



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA
QUÍMICA



REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

**Prof. Francisco Cubillos M.
Alumnos**

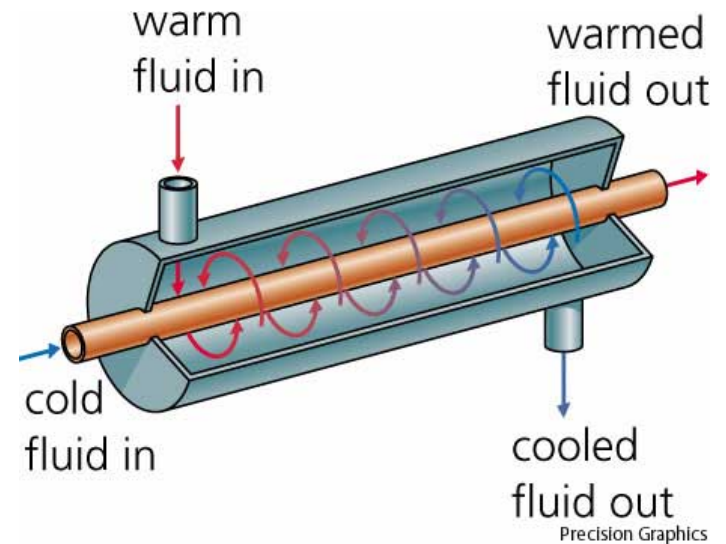
Daniel Navia

Luis Henríquez

José Luis Salazar

Objetivos

- Análisis de estrategia de Integración de Calor
 - Energético
 - Optimización de Costos



Introducción

- Muchos algoritmos han sido desarrollados con el objetivo de disminuir los consumos de utilities dentro de una línea de procesos productivos.
- Uno de éstos, es el denominado: Integración Energética, el cual consiste en planificar una serie de etapas de intercambio de calor de tal manera que las corrientes de proceso que se desean enfriar lo hagan mediante las corrientes de proceso que deberán ser calentadas.

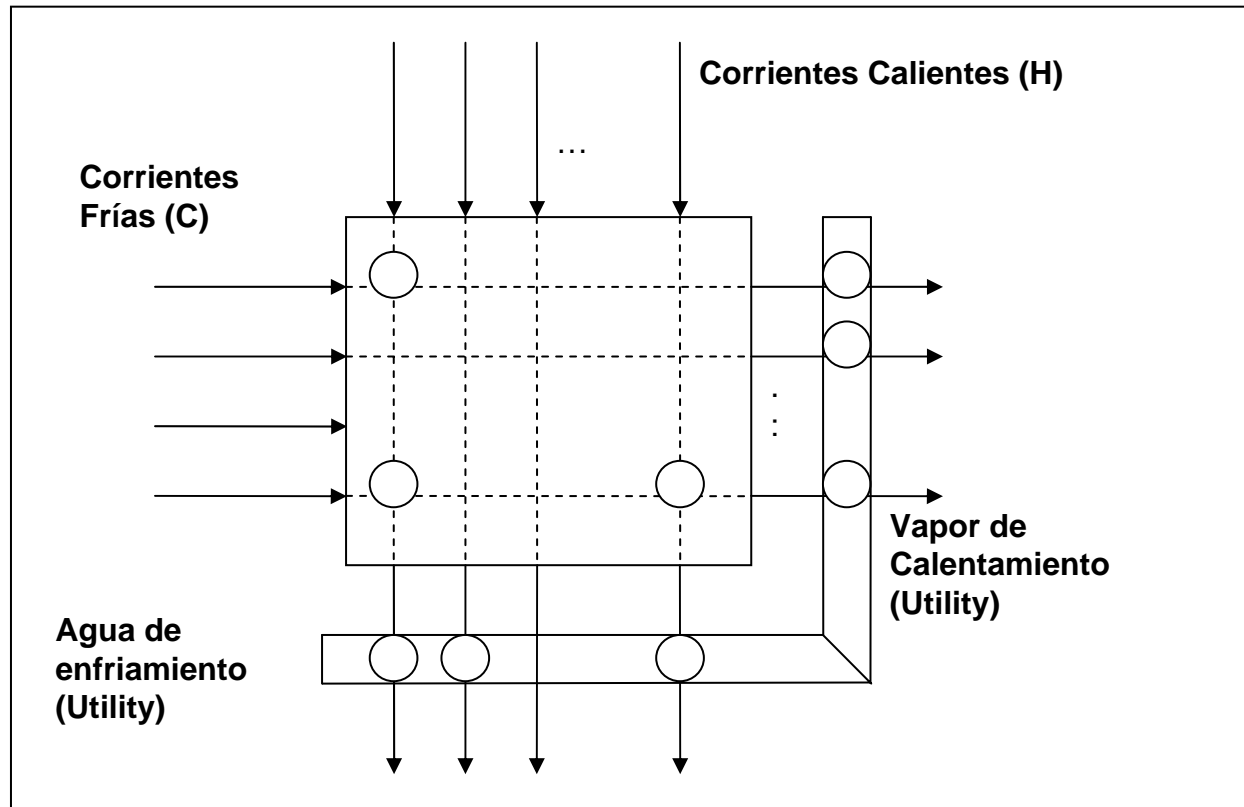


Introducción

- El enfoque teórico de el proceso de integración de calor se basa en los principios de la 1ª y 2ª ley de la Termodinámica.
- En particular, respetando el postulado de Clausius “*Cualquier proceso, que consista sólo en la transferencia de Calor desde una temperatura baja a otra más alta, es imposible*”



Introducción



REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

Introducción

- El problema de decisión finalmente radica en cuán cercanas podrán estar las temperaturas de entrada y salida de las corrientes de proceso.
- Un acercamiento muy grande entre las temperaturas, disminuye los costos de los utilities, pero genera intercambiadores muy grandes con altos costos de inversión.
- Grandes diferencias de estas temperaturas, disminuyen las áreas de intercambio de calor lo que reduce el costo de inversión, pero aumentan los consumos de utilities, lo que encarece el costo de operación.

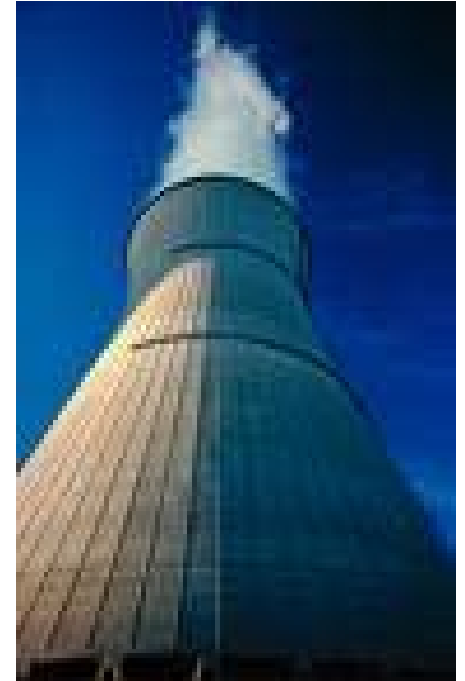


Introducción

- Para obtener una red de intercambio altamente económica veremos dos enfoques:
 - Mínimos Utilities
 - Configuración óptima de intercambio de calor para estos mínimos utilities (*stream matching*).

Mínimos Utilities

- Linnhoff y Flower hacia el año 1978
- Determinar el mínimo uso de utilities mediante una división en intervalos de temperatura disponibles.
- Se generan bloques discretizados donde puede ocurrir la transferencia de calor dado un acercamiento mínimo de temperatura.



Ejemplo N° 1

| Corriente | Ts (°F) | Tt (°F) | mCp (Btu/h°F) | Q (Btu/h) |
|-----------|---------|---------|---------------|-----------|
| C1 | 120 | 235 | 20000 | 2300000 |
| C2 | 180 | 240 | 40000 | 2400000 |
| H1 | 260 | 160 | 30000 | 3000000 |
| H2 | 250 | 130 | 15000 | 1800000 |

El método propuesto por Linnhoff comienza por ajustar de manera arbitraria las temperaturas de las corrientes calientes disminuyendo sus T_s y T_t en una cantidad igual a ΔT_{\min} y manteniendo las corrientes frías.

Ejemplo N°1

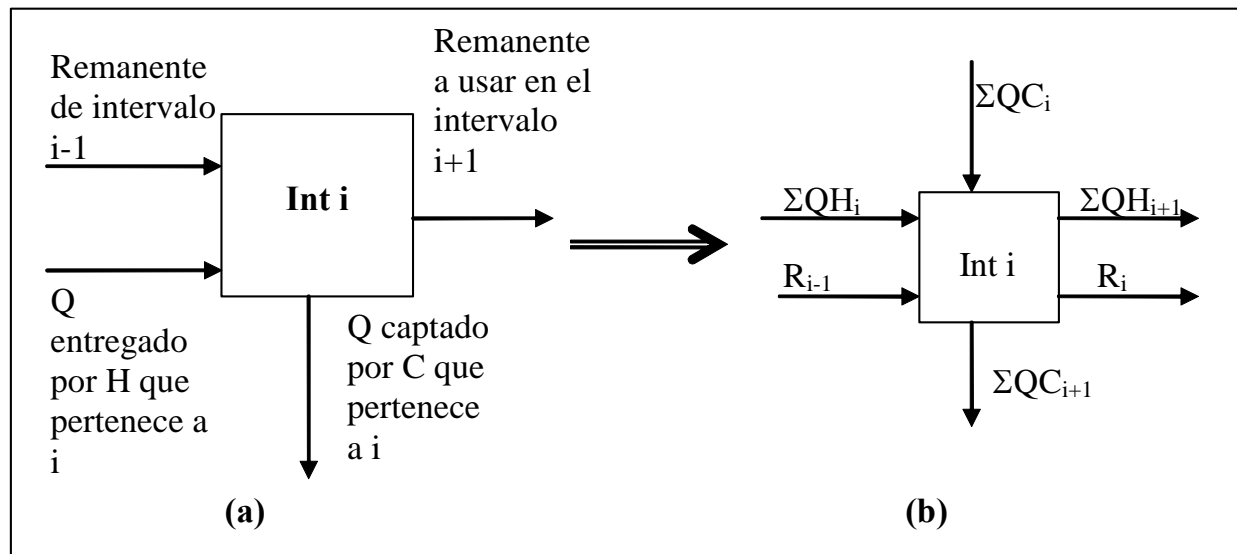
- Las temperaturas ajustadas luego deben ser ordenadas de mayor a menor, desde T_0 hasta T_n . el ordenamiento se muestra a continuación:

| | Ts (°F) | Tt(°F) | Ts (°F) | Tt (°F) | Orden |
|----|----------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
| C1 | 120 | | 120 | | T_5 |
| | | 235 | | 235 | T_2 |
| C2 | 180 | | 180 | | T_3 |
| | | 240 | | 240 | T_1 |
| H1 | 260 | | 250 | | T_0 |
| | | 160 | | 150 | T_4 |
| H2 | 250 | | 240 | | T_1 |
| | | 130 | | 120 | T_5 |

- Este procedimiento genera intervalos de temperatura donde se realizarán los balances de energía respectivos. Así el primer intervalo, sería entre T_0 y T_1 , el segundo entre T_1 y T_2 y así sucesivamente.

Ejemplo N°1

- Los balances de energía comentados tendrán involucrados sólo a las corrientes que se encuentran dentro de este intervalo, y seguirán el siguiente esquema:



Ejemplo N°1

- Así, los respectivos balances de energía serán:

Intervalo 1

$$mCp_{H1}(T_0 - T_1) = R_1$$

$$30000(250 - 240) = 300000 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

$$R_1 = 30 \cdot 10^4 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

Intervalo 2

$$mCp_{H1}(T_1 - T_2) + mCp_{H2}(T_1 - T_2) - mCp_{C2}(T_1 - T_2) + R_1 = R_2$$

$$30000(240 - 235) + 15000(240 - 235) - 40000(240 - 235) + 30 \cdot 10^4 = R_2$$

$$R_2 = 325000 \left(\frac{BTU}{h} \right) = 32.5 \cdot 10^4 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

Intervalo 3

$$mCp_{H1}(T_2 - T_3) + mCp_{H2}(T_2 - T_3) - mCp_{C2}(T_2 - T_3) - mCp_{C1}(T_2 - T_3) + R_2 = R_3$$

$$30000(235 - 180) + 15000(235 - 180) - 40000(235 - 180) - 20000(235 - 180) + 32.5 \cdot 10^4 = R_3$$

$$R_3 = -500000 \left(\frac{BTU}{h} \right) = -50 \cdot 10^4 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

Intervalo 4

$$mCp_{H1}(T_3 - T_4) + mCp_{H2}(T_3 - T_4) - mCp_{C1}(T_3 - T_4) + R_3 = R_4$$

$$30000(180 - 150) + 15000(180 - 150) - 20000(180 - 150) - 50 \cdot 10^4 = R_4$$

$$R_4 = 250000 \left(\frac{BTU}{h} \right) = 25 \cdot 10^4 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

Intervalo 5

$$mCp_{H2}(T_4 - T_5) - mCp_{C1}(T_4 - T_5) + R_4 = R_5$$

$$15000(150 - 120) - 20000(150 - 120) + 25 \cdot 10^4 = R_5$$

$$R_5 = 250000 \left(\frac{BTU}{h} \right) = 10 \cdot 10^4 \left(\frac{BTU}{h} \right)$$

Ejemplo N°1

- De las ecuaciones se observa que el intervalo 1 y 2 presentan un superávit energético

| | |
|-------|-----------------------------------|
| R_1 | $30 \times 10^4 (\text{Btu/h})$ |
| R_2 | $32.5 \times 10^4 (\text{Btu/h})$ |

- El intervalo 3 presenta un déficit de energía el cual no puede ser cubierto mediante energía desde la integración energética (debido a que los intervalos predecesores ya utilizaron su energía, y los posteriores aún cuando presentan excesos, no pueden entregársela por la 2ª ley de la Termodinámica).

| | |
|-------|----------------------------------|
| R_3 | $-50 \times 10^4 (\text{Btu/h})$ |
|-------|----------------------------------|

Ejemplo N° 1

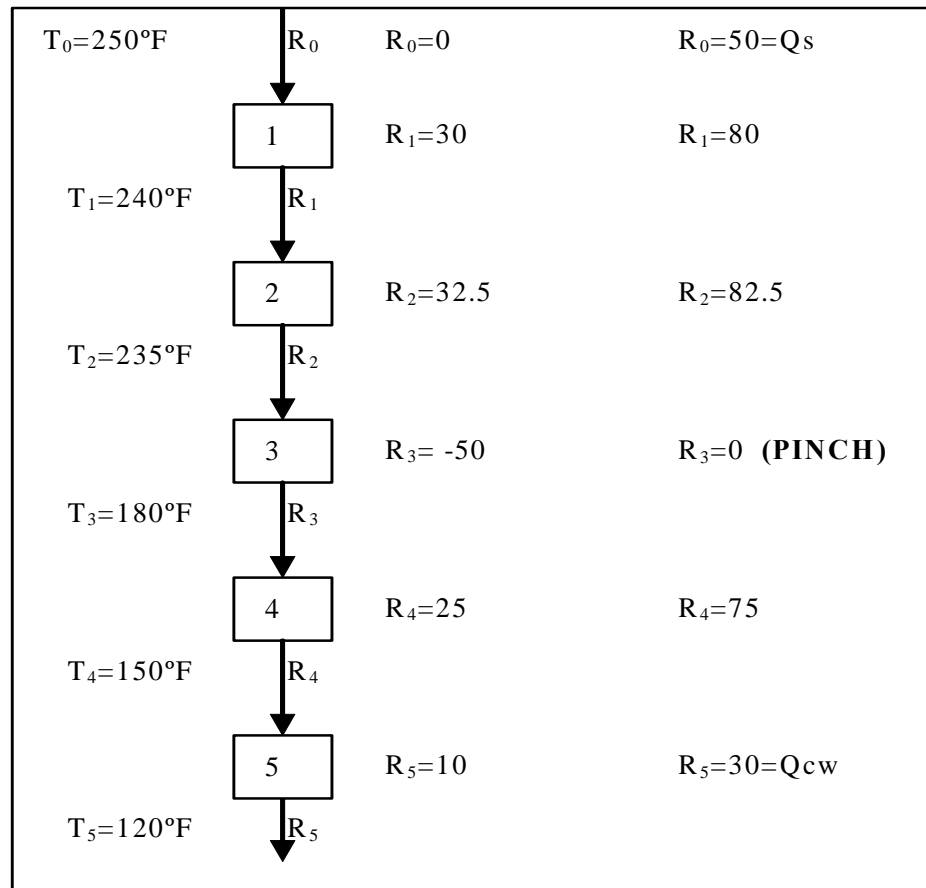
- El intervalo 4 presenta un exceso energético que completa la carencia del intervalo 5.

| | |
|-------|---------------------------------|
| R_4 | $25 \times 10^4 (\text{Btu/h})$ |
| R_5 | $10 \times 10^4 (\text{Btu/h})$ |

- El siguiente paso ahora, es identificar la falencia de energía crítica (la que no fue suplida mediante integración), y agregar una cantidad de energía equivalente, por concepto de utility, se elige para este caso vapor de media a 250°F que entregue el equivalente al déficit global ($50 \times 10^4 \text{ Btu/h}$), esta entrega energética sería equivalente a un R_0

Ejemplo N°1

■ Diagrama de Cascada



Ejemplo N° 1

- Se observa que ahora el Intervalo 3 no presenta un remanente de energía, y su déficit fue cubierto con la energía que el vapor de media proporcionó, a este punto se le conoce como *pinch* o punto de pliegue. El intervalo 5 presenta un exceso de energía de 60×10^4 Btu/h, los cuales no pueden ser removidos por corrientes de proceso disponibles, por lo que se necesita una cantidad de agua de enfriamiento (utility), equivalente, tal que remueva este remanente.
- Así de este método se puede concluir que los utilities mínimos necesarios para una red de intercambio calórico que involucre a estas corrientes de proceso deberían ser un vapor que entregara 50×10^4 Btu/h y agua de refrigeración que eliminara 60×10^4 Btu/h.

Programación Lineal

- Otra forma de encontrar el mínimo consumo de utilities, corresponde a un enfoque de optimización, es así como se genera una programación lineal para este caso.
- Desde un enfoque de optimización, lo que buscamos se puede resumir de la siguiente manera:

$$\min(Q_s)$$

Sujeto a :

$$Q_s + 30 - R_1 = 0$$

$$R_1 - R_2 - 2.5 = 0$$

$$R_2 - R_3 - 82.5 = 0$$

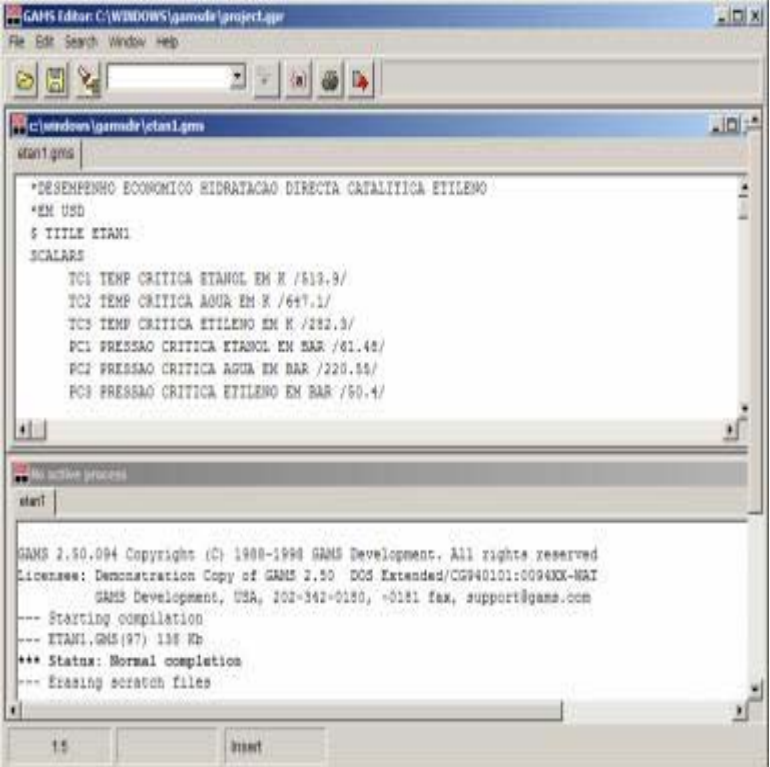
$$R_4 - Q_{cw} - 15 = 0$$

$$Q_s, Q_{cw}, R_1, R_2, R_3, R_4 \geq 0$$

- En ésta ecuación. se resume la programación lineal asociada a la minimización de los utilities asociados al proceso de integración de calor.
- Se pone énfasis en el hecho que sólo se minimiza el calor entregado por el vapor, esto debido a que el calor requerido para eliminar por agua de refrigeración, se encuentra atado al calor de vapor por la primera ley de la Termodinámica, es decir, que la resta de ambos debe ser siempre la misma.
- Luego, se minimiza la cantidad de vapor requerido y de manera análoga para la cantidad de agua de refrigeración necesaria.

Programación Lineal

- Este problema de Optimización es posible programarlo y resolverlo Mediante GAMS (General Algebraic Modeling Software), y los resultados concuerdan con los obtenidos con el método antes citado



The screenshot displays the GAMS Editor interface. The main window shows the source code for a linear programming model named 'ETAN1.GMS'. The code includes a title, a list of scalars, and their values. Below the code, the 'No active process' window shows the output of the compilation process, including the GAMS version, copyright information, and the status of the compilation.

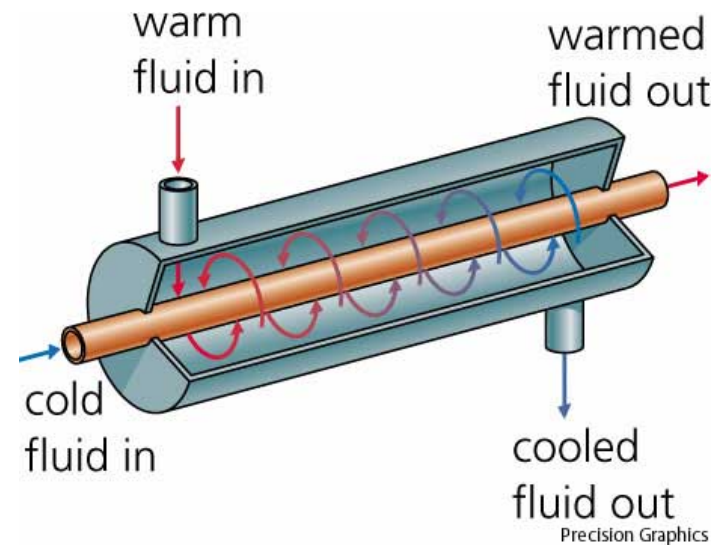
```
start.gms  
  
*DESEMPENHO ECONOMICO HIDRATAÇÃO DIRECTA CATALITICA ETILENO  
*EM USD  
$ TITLE ETAN1  
SCALARS  
TC1 TEMP CRITICA ETANOL EM K /513.9/  
TC2 TEMP CRITICA AGUA EM K /647.1/  
TC3 TEMP CRITICA ETILENO EM K /282.3/  
PC1 PRESSAO CRITICA ETANOL EM BAR /01.48/  
PC2 PRESSAO CRITICA AGUA EM BAR /220.55/  
PC3 PRESSAO CRITICA ETILENO EM BAR /50.4/  
  
*** No active process  
start  
  
GAMS 2.50.094 Copyright (C) 1988-1998 GAMS Development. All rights reserved  
Licensee: Demonstration Copy of GAMS 2.50 DOS Extended/CG940101:0094XX-NAT  
GAMS Development, USA, 202-342-0150, -0181 fax, support@gams.com  
--- Starting compilation  
--- ETAN1.GMS (97) 138 Kb  
*** Status: Normal completion  
--- Erasing scratch files
```

Introducción

- Para obtener una red de intercambio altamente económica veremos dos enfoques:
 - Mínimos Utilities
 - Configuración óptima de intercambio de calor para estos mínimos utilities (*stream matching*).

Stream Matching

- Una vez obtenida la cantidad mínima de calor necesario por utility, hay que buscar el número mínimo de intercambiadores de calor que configurarán la HEN. Para esto se utiliza el modelo de trasbordo, propuesto por Papoulias y Grossmann.
- Este método el típico problema del viajero que debe encontrar la ruta más corta pasando por una serie de paradas preestablecidas, y lo denomina problema de trasbordo.



Stream Matching

- Las ecuaciones, representan la función objetivo del problema de minimización de unidades de intercambio de calor, y corresponde a una sumatoria de variables de tipo binarias (y_{ij})

$$\min z = \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij} \quad (a)$$

Sujeto a:

$$R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{ijk} = Q_{ik}^H \quad i \in H_k \quad k = 1, \dots, K \quad (b)$$

$$\sum_{i \in H_k} Q_{ijk} = Q_{jk}^C \quad j \in C_k \quad k = 1, \dots, K \quad (c)$$

$$\sum_k Q_{ijk} - y_{ij} \cdot U_{ij} \leq 0 \quad i \in H \quad j \in C \quad (d)$$

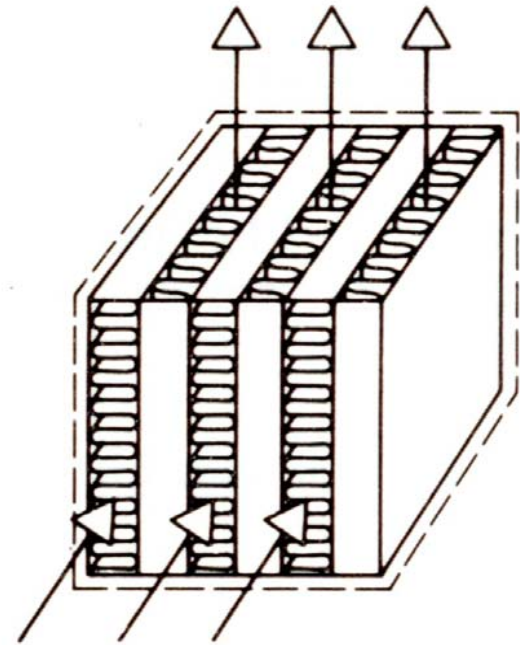
$$U_{ij} = \min(Q_i, Q_j)$$

$$R_{i,k} \geq 0 \quad Q_{ijk} \geq 0 \quad y_{ij} \in \{0,1\} \quad (e)$$

$$R_{i,0} = R_{i,K} = 0 \quad (f)$$

Stream Matching

- La resolución de este problema, requiere técnicas más avanzadas que la simple programación lineal, ya que el hecho de depender de variables binarias en el problema, introduce discontinuidades al sistema y por lo tanto hace que el algoritmo solución sea más sofisticado.
- Uno de los primeros acercamientos a la resolución de este tipo de problemas (denominados MILP por su sigla en inglés Mixed Integer Linear Programming) se denomina Branch and Bounds.



Ejemplo N°2

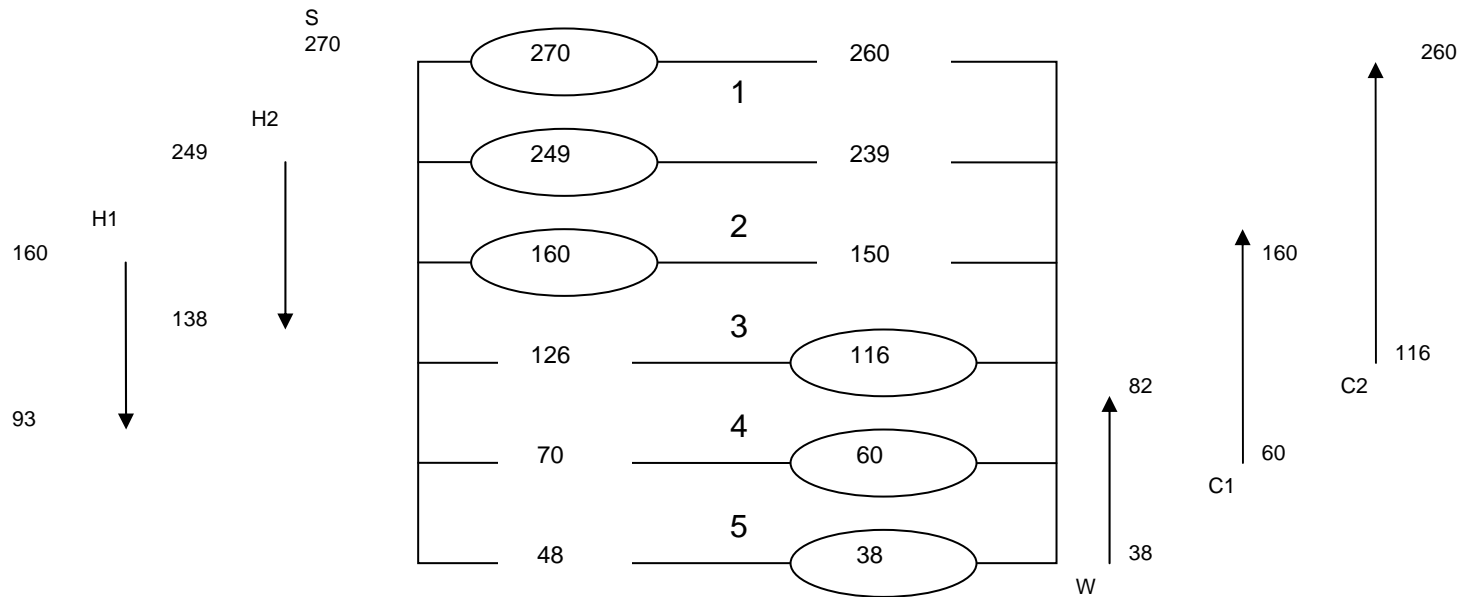
- Para ejemplificar y acercar el entendimiento de este método, se mostrará un ejemplo propuesto por Linnhoff y Flower (1978).

| Corriente | Ts (°C) | Tt (°C) | C (kW/°C) | Q (kW) |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|
| C1 | 60 | 160 | 7.62 | 762 |
| C2 | 116 | 260 | 6.08 | 875.52 |
| H1 | 160 | 93 | 8.79 | 588.93 |
| H2 | 249 | 138 | 10.55 | 1171.05 |
| S | 270 | 270 | N/A | 127.68 |
| W | 38 | 82 | 5.685 | 250.14 |

Ejemplo N°2

- Como ya se mencionó, este método también utiliza intervalos de temperatura para realizar balances de energía, así que el primer paso es encontrar dichos intervalos, para lo cual se presenta una modificación al método presentado con anterioridad, debido fundamentalmente a que ahora se consideran como conocidos los *utilities*.
- Para este caso, la temperatura de entrada representará los límites de los intervalos y a estos se les restará el ΔT_{min} para el caso de las corrientes **H** y se les sumará para las corrientes **C**. y luego se verificará si las corrientes de proceso se encuentran dentro de dicho intervalo, a modo de una primera clasificación

Ejemplo N°2



Esquema de Intervalos de Temperatura

Ejemplo N°2

- Así la clasificación de los flujos de acuerdo al intervalo al cual pertenecen sería la siguiente:

| Intervalo | Corrientes Incluidas |
|-----------|----------------------|
| 1 | S, C2 |
| 2 | H2, C2, C1 |
| 3 | H2, H1, C2, C1 |
| 4 | H1, H2*, C1, W |
| 5 | H1*, H2*, W |

- Donde los asteriscos denotados, muestran una pertenencia hipotética, basada en que aún cuando estas corrientes no se encuentran en el intervalo, igual podrían intercambiar calor mediante los residuos de intervalos a mayor temperatura.

Donde:

S: Vapor saturado a 270°C

W: Agua de enfriamiento desde 38°C a 82°C

Ejemplo N°2

- Este ejercicio se puede transcribir en GAMS, siendo los resultados de la programación lineal entera mixta:

$$z = 5$$

$$y_{S,C2} = y_{H1,C1} = y_{H1,W} = y_{H2,C1} = y_{H2,C2} = 1$$

| | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|
| S – C2: | $Q_{S,C2,1} = 127.68\text{kW}$ | | | |
| H1 – C1: | $Q_{H1,C1,3} = 0$ | $Q_{H1,C1,4} = 338.79\text{kW}$ | | |
| H1 – W: | $Q_{H1,W,4} = 125.07\text{kW}$ | $Q_{H1,W,5} = 125.07\text{kW}$ | | |
| H2 – C1: | $Q_{H2,C1,2} = 76.2\text{kW}$ | $Q_{H2,C1,3} = 262.68\text{kW}$ | $Q_{H2,C1,4} = 87.93\text{kW}$ | |
| H2 – C2: | $Q_{H2,C2,2} = 541.12\text{kW}$ | $Q_{H2,C2,3} = 206.72\text{kW}$ | | |
| H1: | $R_{H1,3} = 298.86$ | $R_{H1,4} = 125.07$ | | |
| H2: | $R_{H2,2} = 321.63$ | $R_{H2,3} = 87.93$ | $R_{H2,4} = 0$ | |

Ejemplo N°2

- Como se puede observar, $z=5$, indica que existen 5 corrientes de proceso que se encuentran intercambiando calor entre ellas, pero si se observan los resultados de transferencia de calor entre las corrientes por intervalos (sólo las sugeridas por $y_{i,j}=1$), nos encontramos con:

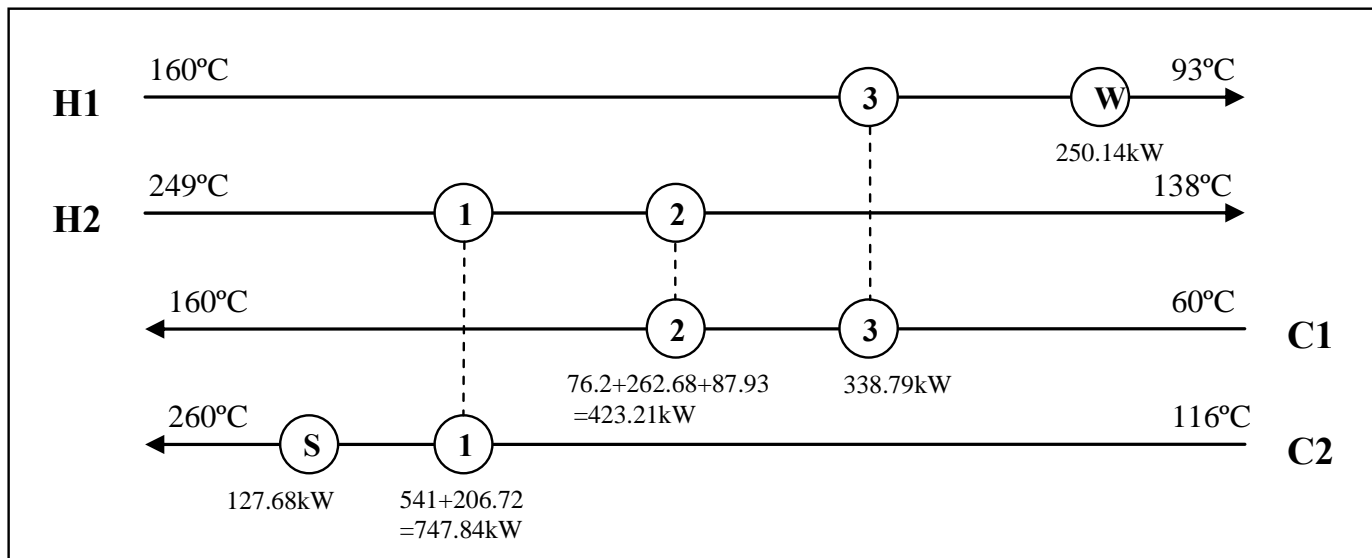


Diagrama de la HEN final, a partir del método MILP

Ejemplo N°2

- De esta manera la red de intercambio de calor (HEN) queda finalmente diseñada de la siguiente manera:

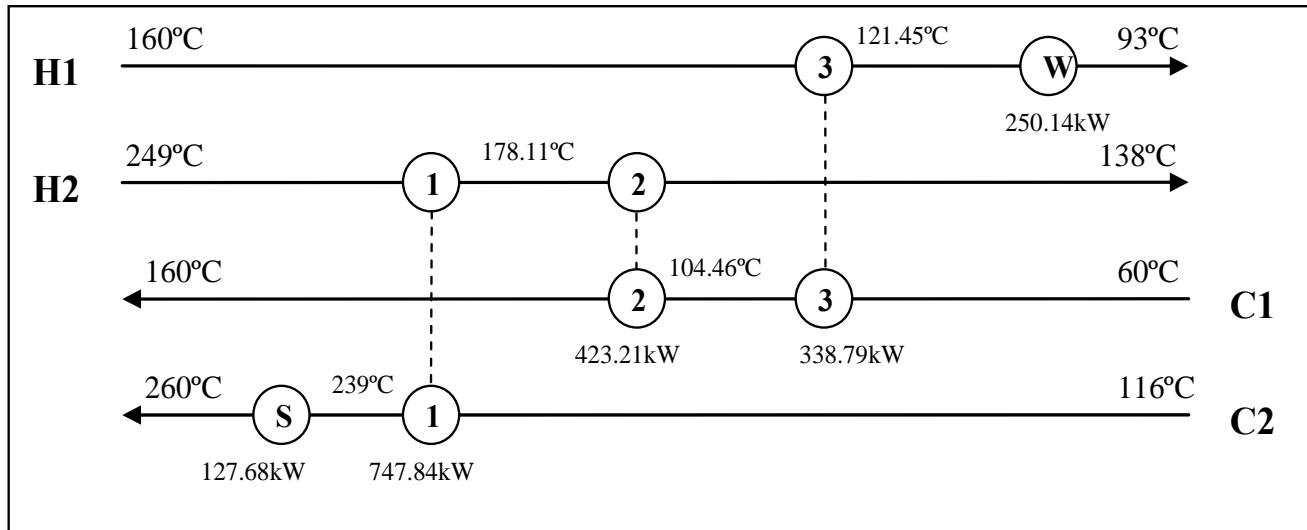


Diagrama de la HEN especificada de sus temperaturas intermedias

Ejemplo N°2

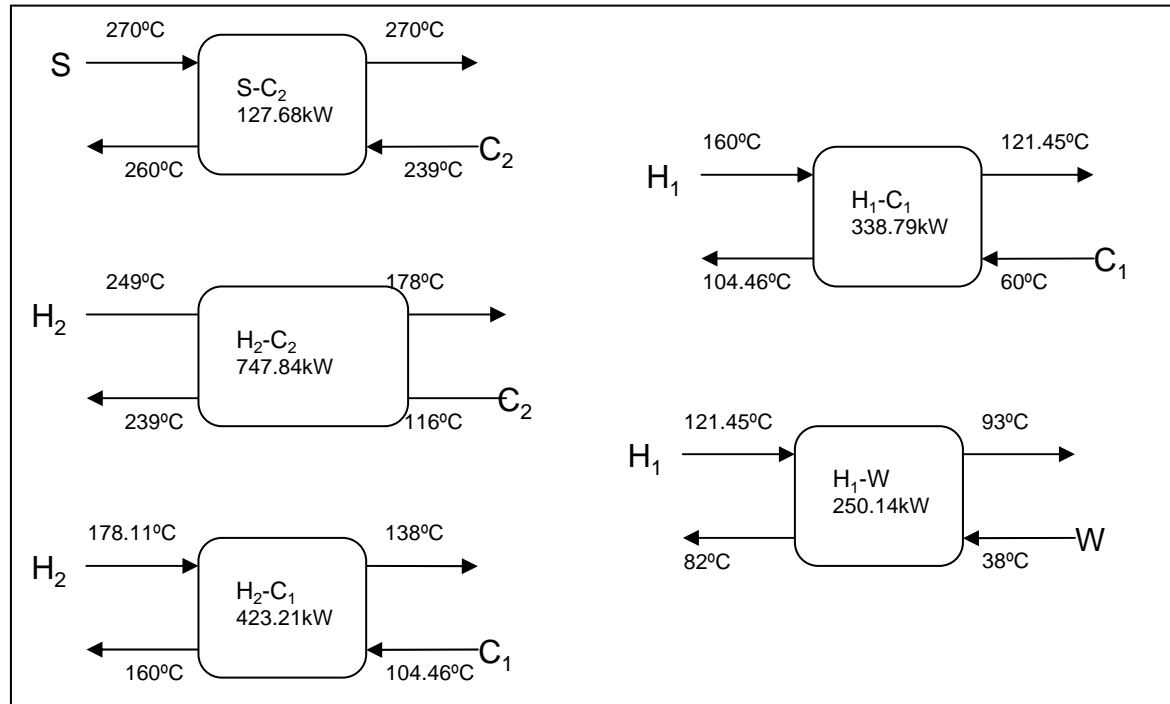


Diagrama de los intercambiadores de calor en la HEN

Breaking the Heat Loops

- Minimización del número de unidades de intercambio de calor.
- Precio relativo del combustible bajo con respecto al costo de compra de los Intercambiadores de calor.
- Aumento de los servicios.
- Flujo de energía a través del punto pinch.
- Hohmann (1971) obtuvo la relación:

$$N_{HX,\min} = N_s + N_u - 1$$

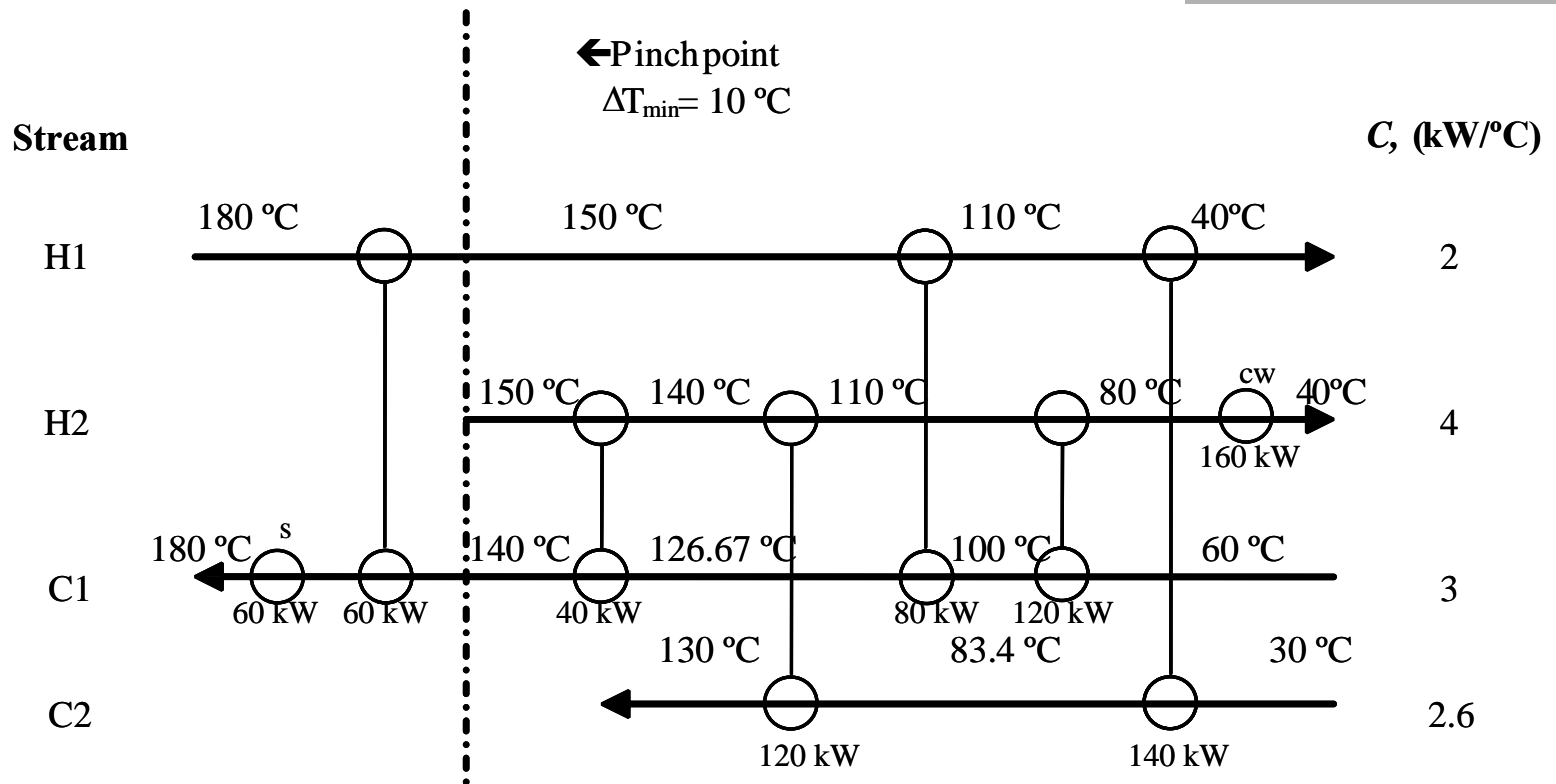
$$N_{HX} - N_{HX,\min} = N^\circ \text{HeatLoops}$$

N_s : Número de corrientes.

N_u : Número de utilities.

N_{HX} : Número de intercambiadores de calor.

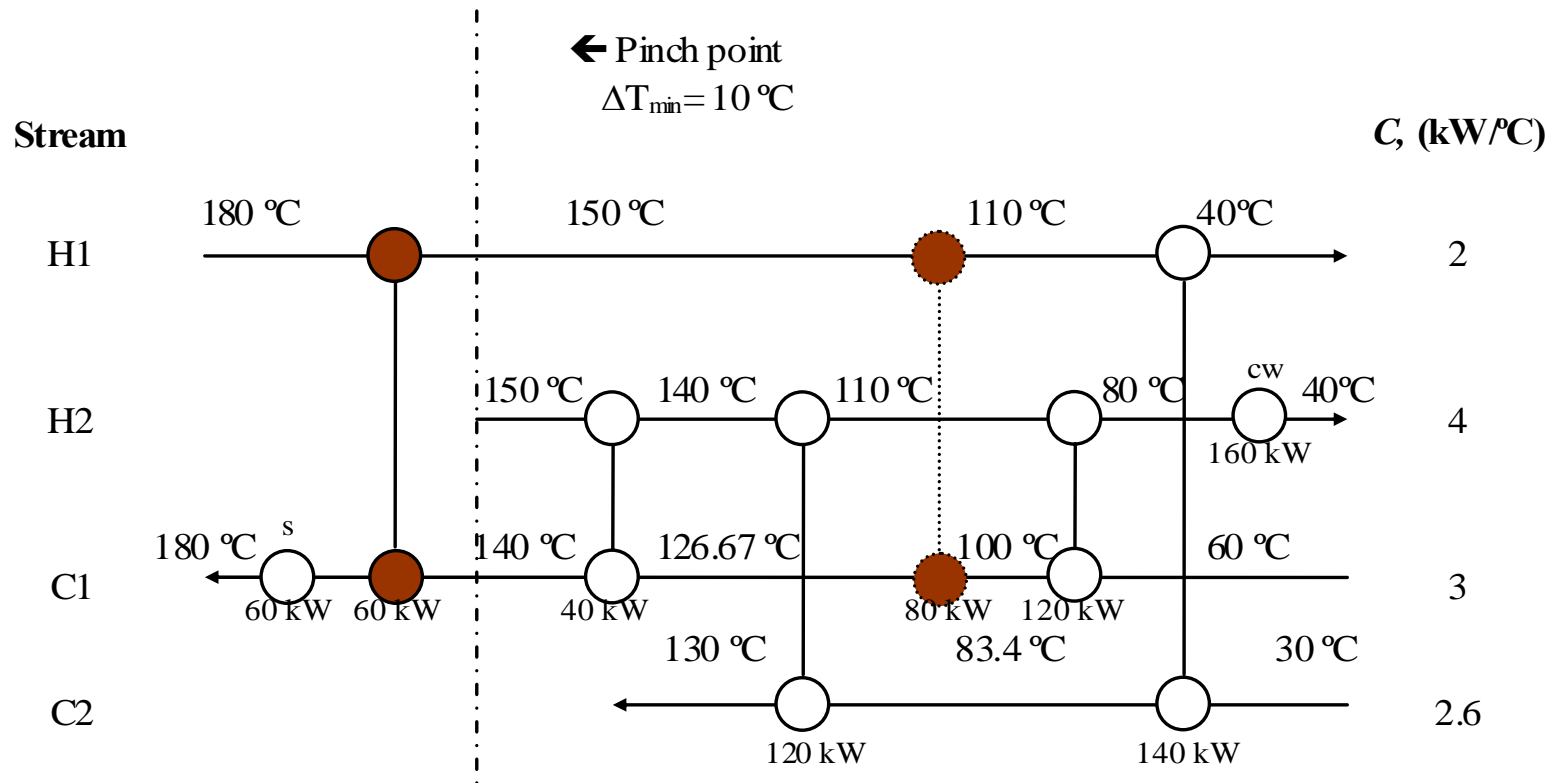
Ejemplo 3



Aquí: $N_s = 2$, $N_u = 4$.

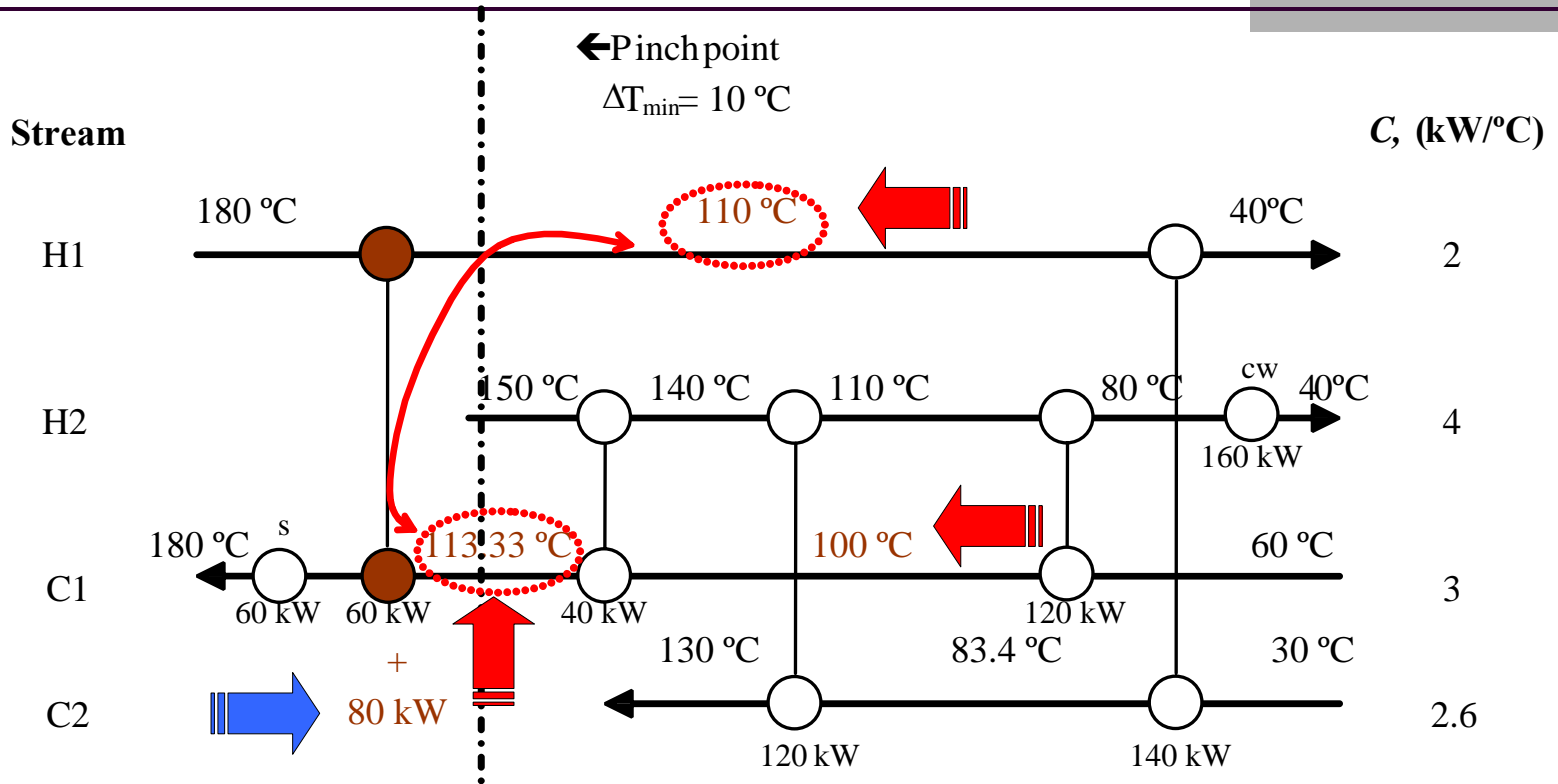
Aplicando la relación de Hohmann: $N_{HX_{\min}} = 4 + 2 - 1 = 5$; $N_{HX} - N_{HX_{\min}} = 3$

Ejemplo 3



HEN con mínimos utilities. Identificación del primer loop energético.

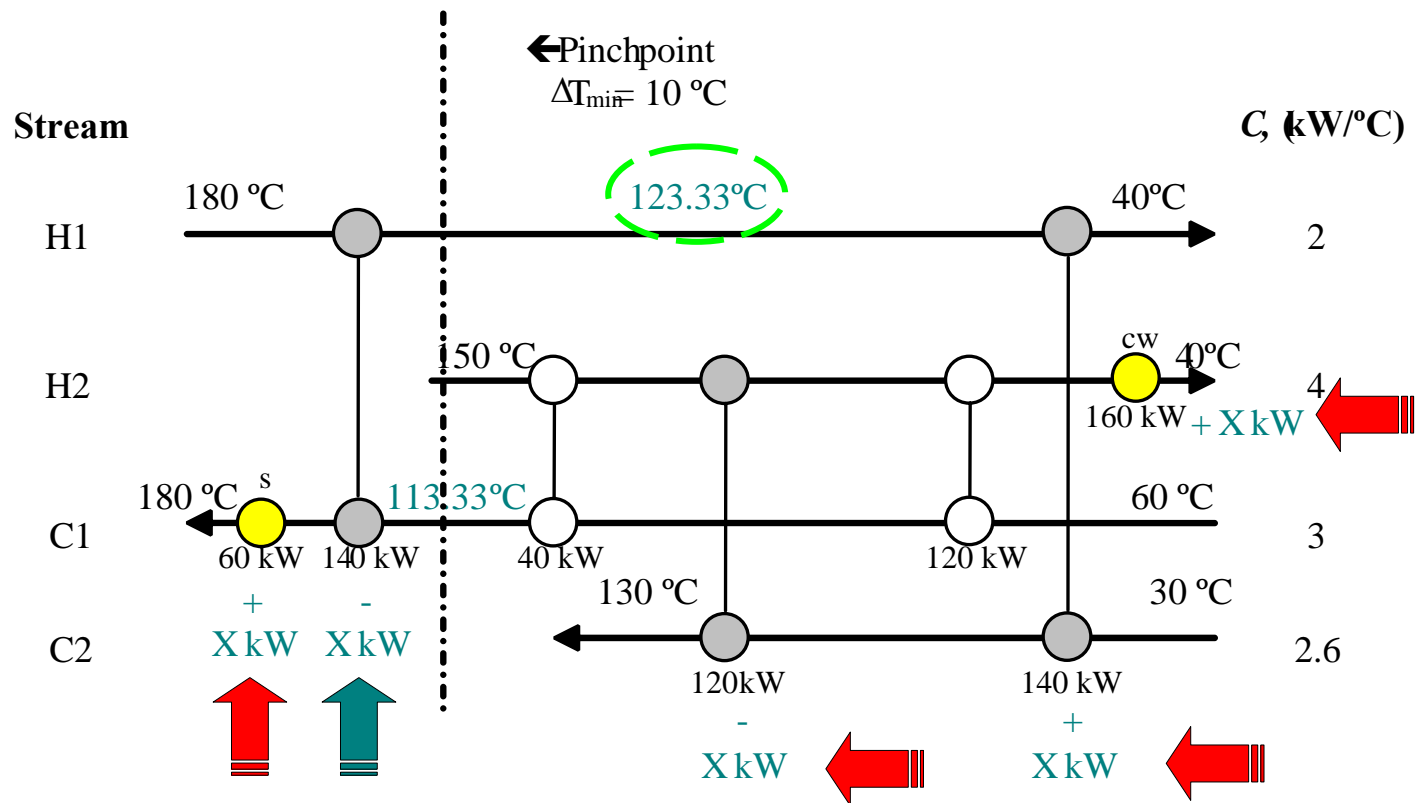
Ejemplo 3



HEN con unidad removida presentando violación a ΔT_{\min} .

Ejemplo 3

- La cantidad de calor transferida en el intercambiador sobrecargado debe ser menor, en una cantidad "X", para cumplir con las temperaturas objetivos, y no violar la segunda ley de la termodinámica.



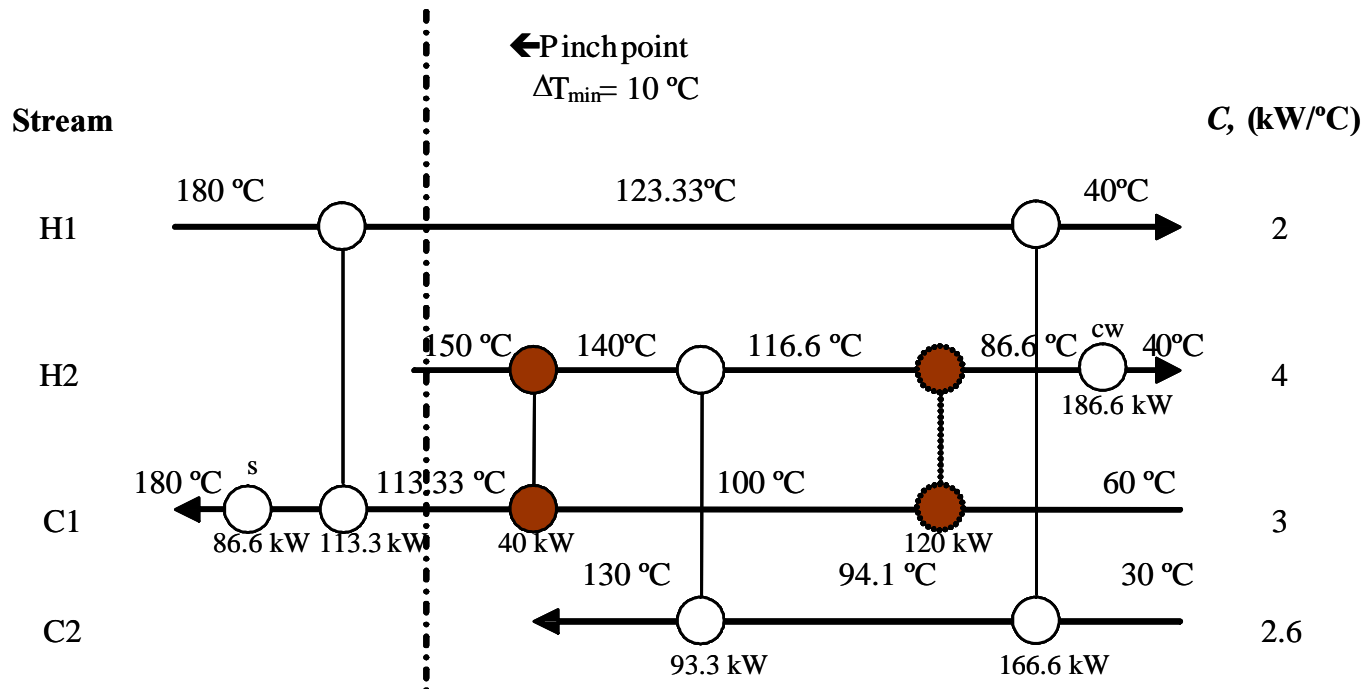
Ejemplo 3

- El ajuste de las carga térmicas se realiza en base a un balance de energía, comenzando por el intercambiador con la temperatura ajustada.

$$Q = C \cdot \Delta T$$

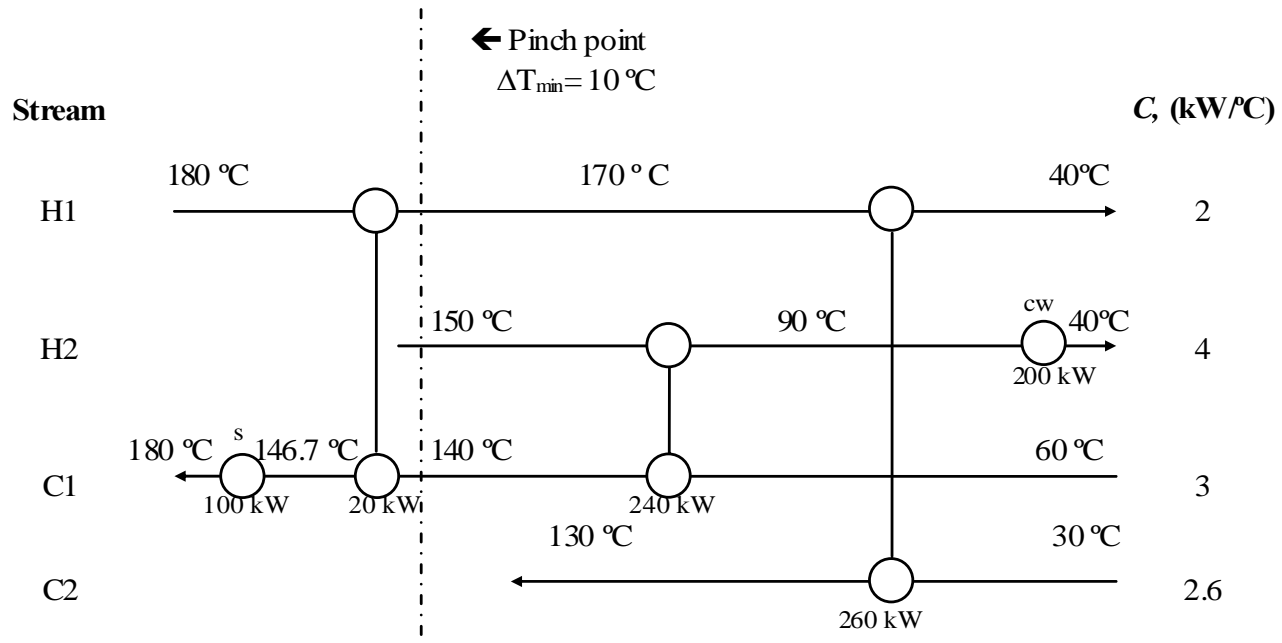
$$140 - X = 2 \cdot (180 - 123.33)$$

$$X = 26.66 \text{ kW}$$



Ejemplo 3

- Se repite el procedimiento hasta lograr la red de mínimas unidades de intercambio de calor.



Evaluación de Costos para la HEN

- Cuando se lleva a cabo el diseño de las redes de intercambio de calor, se buscará el beneficio económico es decir una minimización en los costos totales.
- Los cuales se podrán dividir en costos de inversión y de operación.

$$C_A = r(C_{TI}) + COS$$

- Donde C_A es el costo anualizado, C_{TI} es la inversión total de capital, r es el retorno fraccional de la Inversión, y COS es el costo anual de operación.

Evaluación de Costos para la HEN

- Para este análisis, se tomará C_{TI} como la suma de los costos de cada uno de los intercambiadores involucrados los cuales se obtendrán a partir de su área de intercambio de calor, A

$$A = \frac{Q}{U \cdot F_T \cdot \Delta T_{ml}}$$

- Y el costo de compra

$$C_P = K (A)^b$$

Evaluación de Costos para la HEN

- Finalmente, COS se puede estimar como los costos de los utilities empleados en la Red de intercambio, así la ecuación de costos anualizados resulta:

$$C_A = r \left(\sum C_{P,interior} + \sum C_{P,exterior} \right) + (c_s) \times F_S + (c_w) \times F_{CW}$$

- Donde c_s y c_w , corresponden a los costos asociados a utilities de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

Ejemplo 4

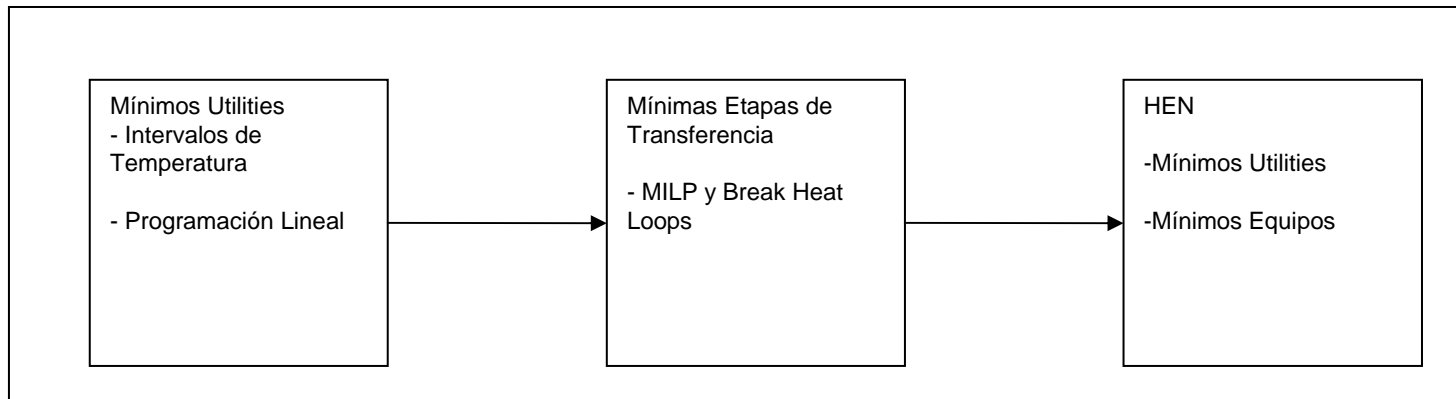
- Evaluación de los costos anuales para las redes presentadas en el Ejemplo 3, empleando:

$$c_w = 0.0015 \text{ (\$/kg)}; \quad c_s = 0.006 \text{ (\$/kg)}; \quad r = 0.1;$$

$$C_p = 3000A^{0.5} \text{ (\$, m}^2\text{)};$$

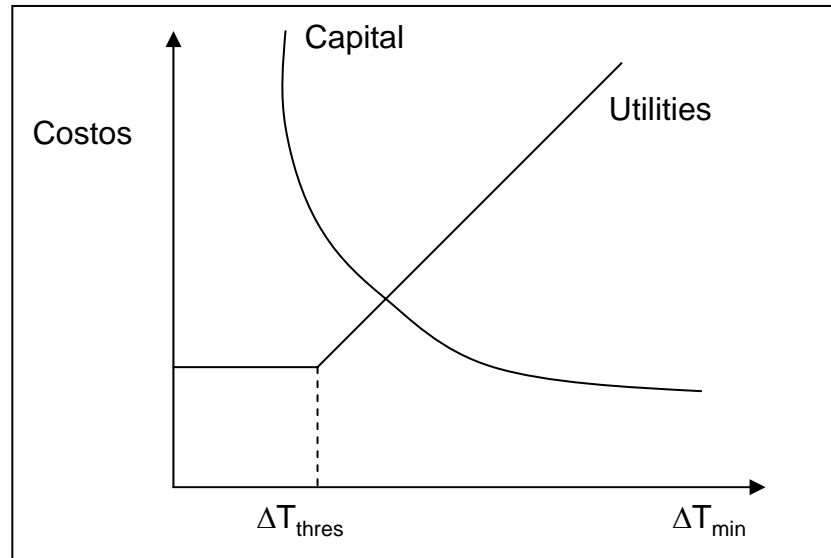
| Red ($\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$) | Costos Servicios (\\$/año) | Costo Compra (\\$) | Costos Anuales (\\$/año) |
|--|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 8 (Min Utilities) | 10960 | 66900 | 17650 |
| 7 | 13250 | 57470 | 19000 |
| 6 | 13250 | 54430 | 18690 |
| 5 (Min Unidades) | 15340 | 45930 | 19930 |

Efecto de ΔT_{\min} en el diseño de HEN



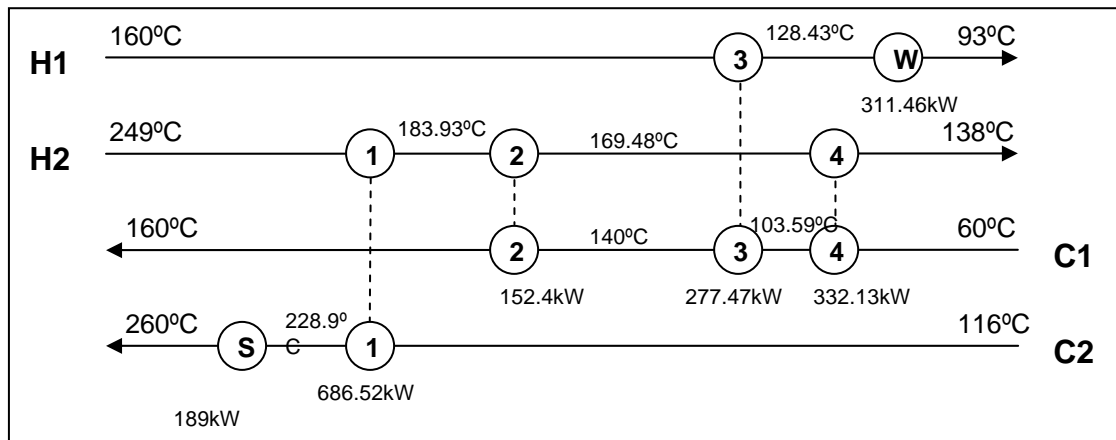
Metodología de trabajo para obtener una HEN óptima

Efecto de ΔT_{\min} en el diseño de HEN



Comportamiento esquemático de Costos en función de ΔT_{\min}

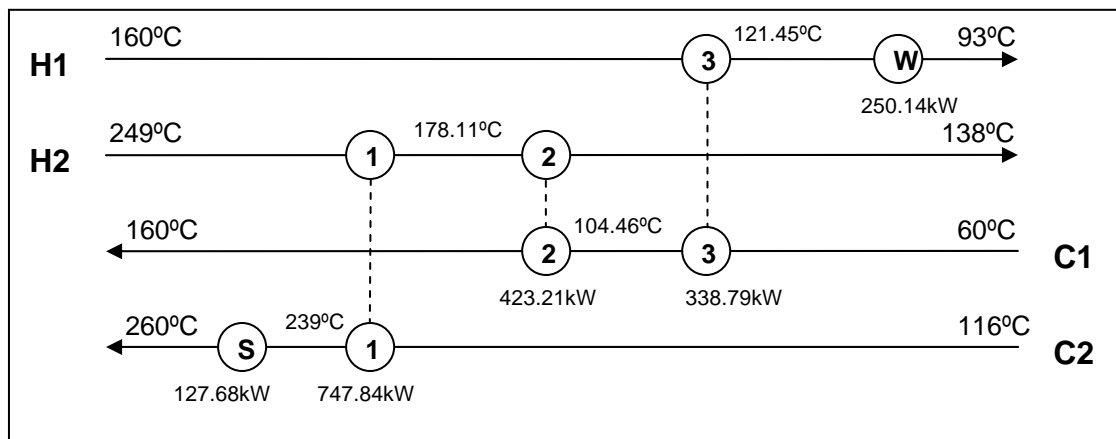
Efecto de ΔT_{\min} en el diseño de HEN



HEN para mínimos utilities $\Delta T_{\min}=20(^{\circ}\text{C})$

A = 174,4 m²

C_{total,anual} = 16.875 (US/año)

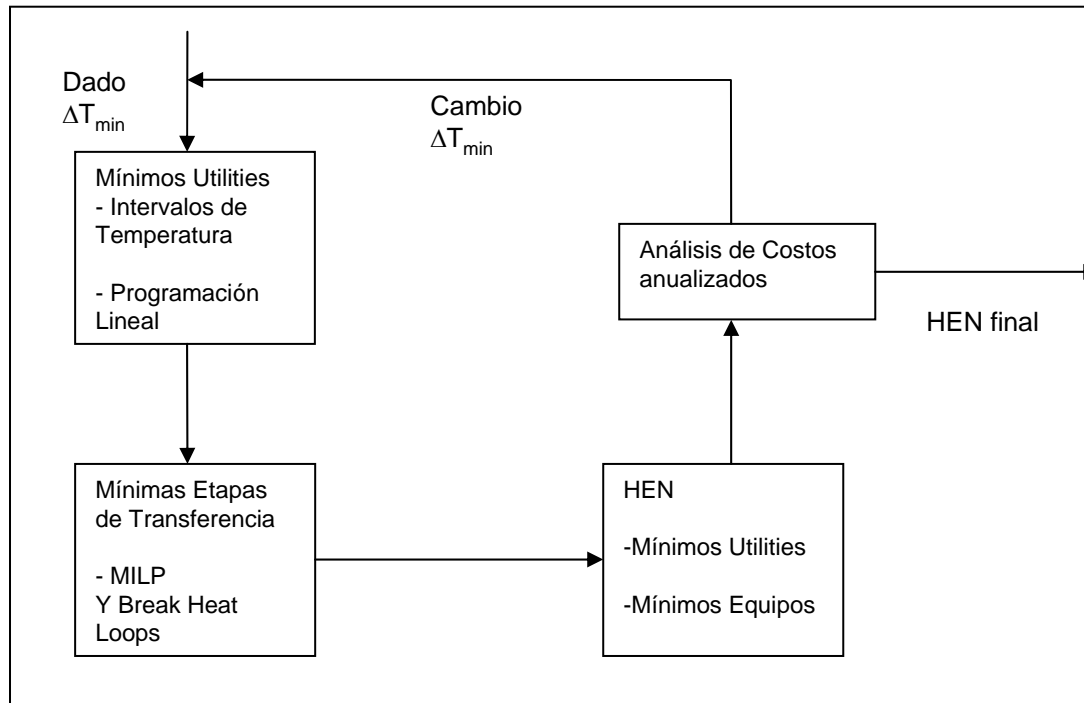


HEN para mínimos utilities $\Delta T_{\min}=10(^{\circ}\text{C})$

A = 226,11 m²

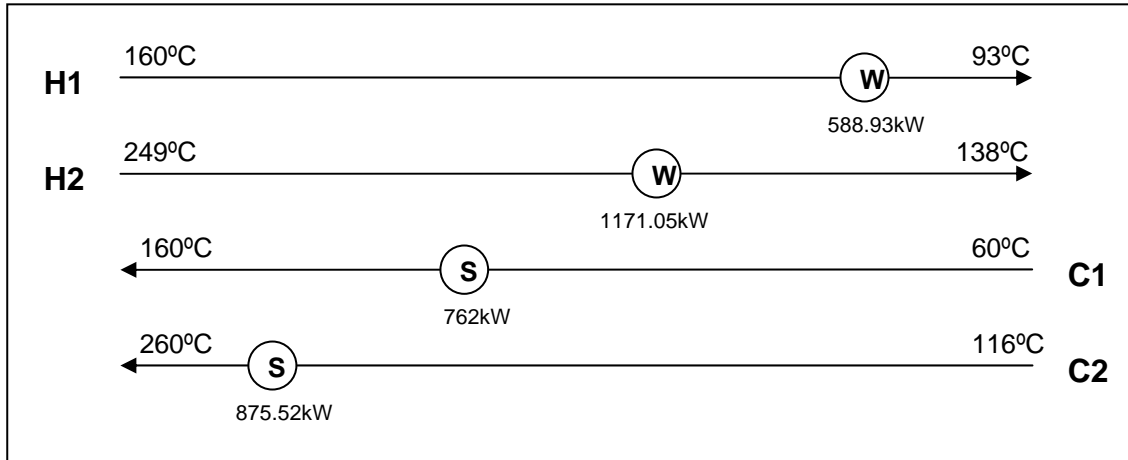
C_{total,anual} = 13.735 (US/año)

Estrategia de diseño



Estrategia de Trabajo que incluye la variación de ΔT_{\min}

Evaluación

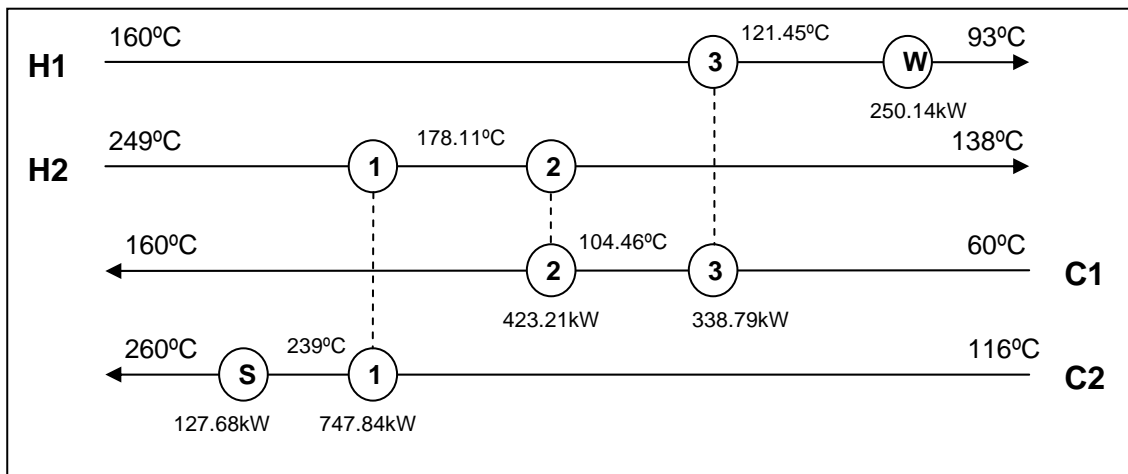


HEN sin integración energética

VAN=-493.845 (US)

Periodo=10 años

TREMA=17%



HEN con integración energética $\Delta T_{\min}=10$

VAN=-84.096 (US)

Periodo=10 años

TREMA=17%



FIN