

Análisis PINCH

Herramienta práctica para la eficiencia térmica en procesos, reducción de costos e impacto ambiental



Ing. Cristián Rossi

CECACIER – GEORED

24 de junio de 2021



Agenda

- Introducción
- Proceso de la cerveza
- Conceptos básicos
- Aplicación
- Evaluación
- Conclusiones
- Bibliografía
- Preguntas

DIAGRAMA DE PROCESO EN UNA CERVECERIA TRADICIONAL

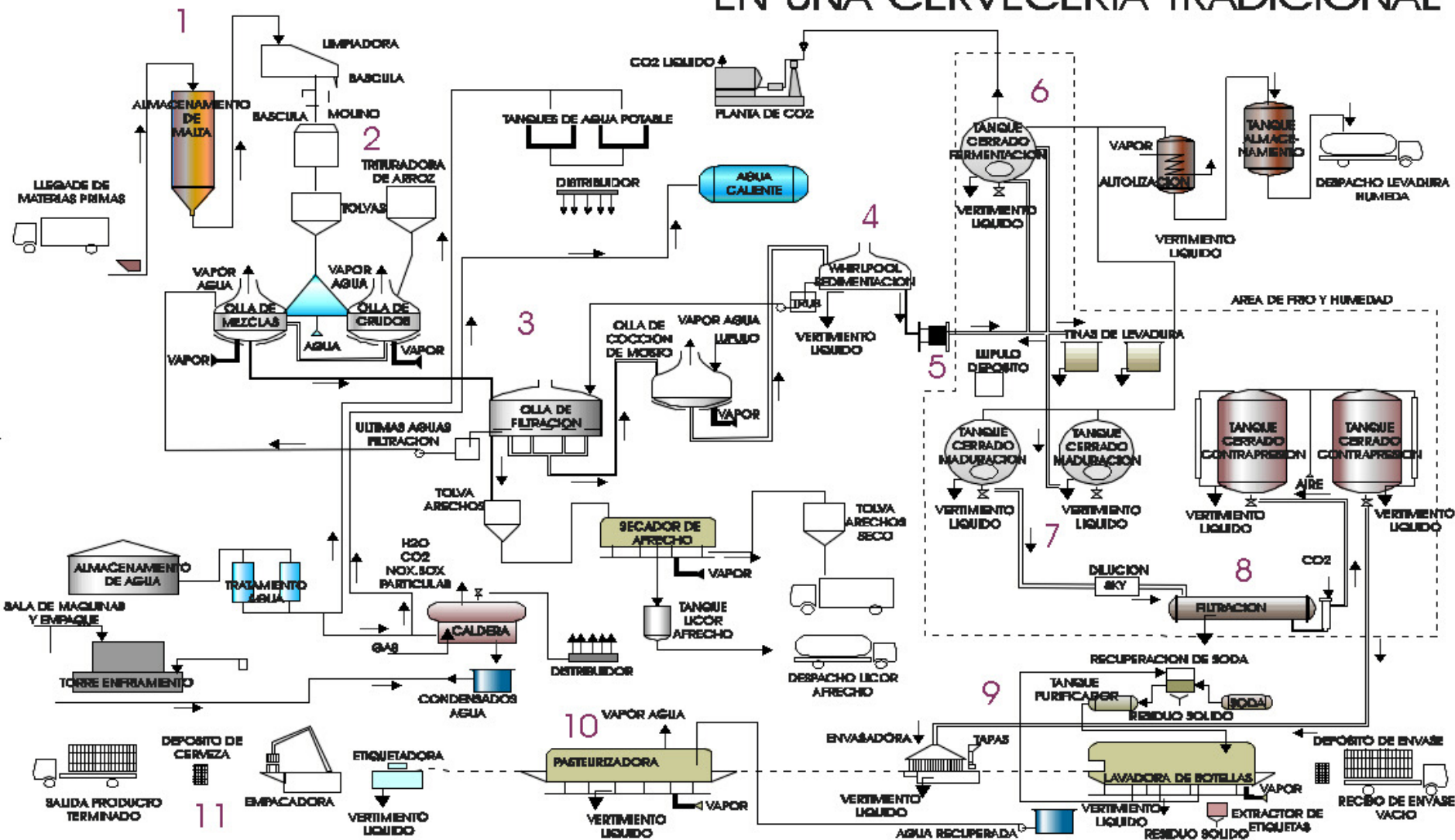
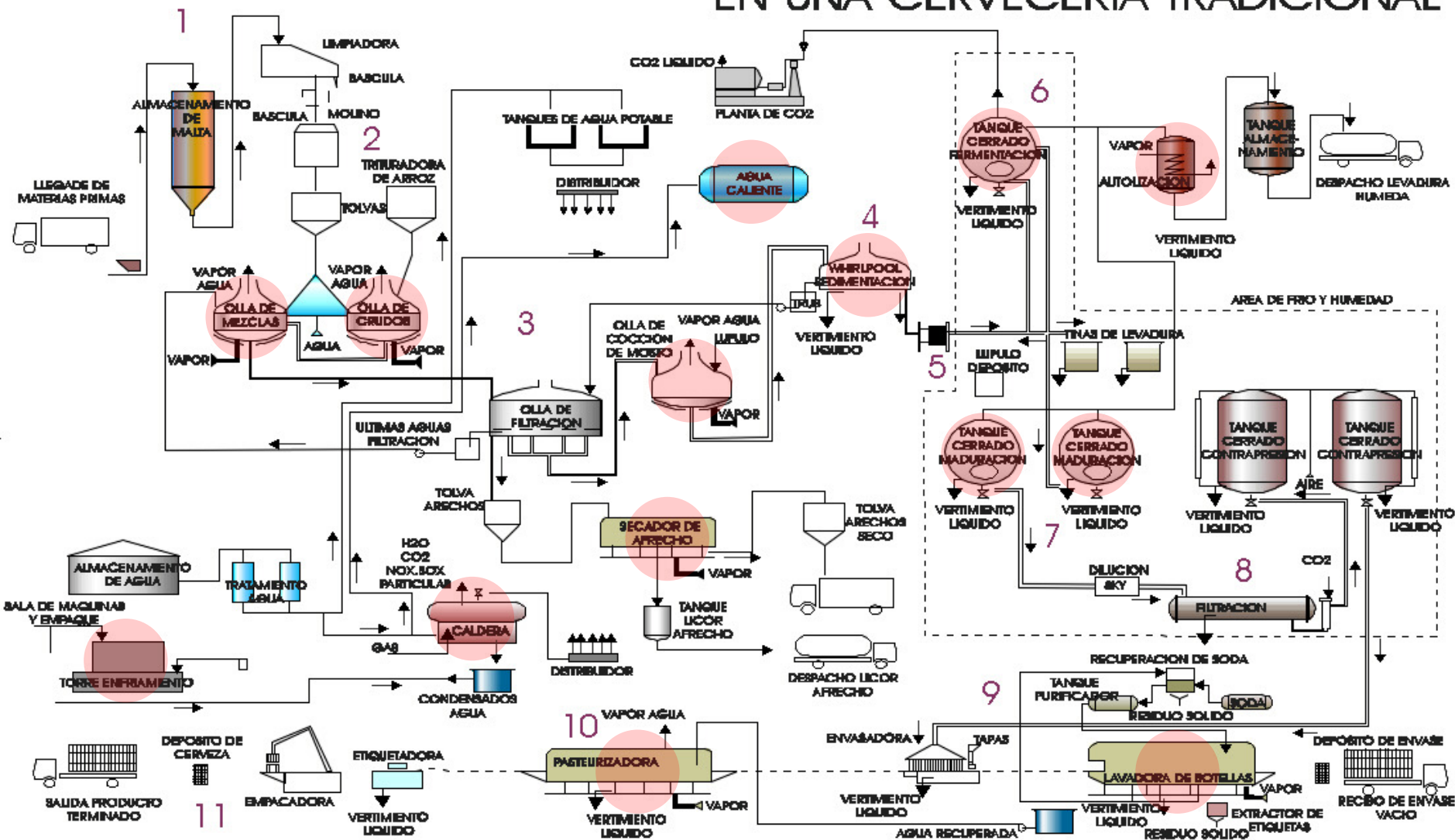


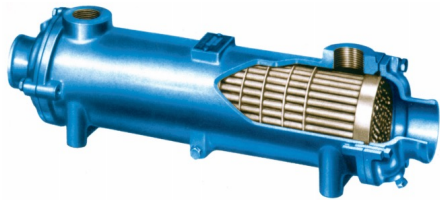
DIAGRAMA DE PROCESO EN UNA CERVECERIA TRADICIONAL



Procesos con intercambio de calor

Intercambiadores de calor (Procesos)

Intercambiador de placas

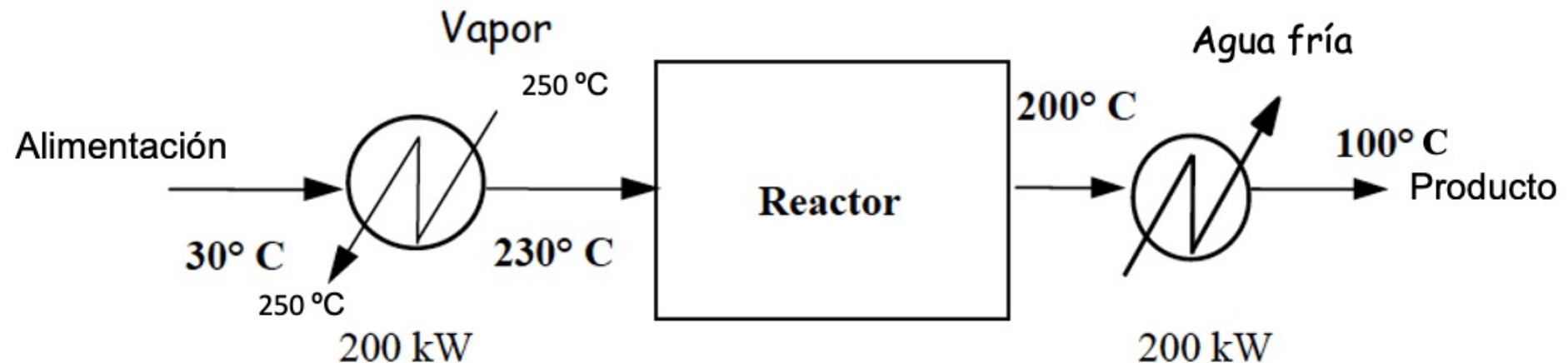


Intercambiador de concha
(coraza) y tubos



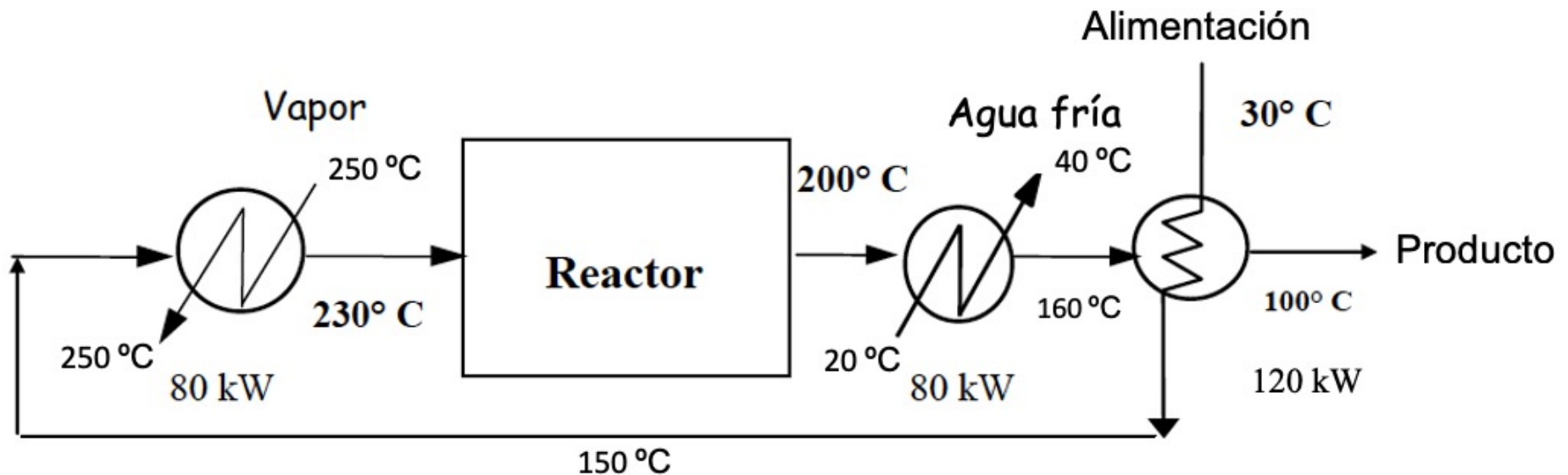
Intercambiador de tubos
concéntricos

Tratamiento térmico convencional para un reactor/equipo de proceso



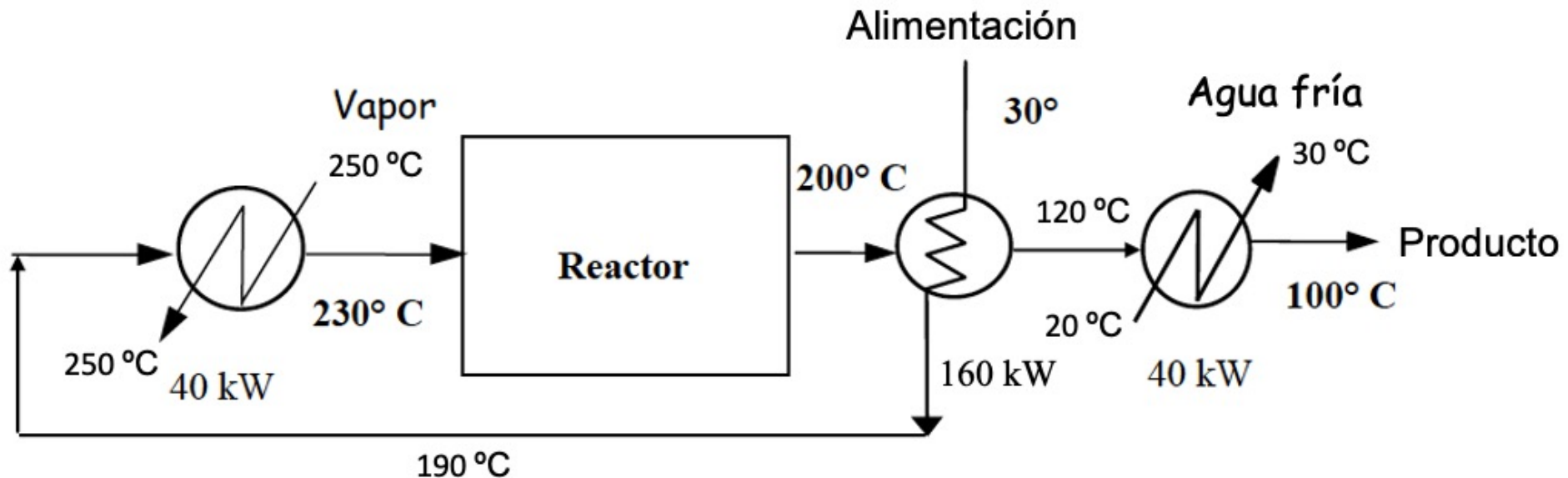
- Costo de vapor a 260 °C (estimado), US\$ 2.81/10⁶ kJ
- Costo de agua fría a 20 °C (estimado), US\$ 0.496/10⁶ kJ
- Costo de intercambiadores de calor: (US\$) = 6,000 + (700) (Área, m²)^{0.65} (Correlación empírica de diseño)
- Costo de operación: US\$ 19,994.70 US\$/año

Tratamiento térmico con integración para un reactor/equipo de proceso



- Recuperación de 120 kW
- Inversión de tres intercambiadores : US\$ 24,400.00 (17.439 m²)
- Costo de operación: US\$ 7,997.94
- Ahorro: US\$ 11,996.82 (ROI: 2.0327)

Tratamiento térmico con integración completa para un reactor



- Recuperación de 160 kW
- Inversión de tres intercambiadores: US\$ 22,500.00 (9.739 m²)
- Costo de operación: US\$ 3998.94
- Ahorro: US\$ 15,995.76 (ROI: 1.4055)

Resumen de los cambios

Escenario	Intercambiadores	Inversión (US\$)	Costo variable (US\$/año)	Ahorro (US\$/año)	ROI (años)
Base	2		19,994.70	---	---
1	3	24,400.00	7,997.94	11,996.82	2.0327
2	3	22,500.00	3,998.94	15,995.76	1.4055

- Contabilizar reducción de emisiones por quema de combustibles
- Contabilizar ahorro en consumo de agua a tratar (enfriamiento y vapor)
- Diseñar y seleccionar intercambiadores adecuados

Requerimientos para esta metodología

- Leyes de la Termodinámica (1era. y 2da.)
- Conceptos de diseño de intercambiadores de calor
- Aislamiento de equipos de proceso y tuberías (calentamiento y enfriamiento)
- Auditoría energética/eficiencia energética
- Mejora continua

Análisis PINCH

- Término introducido por Linnhoff en 1977.
- Métodos termodinámicos para determinar niveles mínimos necesarios de energía para diseño de redes de intercambiadores de calor.
- Cálculo de cambios de entalpía y determinación de dirección del flujo de calor (de alta a baja temperatura).
- Cada intercambiador, de acuerdo a su configuración y condiciones de operación, permitirá un valor máximo de transferencia de calor.

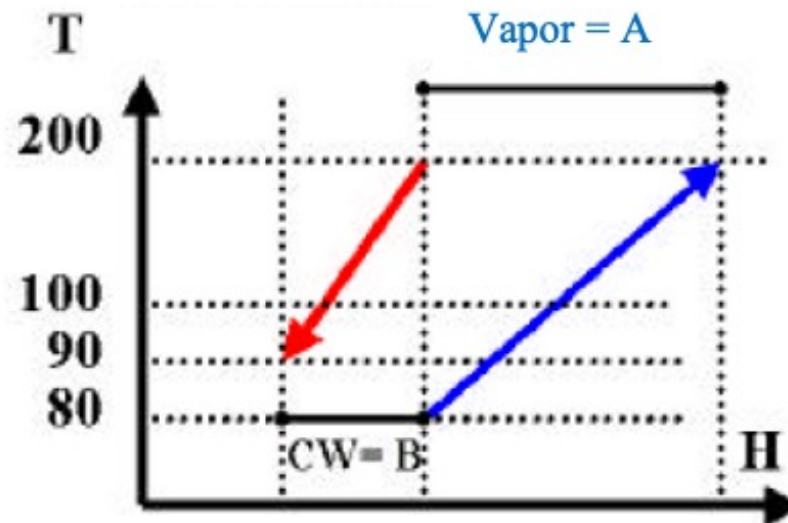
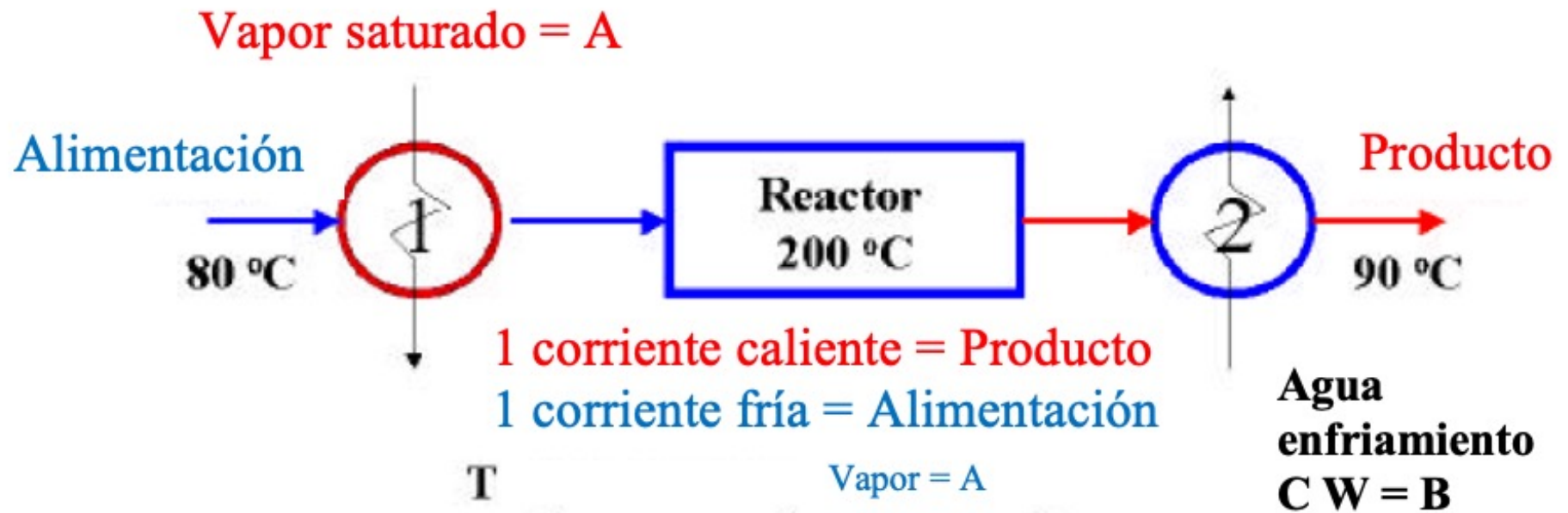
Análisis PINCH (cont.)

- Esta transferencia de calor se producirá siempre y cuando no se use una **diferencia menor** a la **diferencia mínima de temperaturas** entre las corrientes.
- Se determina el $\Delta T_{\min}$ o diferencia mínima de temperatura permitida.
- Ese nivel mínimo se conoce como el **punto o condición PINCH**.
- El PINCH define la **fuerza motora** (gradiente) de transferencia que se permite en el equipo.

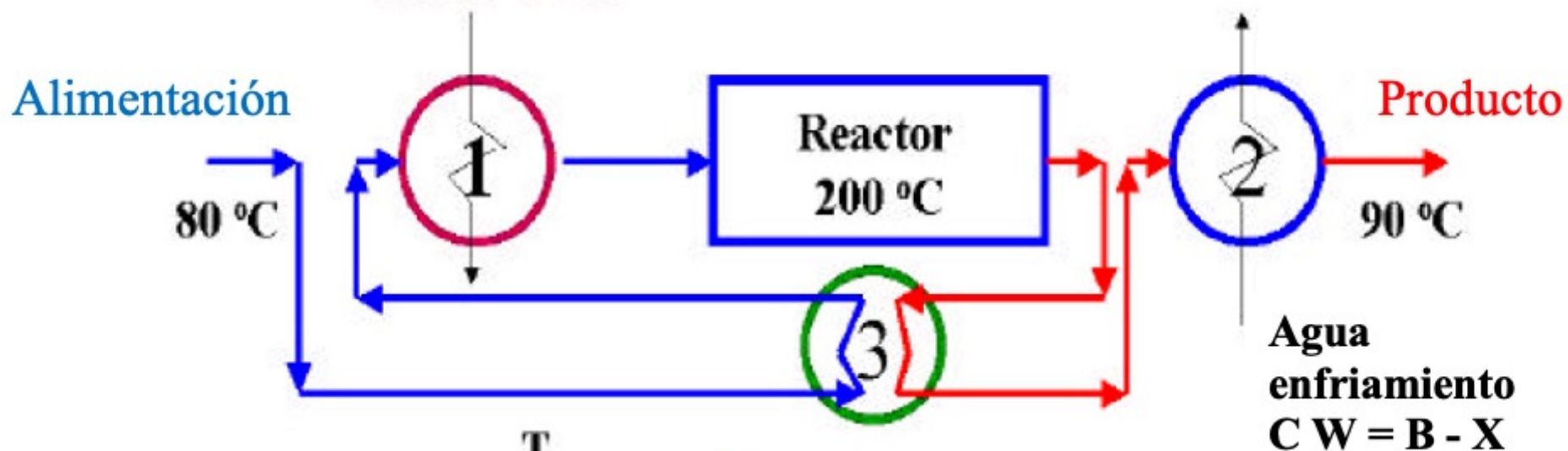
Objetivo del análisis PINCH

- Obtener ahorro de costos debido a la mejor integración de los procesos de transferencia de calor, maximizando la recuperación de calor de proceso a proceso y reduciendo las cargas externas de servicios auxiliares (térmicos).
 - Identifica los costos energéticos
 - Estima el costo de la red de intercambiadores
 - Determina el punto PINCH

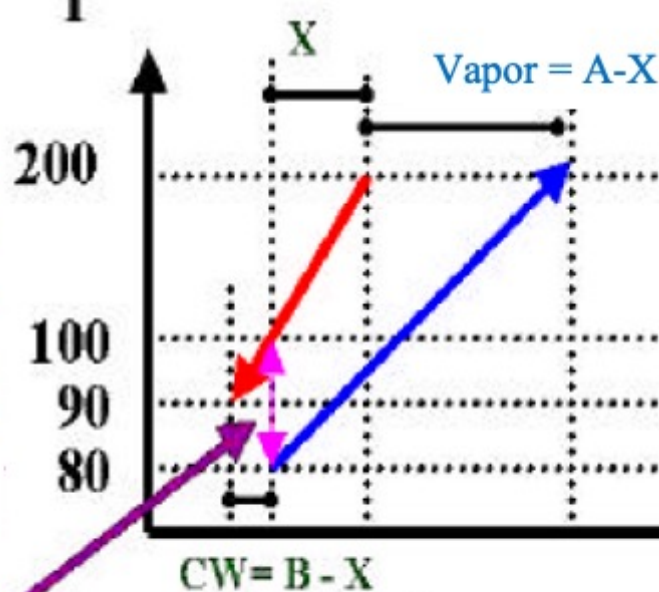
Ejemplo con diagrama T - H



Vapor saturado = A - X



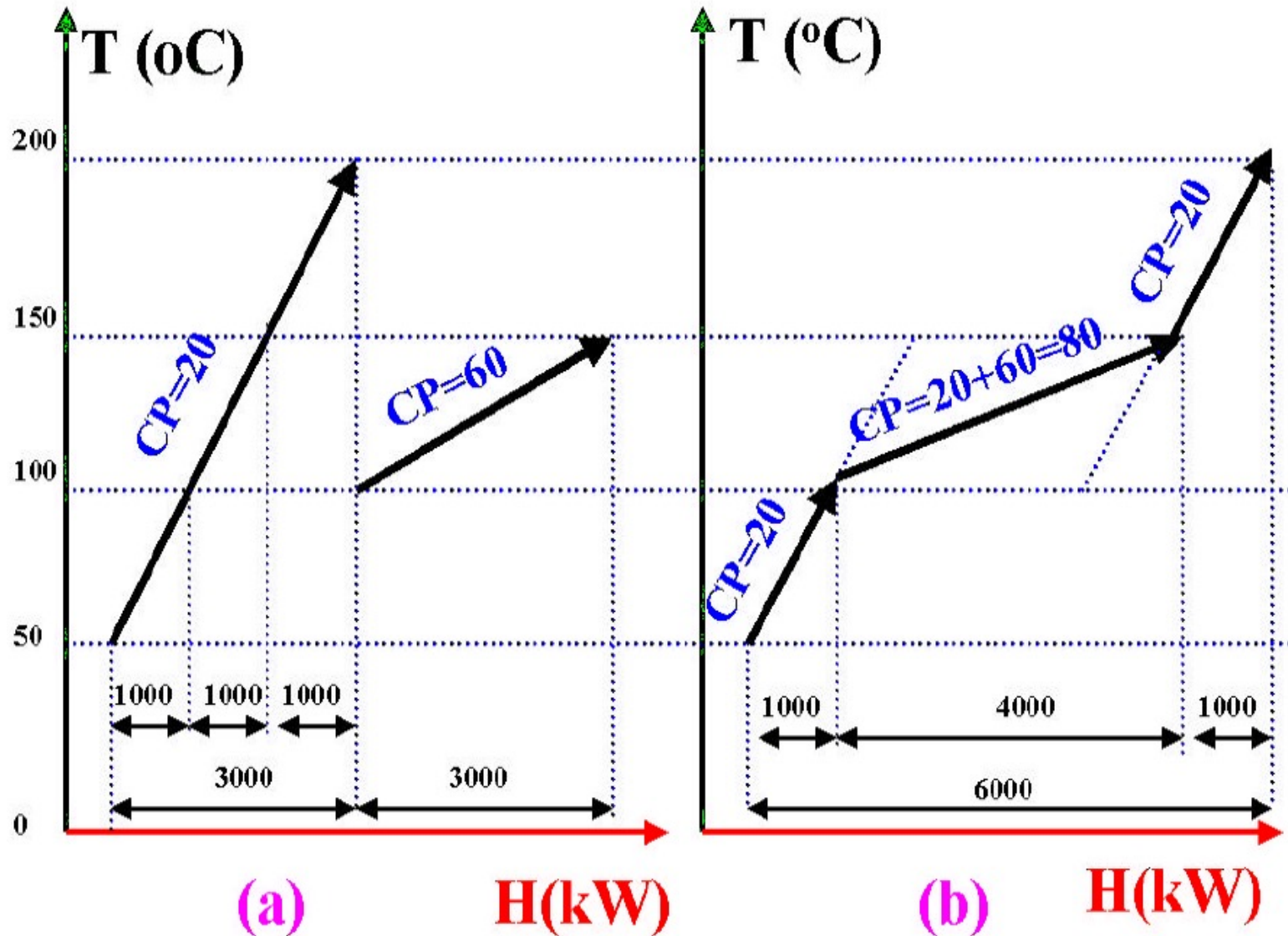
Las curvas son “apiladas” por movimiento horizontal y separadas verticalmente por 20 °C



1 corriente caliente = Producto
1 corriente fría = Alimentación
Calor recuperado = X

(b)

¿Cómo construir una curva compuesta?



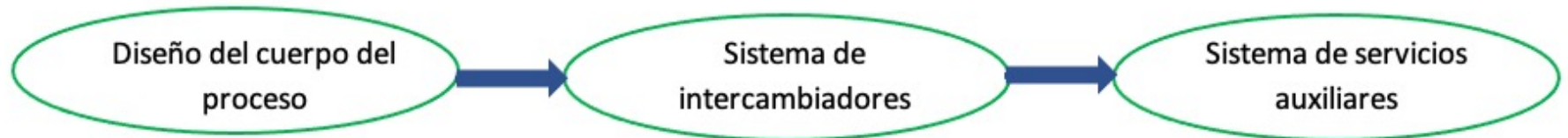
Pasos en el análisis PINCH

- Identificar las corrientes calientes, frías y de servicios auxiliares en el proceso.
- Extraer datos térmicos de las corrientes del proceso.
- Seleccionar el valor del $\Delta T_{\min}$.
- Construir las curvas compuestas y la curva compuesta total.
- Estimar objetivo/meta en reducción del costo de energía.

Pasos en el análisis PINCH (cont.)

- Estimar objetivo/meta en inversión de la red de intercambiadores de calor (HEN)
- Estimar el valor $\Delta t_{\min}$ más adecuado
- Estimar la meta práctica para el diseño del HEN
- Diseñar finalmente la red de intercambiadores (HEN) a usar

Proceso de diseño tradicional



Proceso de diseño con enfoque PINCH

Extracción de datos de corrientes y servicios auxiliares

- Temperatura de suministro (TS °C) (*supply temp*)
- Temperatura objetivo/meta (TT °C) (*target temp*)
- Razón de flujo de capacidad calorífica (CP, kW/ °C):

$$CP = \dot{m} \times Cp$$

Donde:

$\dot{m}$ es el flujo másico (kg/s)

Cp es el calor específico (kJ/kg °C)

- Cambio de entalpía (ΔH), recordando que $W = 0$ (trabajo) en un intercambiador y $\Delta H = CP (TS-TT)$

Ejemplo de datos típicos de corrientes

Número de la corriente	Nombre de la corriente	Temperatura de suministro (°C)	Temperatura objetivo /meta (°C)	Flujo de capacidad calorífica (kW/°C)	Cambio de entalpía (kW)
1	Alimentación	60	205	20	2900
2	Desacarga del reactor	270	160	18	1980
3	Producto	220	70	35	5250
4	Recirculación	160	210	50	2500

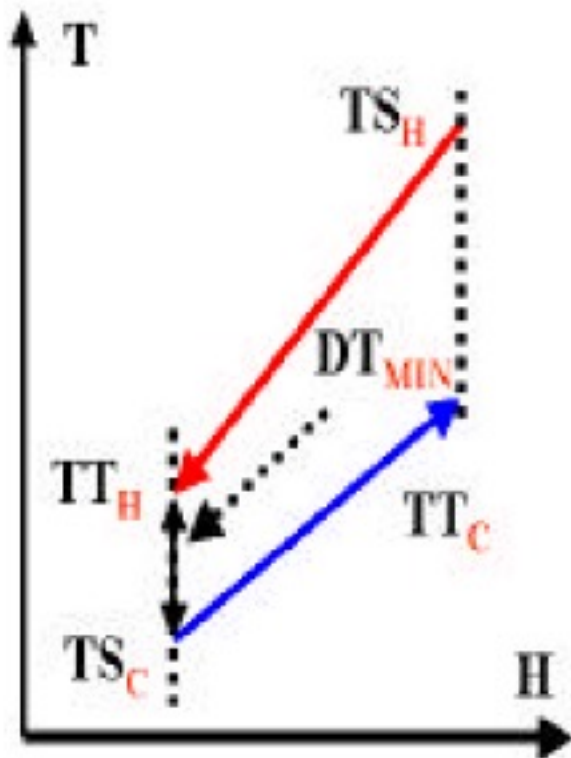
Selección del $\Delta T_{\min}$ inicial

- Para buena transferencia debe existir un ΔT **adecuado** entre corrientes en cada intercambiador.
- Debe existir un $\Delta T_{\min}$ que se cumpla en cualquier parte del intercambiador
- Representa cuello de botella en recuperación de calor.
- El $\Delta T_{\min}$ se determina con:
 - U (coeficiente global)
 - Geometría del intercambiador
- U (Coeficiente global de transferencia de calor) representa **resistencia** del intercambiador para transferencia de calor.

Selección del $\Delta T_{\min}$ inicial (cont.)

- Para intercambiador de concha y tubos (procesos baja temp.): 3 – 5 °C
- Para procesos de alta temperatura (petroquímica): 10 – 40 °C
- Para intercambiador de placas (marco y placas): 2 – 3 °C
- La ecuación de transferencia de calor será:

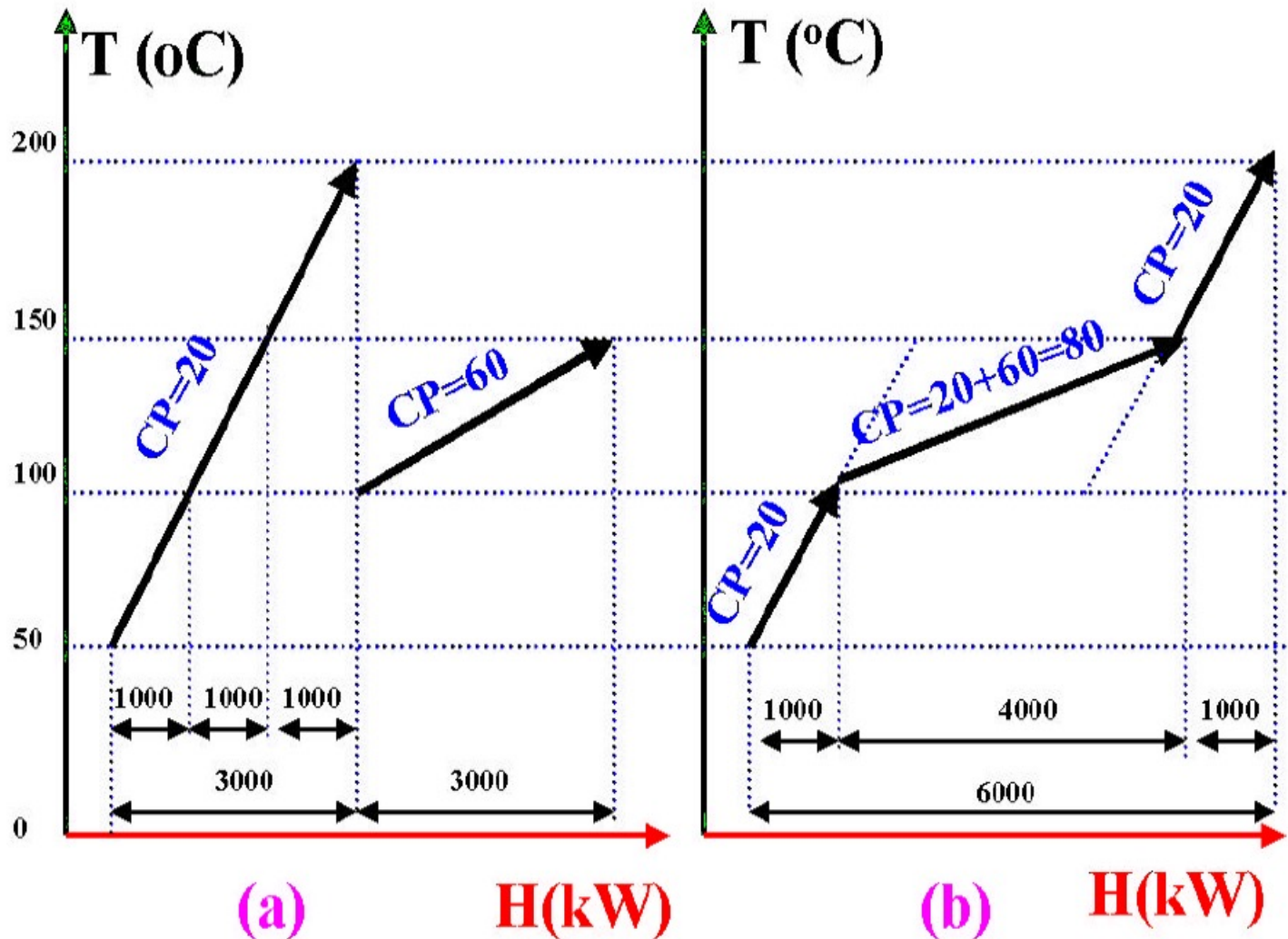
$$Q = U \times A \times \text{LMTD}$$



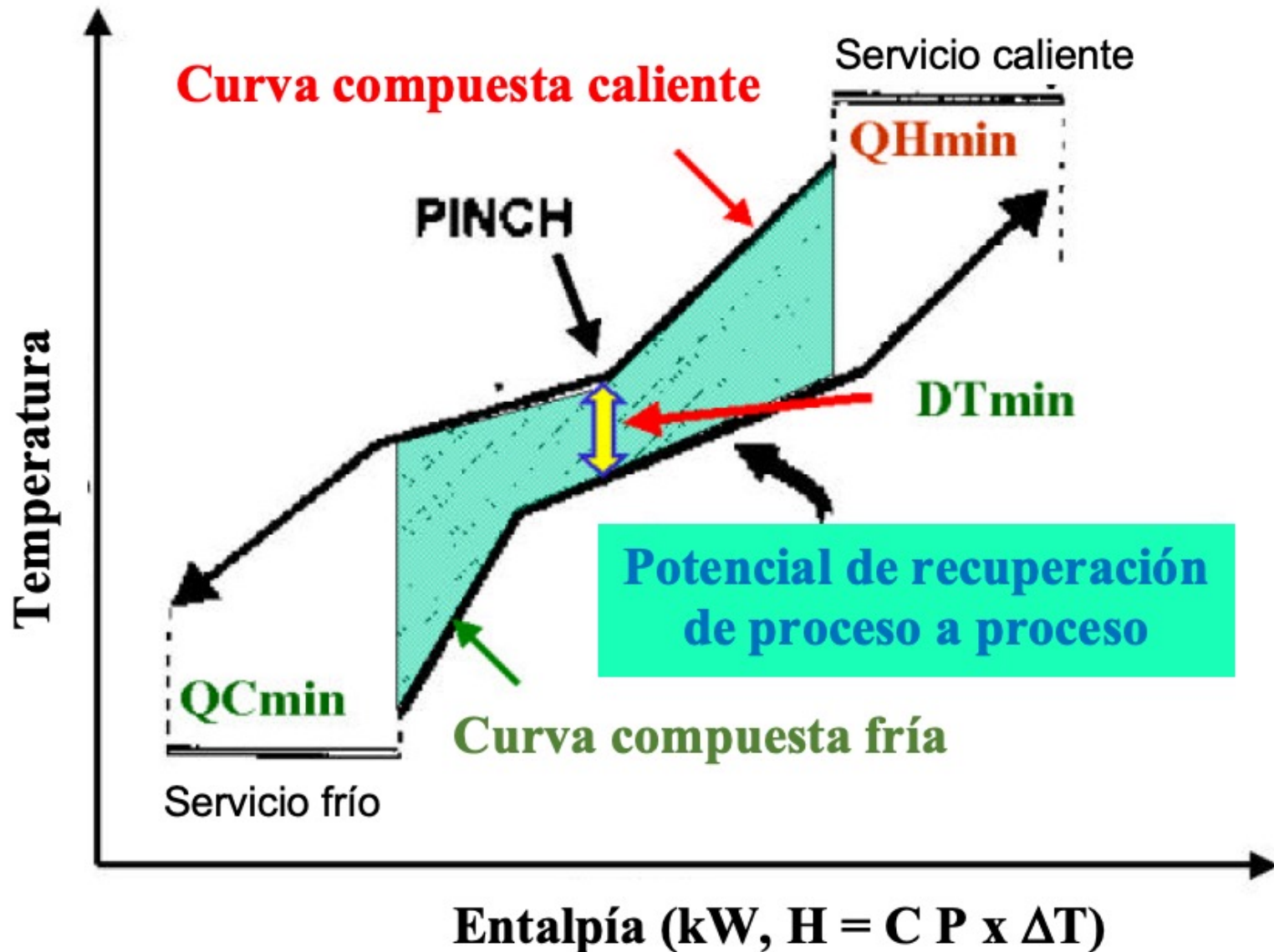
$$\text{LMTD} = \frac{(TS_H - TT_C) - (TT_H - TS_C)}{\ln[(TS_H - TT_C)/(TT_H - TS_C)]}$$

- $A < \Delta T_{\min}, >$ área de intercambiador
- A mayor $\Delta T_{\min}, <$ recuperación de calor y $>$ necesidad en servicios auxiliares
- Mala selección = aumento en costos

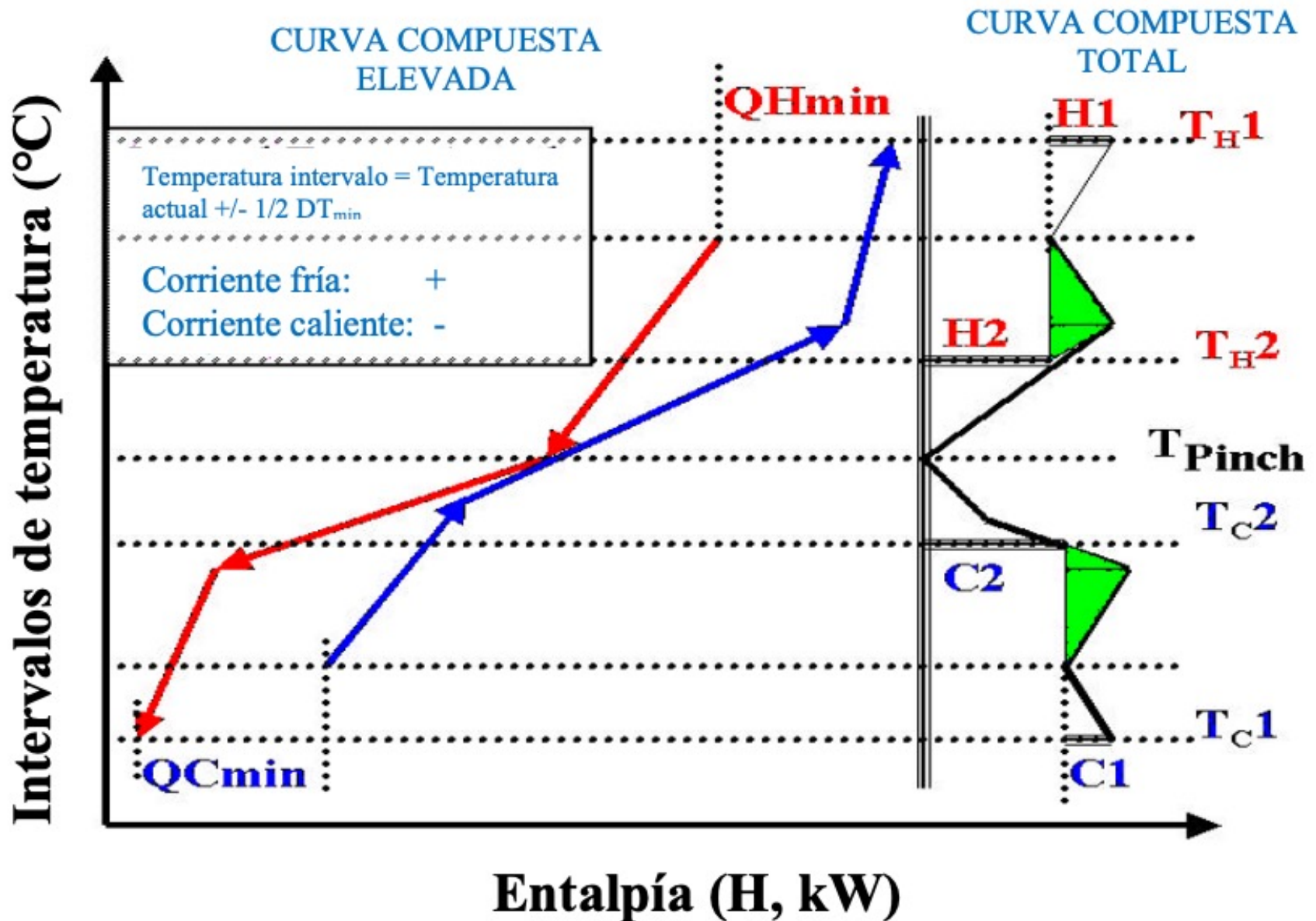
Construcción de curvas compuestas



Curvas compuestas combinadas



Curva compuesta total o global (GCC)



Estimación del costo mínimo meta de energía

- Con $\Delta T_{\min}$ seleccionado, se estima **requerimiento de servicios de calentamiento y enfriamiento**, con los datos de **curva compuesta total (GCC)**:
 - $Q_{H_{\min}}$
 - $Q_{C_{\min}}$
- Con el costo de los servicios, se calcula el costo total:

$$\text{Costo total energía} = \sum_{U=1}^U Q_U \times C_U$$

- Donde:

Q_U = Requerimiento del servicio U, kW

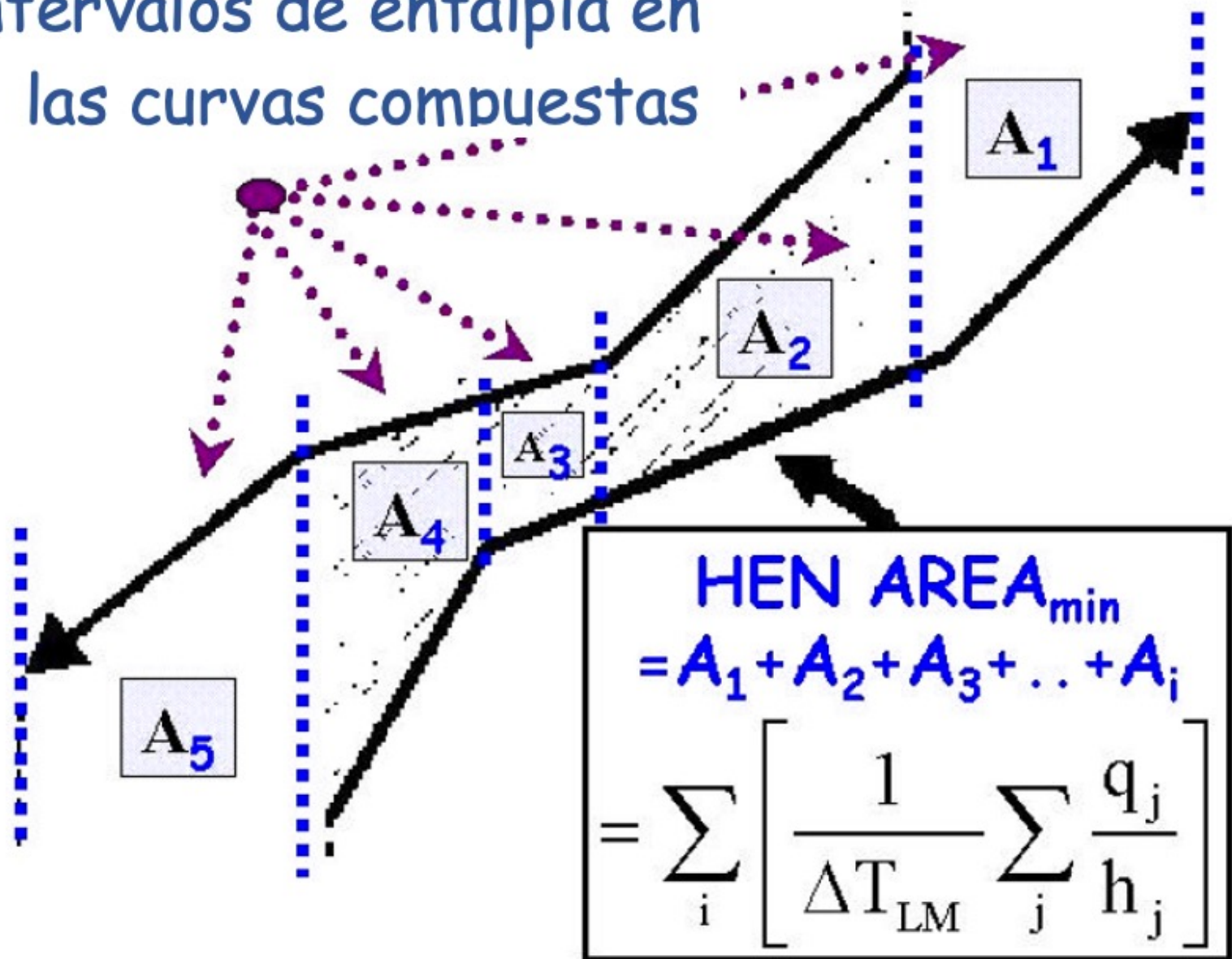
C_U = Costo unitario servicio U, US\$/kW, año

U = Número total de servicios usados

Estimación de inversión objetivo de la red de intercambiadores

- Costo depende de:
 - Número de intercambiadores requeridos
 - Área total requerida de intercambio
 - Distribución del área entre los intercambiadores
- Área para intercambiadores simples en contracorriente: $A = Q / [U \times T_{LMTD}]$
- Estimar un 10 % extra en el área por seguridad

Intervalos de entalpía en las curvas compuestas



Estimación del número meta de unidades de transferencia

- El $N_{\min}$ de unidades para un MER (mínimo de energía requerido) se calcula con:

$$N_{\min \text{MER}} = [N_h + N_c + N_u - 1]_{\text{AP}} + [N_h + N_c + N_u - 1]_{\text{BP}}$$

N_h = Número de corrientes calientes

N_c = Número de corrientes frías

N_u = Número de corrientes de servicios aux.

AP / BP : Sobre el PINCH / Bajo el PINCH

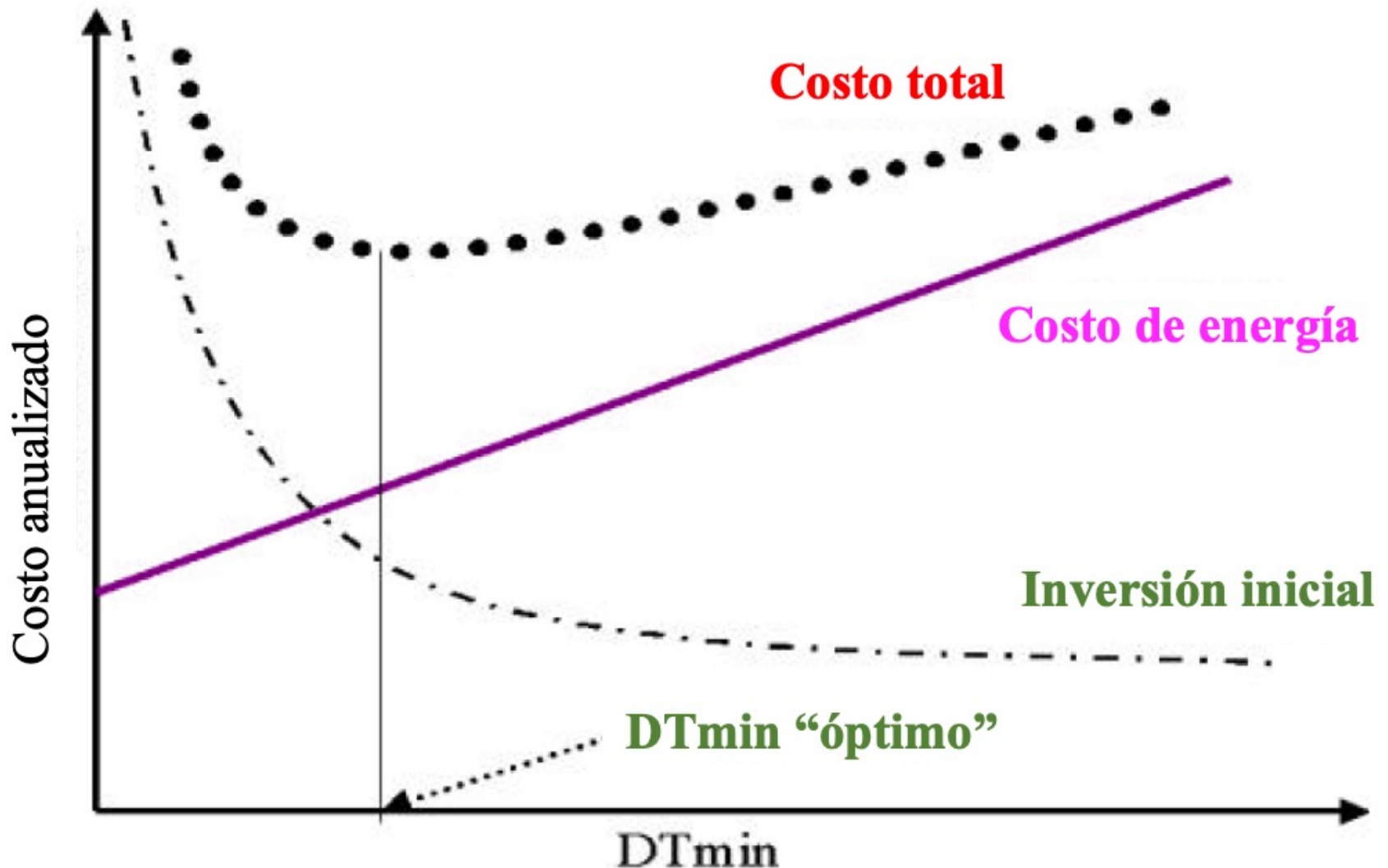
Estimación de inversión meta total del HEN (red de intercambiadores)

- Combinando el área mínima estimada de intercambio (A_{min}) y el número mínimo de unidades (N_{min}) con ecuación empírica para costo de intercambiadores [Costo (US\$) = $a + b (\text{Área})^c$]

$$C(\$)_{HEN} = [N_{min}\{a + b(A_{min}/N_{min})^c\}]_{AP} + [N_{min}\{a + b(A_{min}/N_{min})^c\}]_{BP}$$

- Para intercambiadores de concha y tubo de acero al carbón: $a = 16,000$, $b = 3,200$ y $c = 0.7$
- El costo instalado se puede estimar a 3.5 veces el $C(\$)_{HEN}$ calculado

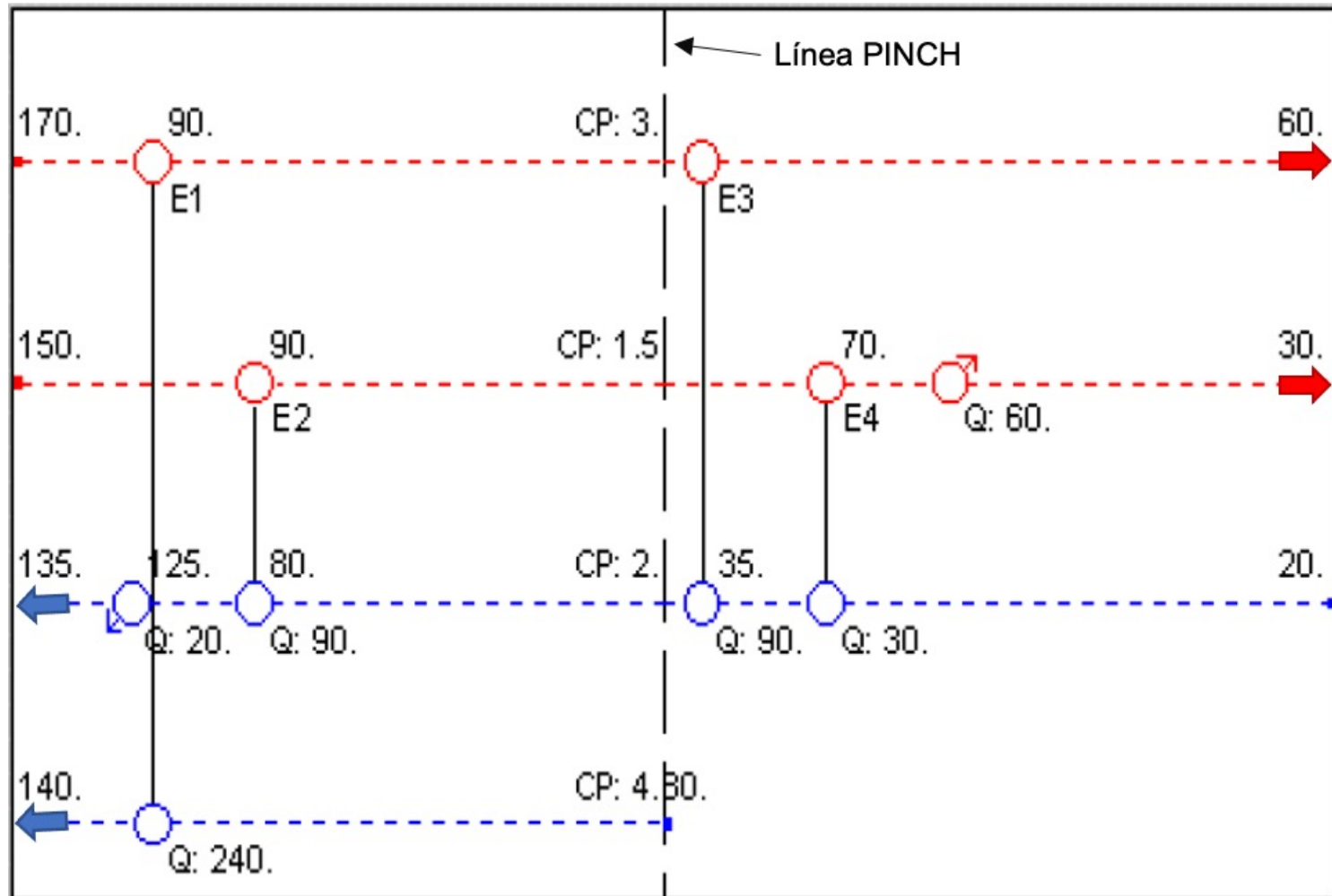
Estimación del DT_{min} “óptimo” por comparación de costos



Estimación de metas prácticas para el diseño del HEN

- Con el $\Delta T_{\min}$ “óptimo” no siempre se obtiene un diseño práctico el sistema es normalmente muy complicado.
- En la práctica, se usa un valor mayor: 1.5 veces el $\Delta t_{\min}$ y se toma en cuenta el cambio en áreas y consumo de servicios.

Diseño de la red de intercambiadores: Diagrama de red



¿Qué significa el punto PINCH?

- Divide el sistema en dos:
 - Un sistema sobre el PINCH (altas temperaturas)
 - Un sistema bajo el PINCH (bajas temperaturas)
- Es único para cada proceso.
- Para un diseño adecuado:
 - Sobre el PINCH solo debería requerirse un servicio de calentamiento
 - Bajo el PINCH solo debería requerirse un servicio de enfriamiento
 - **NO se debe transferir calor a través del punto PINCH**
- **Una violación de estas tres reglas se traduce en requerimientos más altos de energía que los requerimientos mínimos teóricos posibles.**

CONCLUSIONES

Bibliografía

- Gabr, Eman M. 2018. Step by step for designing an optimum heat exchanger network. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 9, Issue 7, July-2018
- Gundersen, T. 2000. A process integration primer. International Energy Agency - Implementing agreement on process Integration.
- Kemp, Ian C. 2007. Pinch analysis and process integration. Second ed. Elsevier Ltd, Great Britain. 415 pp.
- Linnhoff, B. 1994. User guide on process integration for the efficient use of energy. The Institution of Chemical Engineers, United Kingdom.
- Rossiter, A. P. 1995. Waste Minimization Through Process Design, McGraw-Hill.
- Smith, R. 1995. Chemical Process Design, McGraw-Hill.
- <https://www.kbc.global/Resources/Resources.html>

Preguntas

Gracias por su atención...

