

ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-EXTENSIÓN LATACUNGA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

“DISEÑO DE UNA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR PARA OPTIMIZAR LOS COSTOS DE OPERACIÓN”

AUTORA: REVELO CUATIN, MARÍA FERNANDA

DIRECTOR: TUZA ALVARADO, PABLO VINICIO, D. Sc.



INTRODUCCIÓN

DESARROLLO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



INTRODUCCIÓN

Figura 1. Crecimiento industrial



Figura 2. Incremento económico



Figura 3. Combustible



Figura 4. Emisión de CO₂



Figura 6. Intercambiador de calor

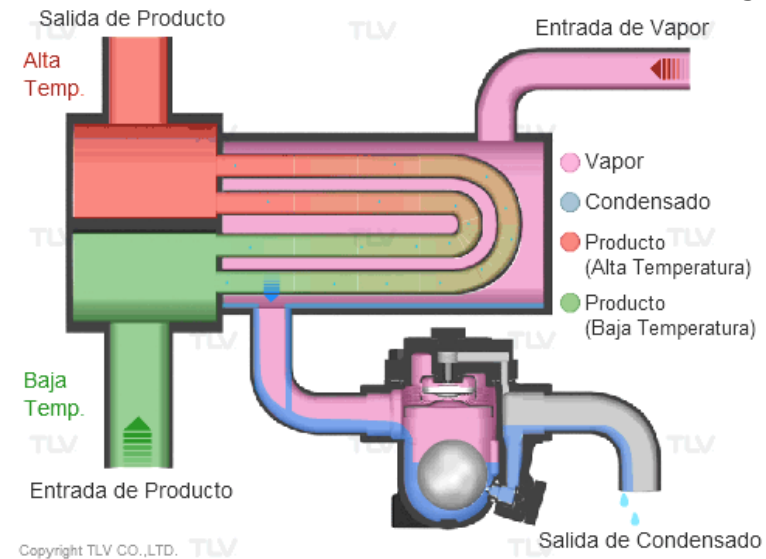


Figura 5. Contaminación ambiental



Figura 7. Red de intercambiadores de calor

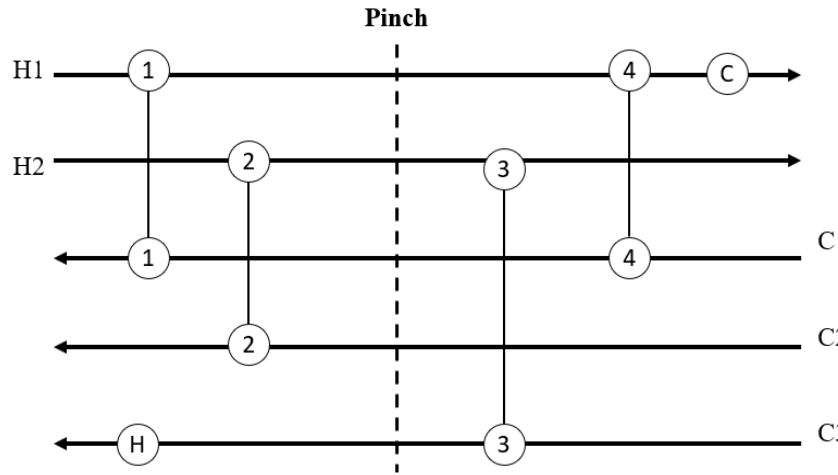


Figura 8. Incremento económico



OBJETIVOS

Objetivo General

Diseño de una Red de Intercambiadores de Calor de un conjunto de corrientes calientes y frías reportadas en la literatura.

Objetivos Específicos

- Colectar información de corrientes reportadas en la literatura para determinar los Requerimientos Mínimos de Energía.
- Sintetizar la Red de Intercambiadores de Calor mediante el Método de Diseño Pinch y el Método de Programación Lineal de Enteros Mixtos.
- Diseñar una red con el mínimo número de intercambiadores de calor eliminando bucles de calor.
- Incluir Múltiples Utilidades en la Red de Intercambiadores de Calor.
- Realizar el análisis de costos y la comparación de los costos obtenidos de la Red de Intercambiadores de Calor propuesta con la correspondiente reportada en la literatura.



INTRODUCCIÓN

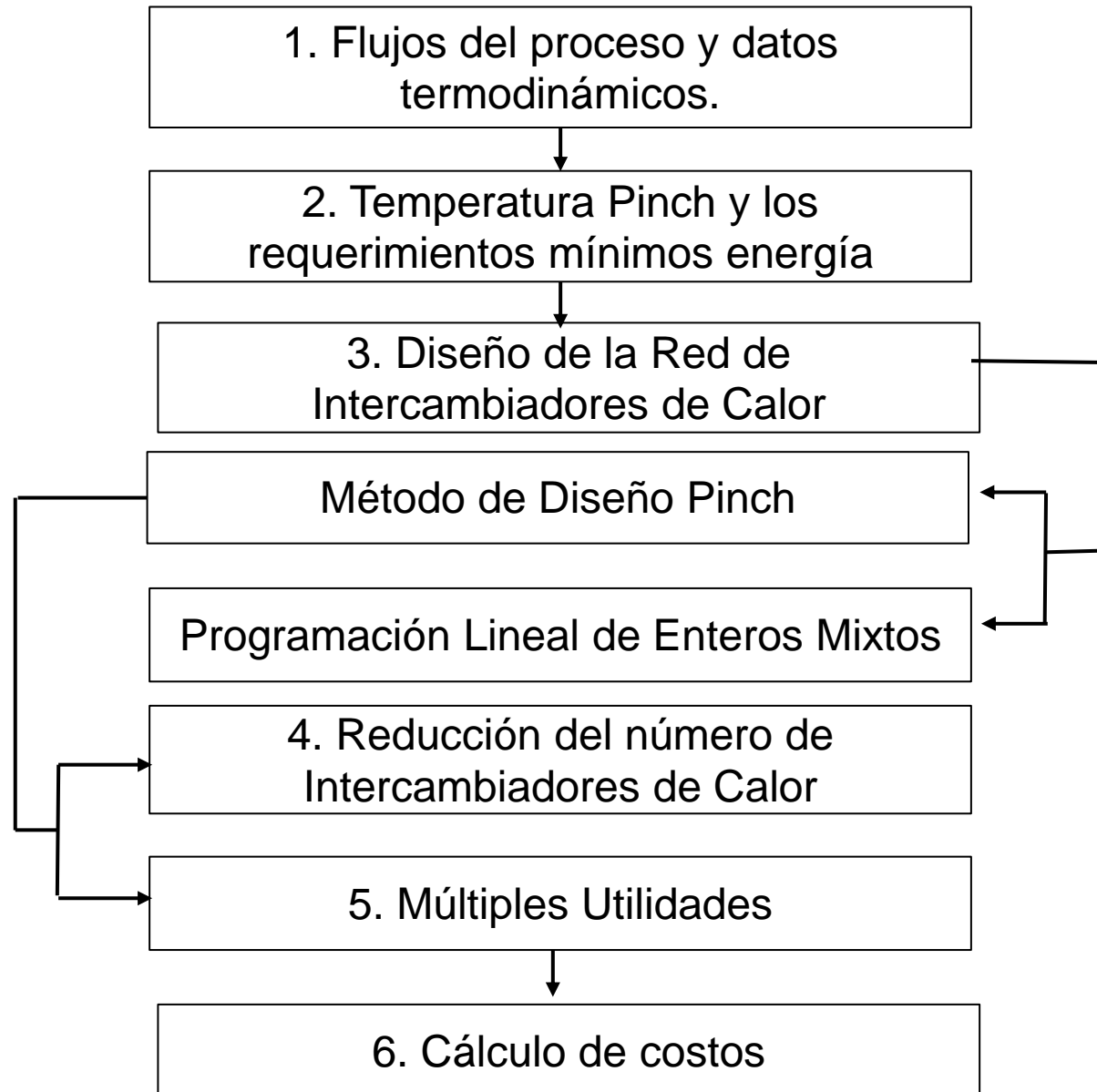
DESARROLLO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES



Figura 9. Etapas de la investigación



IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS DEL PROCESO, DATOS TERMODINÁMICOS Y PROPIEDADES FÍSICAS.

Tabla 1. Datos de las corrientes

Corriente	m(kg/s)	C(kW/K)	Tint (K)	Tout (K)
H1	134	328,83600	413	313
H2	235	576,69000	433	393
H3	12,1	29,69340	483	318
H4	28,5	69,93900	533	333
H5	102	250,30800	553	483
H6	14,2	34,84680	623	443
H7	38,9	95,46060	653	433
C1	235	576,69000	543	658
C2	143	350,92200	403	543
C3	104	255,21600	293	403
CW			293	298
S			700	700

Fuente: (Mizutani et al., 2003)

Tabla 2. Propiedades físicas de las corrientes

Propiedad física	Valor
Viscosidad (kg/m s)	$2,4 \times 10^{-4}$
Densidad (kg/m ³)	634
Capacidad calorífica (J/kg K)	2454
Conductividad térmica (W/m K)	0,114

Fuente: (Mizutani et al., 2003)



TEMPERATURA PINCH Y REQUERIMIENTOS MÍNIMOS ENERGÍA- INTERVALO DE TEMPERATURA

Figura 10. Método de intervalo de temperatura

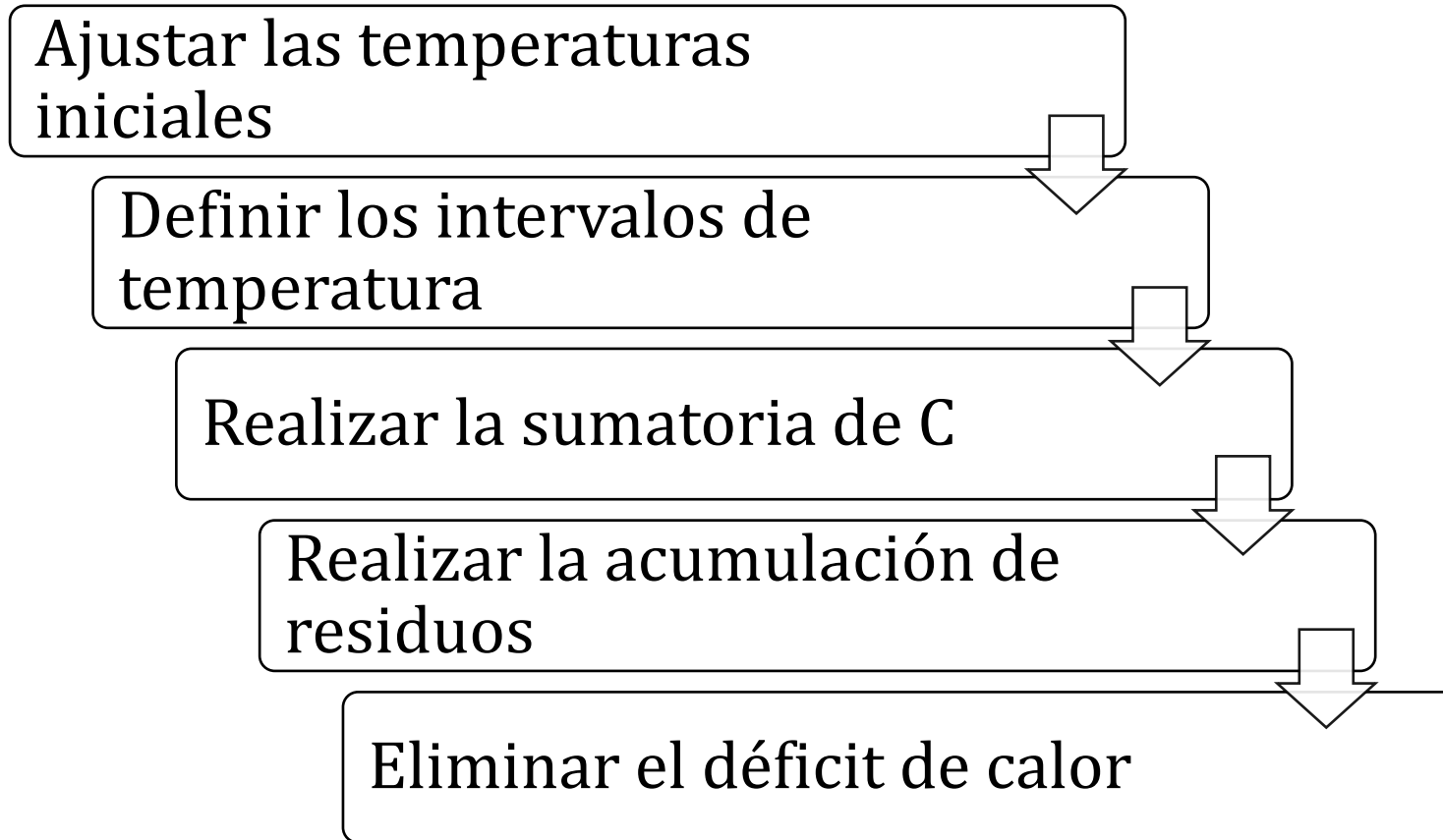


Tabla 3. Temperaturas ajustadas

ΔT min	10 K		Temperatura Ajustada	
	T_{in} (K)	T_{out} (K)	T_{in} (K)	T_{out} (K)
H1	413	313	403	303
H2	433	393	423	383
H3	483	318	473	308
H4	533	333	523	323
H5	553	483	543	473
H6	623	443	613	433
H7	653	433	643	423
C1	543	658	543	658
C2	403	543	403	543
C3	293	403	293	403

Función Lógica

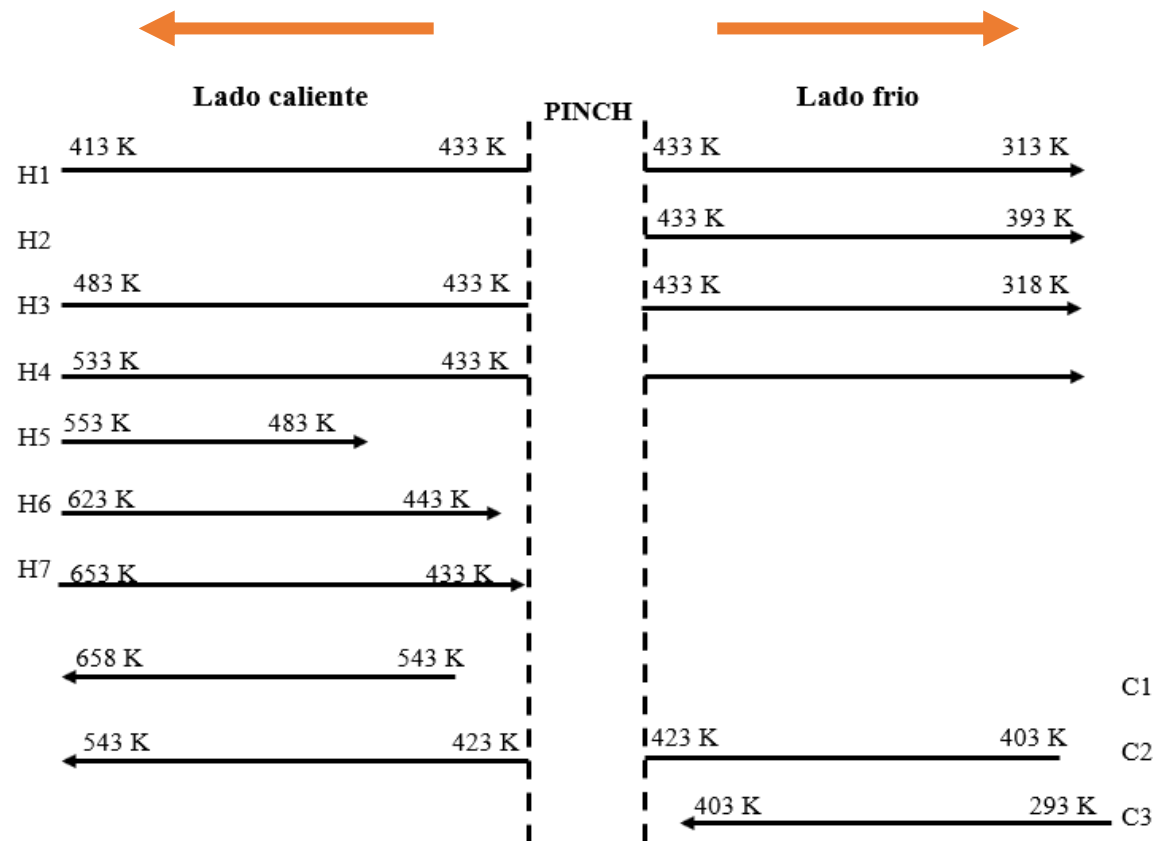
=SI(Y(condición1; condición2); valor_si es verdadero; valor_si es falso)



SÍNTESIS DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

MÉTODO DE DISEÑO PINCH

Figura 11. Método de Diseño Pinch



Fuente: (Linnhoff & Hindmarsh 1982)

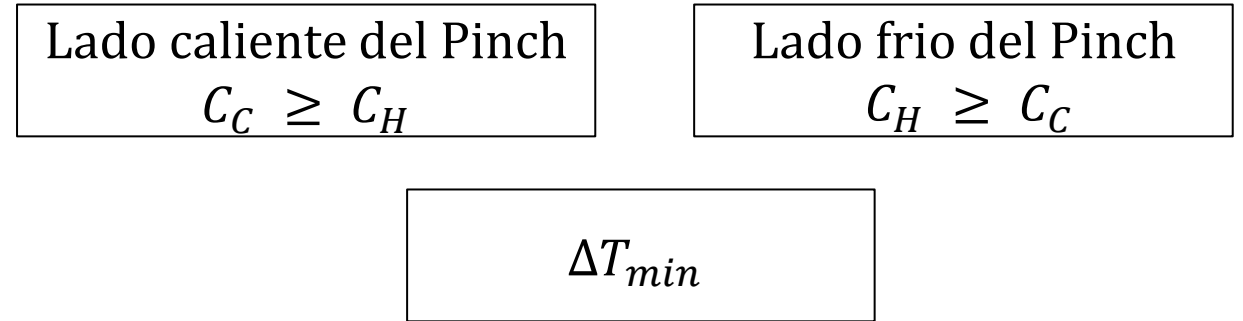
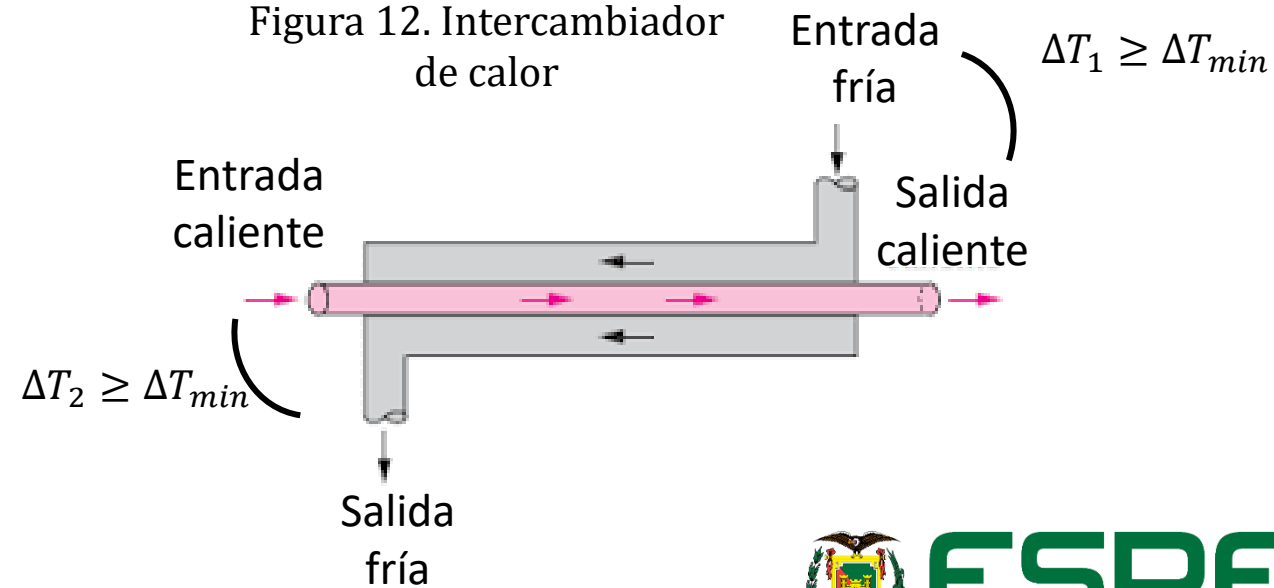
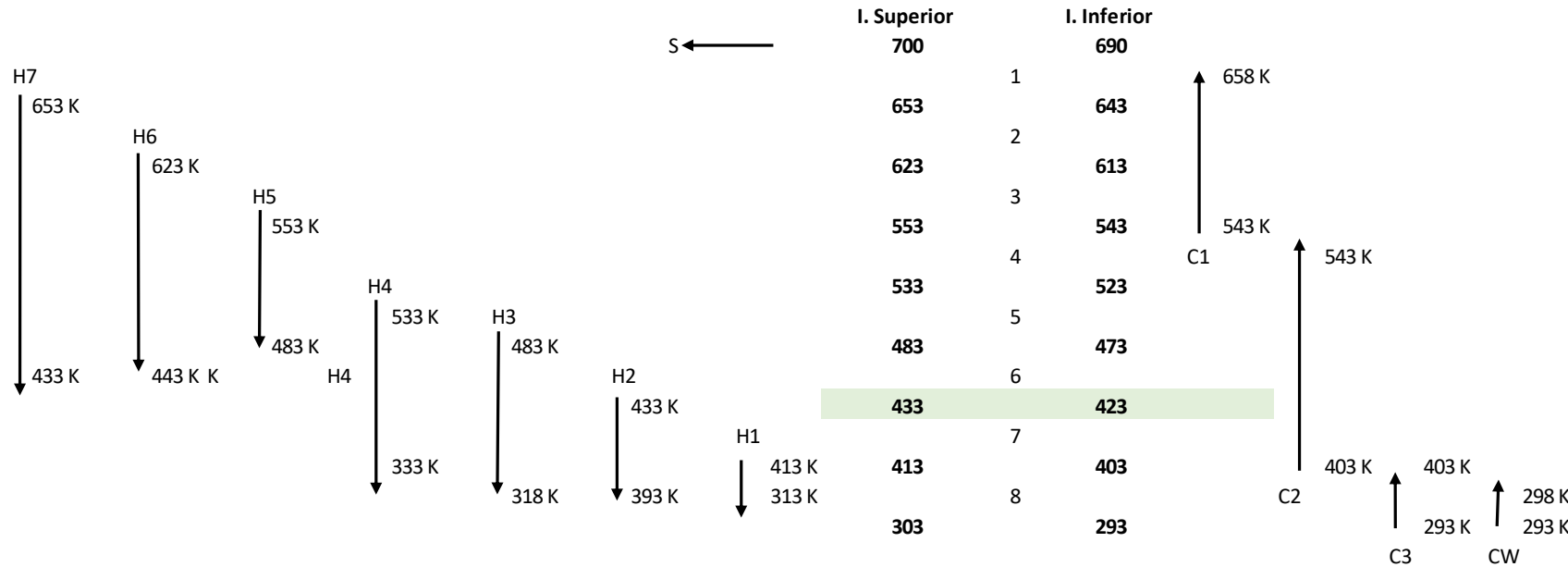


Figura 12. Intercambiador de calor



SÍNTESIS DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR PROGRAMACIÓN LINEAL DE ENTEROS MIXTOS (MILP)

Figura 13. Intervalos de Temperatura



Restricción 1

$$R_{ik} - R_{ik-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{ijk} = Q_{ik}^H$$

Restricción 2

$$\sum_{i \in H_k} Q_{ijk} = Q_{ik}^C$$

Restricción 3

$$\sum_k Q_{ijk} - y_{ij} U_{ij} \leq 0$$

Función Objetivo

Minimizar $\sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij}$

Variables Binarias
(0,1)

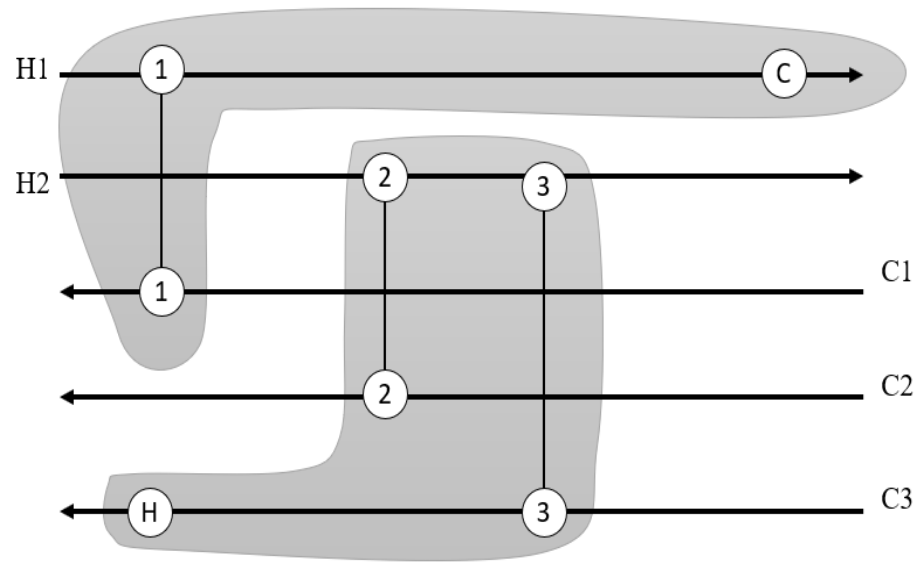
Método Simplex LP

Fuente: (Seider et al., 2009)



REDUCCIÓN DEL NÚMERO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Figura 14. Eliminación de ciclos de calor

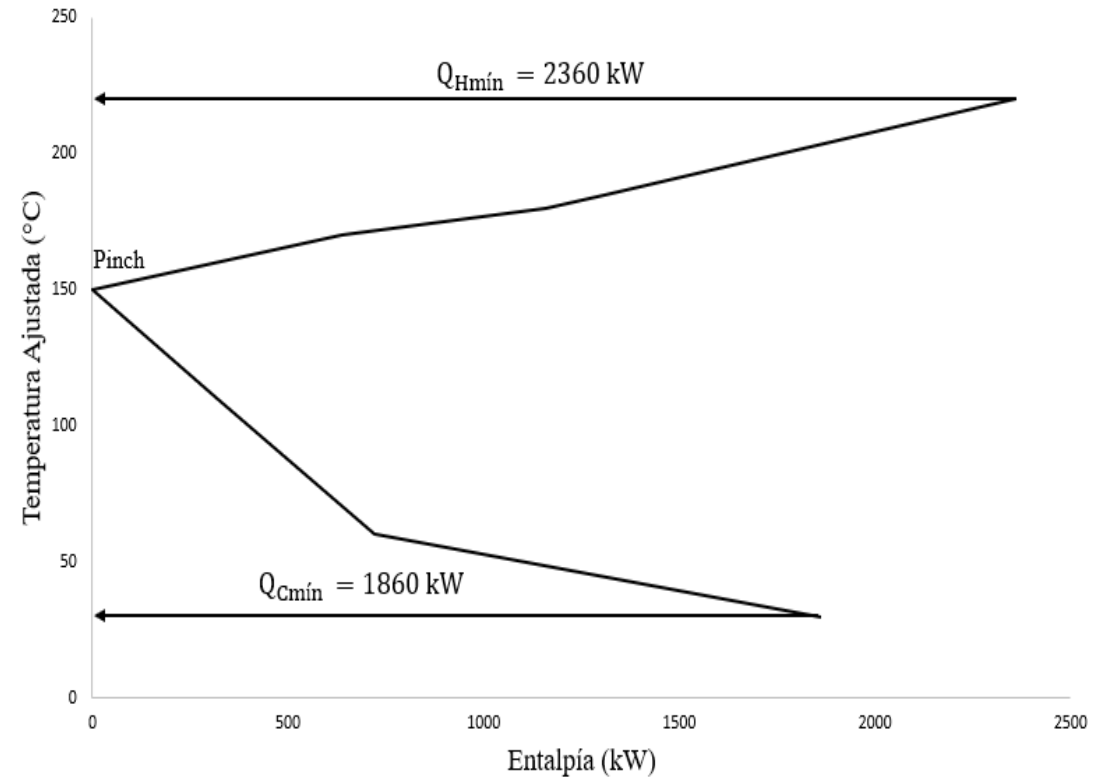


Fuente: (Seider et al., 2009)

- Vapor de presión alta, media y baja

MÚLTIPLES UTILIDADES

Figura 15. Diagrama de la gran curva compuesta



Fuente: (Seider et al., 2009)

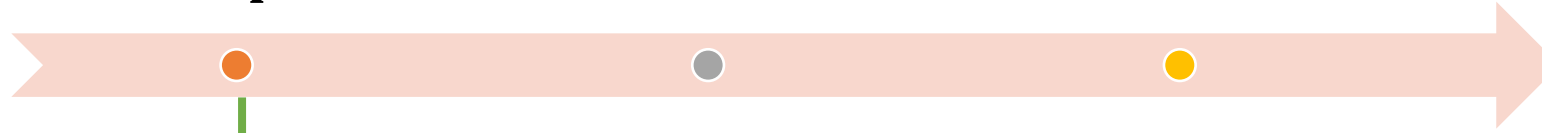
- Agua de alimentación a la caldera
- Agua de enfriamiento



COSTO DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Costo de
Compra

Costo Total
Anualizado



Costo de
Utilidades de
Energía

$$C_P = C_B F_P F_M F_L \quad \text{Ec.1}$$

Aproximación de Chen

$$\Delta T_{LM} = [\Delta T_1 \Delta T_2 0,5 (\Delta T_1 + \Delta T_2)]^{1/3} \quad \text{Ec.3}$$

Fuente: (Sieniutycz & Jezowski, 2013)

Área (A)

$$Q = U A F_T \Delta T_{LM} \quad \text{Ec.2}$$

Costo base C_B

$$C_B = \text{expo} \{11,0545 - 0,9228[\ln(A)] + 0,09861[\ln(A)]^2\} \quad \text{Ec.4}$$

Fuente: (Seider et al., 2009)



COSTO DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Factor de material F_M

$$F_M = a + \left(\frac{A}{100}\right)^b \quad \text{Ec. 5}$$

Factor de la longitud F_L

Factor de presión F_P

Fuente: (Seider et al., 2009)

2006 → CE = 500
2019 → CE = 607,5

$$C_{Pajustado} = C_P \frac{500}{607,5} \quad \text{Ec. 7}$$

Tabla 4. Material de construcción

Material de construcción	a (pulg)	b (pulg)
Carcaza/Tubo		
Acero Carbono/Acero Carbono	0.00	0.00
Acero Carbono/Latón	1.08	0.05
Acero Carbono/Acero Inoxidable	1.75	0.13
Acero Carbono/Monel	2.1	0.13
Acero Carbono/Titanio	5.2	0.16
Acero Carbono/Acero Cr-Mo	1.55	0.05
Acero Cr-Mo/ Acero Cr-Mo	1.70	0.07
Acero Inoxidable/ Acero Inoxidable	2.70	0.07
Monel/Monel	3.3	0.08
Titanio/Titanio	9.6	0.06

Fuente: (Seider et al., 2009)

Tabla 5. Factor de longitud del tubo

Longitud Tubo (pie)	F_L
8	1.25
12	1.12
16	1.05
20	1.00

Fuente: (Seider et al., 2009)

$$F_P = 0,9803 + 0,018 \left(\frac{P}{100}\right) + 0,0017 \left(\frac{P}{100}\right)^2 \quad \text{Ec.6}$$

Fuente: (Chemical Engineering, 2020)



COSTO DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Figura 16. Vapor de procesos industriales



Figura 17. Agua de enfriamiento

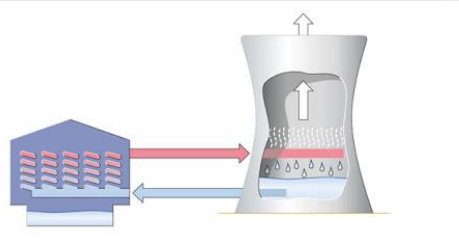
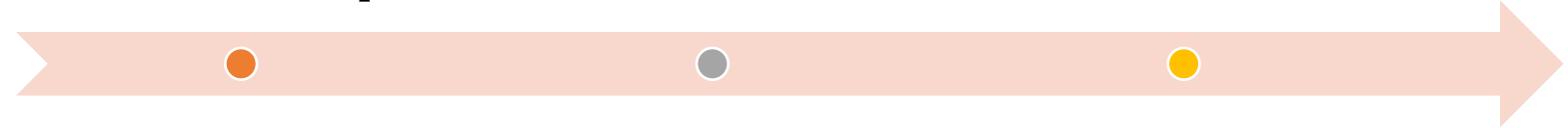


Figura 15

Costo de Compra

Costo Total Anualizado



Costo de Utilidades de Energía

$$i_m = 0,1$$

$$C_A = i_m(C_{TCI}) + C \quad \text{Ec. 12}$$

MÚLTIPLES UTILIDADES

Vapor

$$C_S = S_{\text{costo}} Q_{H\text{min}} \quad \text{Ec.8}$$

Vapor de Presión Intermedia (ips)

$$C_{\text{ips}} = \text{ips}_{\text{costo}} Q_{\text{ips}} \quad \text{Ec.10}$$

Agua de Alimentación a la Caldera

$$C_{\text{bfw}} = \frac{Q_{\text{bfw}} V_{\text{bfw}} \text{costo}}{\Delta H_V} \quad \text{Ec.11}$$

Agua de enfriamiento

$$C_{\text{CW}} = \text{CW}_{\text{costo}} Q_{\text{Cmin}} \quad \text{Ec.9}$$

Fuente: (Seider et al., 2009)



INTRODUCCIÓN

DESARROLLO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



TEMPERATURA PINCH Y REQUERIMIENTOS MÍNIMOS ENERGÍA- INTERVALO DE TEMPERATURA

TABLA 6. Requerimientos mínimos de energía

Intervalos (K)		$\Sigma(\text{CH-CC})$ (KW/K)	Q (KW)	Calor acumulado (kW)	55156,104000
658	643	-576,69000	-8650,35000	-8650,35000	46505,75400
643	613	-481,22940	-14436,88200	-23087,23200	32068,87200
613	543	-446,38260	-31246,78200	-54334,01400	822,09000
543	523	29,69340	593,86800	-53740,14600	1415,95800
523	473	99,63240	4981,62000	-48758,52600	6397,57800
473	433	-120,98220	-4839,28800	-53597,81400	1558,29000
433	423	-155,82900	-1558,29000	-55156,10400	0,00000
423	403	325,40040	6508,00800	-48648,09600	6508,00800
403	383	749,94240	14998,84800	-33649,24800	21506,85600
383	323	173,25240	10395,14400	-23254,10400	31902,00000
323	308	103,31340	1549,70100	-21704,40300	33451,70100
308	303	73,62000	368,10000	-21336,30300	33819,80100
303	293	-255,21600	-2552,16000	-23888,46300	31267,64100



Figura 18. Red De Intercambiadores De Calor Método De Diseño Pinch

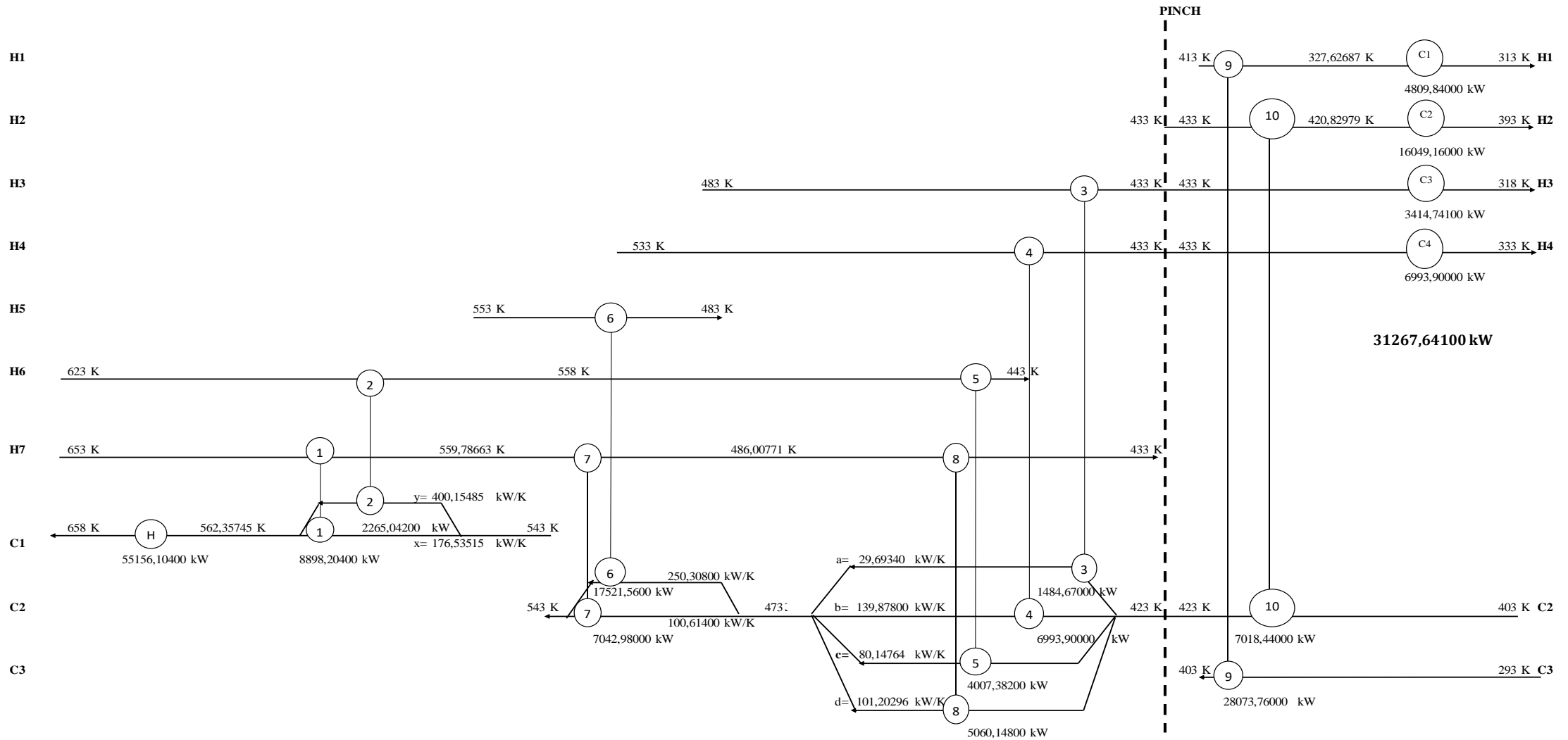


Figura 19. Red De Intercambiadores De Calor

Programación Lineal De Enteros Mixtos (MILP)

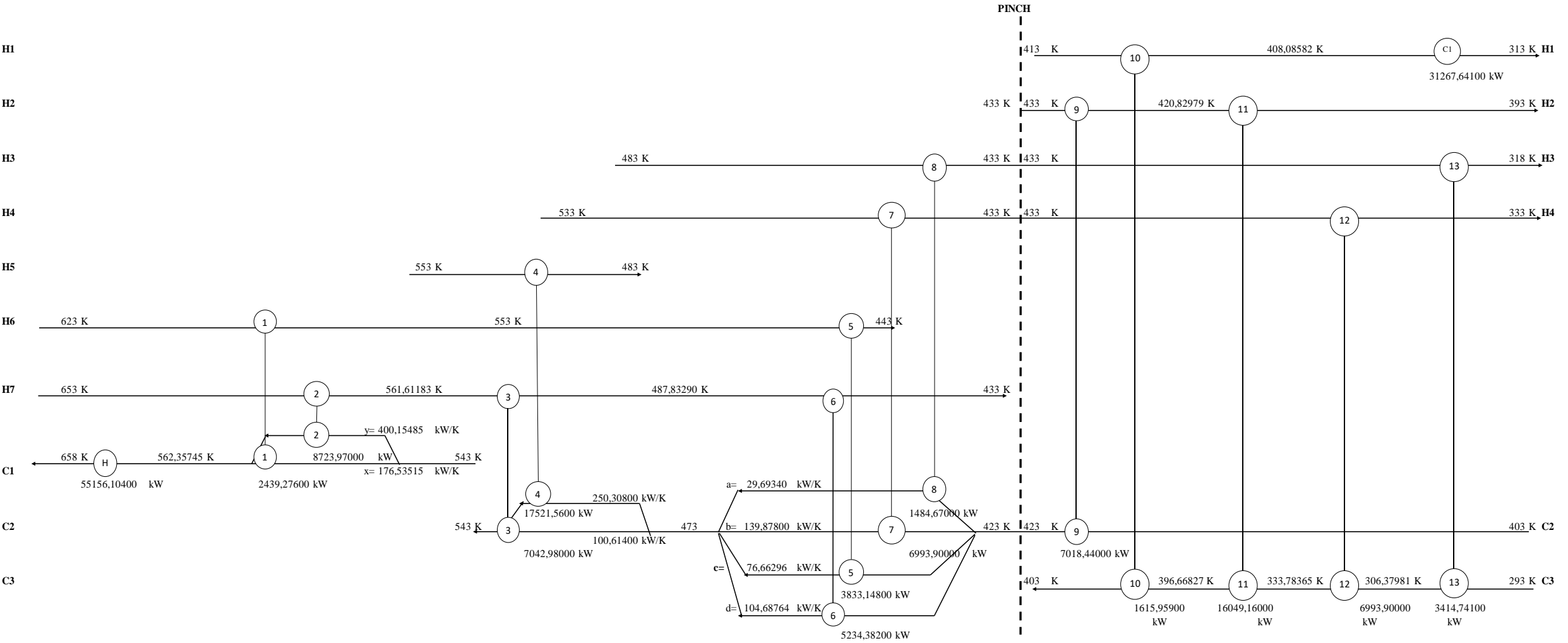


Figura 20. Red De Intercambiadores De Calor

Reducción del Número de Intercambiadores de Calor

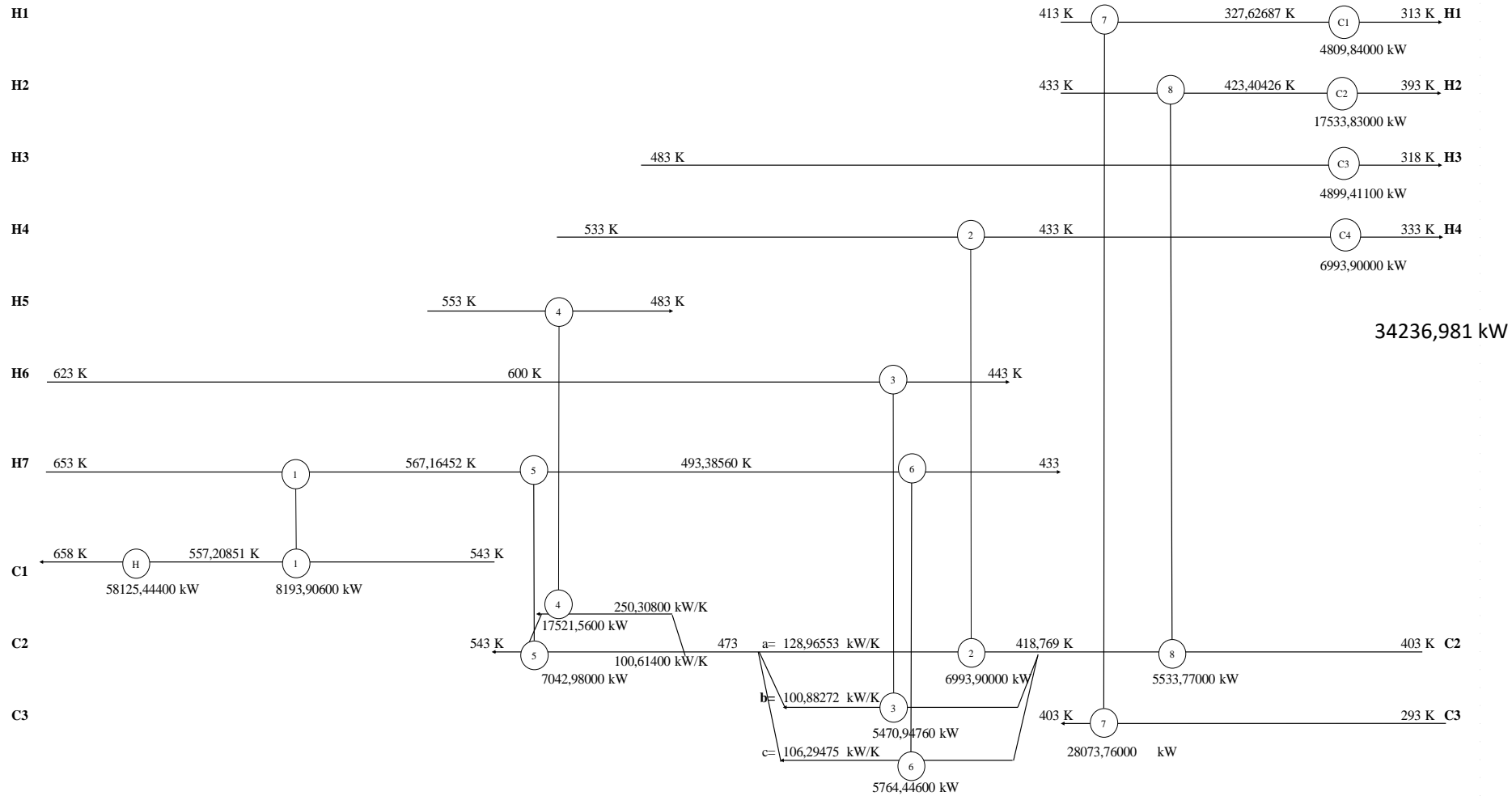


Figura 21. Red De Intercambiadores De Calor Múltiples Utilidades

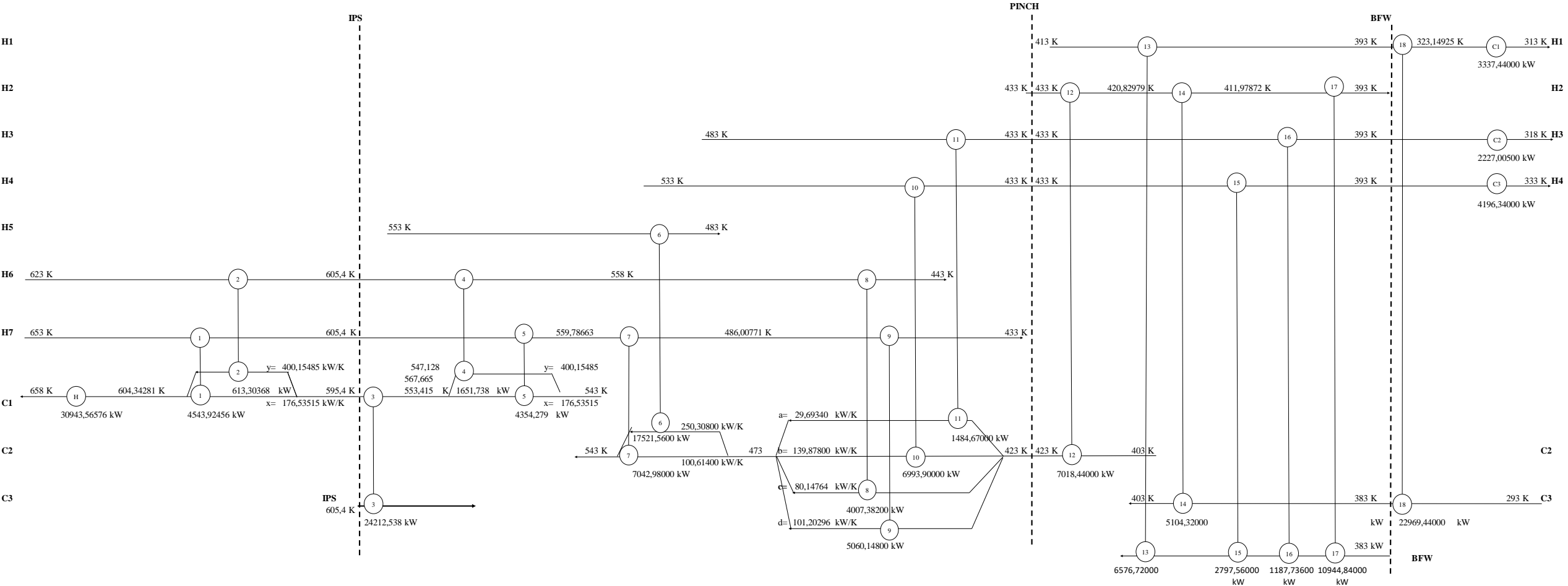
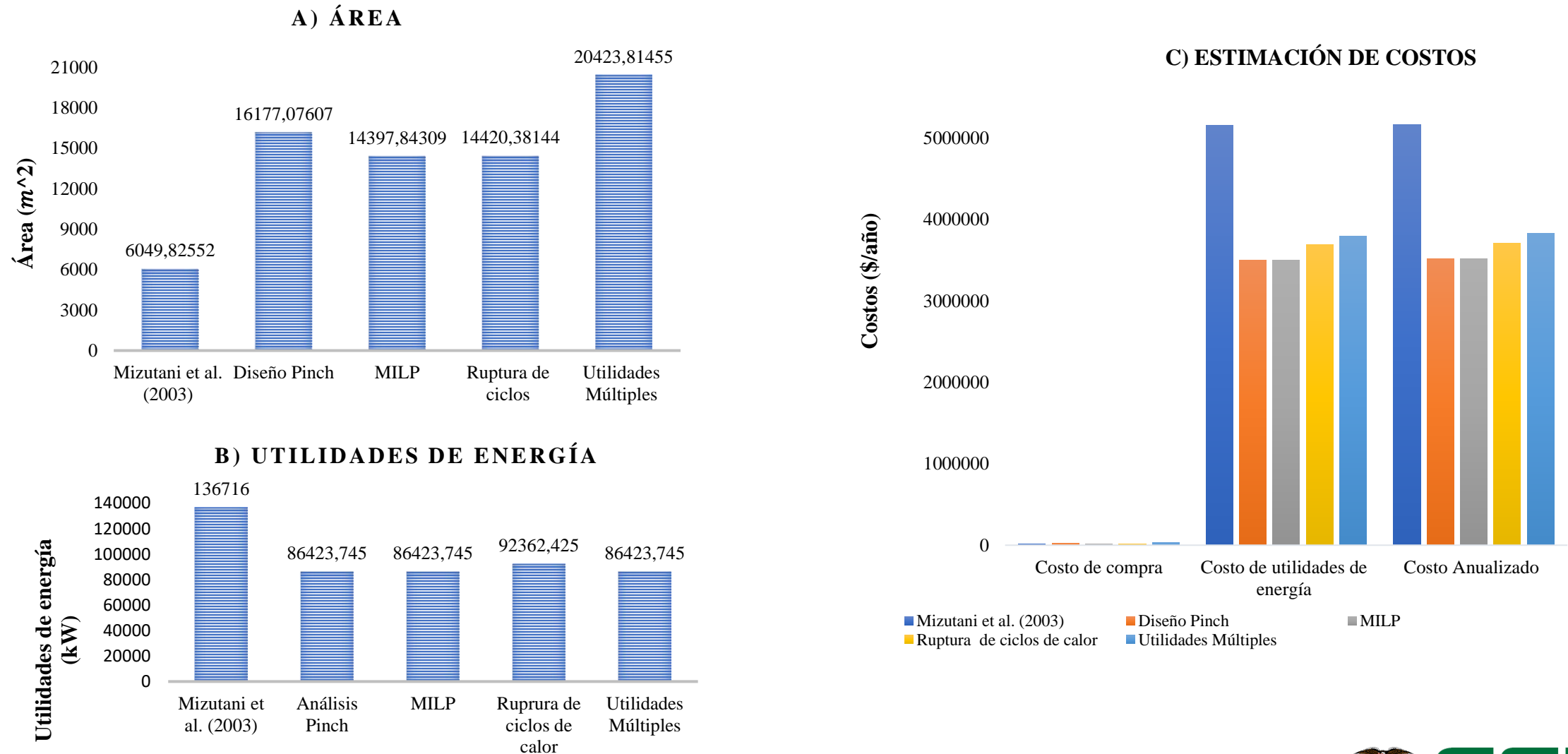


Figura 22. Estimación de Costos para el trabajo de Mizutani et al., (2003), diseño Pinch, MILP, Ruptura de Ciclos y Múltiples Utilidades.



INTRODUCCIÓN

DESARROLLO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CONCLUSIONES

- El análisis Pinch permitió identificar que los requerimientos de energía son menores a los utilizados en la literatura.
- En el presente estudio se observó que el método de análisis Pinch reduce en 31,27% la utilidad de calentamiento y en 44,61% la utilidad de enfriamiento en comparación con las utilidades de energía usadas por la literatura.
- El método de programación lineal de enteros mixtos reflejó mayor reducción en el costo total anualizado que el método de diseño Pinch, con reducciones de 31,94% y 31,92% respectivamente, en comparación con el costo anualizado de la red presentada en la literatura.
- La ruptura de ciclos de calor mostró la reducción de dos unidades de intercambiadores de calor en comparación con el número de intercambiadores de calor de la red resultante del Método de Diseño Pinch. Se evidenció una reducción del 28,18% en comparación al costo anualizado correspondiente a la red reportada en la literatura.



CONCLUSIONES

- El uso de múltiples utilidades de energía mostró la reducción de 49,67% en el costo anualizado en comparación al correspondiente con la red proporcionada en la literatura con utilidades de energía.
- En el presente trabajo fue observable que mientras mayor es la cantidad de utilidades de energía utilizada en el proceso, mayor es el costo anualizado para la red de intercambiadores de calor.
- Realizar las redes de intercambio de calor a partir de análisis Pinch garantiza la recuperación máxima de calor y el uso mínimo de utilidades de calentamiento y enfriamiento.
- Finalmente, la red que mostró mayor reducción en los costos de operación en comparación con la red reportada en la literatura fue la red obtenida mediante el método de programación lineal de enteros mixtos, con la cual se evidenció la disminución de 1650855,971 \$/año.



RECOMENDACIONES

- Realizar la red de intercambiadores de calor con utilidades múltiples mediante el método de Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP).
- Usar el método de resolución GRG no lineal y Evolutionary para resolver problemas de programación lineal de enteros mixtos mediante Solver de Microsoft Excel.
- Emplear Matlab o GAMS para la resolución de la Formulación MILP mediante el método de análisis Pinch.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chemical Engineering. (2020, marzo 20). Recuperado 16 de marzo de <https://www.chemengonline.com/2019-chemical-engineering-plant-cost-index-annual-average/>

Linnhoff, B., & Hindmarsh, E. (1982). The pinch design method for heat exchanger networks. *Advanced Materials Research*, 38, 745-763. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.512-515.1253>

Mizutani, F. T., Pessoa, F. L. P., Queiroz, E. M., Hauan, S., & Grossmann, I. E. (2003). Mathematical programming model for heat-exchanger network synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Network synthesis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(17), 4019-4027. <https://doi.org/10.1021/ie020965m>

Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., & Widagdo, S. (2009). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation* (Tercera ed). United States of America: John Wiley and Sons.

Sieniutycz, S., & Jezowski, J. (2013). *Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells* (Second Edi). Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=wMX-e6Sk1ZAC&pg=PA602&dq=chen+approximation+of+the+log+mean+temperature&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiO__OP1KbvAhUlq1kKHdKuBBwQ6AEwAXoECAQQA#v=onepage&q=chen approximation of the log mean temperature&f=false



GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA