



Diseño de una Red de Intercambiadores de Calor para optimizar los costos de operación

Revelo Cuatin, María Fernanda

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención
del título de Petroquímica

Tuza Alvarado, Pablo Vinicio, D. Sc.

12 de abril del 2021

Latacunga



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el Trabajo de Unidad de Integración Curricular, “**Diseño de una Red de Intercambiadores de Calor para optimizar los costos de operación**” fue realizado por la señorita **Revelo Cuatin, María Fernanda** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, abril del 2021



Firmado electrónicamente por:

**PABLO VINICIO
TUZA
ALVARADO**

.....
Tuza Alvarado, Pablo Vinicio, D. Sc.

C. C.: 1104063241



Urkund AnalysisResult

AnalysedDocument: Tesis_Maria_Revelo.pdf
(D101433005)

aprobado.pdf (D54403984) Submitted: 4/13/2021 2:26:00 AM

SubmittedBy: pvtuza@espe.edu.ec

Significance: 0 %

Sources included in the report:



Firmado electrónicamente por:

**PABLO VINICIO
TUZA ALVARADO**

.....
Tuza Alvarado, Pablo Vinicio, D. Sc.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Revelo Cuatin, María Fernanda** con cédula de ciudadanía n° **1003922927**, declaro que el contenido, ideas y criterios del Trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Diseño de una Red de Intercambiadores de Calor para optimizar los costos de operación”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, abril del 2021



.....
Revelo Cuatin, María Fernanda

C.C.: 1003922927



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Revelo Cuatin, María Fernanda**, con cédula de ciudadanía n° **1003922927**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el Trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Diseño de una Red de Intercambiadores de Calor para optimizar los costos de operación”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, abril del 2021

.....
Revelo Cuatin, María Fernanda

C.C.: 1003922927

DEDICATORIA

A Dios, a mi madre y hermano

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría cuando pensaba que no podía seguir adelante, a mi madre por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria y a mi hermano menor por su ternura y cariño en los momentos de alegría y tristeza.

A mi familia por estar presentes en todos los momentos importantes de mi vida, por sus consejos y motivaciones.

A mis amigos y amigas con quienes compartí momentos inolvidables e hicieron llevadero el camino universitario especialmente a Roger que se convirtió en una persona muy importante en mi vida, quién con su optimismo y carisma me ayudó a llegar hasta este punto.

A mi tutor de proyecto PhD. Pablo Tuza por su constante apoyo, sus conocimientos y su tiempo brindado a lo largo de la realización de este proyecto.

Tabla de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Reporte de urkund	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Tabla de contenidos	8
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Resumen	14
Abstract	15
Introducción	16
Antecedentes	16
Planteamiento del problema	18
Justificación e importancia.....	19
Objetivos	23
<i>Objetivo general</i>	23
<i>Objetivos específicos</i>	23
Hipótesis	24
Variables de investigación	24
Variables independientes.....	24
Variables dependientes	24
Fundamentación teórica	25
Intercambiadores de calor	25
Red de intercambiadores de calor	26

Método de intervalo de temperatura (IT).....	29
Análisis Pinch	31
Método de diseño Pinch	32
Programación lineal de enteros mixtos (MILP)	33
Restricciones para la programación de enteros mixtos	34
Intervalos de temperatura	36
Número mínimo de intercambiadores de calor	37
Ciclos de calor.....	38
Múltiples utilidades	39
Gran curva compuesta (GCC).....	41
División de corrientes	43
Excel.	44
Solver.....	45
Metodología experimental.....	47
Introducción.....	47
Identificación de flujos del proceso y datos termodinámicos.....	48
Temperatura Pinch y requerimientos mínimos energía.....	50
Método de intervalo de temperatura	50
Diseño Pinch	55
Programación Lineal de Enteros Mixtos	55
Eliminación de ciclos de calor.....	56
Múltiples utilidades	56
Costo de la red de intercambiadores de calor	56
Costo de compra de los intercambiadores de calor.....	56
Costo de utilidades	62
Vapor (s)	62
Agua de enfriamiento (CW)	63
Costo de múltiples utilidades	63

Vapor de presión intermedia (ips).....	63
Agua de alimentación a la caldera (bfw).....	63
Costo anualizado <i>CA</i>	64
Resultados y discusiones	65
Requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento y temperatura Pinch	65
Red de intercambiadores de calor con cumple con los objetivos de MER.	65
Método de diseño Pinch.....	65
Programación lineal de enteros mixtos	71
Reducción del número de intercambiadores de calor mediante ruptura de bucles calor.....	90
Múltiples utilidades	98
Vapor de presión intermedia ips.....	99
Agua de entrada a la caldera (bfw).	102
Conclusiones y Recomendaciones	113
Conclusiones.....	113
Recomendaciones.....	115
Bibliografía	116
Anexos	122

Índice de tablas

Tabla 1. Utilidades de energía usados en la investigación del complejo petroquímico ..	41
Tabla 2. Datos de las corrientes.....	49
Tabla 3. Propiedades físicas de las corrientes	50
Tabla 4. Temperaturas ajustadas.....	51
Tabla 5. Requerimientos mínimos de energía y temperatura Pinch	54
Tabla 6. Factores del material de construcción de la carcasa y los tubos	60
Tabla 7. Factor de longitud del tubo	61
Tabla 8. Valores de C de la corriente C1.....	68
Tabla 9. Comparación de costos entre la red de la literatura y la red de diseño Pinch. .	70
Tabla 10. Temperaturas de entrada y salida de las corrientes y utilidades.....	71
Tabla 11. Temperaturas ajustadas para los intervalos de temperatura	72
Tabla 12. Temperaturas ajustadas ordenadas en orden descendente	73
Tabla 13. Corrientes que interactúan en cada intervalo	74
Tabla 14. Calor disponible de las corrientes calientes en cada intervalo	78
Tabla 15. Calor que receptan las corrientes frías en cada intervalo	79
Tabla 16. Variables binarias.....	80
Tabla 17. Calor mínimo que las corrientes pueden absorber o suministrar	82
Tabla 18. Vínculo entre las variables binarias y las variables continuas.....	83
Tabla 19. Coincidencias encontradas entre las corrientes calientes, frías y utilidades ..	86
Tabla 20. Comparación de costos de la red de la literatura y la red con MILP	90
Tabla 22. Comparación de costos entre los diseños de red con utilidades múltiples...	108

Índice de figuras

Figura 1. Consumo de energía por sector en billones de BTU.....	20
Figura 2. Fuentes de energía primaria en Ecuador en 2016.	21
Figura 3. Demanda de energía de uso final por sector en Ecuador en 2015.....	22
Figura 4. Estructura de un intercambiador de calor	25
Figura 5. Configuración de una red de intercambiadores de calor	26
Figura 6. Red de intercambiadores con cuatro corrientes y dos utilidades.....	38
Figura 7. Sistema cíclico de flujos de calor entre las corrientes	39
Figura 8. Diagrama de la gran curva compuesta	42
Figura 9. División de corrientes	44
Figura 10. Ventana de Solver	46
Figura 11. Cálculo del costo de compra de los intercambiadores de calor	57
Figura 12. Descomposición de las corrientes calientes y frías en el punto Pinch.....	66
Figura 13. Red de intercambiadores de calor mediante el diseño Pinch.....	69
Figura 14. Intervalos de temperatura para el método MILP	73
Figura 15. Ventana de Solver con los parametros del caso de estudio.....	85
Figura 16. Red de intercambiadores de calor obtenida por el método	89
Figura 17. Primer ciclo de calor en la red obtenida mediante diseño Pinch	92
Figura 18. Segundo ciclo de calor.....	94
Figura 19. Red de intercambiadores de calor final al eliminar los ciclos de calor	95
Figura 20. Diagrama de la gran curva compuesta	98
Figura 21. Red de intercambiadores de calor incluido la utilidad ips	101
Figura 22. Red de intercambiadores de calor incluido bfw en el lado frio del Pinch	104
Figura 23. Red de intercambiadores de calor con múltiples utilidades.....	105
Figura 24. Red repostada en la literatura con Múltiples Utilidades.....	106

Figura 25. (a) Área total de la red, (b) utilidades de energía y (c) costos109

Resumen

El constante agotamiento de los recursos energéticos fósiles y los crecientes efectos del cambio climático han llevado a las industrias química y petroquímica de todo el mundo a tomar conciencia del uso racional de la energía. El análisis Pinch propone una red de intercambiadores de calor óptima que permite la máxima recuperación de energía (MER) de un proceso químico y un uso mínimo de servicios de energía. En el presente trabajo se desarrolló la optimización de una red de intercambiadores de calor reportada en la literatura mediante el Método de Diseño Pinch, el Método de Programación Lineal de Enteros Mixtos, la Ruptura de Ciclos de Calor y el Uso de Múltiples Utilidades. Este procedimiento se aplicó con el propósito de identificar la red con el menor valor de costo operacional. Los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento obtenidos mediante el Método de Intervalo de Temperatura presentan 36,78% menos que las utilidades de energía usadas en la literatura. La ruptura de ciclos de calor eliminó dos Intercambiadores de calor, sin embargo, aumentó la cantidad de las Utilidades de Energía debido a que ocasiona flujos de calor a través de Pinch. Las Utilidades Múltiples disminuyeron las utilidades de energía y aumentaron el número de Intercambiadores de Calor. El Costo Total Anual de la red obtenida mediante el Método MILP y el Método de Diseño Pinch muestran reducciones de 31,94% y 31,92% respectivamente del correspondiente reportado en la literatura.

Palabras clave:

- **MÉTODO PINCH**
- **RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR**
- **PROGRAMACIÓN LINEAL DE ENTEROS MIXTOS (MILP)**
- **RECUPERACIÓN MÁXIMA DE ENERGÍA (MER)**

Abstract

The constant depletion of fossil-based energy resources and the increasing effects of climate change have led the chemical and petrochemical industries worldwide to become aware of the rational use of energy. The Pinch analysis proposes an optimal heat exchanger network that enables maximum energy recovery (MER) from a chemical process and minimal use of energy utilities. In this work, a Heat Exchanger Network (HEN) reported in the literature was optimized by means of the Pinch Design, the Mixed-Integer Linear Programming (MILP), the Heat Loops Breaking Method and Multiple Utilities. It was performed to identify the network with the lowest operational cost. The minimum heating and cooling requirements achieved through Temperature Interval Method was equal to 36,78% less than the energy utilities used for the literature HEN. The Heat Loops Breaking Method eliminated two heat exchanger units; however, the amount of energy utilities is increased due to heat flow through Pinch point. Multiple Utilities decreases the energy utilities and increases the number of heat exchangers. The Total Annualized Cost from the HEN obtained by the MILP and Pinch Design method shows reductions of 31,94% and 31,92%, respectively, when compared with that from the literature.

Key words:

- **PINCH DESIGN**
- **HEAT EXCHANGERS NETWORK**
- **MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING (MILP)**
- **MAXIMUM ENERGY RECOVERY (MER)**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La implementación de tecnologías que permitan la recuperación de energía en procesos químicos comenzó a tener mayor énfasis en la década de 1970 a raíz de la primera crisis energética (Ravagnani & Caballero, 2007). La síntesis de redes de intercambiadores de calor representa una importante avance ya que permite aprovechar el calor de las corrientes calientes para calentar las corrientes frías del mismo proceso que se encuentren por debajo de la temperatura de las corrientes calientes y de esta manera disminuir el uso de utilidades de calentamiento y enfriamiento (Ciric & Floudas, 1990). La integración de calor se ha vuelto un tema de gran relevancia en las industrias petroquímicas porque permite la recuperación máxima de energía. Además, en el proceso de hacer coincidir las corrientes calientes y frías se puede encontrar un gran número de posibles configuraciones (Floudas, Ciric, & Grossmann, 1986).

Ravagnani & Caballero (2007) informan que en los últimos 40 años se han presentado varios artículos con diferentes métodos de síntesis de red de intercambiadores de calor óptimas. Las investigaciones realizadas proporcionaron énfasis en la recuperación de energía mediante el uso mínimo de utilidades de calentamiento y enfriamiento, el número mínimo de unidades de intercambio de calor y la reducción de contaminación resultado de la combustión de fuentes de energía origen fósil. Las investigaciones del análisis Pinch y programación matemática han logrado ser el enfoque primordial en la optimización de costos operativos en las industrias y así

mismo han experimentado grandes mejoras a lo largo de los años por varios investigadores (Rathjens & Fieg, 2019).

Linnhoff & Hindmarsh (1982) establecieron los objetivos mínimos de utilidades de calentamiento y enfriamiento y la temperatura Pinch mediante el análisis Pinch que se deriva de leyes termodinámicas y heurísticas que le permitan obtener una red de intercambiadores de calor óptima que generalmente logra un ahorro del 20 al 30% de energía, sin embargo, este método implica el uso de una gran cantidad de tiempo básicamente porque las conexiones entre las corrientes son realizadas a base de prueba y error y cuando se involucran más corrientes se vuelve tedioso y difícil de resolver. Papoulias & Grossmann (1983) plantearon el método de programación lineal que permite encontrar coincidencias entre las corrientes calientes y frías de manera mecánica sin requerir mayor esfuerzo incluso cuando se aborda problemas apegados a la realidad que demandan el uso de un gran número de corrientes en el proceso. Este método integra el uso mínimo de utilidades de calentamiento y enfriamiento y se enfoca en obtener la mínima cantidad de unidades de transferencia de calor.

La revista *Industrial & Engineering Chemistry Research* publicó una investigación donde se propuso un modelo de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) que permite diseñar redes de intercambiadores de calor con el diseño minucioso de los intercambiadores de coraza y tubo minimizando, el costo total de los equipos y las utilidades de calentamiento y enfriamiento. Sin embargo, en este estudio no se toma en cuenta la temperatura Pinch por lo que probablemente no se está obteniendo una red que cumpla con los requerimientos del mínimo de calentamiento y enfriamiento, por ende, se espera que los costos de operación sean relativamente altos.

Además esta investigación presenta dos errores de tipeo, el primer error se encuentra a red del ejemplo 3 (figura 3) en la temperatura de salida de la corriente H2, y el segundo error en el costo total de operación que da un total de 5183.221 \$/año y no el valor que reporta esta investigación (Mizutani, Pessoa, Queiroz, Hauan, & Grossmann, 2003).

Es importante mencionar que la revista científica *Industrial & Engineering Chemistry Research* es una revista estadounidense con un factor de impacto de 3.573 (*Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021).

1.2 Planteamiento del problema

Las redes de intercambiadores de calor se usan en gran escala en las en las industrias de derivados de petróleo, porque permiten el intercambio de calor entre las corrientes del proceso que se encuentran a diferentes temperaturas. El método Pinch logra identificar los requerimientos mínimos de las utilidades de calentamiento y enfriamiento y reduce el costo de operación (EL-Temtamy & Gabr, 2012).

El presente trabajo es una extensión del trabajo realizado por Mizutani et al. (2003), en el artículo de estudio se dan las temperaturas de entrada y salida de 3 corrientes frías y 7 calientes y su respectivo flujo másico, los costos y las temperaturas de entrada y salida de las utilidades de calentamiento y enfriamiento, y además se dan las propiedades físicas como viscosidad densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica. El presente trabajo tiene como objetivo determinar el diseño óptimo de la red de intercambiadores de calor para este conjunto de corrientes mediante el análisis Pinch que permite determinar los objetivos mínimos de energía, además se implementará la programación lineal de enteros mixtos que permite tener un diseño acertado y eficiente considerando los objetivos de MER, así también se incluirá el uso

de múltiples utilidades y la reducción del número de intercambiadores de calor mediante ruptura de ciclos de calor para cumplir con el objetivo de reducir los costos de operación y de esta manera poder comparar los costos de las redes obtenidas con la red de la literatura.

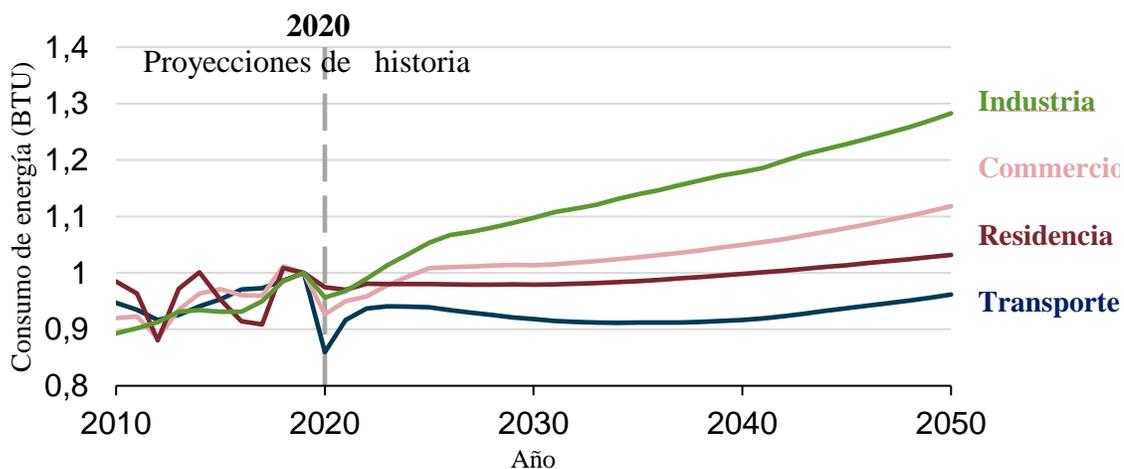
1.3 Justificación e importancia

De acuerdo con Huang, Al-mutairi, & Karimi (2012) “la importancia de reducir el consumo energético deriva del agotamiento de los recursos energéticos no renovables, la creciente demanda de energía, las estrictas regulaciones ambientales , los alarmantes cambios climáticos, la creciente competencia internacional y la globalización del mercado”. Se estima que el consumo de energía aumentara alrededor del 50% a nivel mundial entre 2018 y 2050, en donde el sector industria es el mayor consumidor de energía primaria y tiene la tendencia a aumentar en más del 30 % del 2018 al 2050 (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2019). El mayor aumento de consumo energético por parte del sector industrial se presenta en los países que no forman parte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en donde crece más del 1% por año entre los cuales se encuentran los países de América del Sur. En 2020, EE. UU presento una disminución del 7% del consumo total de energía en comparación al 2019 debido a la paralización del comercio a nivel mundial a causa de la pandemia de COVID-19 (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2021a). Sin embargo, el EIA estima que para el 2025 el consumo de energía por parte de las industrias volverá a los niveles del 2019 e incluso se prevé que aumente el doble que otros sectores de consumo energético, Figura 1 (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2021b) .

Además, el progresivo aumento del cambio climático ha agudizado la importancia de la eficiencia energética a nivel mundial. En 2019 las emisiones relacionadas con la energía alcanzaron un total de 38 gigatoneladas que representa un aumento del 0,9% de emisiones de CO₂ en comparación con el 2018 (EU Science Hub, 2020). En este contexto la eficiencia energética apunta a la reducción de las emisiones del CO₂ y de esta manera mitigar los efectos del cambio climático.

Figura 1

Consumo de energía por sector en billones de unidades térmicas británicas.



Nota: Consumo de energía por sector a nivel mundial. Tomado de Annual Energy Outlook, por U.S. Energy Information Administration (EIA), 2021b.

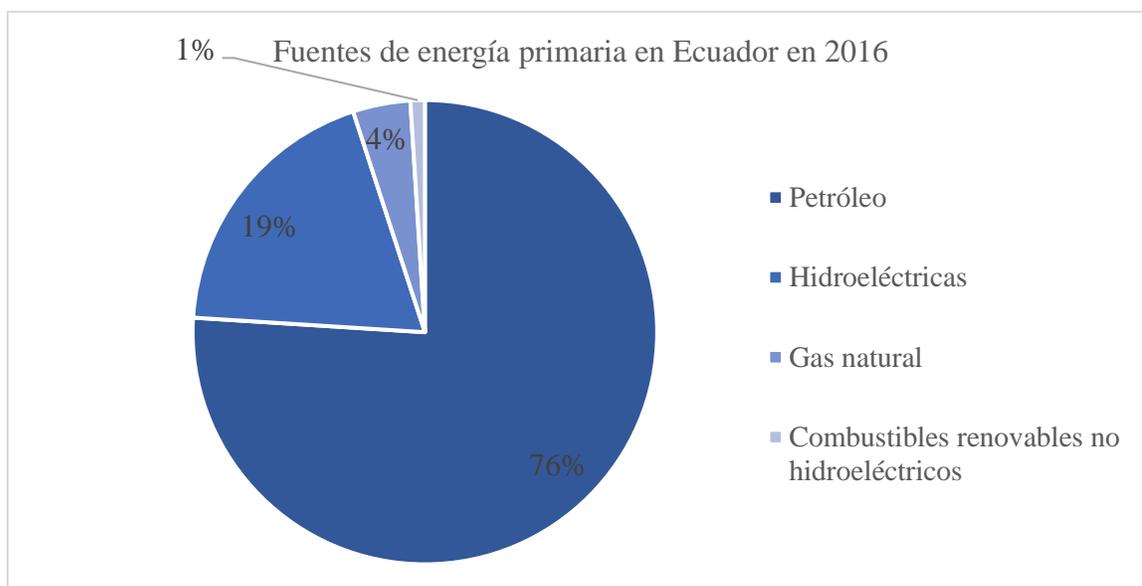
En el informe realizado por la administración de información energética por sus siglas en inglés (EIA) se puede constatar que, en el caso del Ecuador, en el año 2016 el 76% de la energía primaria se obtuvo del petróleo, el 19% de hidroeléctricas y el porcentaje restante es representado por el gas natural y los combustibles renovables no hidroeléctricos como se puede observar en la Figura 2 (International - U.S. Energy

Information Administration (EIA), 2017). Por tanto, la matriz energética del Ecuador depende principalmente de los hidrocarburos fósiles.

La demanda de energética en Ecuador incrementó 71% en el periodo del año 2000 al 2015, de los cuales el 19% pertenece al sector industrial siendo este el segundo sector con mayor demanda de energía como se puede observar en la Figura 3 (Delgado, 2016).

Figura 2

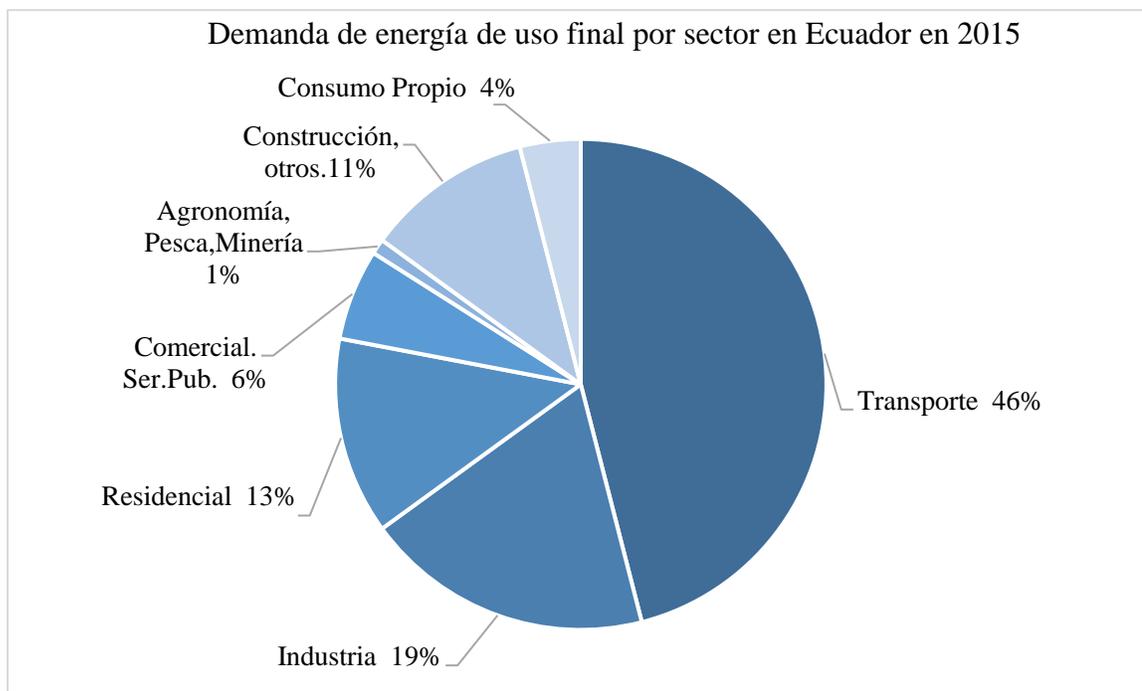
Fuentes de energía primaria en Ecuador en 2016.



Nota: Fuentes de energía primaria en Ecuador en 2016. Tomado de Total Primary Energy Consumption in Ecuador por International - U.S. Energy Information Administration (EIA), 2017.

Figura 3

Demanda de energía de uso final por sector en Ecuador en 2015.



Nota: Demanda de energía por sector en Ecuador. Tomado de Balance Energético Nacional del Ministerio coordinador de sectores estratégicos, por D. Delgado, 2016.

Generalmente las industrias químicas y petroquímicas son las áreas que mayormente requieren de recuperación de calor ya que cada vez muestran un mayor crecimiento en muchos países como Cuba, por ejemplo, los ingenios azucareros, las plantas de procesos industriales entre otras aplicaciones son las que se incluyen en la optimización de calor (Reyes, Moya, & Cruz, 2014). En la actualidad en Ecuador la industria petrolera y la Agroindustria, por ejemplo, los ingenios azucareros, son las que presentan mayor consumo de energía debido a los procesos de calentamiento, evaporación y condensación que aplican para obtener el producto, por ende, es indispensable realizar una integración de calor para optimizar los recursos energéticos,

en donde se puede aplicar el Diseño de Redes de intercambio de calor mediante el Método Pinch. El presente trabajo es una aplicación de dicho Método, el cual propone mejorar la eficiencia energética y disminuir los costos de operación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseño de una red de intercambiadores de calor de un conjunto de corrientes calientes y frías reportadas en la literatura.

1.4.2 Objetivos específicos

- Colectar información de corrientes calientes y frías reportadas en la literatura para determinar los requerimientos mínimos de energía mediante el método de intervalo de temperatura.
- Síntesis de 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.

1.5 Hipótesis

¿El uso del Método Pinch en la optimización de redes de intercambiadores de calor permitirá obtener menores costos en comparación con los costos reportados en la literatura para un mismo conjunto de corrientes calientes y frías?

1.6 Variables de investigación

1.6.1 Variables independientes

Número de Intercambiadores de Calor y Utilidades de Energía

1.6.2 Variables dependientes

Costo de compra, costo de utilidades de energía y costo total anual.

CAPÍTULO II

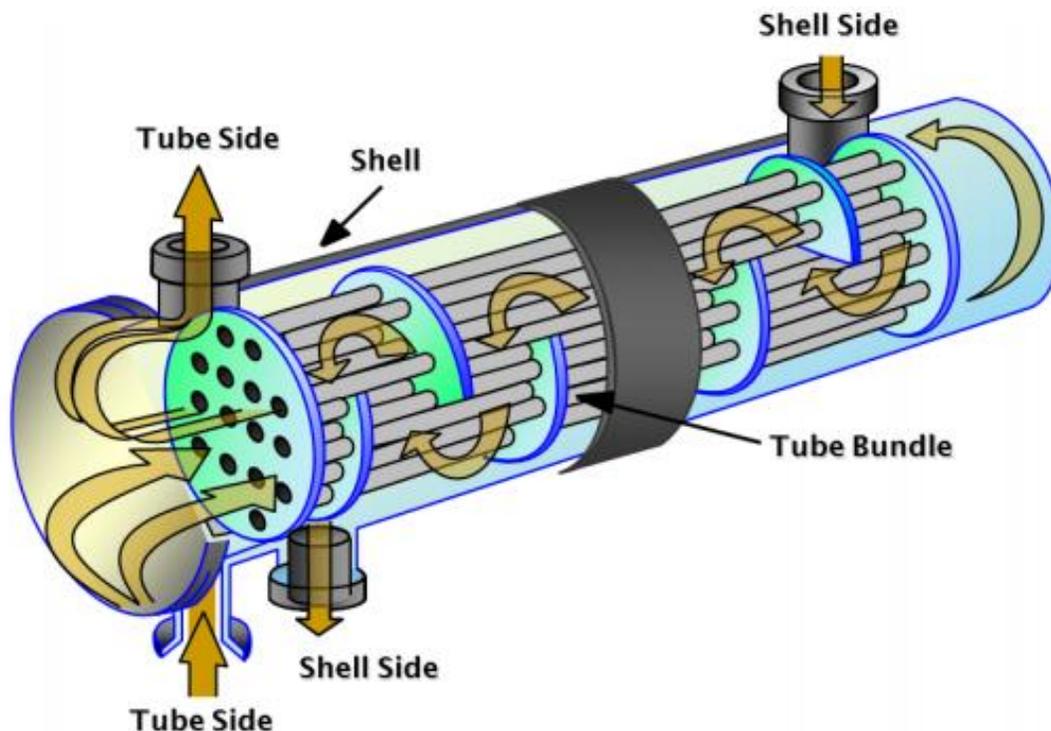
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos utilizados para transferir energía térmica entre un fluido caliente y un fluido frío. Son ampliamente utilizados en procesos industriales ya que permiten calentar o enfriar una corriente mediante el uso de un fluido exterior, también permiten generar vapor o condensar una corriente del proceso como se puede observar en la Figura 4 (Kakac, Liu, & Pramuanjaroenkij, 2020).

Figura 4

Estructura de un intercambiador de calor.



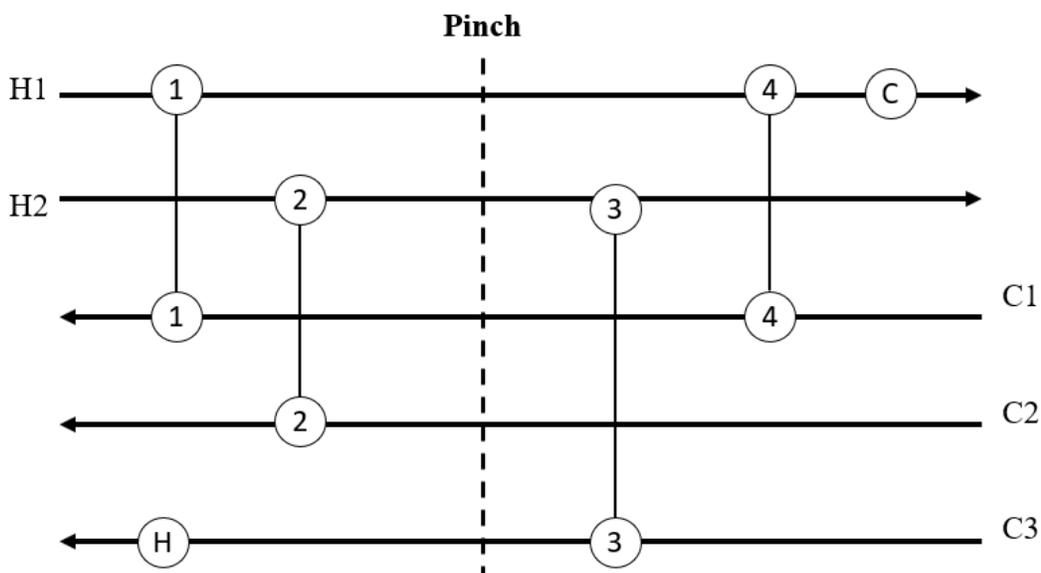
Nota: Estructura del intercambiador de calor de carcasa y tubo. Tomado de Intercambiadores de calor de C&T, por J. Tirenti, 2016, Arveng Training & Engineering.

2.2 Red de intercambiadores de calor

La red de intercambiadores de calor tiene como objetivo situar correctamente los intercambiadores dentro del proceso que permitan el aprovechamiento de las corrientes calientes y frías de la planta industrial para intercambiar calor entre ellas y disminuir el uso de fuentes externas, como se puede observar en la Figura 5. Los intercambiadores de calor son muy utilizados en industrias químicas, petroquímicas y procesos de integración de calor (Linnhoff & Hindmarsh, 1982).

Figura 5

Configuración de una red de intercambiadores de calor.



Nota: Diagrama de la red de intercambiadores de calor. Tomado de *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

En la actualidad las refinerías de petróleo han optado por modernizar sus técnicas de manufactura para tener mayor competitividad en el mercado con tecnología que permitan disminuir el consumo de energía y por ende el impacto ambiental. Las columnas de destilación de crudo son unidades que mayor consumo de energía tienen en una refinería, en este contexto se ha implementado el tren de precalentamiento de crudo antes de ingresar a la columna de destilación, el cual consiste en dos etapas, en la primera etapa a través de la red de intercambiadores de calor se calienta el crudo a temperatura intermedia mediante el intercambio de calor con las corrientes calientes de destilado que van hacer enfriadas, en la segunda etapa el crudo que sale la red ingresa al horno para llevarlo a la temperatura objetivo en donde el consumo de combustible será mínimo dado que el crudo ha sido calentado previamente aprovechando el calor de las corrientes calientes. La investigación se ha centrado en datos reales de una gran corporación nacional que tiene como objetivo optimizar las redes de intercambiadores de calor mediante la tecnología Pinch para mejorar la eficiencia energética de las columnas de destilación de crudo, con los ajustes realizados se logró ahorrar 56,8 MMBtu/h de combustible para hornos lo que equivale a 1,8 MMCFD (millones de pies cúbicos estándares diarios) de una planta que procesa 325000 barriles por día de petróleo crudo que contiene 65% de crudo liviano y 35% de crudo pesado (Kamel & Noureldin, 2013).

Las fábricas azucareras británicas y europeas comenzaron a implementar los diseños de optimización de energía en 1990 debido a los grandes avances que se iban presentando en cuanto a la integración de calor en ese periodo, la fábrica de azúcar procesa 2400 toneladas de remolacha al día y consume 5 kg de carbón por cada 100 kg de remolacha. Para el proceso de cristalización de azúcar se requiere calentar las

corrientes que contienen el jugo y el almíbar de remolacha con vapor a través de una red de intercambiadores de calor. La modernización de las azucares combinando el análisis Pinch con los evaporadores para optimizar la energía en las redes de intercambio de calor, estos ajustes logran aumentar la capacidad de procesamiento a 3500 toneladas de remolacha al día ahorrando aproximadamente 29% de energía, además se obtuvo azúcar de mejor calidad con mayor rendimiento (Urbaniec, Zalewski, & Zhu, 2000), por cuanto se logra constatar que la optimización de redes de intercambiadores mediante el análisis Pinch es una investigación de mucho provecho en la actualidad.

Li, Liu, Tao, & Li (2011) aplicaron la tecnología Pinch junto con la integración de calor para optimizar de la recuperación de calor en la industria de papel. La investigación arrojó que se puede obtener mayor recuperación de energía en el área de secado, el calor recuperado normalmente era de 4821,6 kJ/s, con la de esta tecnología la recuperación de calor aumento a 9973,1 kJ/ y se logra un ahorro de 2,3% de vapor fresco.

El procesamiento de azúcar y la destilación de alcohol son las principales actividades que generan ingresos económicos en Brasil, por ende, demanda de mucha energía, así también sería uno de los principales responsables de la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmosfera. Ensinas, Nebra, Lozano, & Serra (2007) presentaron un estudio donde se analizó una planta de azúcar y etanol típica de Brasil, este estudio demostró que integración de la red de intercambiadores de calor pueden disminuir drásticamente los requerimientos de vapor y por ende la demanda de

energía, y de esta manera se obtendrá mayor cantidad de bagazo de caña que se le puede dar otros usos como materia prima para general etanol o combustible adicional.

2.3 Método de intervalo de temperatura (IT)

La ubicación del punto Pinch se da a través del método de intervalo de temperatura, este método permite además identificar los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento mediante un procedimiento sistemático dada la mínima diferencia de temperatura que permite la transferencia de calor (ΔT_{min}). El método de intervalo de temperatura se fundamenta en balances de entalpía. (Linnhoff & Flower, 1978).

Seider et al. (2009) señala que el método de intervalo de temperatura requiere conocer los valores del calor específico que debe ser constante para todas las corrientes, los flujos másicos y las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes. Además, indica que este método se desarrolla en 5 pasos:

- Ajustar las temperaturas iniciales en torno a ΔT_{min} , a las temperaturas de entrada y salida de las corrientes calientes se le resta ΔT_{min} y temperaturas de las corrientes frías se mantienen de manera que cuando se produzca el intercambio de calor se cumpla con la diferencia mínima de temperatura.
- Ordenar las temperaturas ajustadas en orden decreciente e ignorar las temperaturas repetidas, definir los intervalos de temperatura con cada par de las temperaturas ordenadas.
- Identificar todas las corrientes presentes dentro de cada intervalo, de temperatura para realizar el balance entalpía, es decir, la diferencia entre de la

energía que liberan las corrientes calientes y la energía que absorben las corrientes frías.

$$Q_i = \Delta H_i = (\sum C_H - \sum C_C)_i (T_o - T_f)_i \quad \text{Ec. 1}$$

Donde ΔH_k es la diferencia de entalpia, C es el producto del calor específico y el flujo másico tanto para las corrientes calientes C_H y las corrientes frías C_C , entonces, $\sum C_H$ es la sumatoria de C de las corrientes calientes y $\sum C_C$ es la sumatoria de C de las corrientes frías en cada intervalo, k, además T_o y T_f corresponde a las temperaturas inicial y final del intervalo.

- Realizar la cascada de calor mediante los residuos de cada intervalo, los residuos generados en cada intervalo se pasan al siguiente intervalo de menor temperatura, en primera instancia no se asume el uso de una utilidad, es decir, $Q_0 = 0$.

$$Q_{rk} = Q_0 + Q_k \quad \text{Ec. 2}$$

$$Q_{rk+1} = Q_{k-1} + Q_{k+1} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde Q_{rk} es el calor residual en el intervalo k, cuando $Q_0 = 0$, la cascada presenta valores negativos que hace referencia a un déficit de calor.

- Eliminar el déficit mediante el suministro de calor de fuentes externas a temperaturas altas, para ello se selecciona el menor valor negativo de la columna de los residuos de calor y el valor absoluto se coloca en el intervalo cero, Q_0 , para realizar la segunda cascada que se llamará calor residual ajustado, dicha cascada proporciona los valores mínimos de calentamiento y

enfriamiento en los extremos superior e inferior respectivamente. El flujo de calor que de cero en esta cascada se denomina punto Pinch.

La Máxima Recuperación de Energía (MER) tiene como objetivo determinar los mínimos requerimientos de utilidades de calentamiento y enfriamiento para sintetizar una red con la menor cantidad de unidades y de esta manera optimizar los costos de operación y disminuir el consumo de energía, los objetivos del MER se obtienen a través de método de intervalo de temperatura a partir de las temperaturas de origen y objetivo de las corrientes frías y calientes (Seider et al., 2009).

2.4 Análisis Pinch

El análisis Pinch es una herramienta que incluye los principios termodinámicos ampliamente utilizados en la industria para maximizar la eficiencia energética a través de la identificación del punto Pinch. La primera ley determina los cambios de entalpia que ocurre en los intercambiadores de calor y la segunda ley direcciona los flujos de calor, es decir, de caliente a frío siempre que se cumpla con el gradiente mínimo de temperatura. Considerando el conjunto de corrientes calientes y frías que intercambiarán calor el punto Pinch es el intervalo de temperaturas donde no existe intercambio de calor. El análisis Pinch comprende dos etapas, la primera etapa determina los requerimientos mínimos de energía a partir del punto Pinch y la segunda es el diseño de la red de intercambiadores de calor óptima que permite minimizar el costo de inversión (Sun, Wan Alwi, & Manan, 2013).

2.4.1 Método de diseño Pinch

El diseño de la red de intercambiadores de calor a partir del de Pinch tiene como objetivo obtener una red con la menor cantidad de unidades y el mínimo consumo de utilidades de energía. El método de diseño consiste en dividir las corrientes calientes y frías en la temperatura Pinch de tal forma que se obtenga dos subredes para que el costo de los las utilidades de energía sea mínimo, una por encima del Pinch y otra por debajo de la temperatura Pinch. La instalación de los intercambiadores de calor inicia desde el Pinch hacia fuera para evitar problemas futuros (Linnhoff & Hindmarsh, 1982).

La instalación de los primeros intercambiadores de calor desde el Pinch hacia fuera debe ser tal que la diferencia de temperatura en cada extremo del intercambiador sea mayor o igual al ΔT_{min} . Se tiene un cruce de temperatura cuando la temperatura de la corriente fría es mayor que la temperatura de la corriente caliente, lo cual puede ocurrir, como indicador por la segunda ley de la termodinámica. Las unidades de calentamiento y enfriamiento se colocan al final, la energía requerida en estos dispositivos debe coincidir con los requerimientos de calentamiento y enfriamiento de modo que se cumpla con el análisis Pinch. Sobre el Pinch no se usa utilidades frías y debajo del Pinch no se usa utilidades calientes (Seider et al., 2009).

Linnhoff & Hindmarsh (1982) sugiere tres criterios de viabilidad para determinar las coincidencias acordes al uso mínimo de utilidades de energía. Los tres criterios son:

1. El número de corrientes calientes y frías debe permitir un intercambio de calor adecuado que sea afín con el uso mínimo de utilidades.
 - En el lado caliente debe contener una coincidencia por cada corriente caliente, para ello se debe dividir las corrientes para mantener la desigualdad $N_H \leq N_C$.

- En el lado frío ocurre lo inverso, debe existir una coincidencia por cada corriente fría, por lo que es necesario dividir las corrientes para cumplir con la desigualdad $N_H \geq N_C$.
2. La desigualdad de C y lo que de ahora en adelante llamaremos la regla del C garantiza que no exista infracciones en la temperatura de aproximación, si la regla del C no se cumple es necesario dividir las corrientes y por ende dividir el C.
- En el lado caliente del Pinch el emparejamiento de las corrientes se realiza de modo que se cumpla con la desigualdad $C_C \geq C_H$.
 - En el lado frío del Pinch sucede lo contrario el emparejamiento de las corrientes se realiza de modo que se cumpla con la desigualdad $C_H \geq C_C$.

Estas desigualdades son válidas únicamente cerca del Pinch, cuando se aleja del Pinch podrá omitir la regla del C.

3. La diferencia de Cp permite identificar coincidencias de manera anticipada, sin embargo, dichos emparejamientos coinciden en las subredes del lado caliente y frío y muestra cierta dificultad al emparejar en la red global.

Diferencia de Cp:

- Lado caliente del Pinch *Diferencia* $C_p = C_{pC} - C_{pH}$
- Lado frío del Pinch *Diferencia* $C_p = C_{pH} - C_{pC}$

Para la realización del presente trabajo se enfocó en los criterios 1 y 2 que son los criterios que se utilizó en el libro Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation (Seider et al., 2009).

2.5 Programación lineal de enteros mixtos (MILP)

Papoulias & Grossmann (1983) propusieron el modelo de trasbordo de programación lineal de enteros mixtos que permite la síntesis de una red de

intercambiadores de calor con el menor número de coincidencias entre las corrientes calientes y las corrientes frías, es decir, logra una red con el mínimo número de intercambiadores de calor mientras cumple con los requerimientos mínimos utilidades de energía públicos garantizando la reducción en el costo de inversión.

La programación lineal de enteros mixtos es un método sistemático que da paso a la optimización de un problema de integración de calor mediante la minimización de la función objetivo que depende de la modificación de dos tipos de variables, las que pueden tomar cualquier valor denominadas variables continuas y las variables binarias que toman valores de 0 y 1, estas variables están sujetas a restricciones que permiten cumplir el objetivo. Las variables binarias indican si existe coincidencia o no (Grossmann, 1985). Este método permite visualizar coincidencias que a simple vista no se puede detectar lo cual lo hace muy eficiente al momento de optimizar redes de intercambiadores de calor.

2.5.1 Restricciones para la programación de enteros mixtos

La función objetivo es la suma de todas las coincidencias que se pueden dar entre las corrientes calientes y las corrientes frías. Dichas coincidencias se identifican con las variables binarias. Si existe coincidencia se indica el valor de uno, caso contrario es cero Ec.4. La primera restricción (Ec.5) representa los balances de energía de las corrientes calientes en cada uno de los intervalos, es decir, es la suma entre el calor que las corrientes calientes intercambian con las corrientes frías en un intervalo más el residuo que se genera en ese intervalo menos el residuo generado en el intervalo anterior es igual al calor disponible de la corriente caliente en ese intervalo. La segunda restricción indica que la suma del calor que las corrientes calientes intercambian con las

corrientes frías en un intervalo es igual al calor que recepta la corriente fría en el mismo intervalo, Ec.6. La tercera restricción (Ec.7) establece un vínculo entre las variables binarias y las variables continuas que permitan tener una coincidencia exacta. U_{ij} elige el mínimo valor entre el calor máximo que la corriente caliente libera y el calor máximo que es capaz de absorber la corriente fría, ya que la sumatoria de calor que se transfiere entre dos corrientes en todos los intervalos de temperatura no debe exceder el mínimo de calor que es cedido por la corriente caliente o es receptada por la corriente fría. La Ec.8 representa las restricciones de no negatividad para el calor residual y para el calor que se transfiere entre las corrientes calientes y frías y delimita la variable binaria, y la restricción cinco (Ec.9) establece que los residuos de calor iniciales y finales son iguales a cero (Seider et al., 2009).

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij} \quad \text{Ec. 4}$$

$$R_{ik} - R_{ik-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{ijk} = Q_{ik}^H, \quad i \in H_k, \quad k = 1, \dots, \quad \text{Ec. 5}$$

$$\sum_{i \in H_k} Q_{ijk} = Q_{ik}^C, \quad j \in C_k, \quad k = 1, \dots, K \quad \text{Ec. 6}$$

$$\sum_k Q_{ijk} - y_{ij} U_{ij} \leq 0, \quad i \in H, \quad i \in C \quad \text{Ec. 7}$$

$$R_{ik} \geq 0, \quad Q_{ijk} \geq 0, \quad y_{ij} \in 0,1 \quad \text{Ec. 8}$$

$$R_{i0} = R_{ik} = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

i : índice de corriente caliente.

j : índice de corriente fría

k : índice de intervalo.

y_{ij} : es la variable binaria, 1 cuando hay conciencia y 0 cuando no existe coincidencia.

w_{ij} : es el factor de ponderación de las coincidencias.

R_{ik} : es el residuo de calor en la corriente caliente.

R_{ik-1} : es el calor residual del intervalo anterior.

Q_{ijk} : es el calor que intercambian la corriente caliente y la corriente fría en el intervalo k .

Q_{ik}^H : es el calor que se encuentra disponible en el intervalo k de la corriente caliente.

Q_{ik}^C : es el calor que recepta la corriente fría en el intervalo k .

U_{ij} : es el mínimo entre el calor máximo que libera la corriente caliente y el calor máximo que puede absorber la corriente fría.

Para que las variables binarias sean 0 o 1 se agrega tres restricciones adicionales, dos restricciones de desigualdad (Ec.10) y la restricción de enteros (Ec.11) (Londoño & Boada, 2017).

$$y_{ij} \geq 0, y_{ij} \leq 1 \quad \text{Ec. 10}$$

$$y_{ij} = \text{int} \quad \text{Ec. 11}$$

2.5.2 Intervalos de temperatura

Los intervalos de temperatura para el método de programación lineal se obtienen con las temperaturas de entrada de las corrientes calientes y frías. Además, en este método también se toma en cuenta las temperaturas de las utilidades calientes, el ΔT_{min} se resta a las corrientes calientes y se suman a las corrientes frías para formar los intervalos de temperatura, entonces los intervalos quedan separados por ΔT_{min} . Es importante definir las corrientes que interactúan en cada intervalo para que al momento

de realizar los balances de energía se identifiquen fácilmente ya que son la base para la estructuración del MILP (Seider et al., 2009).

2.6 Número mínimo de intercambiadores de calor

Según Seider et al. (2009) se puede obtener una red de intercambiadores de calor satisfactoria partiendo de la red que cumple con la máxima recuperación de calor mediante la eliminación de ciclos de calor y división de corrientes. Sin embargo, la reducción de los intercambiadores de calor a menudo aumenta los requerimientos mínimos de energía debido a que los flujos de calor atraviesan el Pinch.

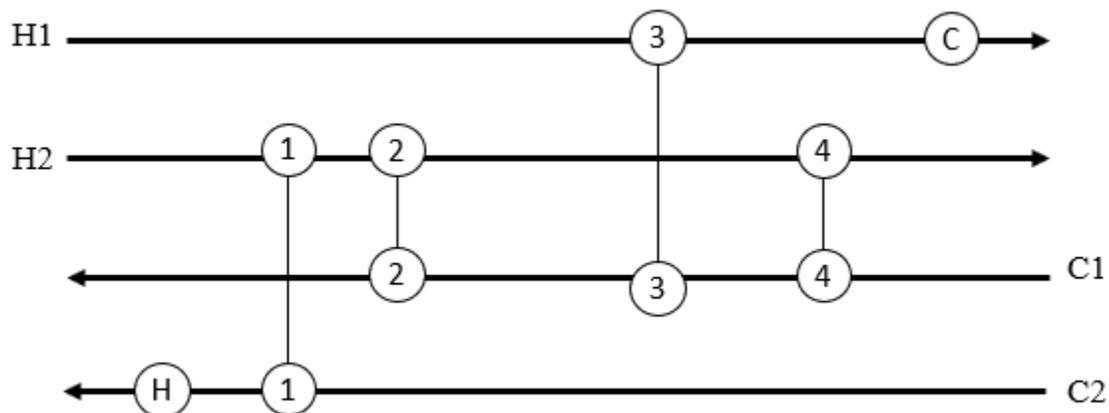
El mínimo número de intercambiadores de calor $N_{HX,min}$ es el número total de corrientes N_s más el número total de utilidades calientes y frías N_U menos 1 (Ec.12). También se puede decir que el número mínimo de intercambiadores de calor es la suma de los intercambiadores mínimos encima del Pinch y debajo del Pinch, por ejemplo, para la red de la Figura 6 que tiene cuatro corrientes y dos utilidades se obtiene $N_{HX,min} = 5$, después de eliminar el ciclo de calor existente entre los Intercambiadores de Calor 2 y 4 (Seider et al., 2009).

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

Ec. 12

Figura 6

Red de intercambiadores con cuatro corrientes y dos utilidades.



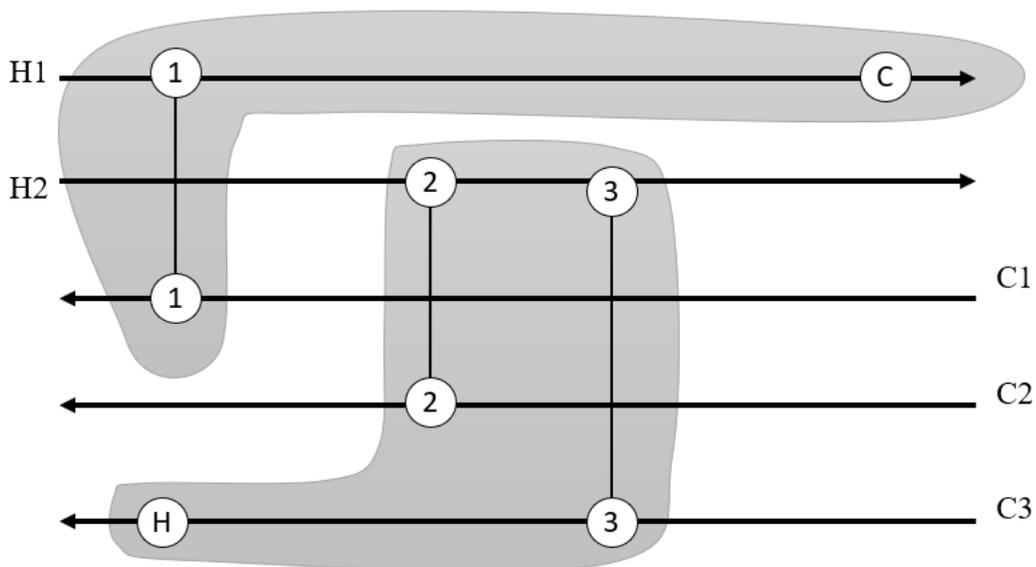
Nota: Red de intercambiadores de calor. Tomado de Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

2.7 Ciclos de calor

En las redes de intercambiadores de calor que cumplen con los objetivos mínimos de energía se encuentran bucles de calor, es decir, sistemas cíclicos de flujo de calor entre algunas corrientes como se puede observar en la Figura 7. Para reducir el número de intercambiadores de calor es necesario que exista una ruptura del ciclo de calor. Luego de identificar el ciclo de calor se elimina el intercambiador de calor pequeño en donde se transfiere menor valor de calor, ya que resulta menos costoso aumentar el área de un intercambiador grande en comparación con el correspondiente para un intercambiador de calor pequeño. La ruptura del ciclo de calor trae consigo el aumento de las utilidades de energía ya que el ajuste de las nuevas cargas al eliminar un intercambiador de calor generalmente arrastra a un flujo de calor a través del Pinch (Seider et al., 2009).

Figura 7

Sistema cíclico de flujos de calor entre las corrientes.



Nota: Ciclos de calor. Tomado de *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

2.8 Múltiples utilidades

El uso de utilidades ayuda a reducir los costos de operación total ya que son utilidades de energía externas que permiten aprovechar el exceso de calor o la demanda excesiva de calor para calentar o enfriar las corrientes del proceso. Se puede utilizar fuentes alternativas de utilidad como vapor de alta presión (hps), presión intermedia (ips) y presión baja como utilidades de energía calientes para compensar los requerimientos mínimos de calentamiento por encima del Pinch y agua de alimentación de calderas (bfw) o agua de enfriamiento (cw) como utilidades de energía frías para satisfacer el requerimiento mínimo de enfriamiento por debajo del Pinch. Las cargas

óptimas para las múltiples utilidades que permiten cumplir con los requerimientos mínimos localizados en el análisis Pinch se realiza mediante la gran curva compuesta (Shenoy, Sinha, & Bandyopadhyay, 1998).

En las plantas petroquímicas se usa vapor de presión alta de medios externos cuando el vapor de presión intermedia o alta generado en la planta de proceso no satisface la demanda de la misma. Cuando el vapor generado en la planta supera la demanda se combina con el vapor generado en las calderas en donde se obtiene vapor de presión baja y electricidad que se puede usar en la planta (Zhang & Hua, 2007). En la investigación realizada por Tarighaleslami et al. (2017) utiliza ocho servicios públicos como se puede observar en la Tabla 1, para una empresa petroquímica que consta de 8 sub plantas con 60 corrientes en total, el uso de dichas utilidades de energía permite obtener las temperaturas objetivo de las corrientes calientes y frías.

Tabla 1

Utilidades de energía usados en la investigación del complejo petroquímico.

Nombre de la utilidad	Tipo de utilidad	Temperatura de suministro (°C)	Temperatura objetivo (°C)	Rango de presión (bar g)
Ciclo de aceite caliente	Caliente	390	365	
V. a muy alta presión (VHPS)	Caliente	320	319,9	65
V. a alta presión (HPS)	Caliente	250	249,9	15
V. de presión media (MPS)	Caliente	190	189,9	9
Vapor a presión baja (LPS)	Caliente	140	139,9	5
Agua templada (TW)	Fría	60	90	
Agua de refrigeración (CW)	Fría	15	301	
Agua helada (ChW)	Fría	8	13	

Nota: Utilidades de energía. Tomado de A Unified Total Site Heat Integration targeting method for isothermal and non-isothermal utilities, por A. Tarighaleslami, T. Walmsley, M. Atkins, M. Walmsley, P. Liew, & J. Neale, 2017, *Energy* 119, 10-25.

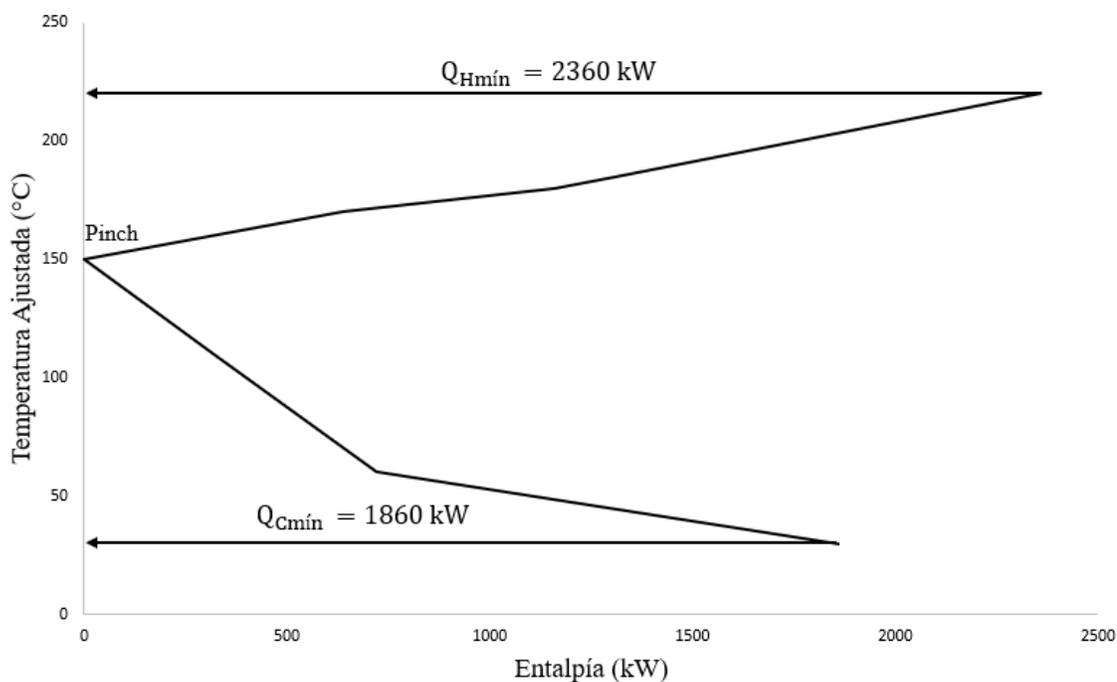
2.8.1 Gran curva compuesta (GCC)

La gran curva compuesta también conocida como diagrama de excedentes de calor se utiliza para estimar la cantidad de calor que se recupera con cada utilidad fría o caliente. El GCC se logra a partir de la tabla de datos del método de intervalo de temperatura, el diagrama de excedentes de calor se obtiene graficando las temperaturas ajustadas de las corrientes calientes y frías versus el calor residual ajustado (ver Figura 8). Los residuos de calor que se encuentran en el intervalo superior

e inferior representan los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamientos respectivamente y el punto donde se interseca la curva con el eje vertical es el punto Pinch. (Fraser, Howe, Hugo, & Shenoy, 2005).

Figura 8

Diagrama de la gran curva compuesta.



Nota: Gran Curva Compuesta. Tomado de Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

La gran curva compuesta ayuda a utilizar mejor los recursos de utilidad cuando se diseña la red de intercambiadores de calor, el uso de utilidades requiere de un diseño complejo ya que se debe incluir un Pinch por cada utilidad utilizada además del

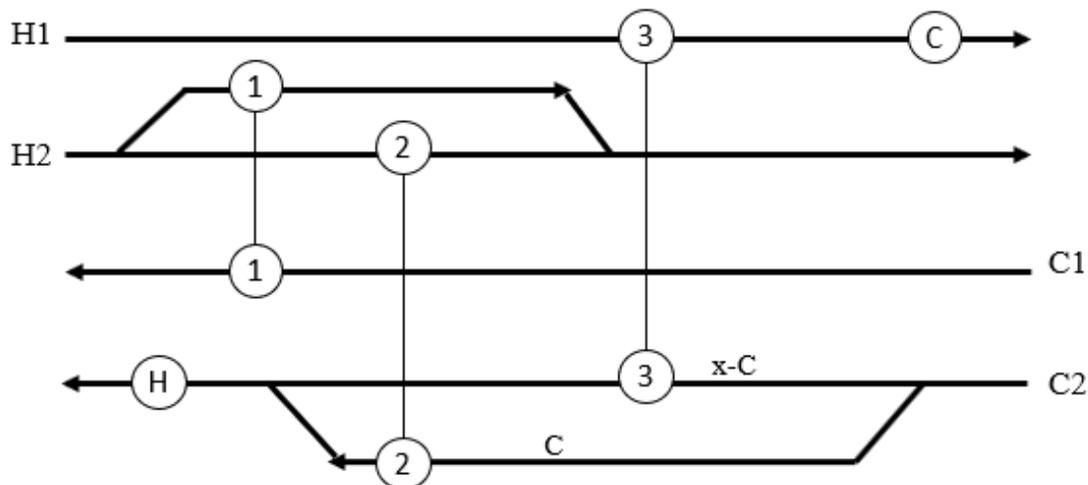
Pinch general (Seider et al., 2009), es decir, existirán tres Pinch si se utiliza agua de alimentación de caldera y vapor de presión intermedia como utilidades.

2.9 División de corrientes

La división de corrientes se realiza cuando el número de corrientes frías es diferente a las corrientes calientes o viceversa. Cuando la cantidad de corrientes calientes exceden el número de corrientes frías se dividen las corrientes frías hasta igualar el número de corrientes calientes y cuando las corrientes frías exceden el número de las corrientes calientes se parten las corrientes calientes hasta igualar el número de corrientes frías. Estas divisiones se realizan con el objetivo de que todas las corrientes puedan emparejarse. La división de corriente permite reducir la cantidad de intercambiadores de calor manteniendo los objetivos del MER. Para partir una corriente se debe tener en cuenta que la regla del C antes mencionada se cumpla, dado que cuando se divide una corriente el valor de C cambia. El nuevo valor de C se calcula mediante el balance de energía de la corriente partida (Ec.13) y de esta manera se asegura que la división cumpla con el ΔT_{\min} (Seider et al., 2009). En la Figura 9 se puede observar un ejemplo de la división de corrientes.

$$Q = C(T_{sal} - T_{ent})$$

Ec. 13

Figura 9*División de corrientes.*

Nota: División de Corrientes. Tomado de Product and Process Design Principles:

Synthesis, Analysis and Evaluation, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

2.10 Excel

Excel es un programa que cuenta con hojas de cálculo que permiten realizar cálculos de una manera rápida y eficiente ya que tiene incorporado diferentes fórmulas y funciones matemáticas y estadísticas que permiten resolver problemas extensos de manera sistemática. Este programa informático es el más utilizado debido a que se puede realizar desde trabajos contables hasta gráficos que parten de un grupo de datos numéricos (Herrerías, 2005).

2.10.1 Solver

El solucionador Solver de Excel permite encontrar de manera rápida y óptima una solución a un problema dado, Solver busca el valor máximo, mínimo o el valor exacto de una función objetivo sujeta a varias restricciones mediante la modificación de las celdas de variables. Esta herramienta permite resolver fácil y rápidamente modelos de optimización tan grandes como los que se encuentra en mundo real aplicando menos esfuerzo. En la ventana de parámetros de Solver como se puede observar en la Figura 10 se encuentra el campo de la función objetivo, la cual debe ser una celda que contenga una fórmula que involucre las celdas variables, más abajo se encuentra las opciones para maximizar (máx.), minimizar (mín.) o agregar valor de acuerdo a la función objetivo, también se encuentra el campo donde se agregan las celdas variables y el campo de las restricciones de las cuales depende la función objetivo. En el campo de método de resolución se encuentran tres métodos, GRG Nonlinear, LP Simplex y el método Evolutionary (Abdelwali, Swilem, Shiaty, & Murad, 2019).

Figura 10

Ventana de Solver.

The image shows the 'Parámetros de Solver' (Solver Parameters) dialog box in Excel. The window title is 'Parámetros de Solver' with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections:

- Establecer objetivo:** A text box for the objective function, with an upward arrow button to the right.
- Para:** Three radio buttons: 'Máx' (selected), 'Mín', and 'Valor de:'. The 'Valor de:' option has a text box containing the number '0'.
- Cambiando las celdas de variables:** A text box for the variable cells, with an upward arrow button to the right.
- Sujeto a las restricciones:** A large empty text box for constraints, with a list of action buttons to its right: 'Agregar', 'Cambiar', 'Eliminar', 'Restablecer todo', and 'Cargar/Guardar'.
- Convertir variables sin restricciones en no negativas:** A checked checkbox.
- Método de resolución:** A dropdown menu currently set to 'GRG Nonlinear', with an 'Opciones' button to its right.
- Método de resolución:** A text box containing the following text: 'Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.'

At the bottom of the dialog, there are three buttons: 'Ayuda', 'Resolver' (highlighted with a blue border), and 'Cerrar'.

La herramienta Solver de Excel cambia los valores de las variables mediante iteraciones de tal forma que cumplan con las restricciones impuestas hasta obtener el resultado deseado en la función objetivo, el programa deja de iterar cuando ha llegado a la solución óptima, esta herramienta permite la solución de modelos de optimización lineales, lineales enteros y no lineales (Londoño & Boada, 2017).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

La optimización de redes de intercambio de calor se realizó mediante el software Microsoft® Excel 2016 y la herramienta Solver que se encuentra en dicho programa. Los problemas de Solver lineales se resuelven mediante el método Simplex LP.

El método Simplex LP encuentra la solución óptima de un problema lineal mediante dos fases (Edgar, Himmelblau, & Lasdon, 2001):

- Fase 1: Encuentra la solución básica factible inicial en concordancia con las restricciones impuestas en el caso de que exista de lo contrario indica que no existe y el problema no tiene solución.
- Fase 2: Usa la solución inicial encontrada en la fase 1 como punto de partida para maximizar o minimizar la solución.

El proceso para la reducción de los costos de operación se realizó mediante investigación bibliográfica.

En el presente trabajo primero se obtuvieron los requerimientos mínimos de energía y la temperatura Pinch mediante el método de intervalo de temperatura para diseñar la red de intercambiadores de calor. La síntesis de la red de intercambiadores de calor se realizó a través de dos métodos, el método de diseño Pinch y el método de programación lineal de enteros mixtos (MILP). A continuación, partiendo de la red que cumple con los objetivos de MER se diseñó la red de intercambiadores de calor

incluyendo múltiples utilidades y la red con el mínimo número se intercambiadores de calor mediante ruptura de ciclos de calor. Finalmente se realizó el análisis de costos para cada una de las redes obtenidas.

La metodología de desarrollo se divide en seis etapas, descritas a continuación:

1. Identificación de los flujos del proceso y datos termodinámicos.
2. Determinación de la temperatura Pinch y los requerimientos mínimos energía, mediante el método de intervalo de temperatura.
3. Diseño de la red de intercambiadores de calor que cumplan con los requerimientos del MER mediante el método de diseño Pinch y programación lineal de enteros mixtos.
4. Reducción del número de intercambiadores de calor mediante ruptura de bucles.
5. Diseño de la red de intercambiadores de calor incluyendo múltiples utilidades.
6. Cálculo de los costos de la red de intercambiadores de calor.

3.2 Identificación de flujos del proceso y datos termodinámicos.

Los datos termodinámicos y las propiedades físicas de las corrientes calientes y frías se obtuvieron del trabajo de investigación previo realizado por Mizutani et al. (2003). En la Tabla 2 se encuentran las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes y el flujo másico de las mismas. En la Tabla 3 se estipulan las propiedades físicas del proceso.

Tabla 2*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

Nota: Datos termodinámicos de las corrientes calientes y frías. Tomado de Mathematical programming model for heat-exchanger network synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Network synthesis, F. Mizutani, F. Pessoa, E. Queiroz, S. Hauan, & I Grossmann, 2003, Industrial and Engineering Chemistry Research.

Tabla 3*Propiedades físicas de las corrientes.*

Propiedad física	Valor
Viscosidad (kg/m s)	2,4x10 ⁻⁴
Densidad (kg/m³)	634
Capacidad calorífica (J/kg K)	2454
Conductividad térmica (W/m K)	0,114

Nota: Propiedades físicas de las Corrientes calientes y frías. Tomado de Mathematical programming model for heat-exchanger network synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Network synthesis, F. Mizutani, F. Pessoa, E. Queiroz, S. Huan, & I Grossmann, 2003, Industrial and Engineering Chemistry Research.

3.3 Temperatura Pinch y requerimientos mínimos energía

3.3.1 Método de intervalo de temperatura

Para la ubicación del punto Pinch y la determinación de los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento se empleó el método de intervalo de temperatura. Como primer paso se ajustó las temperaturas de entrada y salida de cada una de las corrientes en función del valor ΔT_{\min} . Se restó ΔT_{\min} a la temperatura de las corrientes calientes y se mantuvo constante la temperatura de las corrientes frías como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4*Temperaturas ajustadas.*

ΔT min	10	K	Temperatura Ajustada			
Corriente	m(kg/s)	C(kW/K)	T _{in} (K)	T _{out} (K)	T _{in} (K)	T _{out} (K)
H1	134	328,83600	413	313	403	303
H2	235	576,69000	433	393	423	383
H3	12,1	29,69340	483	318	473	308
H4	28,5	69,93900	533	333	523	323
H5	102	250,30800	553	483	543	473
H6	14,2	34,84680	623	443	613	433
H7	38,9	95,46060	653	433	643	423
C1	235	576,69000	543	658	543	658
C2	143	350,92200	403	543	403	543
C3	104	255,21600	293	403	293	403

A continuación, se determinó los intervalos de temperatura en los cuales fueron analizadas las temperaturas de cada una de las corrientes frías y calientes, para ello se ordenó las temperaturas ajustadas en orden descendente mediante la función de Excel K. ESIMO.MAYOR. Esta función ayuda a ordenar de manera jerárquica los valores de una matriz o lista de valores. K. ESIMO.MAYOR(**matriz,k**), el argumento matriz o rango es la lista de valores numéricos que se desea ordenar y el argumento k es la posición que desea obtener ya sea el primero, segundo, tercero, etc (Sánchez, 2010).

La sumatoria de C ($\sum(C_H - C_C)$) se determinó mediante el uso del de la función lógica =SI(Y(condición1; condición2); valor_si es verdadero; valor_si es falso) que

comparar dos o más condiciones diferentes y da el valor_si es verdadero cuando se cumplen todas las condiciones y el valor_si es falso cuando una de las condiciones no se cumple. Esta función lógica permite realizar comparaciones extensas de manera rápida y eficiente ya que el software compara todas las condiciones en un solo paso y da una respuesta sin errores. (Campos, 2008). Esta condición entonces permite comparar todas las corrientes frías y calientes y determinar cuál de estas se encuentra en el intervalo en análisis de acuerdo a las dos condiciones propuestas, la condición uno señala que el mayor valor de la temperatura del intervalo tiene que ser mayor a la temperatura menor de la corriente y la condición dos menciona que el menor valor de la temperatura del intervalo tiene que ser menor a la temperatura mayor de la corriente. Las corrientes que cumplen con estas dos condiciones son tomadas en cuenta en la sumatoria de C. Es importante mencionar que en las corrientes calientes se suman y en las corrientes frías se restan. En las corrientes que no se cumple una de las dos condiciones se suma el valor de cero.

Función lógica

$$= SI(Y(IT_{mayor} > T_{menor}; IT_{menor} < T_{mayor}); C_H; 0) + SI(Y(IT_{mayor} \dots \\ - SI(Y(IT_{mayor} > T_{menor}; IT_{menor} < T_{mayor}); C_C; 0) - SI(Y(IT_{mayor} \dots))$$

La entalpia se obtuvo multiplicando la sumatoria del calor específico $\sum(C_H - C_C)$ por la diferencia de temperatura del intervalo (ΔT) en cada uno de los intervalos, seguidamente se determinó los residuos de calor existente en cada intervalo mediante la cascada de calor, que es la suma acumulada de la entalpia, comenzando desde el valor correspondiente al intervalo de mayor valor de temperatura. En la primera cascada se obtienen residuos negativos, los cuales fueron eliminados en la siguiente cascada de

calor, sumando el valor absoluto del menor valor negativo de los residuos a la entalpía correspondiente al intervalo de temperatura mayor, obteniéndose la segunda cascada de calor, a la cual se le denominó calor residual ajustado (Linnhoff & Flower, 1978).

Según Seider et al. (2009) “para satisfacer la segunda ley de la termodinámica, todos los residuos negativos deben eliminarse porque el calor no puede fluir de un intervalo de temperatura baja a uno alto” (p. 256). Los valores superior e inferior de la segunda cascada proporcionaron los requerimientos de calentamiento y enfriamiento respectivamente, el calor residual con valor cero ($Q = 0$) representa el punto Pinch, para el menor valor de temperatura, que corresponde a la Temperatura del Pinch para las Corrientes Frías, y dicho valor, sumado el ΔT_{\min} , corresponde al Pinch para las Corrientes Calientes. Cabe enfatizar que en la temperatura del Pinch, tanto para las corrientes calientes, como también para las corrientes frías no existe intercambio de calor. El Pinch y la correspondiente temperatura para las corrientes frías se puede verificar en la Tabla 5.

Tabla 5*Requerimientos mínimos de energía y temperatura Pinch.*

Intervalos	$\Sigma(\text{CH-CC})$ (KW/K)	Q (KW/K)	0	55156,104000	QH mín.
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	Pinch
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	QC mín.

Una vez definidos los requerimientos mínimos de energía se realizó el diseño de la red de intercambiadores de calor. Para la síntesis de la red de intercambiadores de calor se empleó el Método de Intervalo de Temperatura, el cual se mejoró en términos de disminución de número de Intercambiadores de Calor, y la aplicación de Utilidades Múltiples. Adicionalmente, la síntesis de la Red de Intercambiadores de Calor se realizó mediante el Método de Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP). Cabe enfatizar que cuando el problema de optimización está estructurado para restricciones lineales y

una función objetivo de naturaleza lineal, la correspondiente formulación se denomina MILP (Seider et al., 2009).

3.4 Diseño Pinch

Para diseñar la red de intercambiadores de calor usando los resultados del Método de Intervalo de Temperatura primero se dividió las corrientes en dos subredes, una por encima de punto Pinch y la otra por debajo de este. Como segundo y último paso se procedió a colocar los intercambiadores de calor tomando en cuenta que se cumpla con la regla del C y el ΔT_{\min} desde el Pinch hacia los extremos de cada corriente (Seider et al., 2009).

3.5 Programación Lineal de Enteros Mixtos

Para diseñar la red de intercambiadores de calor mediante MILP se siguió los siguientes pasos:

1. Definir los intervalos de temperatura y las corrientes que interactúan en cada intervalo.
2. Establecer la función objetivo (Ec.4)
3. Realizar los balances de energía correspondientes a la restricción 1 (Ec.5)
4. Establecer la segunda y tercera restricción Ec,6 y Ec.7 respectivamente.
5. Colocar en la ventana de Solver de Microsoft Excel las restricciones, las variables binarias y continuas y la función objetivo para ejecutar el programa.
6. Finalmente, se procede a realizar la red de intercambiadores de calor con las coincidencias encontradas por Solver.

3.6 Eliminación de ciclos de calor

Para reducir el número de intercambiadores de calor de la red obtenida mediante el uso de los Resultados del Método de Intervalo de Temperatura, primero se identificaron los ciclos de calor presentes en la red y se procedió a eliminar dichos ciclos, para lo cual, se transfirió el calor del intercambiador de calor pequeño al de mayor tamaño y se recalculó las cargas y las temperaturas de entrada y salida de cada uno de los intercambiadores de calor teniendo en cuenta que se debe cumplir con la regla del C y el ΔT_{min} .

3.7 Múltiples utilidades

Para diseñar la red de intercambiadores de calor añadiendo utilidades múltiples primero se graficó la Gran Curva Compuesta (GCC) (ver Figura 8), la cual permitió definir las cantidades de calor que se recupera con cada utilidad fría o caliente. Finalmente, se realizó el diseño de la red de intercambiadores de calor. Cabe enfatizar que la red con múltiples utilidades consta de tres Pinch, el Pinch del proceso y un Pinch por cada utilidad.

3.8 Costo de la red de intercambiadores de calor

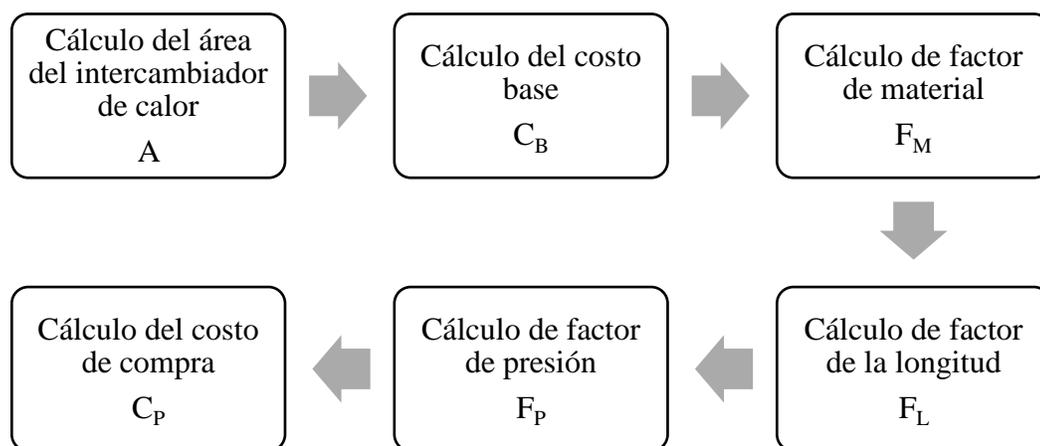
3.8.1 Costo de compra de los intercambiadores de calor

La investigación de Mizutani et al. (2003) utilizó intercambiadores de calor de carcasa y tubo e indica que por simplicidad supone un coeficiente de transferencia de calor global constante $U = \frac{444W}{m^2 K}$ y un paso por los tubos, por lo tanto, el factor de corrección de temperatura es $F_T = 1$.

El costo de los intercambiadores de calor se efectuó mediante el procedimiento indicado en Seider et al. (2009). El siguiente diagrama indica el procedimiento seguido para calcular el costo de compra de los intercambiadores de calor (ver Figura 11).

Figura 11

Proceso para el cálculo del costo de compra de los intercambiadores de calor.



El área se calculó mediante la ecuación

$$Q = UAF_T\Delta T_{LM} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde U es el coeficiente general de transferencia de calor, A es el área de transferencia de calor, F_T es el factor de corrección de temperatura y ΔT_{LM} es la fuerza impulsora media logarítmica de temperatura.

ΔT_{LM} se calculó mediante la aproximación de Chen (Ec.15) debido a que existen casos en que las diferencias de temperatura en los dos extremos del intercambiador de calor son iguales lo cual produce una indeterminación con la ecuación convencional (Sieniutycz & Jezowski, 2013).

$$\Delta T_{LM} = [\Delta T1 \Delta T2 0,5 (\Delta T1 + \Delta T2)]^{1/3} \quad \text{Ec. 15}$$

Se utilizó las ecuaciones para intercambiadores de calor de carcasa y tubo de cabezal fijo. Se utilizó este tipo de intercambiadores debido a que el costo de construcción de los intercambiadores de calor de cabezal fijo es relativamente bajo en comparación a los de cabezal flotante. Además, este tipo de intercambiadores permite reemplazar los tubos que se han dañado individualmente y se pueden usar con múltiples pasos de tubos (Mukherjee, 1998). El costo de compra C_B se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$C_B = \text{expo} \{11,0545 - 0,9228[\ln(A)] + 0,09861[\ln(A)]^2\} \quad \text{Ec. 16}$$

Seider et al. (2009) menciona que “las ecuaciones están realizadas para un caso base de tubos de acero al carbón de $\frac{3}{4}$ pulg a 1 pulg de diámetro exterior y 20 ft de longitud en carcasa de acero al carbono para usar con presiones de hasta 100 psig y se deben usar para áreas de 150 ft^2 a 12000 ft^2 ”.

Cuando el área sobrepasa el rango establecido por la ecuación del cálculo del costo, se usa intercambiadores de calor de dos o más pasos por la carcasa para dividir el área de modo que se encuentre dentro del rango debido a que los pasos por la carcasa simulan como varios intercambiadores en paralelo. El uso de intercambiadores con múltiples pasos por la carcasa varía el valor del factor de corrección de la temperatura (F_T). El valor de F_T debe ser menor a 1 y es conveniente que sea mayor a 0,85 debido que, si es menor a 0,75 es probable que se produzca cruce de

temperaturas. Este valor se encuentra en función de R y S como se puede ver en el Anexo 1 (Seider et al., 2009).

Se calculó R y S mediante las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{T_{hot\ in} - T_{hot\ out}}{T_{cold\ out} - T_{cold\ in}} \quad Ec. 17$$

$$S = \frac{T_{cold\ out} - T_{cold\ in}}{T_{hot\ in} - T_{cold\ in}} \quad Ec. 18$$

El factor de material se calculó mediante la siguiente ecuación (Seider et al., 2009):

$$F_M = a + \left(\frac{A}{100}\right)^b \quad Ec. 19$$

Donde a y b son los factores de material para la carcasa y los tubos respectivamente. En la Tabla 6 se indica los factores para los distintos tipos de materiales.

Tabla 6

Factores del material de construcción de la carcasa y los tubos para la Ec. 19.

Material de construcción	a (pulg)	b (pulg)
Carcaza/Tubo		
Acero Carbono/Acerro 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

Nota: Recuperado de Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

El factor de longitud depende de la longitud del tubo que se esté usando, los cuales se indican en la Tabla 7.

Tabla 7*Factor de longitud del tubo.*

Longitud del Tubo (ft)	F _L
8	1.25
12	1.12
16	1.05
20	1.00

Nota: Recuperado de Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, por W. Seider, J. Seader, D. Lewin, & S. Widagdo, 2009, John Wiley and Sons.

El factor de presión hace referencia a la presión en el lado de la carcasa y se calculó mediante la siguiente ecuación (Seider et al., 2009):

$$F_P = 0,9803 + 0,018 \left(\frac{P}{100} \right) + 0,0017 \left(\frac{P}{100} \right)^2 \quad \text{Ec. 20}$$

Esta ecuación se aplica para presiones de 100 hasta 2000 psig.

El costo de compra se obtuvo mediante la siguiente ecuación (Seider et al., 2009):

$$C_P = F_P F_M F_L C_B \quad \text{Ec. 21}$$

Estas ecuaciones están realizadas para un índice costo del año 20006 $CE = 500$, por ello es necesario llevarlo al índice de costo más actual. La revista Chemical Engineering publicó el índice de costo promedio anual actual del 2019 que fue de 607,5 como se puede ver en Anexo 2 (*Chemical Engineering*, 2020).

Se ajustó el costo de compra al índice de costo del 2019 mediante la siguiente ecuación (Seider et al., 2009):

$$C_{Pajustado} = C_P \frac{500}{607,5} \quad Ec. 22$$

3.8.2 Costo de utilidades

En la investigación presentada por (Mizutani et al., 2003) se dan los costos para el vapor y el agua de enfriamiento.

$$S_{costo} = 60 \$/kW \text{ año}$$

$$CW_{costo} = 6 \$/kW \text{ año}$$

3.8.2.1 Vapor (s)

Para calcular el costo de la utilidad de calentamiento se multiplicó el costo del vapor por la cantidad total de calor que se utilizó para calentar las corrientes frías, es decir, el requerimiento mínimo de calentamiento (Seider et al., 2009).

$$C_S = S_{costo} Q_{Hmin} \quad Ec. 23$$

3.8.2.2 Agua de enfriamiento (CW)

De la misma manera se calculó el costo del agua de enfriamiento, se multiplicó el calor extraído en los enfriadores por el precio de esta utilidad (Seider et al., 2009).

$$C_{CW} = CW_{costo} Q_{Cmin} \quad Ec. 24$$

3.8.3 Costo de múltiples utilidades

De acuerdo con Seider et al. (2009) el costos para el vapor de presión intermedia a 17,24 bar y 605,4 K es $ips_{costo} = 73,32 \$/kW$ estipulado en el ejercicio 9,20 y el costo para agua de alimentación a la caldera es $bfw_{costo} = 0,5 \$/m^3$ especificado en la Tabla 23,1 del mismo libro.

3.8.3.1 Vapor de presión intermedia (ips)

El costo de la utilidad ips se calculó mediante la multiplicación del costo por el calor que suministro el ips a las corrientes frías (Seider et al., 2009).

$$C_{ips} = ips_{costo} Q_{ips} \quad Ec. 25$$

3.8.3.2 Agua de alimentación a la caldera (bfw)

Para calcular el costo de la alimentación a la caldera se necesita la entalpia de vaporización y el volumen especifico, datos que se pueden encontrar en el Apéndice 1 Tabla A-4 del libro de Termodinámica como se puede ver en el Anexo 3 (Cengel & Boles, 2012).

$$\Delta H_V = 2229,7 \frac{kJ}{Kg}$$

$$V = 0,001052 \frac{m^3}{Kg}$$

El costo del agua de alimentación a la caldera se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$C_{bfw} = \frac{Q_{bfw} V_{bfw} \text{costo}}{\Delta H_V} \quad \text{Ec. 26}$$

3.8.4 Costo anualizado (C_A)

El costo total anual se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$C_A = i_m(C_{TCI}) + C \quad \text{Ec. 27}$$

Donde i_m es el retorno de la inversión anual, C_{TCI} es la inversión de capital anual y C es el costo anual de ventas. Sin embargo, para determinar la rentabilidad aproximada se debe tratar C_{TCI} como la suma total de los costos de compra de los intercambiadores de calor ignorando los costos de instalación y otros costos de inversión de capital y C como el costo total anual de las utilidades de energía (Seider et al., 2009).

El período considerado para el cálculo del costo total por año fue igual a 10 años, es decir, $i_m = 0,1$ como se indica en los ejercicios de capítulo nueve del libro "Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation" (Seider et al., 2009).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento y temperatura Pinch

Los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento obtenidos por el método de intervalo de temperatura para $\Delta T_{min} = 10 K$ son 55156,10400 kW y 31267,64100 kW respectivamente. Y la temperatura Pinch es 423 y 433 K.

Al comparar con la red de intercambiadores de calor obtenida por Mizutani et al. (2003) se observa que el análisis Pinch logra reducir 36,78% el uso de utilidades de energía, por lo tanto, se reduce el costo total de operación. La reducción de las utilidades de energía se da porque el análisis Pinch determina los mínimos requerimientos de utilidades de energía para obtener una red óptima.

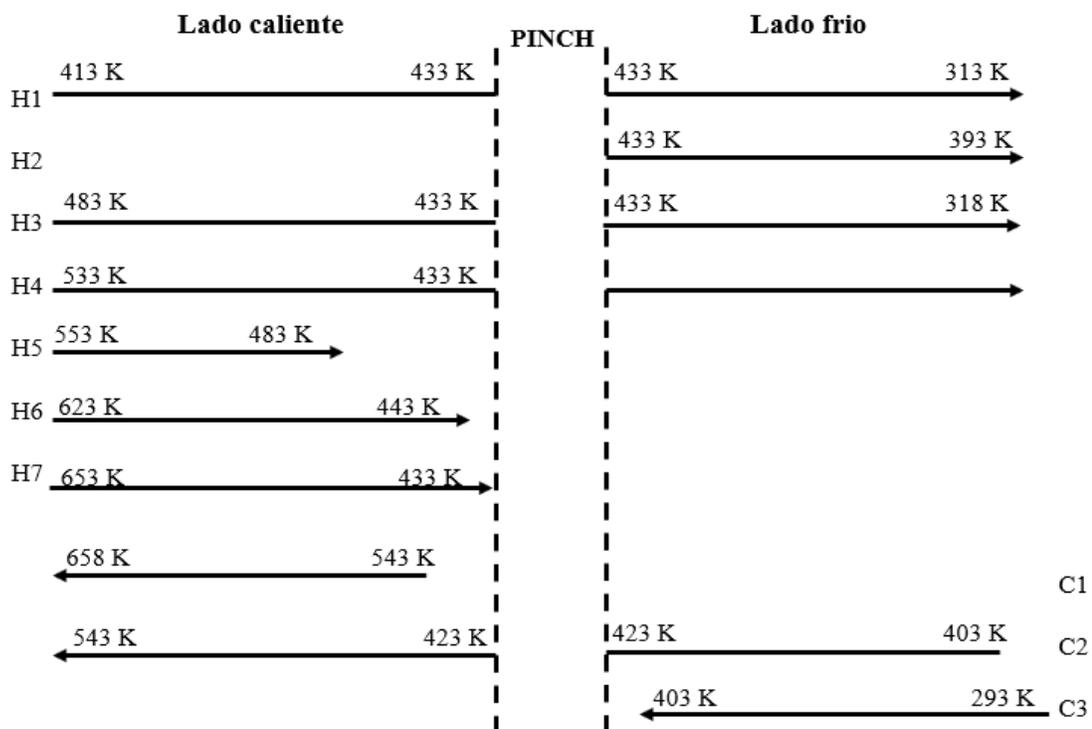
4.2 Red de intercambiadores de calor con cumple con los objetivos de MER.

4.2.1 Método de diseño Pinch.

Para el diseño de la red de intercambiadores usando los resultados del Método de Intervalo de Temperatura se procedió a descomponer las corrientes calientes y frías en la temperatura Pinch dado que para cumplir con los requerimientos del MER no existe transferencia de calor a través del Pinch, y se obtuvo dos diseños independientes de redes de intercambiadores de calor, en lado caliente del Pinch y en el lado frío del Pinch (Seider et al., 2009). Como se puede observar en la Figura 12.

Figura 12

Descomposición de las corrientes calientes y frías en el punto Pinch.



Se empezó a diseñar la red de intercambiadores de calor desde el Pinch hacia los extremos de las corrientes (Linnhoff & Hindmarsh, 1982). Inicialmente se partió la corriente C1 y se dividió dos veces la corriente C2 hasta igualar el número de Corrientes calientes, debido a que existe un exceso de estas, lo cual es indicado en la literatura (Seider et al., 2009), obteniéndose cinco corrientes frías y cinco corrientes calientes, seguidamente se procedió a colocar los intercambiadores de calor tomando en cuenta que se cumpla con el ΔT_{min} y la regla del C ($C_C \geq C_H$). En vista que esta condición no se cumplía se volvió a partir la corriente C2, la primera partición de la corriente C2 se hizo en el intervalo de 423K a 473K para asegurar el $\Delta T_{min} = 10K$ debido a que la temperatura de entrada de la corriente H3 es de 483K y la segunda partición se realizó en el intervalo de 473K a 543K de igual manera para asegurar el ΔT_{min} cuando

intercambia calor con la corriente H5, dado que esta únicamente puede intercambiar calor con C2. De la misma manera se procedió en el lado frío, sin embargo, en este lado no fue necesario partir las corrientes debido a que al colocar los intercambiadores de calor entre las corrientes frías y calientes se cumple con el ΔT_{min} y la regla del C. Cabe enfatizar que, en el lado frío, la tasa de flujo de capacidad calorífica de la corriente caliente debe ser mayor que de la corriente fría ($C_H \geq C_C$) (Linnhoff & Hindmarsh, 1982).

Para determinar el nuevo valor de C en las divisiones de la corriente C2 se resolvió los balances de energía de las corrientes divididas.

Balance para las corrientes C1 – H3

$$Q_3 = a (T_{sal} - T_{ent})$$

$$1484,67000 \text{ kW} = a (473 - 423) \text{ K}$$

$$a = \frac{1484,67000 \text{ kW}}{(473 - 423) \text{ K}} = 29,69340 \text{ kW/K}$$

De la misma manera se procedió para las demás divisiones de la corriente C2, la suma de C de las divisiones de ser igual al C de la corriente C2.

$$C = 29,69340 \frac{\text{kW}}{\text{K}} + 139,87800 \frac{\text{kW}}{\text{K}} + 80,14764 \frac{\text{kW}}{\text{K}} + 101,20296 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

$$C = 350,92200 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

Los valores de C de las divisiones de la corriente C1 se encontraron mediante Solver debido a que se desconoce la temperatura de salida de las divisiones, y se obtuvieron los valores que se observan en la Tabla 8. Cabe mencionar que las mencionadas temperaturas permiten cumplir con el valor de el ΔT_{\min} .

Tabla 8

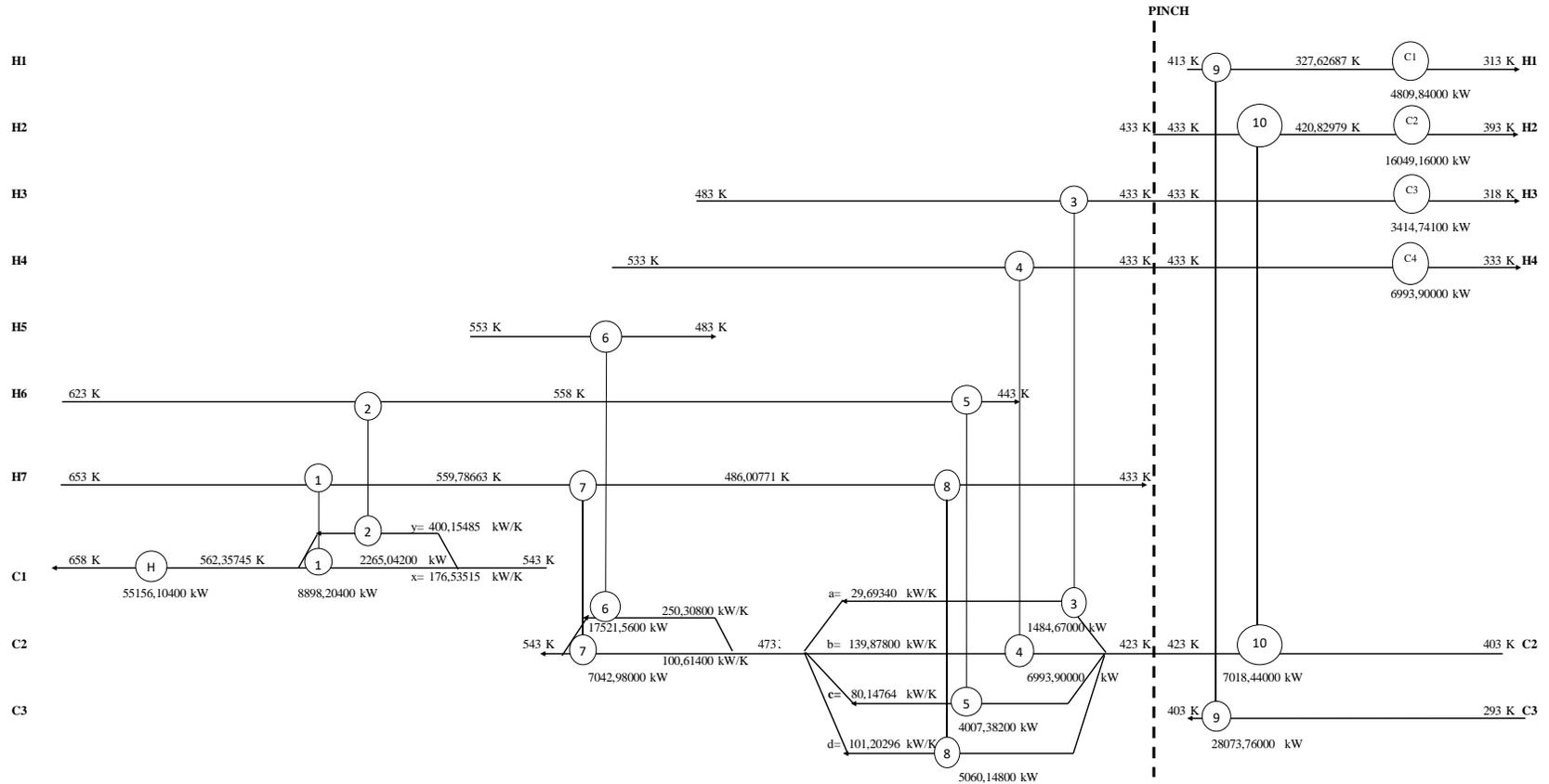
Valores de C de la corriente C1.

División de C1	C (KW/K)	Q (KW)	Tsal (K)	ΔT (K)
x	176,53515	8898,203999	593,404716	59,5952838
y	400,15485	2265,042	548,660414	74,3395863
Función	576,69000	11163,246		
Objetivo				

Finalmente se instaló un calentador (H) en la corriente C1 del lado caliente del Pinch con 55156,10400 KW que coincide con el requerimiento mínimo de calentamiento, y en al lado frio del Pinch se colocó 4 enfriadores, en las corrientes H1, H2, H3 Y H4 respectivamente, con un total de 31267,90000 KW que representa el objetivo mínimo de enfriamiento, como se puede verificar en la Figura 13.

Figura 13

Red de intercambiadores de calor mediante el diseño Pinch.



Para comparar la efectividad de la metodología entre este trabajo y el realizado por Mizutani et al. (2003) se calculó los costos de la red reportada en la literatura mediante el procedimiento adoptado en este análisis para igualar el porcentaje de error. En la Tabla 9 se muestran los datos obtenidos para la red de intercambiadores de calor reportado en la literatura y los datos de la red obtenida mediante el diseño Pinch.

En la Tabla 9 se puede observar que existe un aumento en el área total de los intercambiadores de calor para la red obtenida mediante el análisis Pinch, sin embargo, este método minimiza el uso de utilidades de energía y por lo tanto se logra reducir 1649817,185 \$ en el costo anualizado.

Tabla 9

Comparación de costos entre la red reportada en la literatura y la red obtenida mediante el análisis Pinch.

	Mizutani et al. (2003)	Método de análisis Pinch
Utilidad de calentamiento (kW)	80259	55156,10400
Utilidad de enfriamiento (kW)	56457	31267,64100
Área total de la red (m²)	6049,82552	16177,07607
C. utilidades de energía (\$/año)	5154282,00000	3496972,08600
Costo de compra (\$)	145519,45177	220446,74160
Costo anualizado (C_A) (\$/año)	5168833,94518	3519016,76016

4.2.2 Programación lineal de enteros mixtos

Para obtener la red de intercambiadores de calor mediante MILP primero se estableció los intervalos de temperatura para lo cual se tomó las temperaturas de entrada tanto de las corrientes frías y calientes como de las utilidades de calentamiento y enfriamiento, que se puede verificar en la Tabla 10, De esta forma se obtuvieron, dos columnas que representan los extremos del intervalo, la columna "I. Superior" que contiene los extremos superiores y la columna "I. Inferior" que presenta los extremos inferiores (Tabla 11).

Tabla 10

Temperaturas de entrada y salida de las corrientes y utilidades.

Corrientes	Tint (k)	Tout(K)
H1	413	313
H2	433	393
H3	483	318
H4	533	333
H5	553	483
H6	623	443
H7	653	433
C1	543	658
C2	403	543
C3	293	403
CW	293	298
S	700	700

Los intervalos se obtuvieron usando las temperaturas de entrada (Tabla 11: Filas 1 a 8, Columna 1, para las corrientes calientes y Filas 9 a 12, Columna 2, para las corrientes

frías). El intervalo se completó mediante la suma o resta del valor del $\Delta T_{min} = 10 K$, para las corrientes frías o calientes, respectivamente (ver Tabla 11).

Tabla 11

Temperaturas ajustadas para los intervalos de temperatura.

	I. Superior	I. Inferior
1	700	690
2	653	643
3	623	613
4	553	543
5	533	523
6	483	473
7	433	423
8	413	403
9	553	543
10	413	403
11	303	293
12	303	293

Se procedió a ordenar los intervalos de mayor a menor y se eliminó los intervalos que se repiten, (ver Tabla 12). Obteniéndose de esta manera los intervalos en los cuales se va a basar la determinación de los balances de energía, como se puede observar en la Figura 14.

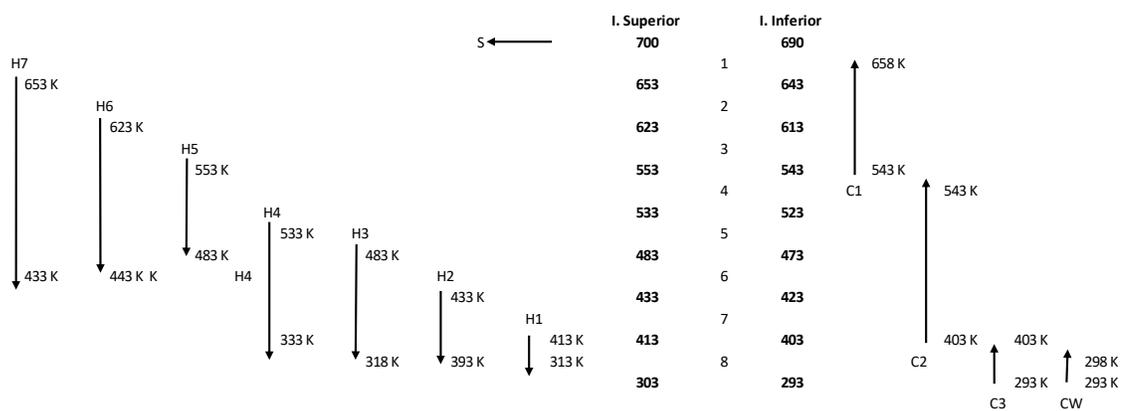
Tabla 12

Temperaturas ajustadas ordenadas en orden descendente.

	I. Superior	I. Inferior
1	700	690
2	653	643
3	623	613
4	553	543
5	553	543
6	533	523
7	483	473
8	433	423
9	413	403
10	413	403
11	303	293
12	303	293

Figura 14

Intervalos de temperatura para el método MILP.



En la Tabla 13 se estableció que corrientes interactúan en cada intervalo de temperatura, siendo que el símbolo “asterisco” indica que en esos intervalos hay traspaso de calor gracias a los residuos que se generaron en los intervalos superiores (Seider et al., 2009).

Tabla 13

Corrientes que interactúan en cada intervalo.

Intervalo	Corriente
1	C1, S
2	C1, H7, S*
3	C1, H6, H7, S*
4	C2, H5, H6, H7, S*
5	C2, H4, H5, H6, H7, S*
6	C2, H3, H4, H6, H7, H5*, S*
7	C2, H2, H3, H4
8	C3, CW, H1, H2, H3, H4

Seguidamente se procedió a realizar los balances de energía para cada una de las corrientes en los diferentes intervalos, cabe recalcar que no existe intercambio de calor sobre el punto Pinch, por ello en los balances de energía en el intervalo en que se encuentra la temperatura Pinch (intervalo 6) se consideró que no existe residuo (Seider et al., 2009), dado que no puede pasar al siguiente intervalo traspasando el punto Pinch, si esto ocurriera se producirá flujo de calor a través del Pinch y los requerimientos de utilidades de energía podrán aumentar, lo cual no es requerido.

Balances de energía para la utilidad de calentamiento S.

$$R_{S,1} + Q_{S,C1,1} = Q_{S,1}^H$$

$$R_{S,2} - R_{S,1} + Q_{S,C1,2} = Q_{S,2}^H$$

$$R_{S,3} - R_{S,2} + Q_{S,C1,3} = Q_{S,3}^H$$

$$R_{S,4} - R_{S,3} + Q_{S,C2,4} = Q_{S,4}^H$$

$$R_{S,5} - R_{S,4} + Q_{S,C2,5} = Q_{S,5}^H$$

$$-R_{S,5} + Q_{S,C2,6} = Q_{S,6}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H7.

$$R_{H7,2} + Q_{H7,C1,2} = Q_{H7,2}^H$$

$$R_{H7,3} - R_{H7,2} + Q_{H7,C1,3} = Q_{H7,3}^H$$

$$R_{H7,4} - R_{H7,3} + Q_{H7,C2,4} = Q_{H7,4}^H$$

$$R_{H7,5} - R_{H7,4} + Q_{H7,C2,5} = Q_{H7,5}^H$$

$$-R_{H7,5} + Q_{H7,C2,6} = Q_{H7,6}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H6.

$$R_{H6,3} + Q_{H6,C1,3} = Q_{H6,3}^H$$

$$R_{H6,4} - R_{H6,3} + Q_{H6,C2,4} = Q_{H6,4}^H$$

$$R_{H6,5} - R_{H6,4} + Q_{H6,C2,5} = Q_{H6,5}^H$$

$$-R_{H6,5} + Q_{H6,C2,6} = Q_{H6,6}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H5.

$$R_{H5,4} + Q_{H5,C2,4} = Q_{H5,4}^H$$

$$R_{H5,5} - R_{H5,4} + Q_{H5,C2,5} = Q_{H5,5}^H$$

$$-R_{H5,5} + Q_{H5,C2,6} = Q_{H5,6}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H4.

$$R_{H4,5} + Q_{H4,C2,5} = Q_{H4,5}^H$$

$$-R_{H4,5} + Q_{H4,C2,6} = Q_{H4,6}^H$$

$$R_{H4,7} + Q_{H4,C2,7} = Q_{H4,7}^H$$

$$-R_{H4,7} + Q_{H4,C3,8} + Q_{H4,CW,8} = Q_{H4,8}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H3.

$$R_{H3,6} + Q_{H3,C2,6} = Q_{H3,6}^H$$

$$R_{H3,7} + Q_{H3,C2,7} = Q_{H3,7}^H$$

$$-R_{H3,7} + Q_{H3,C3,8} + Q_{H3,CW,8} = Q_{H3,8}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H2.

$$R_{H2,7} + Q_{H2,C2,7} = Q_{H2,7}^H$$

$$-R_{H2,7} + Q_{H2,C3,8} + Q_{H2,CW,8} = Q_{H2,8}^H$$

Balances de energía para la corriente caliente H1.

$$R_{H1,8} + Q_{H1,C3,8} + Q_{H1,CW,8} = Q_{H1,8}^H$$

Balances de energía para la corriente fría C1.

$$Q_{S,C1,1} = Q_{C1,1}^C$$

$$Q_{H7,C1,2} + Q_{S,C1,2} = Q_{C1,2}^C$$

$$Q_{H6,C1,3} + Q_{H7,C1,3} + Q_{S,C1,3} = Q_{C1,3}^C$$

Balances de energía para la corriente fría C2.

$$Q_{H5,C2,4} + Q_{H6,C2,4} + Q_{H7,C2,4} + Q_{S,C2,4} = Q_{C2,4}^C$$

$$Q_{H4,C2,5} + Q_{H5,C2,5} + Q_{H6,C2,5} + Q_{H7,C2,5} + Q_{S,C2,5} = Q_{C2,5}^C$$

$$Q_{H3,C2,6} + Q_{H4,C2,6} + Q_{H5,C2,6} + Q_{H6,C2,6} + Q_{H7,C2,6} + Q_{S,C2,6} = Q_{C2,6}^C$$

$$Q_{H2,C2,7} + Q_{H3,C2,7} + Q_{H4,C2,7} = Q_{C2,7}^C$$

Balances de energía para la corriente fría C3.

$$Q_{H1,C3,8} + Q_{H2,C3,8} + Q_{H3,C3,8} + Q_{H4,C3,8} = Q_{C3,8}^C$$

Balances de energía para la utilidad de enfriamiento CW.

$$Q_{H1,CW,8} + Q_{H2,CW,8} + Q_{H3,CW,8} + Q_{H4,CW,8} = Q_{CW,8}^C$$

El calor disponible en cada intervalo de temperatura para las corrientes calientes Q_{ik}^H se determinó multiplicando C_H (kW/K) por la diferencia de temperatura del intervalo que se está analizando, que se denominará ΔT (K). (Figura 14). Por ejemplo, el calor disponible de la corriente H7 en el intervalo 1 se determinó mediante el siguiente cálculo.

$$Q_{H7,2}^H = 95,4606 \frac{kW}{K} (653 - 623)K = 2863,81800 \text{ kW}$$

De la misma manera se procedió para el resto de corrientes calientes en los diferentes intervalos, como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14

Calor disponible de las corrientes calientes en cada intervalo de temperatura.

	Q_{ik}^H (kW)		Q_{ik}^H (kW)
$Q_{H7,2}^H$	2863,81800	$Q_{H4,5}^H$	3496,95000
$Q_{H7,3}^H$	6682,24200	$Q_{H4,6}^H$	3496,95000
$Q_{H7,4}^H$	1909,21200	$Q_{H4,7}^H$	1398,78000
$Q_{H7,5}^H$	4773,03000	$Q_{H4,8}^H$	5595,12000
$Q_{H7,6}^H$	4773,03000	$Q_{H3,6}^H$	1484,67000
$Q_{H6,3}^H$	2439,27600	$Q_{H3,7}^H$	593,86800
$Q_{H6,4}^H$	696,93600	$Q_{H3,8}^H$	2820,87300
$Q_{H6,5}^H$	1742,34000	$Q_{H2,7}^H$	11533,80000
$Q_{H6,6}^H$	1393,87200	$Q_{H2,8}^H$	11533,80000
$Q_{H5,4}^H$	5006,16000	$Q_{H1,8}^H$	32883,60000
$Q_{H5,5}^H$	12515,40000		

El calor que puede ser recuperado por las corrientes frías se calculó de la misma manera que para las corrientes calientes, por ejemplo, el calor que receipta la corriente C1 en el intervalo 1 se determinó mediante el cálculo siguiente.

$$Q_{c1,1}^c = 255,216 \frac{kW}{^\circ K} (658 - 643)^\circ K = 8650,35000 kW$$

De la misma manera se procedió para el resto de corrientes frías en los diferentes intervalos, como se puede observar en la Tabla 15.

Tabla 15

Calor que reciben las corrientes frías en cada intervalo.

	Q_{jk}^c (kW)		Q_{jk}^c (kW)
$Q_{C1,1}^c$	8650,35000	$Q_{C2,5}^c$	17546,10000
$Q_{C1,2}^c$	17300,70000	$Q_{C2,6}^c$	17546,10000
$Q_{C1,3}^c$	40368,30000	$Q_{C2,7}^c$	7018,44000
$Q_{C2,4}^c$	7018,44000	$Q_{C3,8}^c$	28073,76000

En la hoja de cálculo de Excel se colocó los balances de energía y los datos conocidos (ver Tabla 14 y 15). Posteriormente, en una columna diferente, se identificó los datos desconocidos los cuales se denominan variables continuas, estas celdas que contienen las variables desconocidas tomarán más adelante valores de tal forma que se permita cumplir con los balances y restricciones.

Para determinar el mínimo número de coincidencias que existe entre la corriente caliente y la corriente fría se utilizó la herramienta Solver del software Excel. Primero se estableció la función objetivo que es la sumatoria de todas las posibles coincidencias que se pueden dar entre las corrientes frías y calientes, mediante la función suma del software Excel. Las coincidencias, que representan Intercambiadores de Calor, se pueden observar en la, Tabla 16.

Tabla 16*Variables binarias.*

Variables Binarias	
Y(S-C1)	1
Y(S-C2)	1
Y(H7-C1)	1
Y(H7-C2)	1
Y(H6-C1)	1
Y(H6-C2)	1
Y(H5-C2)	1
Y(H4-C2)	1
Y(H4-C2)	1
Y(H4-C3)	1
Y(H4-CW)	1
Y(H3-C2)	1
Y(H3-C2)	1
Y(H3-C3)	1
Y(H3-CW)	1
Y(H2-C2)	1
Y(H2-C3)	1
Y(H2-CW)	1
Y(H1-C3)	1
Y(H1-CW)	1
Función Objetivo	20

Seguidamente se determinó el valor de U_{ij} , para obtener el mínimo consumo de las utilidades de energía. Para obtener dicho valor, es necesario que no exista intercambio de calor a través del punto Pinch, por ello se calculó las cargas de calor en los segmentos encima y por debajo de la temperatura Pinch (423 K y 433 K) siguiendo la metodología de Seider et al. (2009). Mediante la función **=MIN(número1, [número2])**, de Excel se eligió el mínimo valor entre las energías que las corrientes pueden liberar o absorber, (Tabla 17).

Tabla 17

Calor mínimo que las corrientes pueden absorber o suministrar.

U_{ij}				Mínimo
	U(S-C1)	55156,10400	66319,35000	55156,10400
	U(S-C2)	55156,10400	42110,64000	42110,64000
	U(H7-C1)	21001,33200	66319,35000	21001,33200
	U(H7-C2)	21001,33200	42110,64000	21001,33200
	U(H6-C1)	6272,42400	66319,35000	6272,42400
	U(H6-C2)	6272,42400	42110,64000	6272,42400
	U(H5-C2)	17521,56000	42110,64000	17521,56000
Encima del Pinch	U(H4-C2)	6993,90000	42110,64000	6993,90000
Debajo del Pinch	U(H4-C2)	6993,90000	7018,44000	6993,90000
	U(H4-C3)	6993,90000	28073,76000	6993,90000
	U(H4-CW)	6993,90000	31267,64100	6993,90000
Encima del Pinch	U(H3-C2)	1484,67000	42110,64000	1484,67000
Debajo del Pinch	U(H3-C2)	3414,74100	7018,44000	3414,74100
	U(H3-C3)	3414,74100	28073,76000	3414,74100
	U(H3-CW)	3414,74100	31267,64100	3414,74100
	U(H2-C2)	23067,60000	7018,44000	7018,44000
	U(H2-C3)	23067,60000	28073,76000	23067,60000
	U(H2-CW)	23067,60000	31267,64100	23067,60000
	U(H1-C3)	32883,60000	28073,76000	28073,76000
	U(H1-CW)	32883,60000	31267,64100	31267,64100

A continuación, se fijó la tercera restricción Ec.7, es decir, la conexión entre las variables continuas y las variables binarias, Tabla 18.

Tabla 18

Vínculo entre las variables binarias y las variables continuas.

S-C1	-46503,75400
S-C2	-42107,64000
H7-C1	-20999,33200
H7-C2	-20998,33200
H6-C1	-6271,42400
H6-C2	-6269,42400
H5-C2	-17518,56000
H4-C2	-6991,90000
H4-C2	-6992,90000
H4-C3	-6992,90000
H4-CW	-6992,90000
H3-C2	-1483,67000
H3-C2	-3413,74100
H3-C3	-3413,74100
H3-CW	-3413,74100
H2-C2	-7017,44000
H2-C3	-23066,60000
H2-CW	-23066,60000
H1-C3	-28072,76000
H1-CW	-31266,64100

Finalmente, una vez se ha planteado el problema se inició con el solucionador de Excel (Solver) que se encuentra en el menú "Datos", se desplegó la ventana de parámetros de Solver. En el campo establecer objetivo se colocó la celda de la función objetivo y se indicó que se minimizará, en el siguiente campo se colocó las celdas de las variables binarias y las celdas de las variables continuas. Seguidamente se procedió a añadir las restricciones, se agregaron 37 restricciones referentes a los balances de energía de las corrientes calientes y frías, adicionalmente se agregaron 3 restricciones referentes a las variables binarias Ec.10 y Ec.11 que indica que todas las variables binarias deben ser mayor o igual a 0, menor o igual a 1 y todas las variables binarias deben ser números enteros. También se agregó la restricción de la Ec.7. En total se agregaron 41 restricciones. (ver Figura 15).

Figura 15

Ventana de Solver con los parámetros del caso de estudio.

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para: Máx Mín Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

\$E\$29 = \$F\$29
 \$J\$101 = \$H\$101
 \$J\$105 = \$H\$105
 \$J\$109 = \$H\$109
 \$J\$113 = \$H\$113
 \$J\$117 = \$H\$117
 \$J\$121 = \$H\$121
 \$J\$126 = \$H\$126
 \$J\$129 = \$H\$128
 \$J\$132 = \$H\$131
 \$J\$135 = \$H\$134
 \$J\$138 = \$H\$137
 \$J\$141 = \$H\$140

Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda Resolver Cerrar

Se escogió como método de resolución el método LP Simplex, el cual permite determinar la solución óptima de un problema lineal, es un algoritmo que mediante iteraciones cambia de valores de las variables en forma sistemática hasta llegar a la respuesta correcta, considerando las restricciones. Cada iteración implica resolver todas las operaciones presentes con los nuevos valores tomados, cuando se llega al valor óptimo no es necesario seguir iterando (Moncayo-Martínez & Muñoz, 2018). Finalmente se procedió a ejecutar Solver y se obtuvo 14 coincidencias entre las corrientes calientes y las corrientes frías como se puede observar en la Tabla 19.

Tabla 19

Coincidencias encontradas entre las corrientes calientes, frías y utilidades.

Variables Binarias	
Y(S-C1)	1
Y(S-C2)	0
Y(H7-C1)	1
Y(H7-C2)	1
Y(H6-C1)	1
Y(H6-C2)	1
Y(H5-C2)	1
Y(H4-C2)	1
Y(H4-C2)	0
Y(H4-C3)	1
Y(H4-CW)	0
Y(H3-C2)	1
Y(H3-C2)	0
Y(H3-C3)	1
Y(H3-CW)	0
Y(H2-C2)	1
Y(H2-C3)	1
Y(H2-CW)	0
Y(H1-C3)	1
Y(H1-CW)	1
Función Objetivo	14

Una vez determinado las coincidencias se procedió a realizar la red de intercambiadores de calor. La utilidad de calentamiento S intercambia calor con la corriente C1 en tres intervalos, los cuales son el intervalo 1, 2 y 3, sin embargo, se colocó un solo calentador (H) para esos tres intervalos debido a que son intervalos consecutivos y por lo tanto la instalación de un dispositivo permitió cumplir con el propósito.

Además, las corrientes H7 y H6 intercambian calor con la corriente C1 en el intervalo 3, por lo que fue necesario partir la corriente C1 en ese intervalo para cumplir con el objetivo, el intercambiador 1 y 2.

Por otro lado, la corriente H7 Y H5 también intercambian calor, en el intervalo 4 y 5, con la corriente C2, de la misma manera se partió la corriente C2 de modo que se cumpliera con el ΔT_{min} y la regla del C, en ese sentido, para los dos intervalos se colocó un intercambiador para las corrientes H7-C2 (intercambiador 3) en los dos intervalos y otro intercambiador para las corrientes H5-C2 (intercambiador 4).

Adicionalmente, las corrientes H7, H6, H4 Y H3 intercambian calor, en el intervalo 6, con la corriente C2, por ello se dividió la corriente C2 en el intervalo 6 en 4 corrientes para que la corriente C2 intercambie calor con cada una de las corrientes calientes (intercambiador 5, 6, 7 y 8).

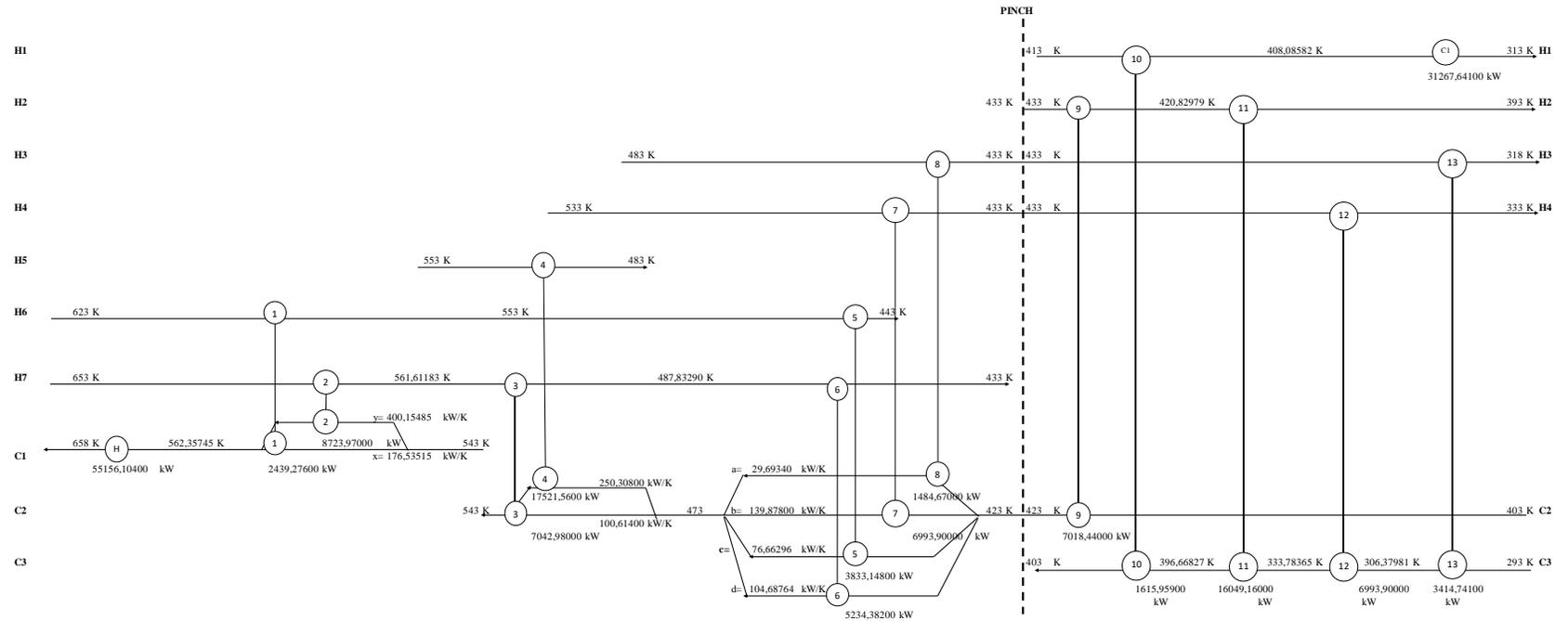
En el intervalo 7 debajo del Pinch, la corriente H2 intercambia calor con C2 y se colocó el intercambiador 9. En el intervalo 8 intercambian calor las corrientes H1, H2, H3 y H4 con C2, por tanto, se instalaron cuatro intercambiadores, uno por cada corriente caliente

(intercambiador 10, 11, 12 y 13), no fue necesario partir la corriente C2 porque al instalar los intercambiadores se cumple con el ΔT_{min} .

Finalmente se procedió a revisar que cada una de las corrientes que entran y salen de los intercambiadores cumpla con el ΔT_{min} y la regla del C. Como se pudo observar no existen corrientes que intercambien calor a través del Pinch y el mínimo número de intercambiadores de calor que permiten el mínimo consumo de utilidades de energía es 15 unidades. (Figura 16).

Figura 16

Red de intercambiadores de calor obtenida por el método MILP.



El método de programación lineal reduce el área total de la red en comparación con la red obtenida mediante el método de diseño Pinch. El área de la red obtenida mediante MILP es 1779,23298 m² menos que el área de la red obtenida por el diseño Pinch (Tabla 20), por ende, el costo de compra disminuye. El método de programación lineal disminuye 1038,78619 \$/año en el costo anualizado en comparación con el método de diseño Pinch. Al comparar con la red reportada en la literatura se reduce 1650855,971 \$ al año del costo anualizado.

Tabla 20

Comparación de costos entre la red reportada en la literatura y las redes obtenidas mediante el análisis Pinch y MILP.

	Mizutani et al. (2003)	Método de análisis Pinch	MILP
Utilidad de calentamiento (kW)	80259	55156,10400	55156,10400
Utilidad de enfriamiento (kW)	56457	31267,64100	31267,64100
Área total de la red (m²)	6049,82552	16177,07607	14397,84309
C. utilidades de energía (\$/año)	5154282,00000	3496972,08600	3496972,08600
Costo de compra (\$)	145519,45177	220446,74160	210058,87971
Costo anualizado (C_A) (\$/año)	5168833,94518	3519016,76016	3517977,97397

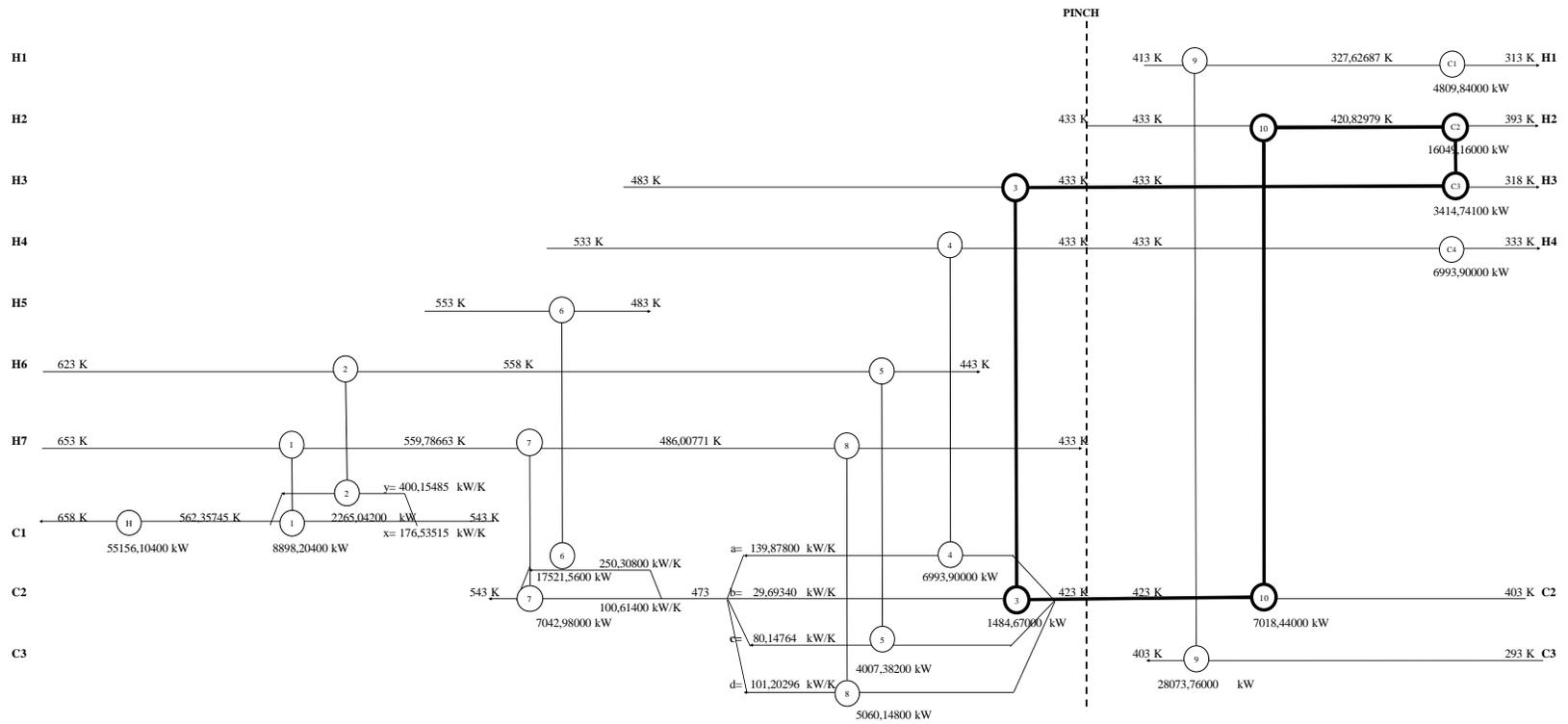
4.3 Reducción del número de intercambiadores de calor mediante ruptura de bucles de calor.

Para reducir el número de intercambiadores de calor primero se identificó el ciclo de calor presente en la red de intercambiadores de calor que cumple con los requerimientos del MER, el cual se puede observar con línea continua gruesa en la Figura 15. Para eliminar el primer bucle se combinó el intercambiador 3 con el enfriador

C2, es decir, el calor del intercambiador 3 se le agrego al enfriador C2 y se eliminó el intercambiador 3, obteniéndose 17533, 83 KW en el enfriador C2. Se procedió ajustar las temperaturas de salida y el calor en cada uno de los intercambiadores.

Figura 17

Primer ciclo de calor en la red que cumple con los requerimientos del MER.

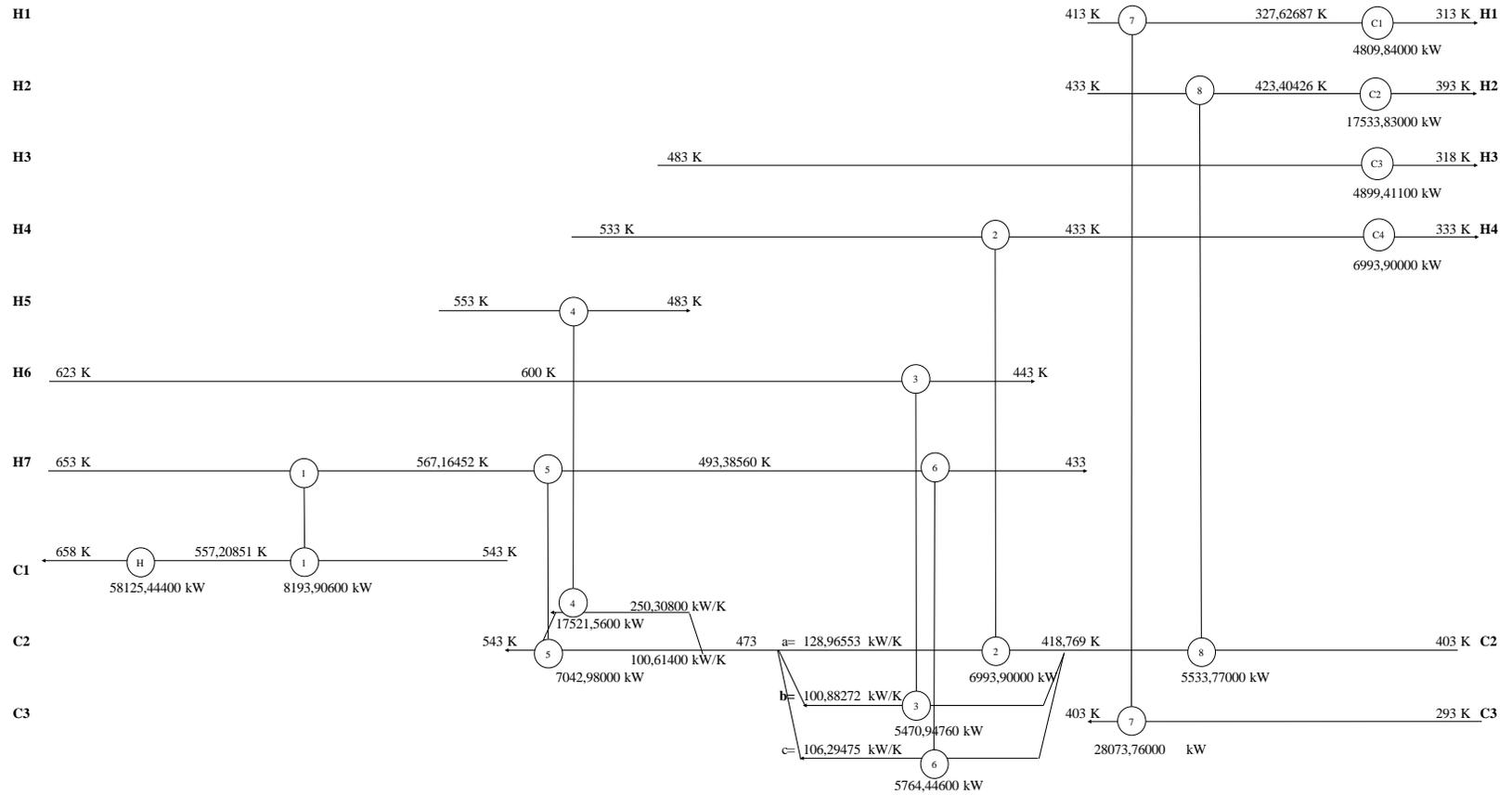


En la segunda red que se obtuvo se identificó un segundo bucle (Figura 18). Para el eliminar el segundo ciclo se pasó el calor del intercambiador 2 al intercambiador 1 y se eliminó el intercambiador 2. En consecuencia, se eliminó la partición de la corriente C1. El intercambiador 1 obtuvo un calor total de 8193,90600 KW. De la misma manera que el anterior bucle, se procedió a ajustar las temperaturas de salida y el calor de cada intercambiador con base al intercambiador eliminado, se revisó que los nuevos ajustes cumplan con el ΔT_{min} y la regla del C.

La red final que se encontró tiene un total de 13 unidades de intercambiadores de calor como se puede observar en la Figura 19.

Figura 19

Red de intercambiadores de calor final obtenida mediante ruptura de ciclos.



La red obtenida mediante el método de diseño Pinch presentó dos ciclos de calor como se puede observar en las Figuras 17 y 18, los cuales fueron eliminados para obtener la red con el menor número de intercambiadores de calor. La red final obtenida al romper los ciclos de calor presenta 13 intercambiadores de calor en total, lo que significa que la ruptura de bucles de calor eliminó dos unidades de intercambiadores de calor. La ruptura de ciclos de calor aumentó los requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento debido a que existen flujos de calor a través del Pinch.

En la Tabla 21 se puede observar que la ruptura de ciclos de calor aumenta la cantidad de utilidades de energía lo que provoca un aumento de 193226,0258 \$ en el costo anualizado en comparación con el costo de la red de diseño Pinch. La ruptura de bucles disminuye aproximadamente 10,86% del área total de la red por lo que el costo de compra disminuye, sin embargo, el costo de las utilidades de energía representa aproximadamente el 99% del costo anualizado, por lo tanto, la ruptura de ciclos de calor aumenta el costo anualizado.

Tabla 21

Comparación de costos entre el diseño de la red de análisis Pinch y el diseño de la red de ruptura de ciclos de calor.

	Método de análisis Pinch	Ruptura de ciclos de calor
Utilidad de calentamiento (kW)	55156,10400	58125,44400
Utilidad de enfriamiento (kW)	31267,64100	34236,98100
Área total de la red (m²)	16177,07607	14420,38144
C. utilidades de energía (\$/año)	3496972,08600	3692948,52600
Costo de compra (\$/año)	220446,74160	192942,59917
Costo total anual (\$/año)	3519016,76016	3712242,78592

Al comparar los valores con el diseño reportado en la literatura se puede verificar que a pesar de que el número de intercambiadores de calor es igual en las dos redes (13 intercambiadores de calor) la cantidad de utilidades de energía es menor en el diseño obtenido por ruptura de ciclos de calor y por lo tanto el costo anualizado es menor. La de red obtenida por ruptura de ciclos presenta 1456591,159 \$/año menos del costo anualizado en comparación con el diseño reportado en la literatura.

Al comparar el costo de la red proveniente de ruptura de ciclos de calor con la red obtenida mediante programación lineal, esta última presenta 194264,812 \$/año menos. En resumen, el diseño de ruptura de bucles de calor representa menores valores de costo total anual en comparación con el correspondiente al reportado en la literatura y mayor costo total anual en comparación al obtenido en la red de diseño Pinch y la red de diseño por MILP.

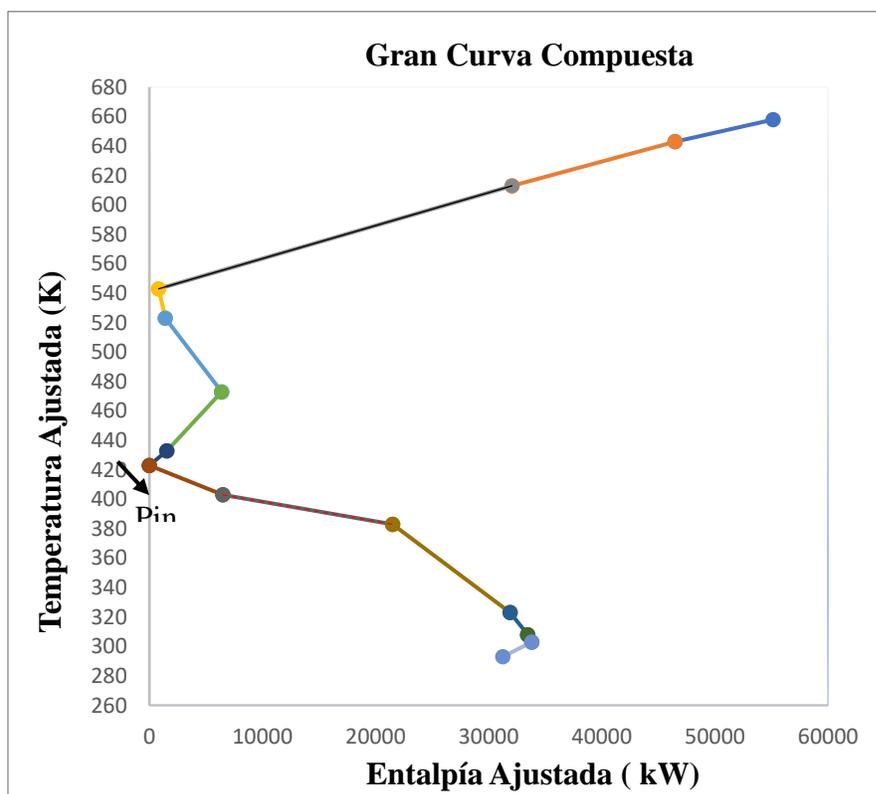
4.4 Múltiples utilidades

Además de las dos utilidades de energía usadas se puede añadir más utilidades con el fin de reducir el costo de operación. En el presente trabajo se añadió vapor de presión intermedia a 605,4 K y 17,24 bar como utilidad de calentamiento y agua de alimentación a la caldera a 110°C como utilidad de enfriamiento (Seider et al., 2009).

Para estimar el calor que se recuperará con el uso de utilidades múltiples primero se realizó la gran curva compuesta (Figura 20), se graficó las temperaturas ajustadas versus la entalpía residual ajustada con los datos obtenidos en el método de intervalos de temperatura.

Figura 20

Diagrama de la gran curva compuesta.



4.4.1 Vapor de presión intermedia ips

Se utilizó vapor de presión intermedia a 605,4 K y 17,24 bar cómo se indica en el ejercicio 9,20 del libro de (Seider et al., 2009). Para que exista intercambio con las corrientes frías se debe restar $\Delta T_{min} = 10 K$, se utiliza ips a 605,4 K de temperatura debido a que la corriente C1 se debe llevar a una temperatura considerablemente alta, si se utiliza ips a menor temperatura la reducción de costos será mínima.

$$ips = 605,4 K - 10 K = 595,4 K$$

El calor que suministra ips a las corrientes frías se calculó mediante la ecuación de la recta que interseca con la temperatura del ips. Figura 16.

$$y = 0,00224023069x + 541,15832875206$$

Se procedió a remplazar la temperatura del ips en la ecuación y se obtuvo el calor que proporcionara la utilidad caliente a las corrientes frías.

$$595,4 K = 0,00224023069 \frac{K}{kW} x + 541,15832875206 K$$

$$Q_{ips} = x = \frac{595,4K - 541,15832875206 K}{0,00224023069 \frac{K}{kW}} = 24212,53824 kW$$

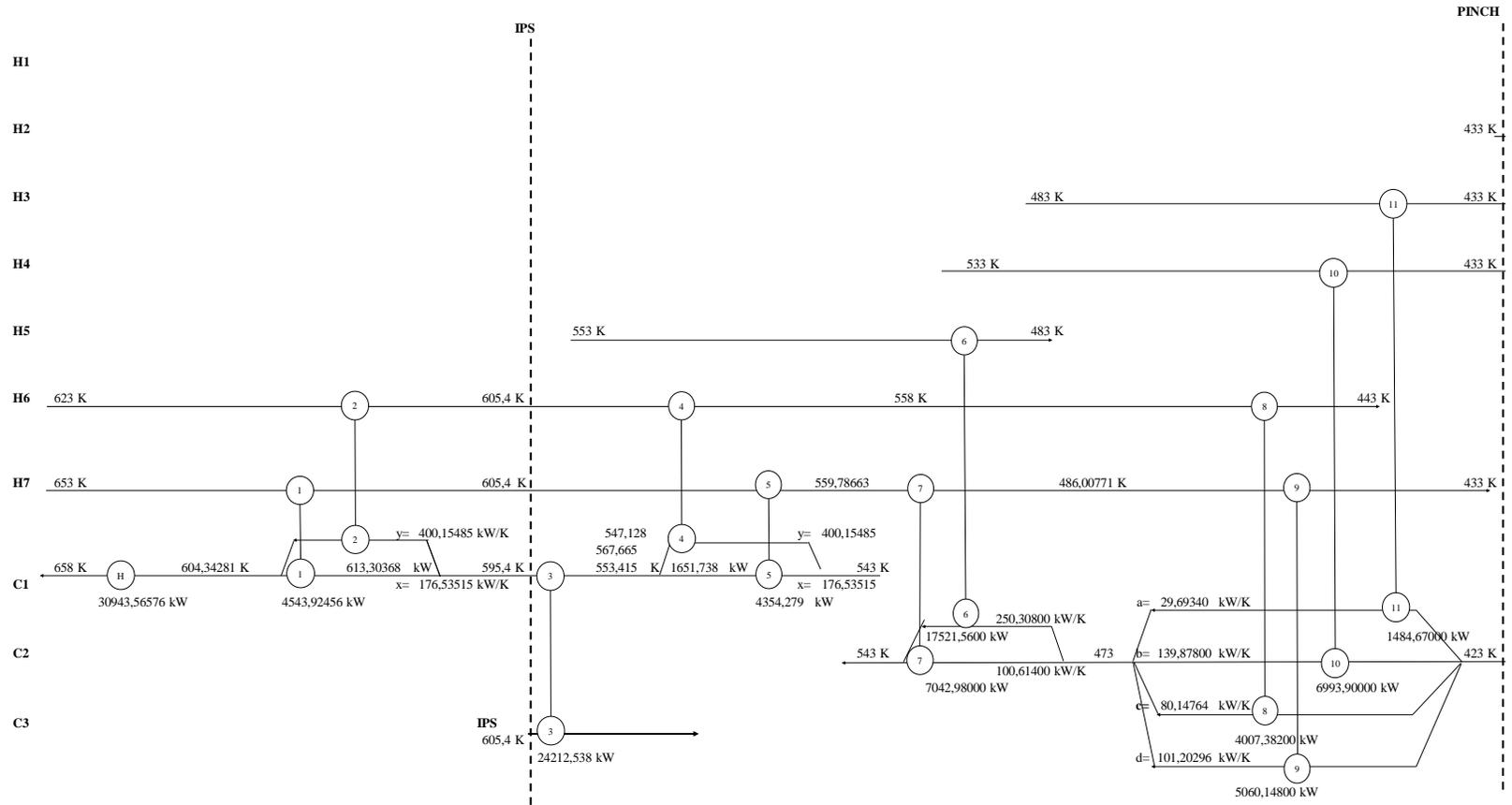
El calor suministrado por el calentador será:

$$Q_H = 55156,10400 kW - 24212,53824 kW = 30943,56576 kW$$

Seguidamente se realizó la red de intercambiadores de calor para el lado caliente del Pinch, primero se añadió el Pinch para el ips (595,4 K - 605,4 K), se calculó el calor sobre el Pinch del ips y el calor entre el Pinch del proceso y el Pinch de los intercambiadores de calor se instalaron. Cabe enfatizar que no tienen que existir intercambio de calor a través del Pinch del ips como ocurre con el Pinch del proceso. En la corriente C1 se instaló un calentador que aporta 30943,56576 kW de calor y el ips suministro 24212,53824 kW de calor a la corriente C1 (ver Figura 21).

Figura 21

Red de intercambiadores incluido la utilidad ips en el lado caliente del Pinch.



4.4.2 Agua de entrada a la caldera (bfw).

Se utilizó agua de entrada a la caldera bfw a 110°C como se indica en el ejercicio 9,17 del libro de (Seider et al., 2009), debido a que se puede aprovechar una porción del calor que se elimina en los enfriadores para generar vapor necesario en otros procesos a partir de bfw y de esta manera reducir costos de operación.

$$b_{wf} = 110^{\circ}C = 383 K$$

El calor que recepta bfw de las corrientes calientes se calculó mediante la ecuación de la recta que interseca con la temperatura del bfw. (ver Figura 16).

$$y = -0,0013334357412 x + 411,6780104712040$$

Se procedió a remplazar la temperatura de bfw en la ecuación y se obtuvo el calor que receptara esta utilidad.

$$383 K = -0,0013334357412 \frac{K}{kW} x + 411,6780104712040 K$$

$$Q_{b_{fw}} = x = \frac{383 K - 411,6780104712040 K}{-0,0013334357412 \frac{K}{kW}} = 21506,85600 kW$$

El calor removido por el enfriador será:

$$Q_C = 31267,64100 kW - 21562,41353 kW = 9760,78500 kW$$

A continuación, se realizó la red de intercambiadores de calor el lado frío del Pinch, primero se añadió el Pinch de la utilidad de enfriamiento bfw (383 K – 393 K), se calculó el calor entre el Pinch del proceso y el Pinch de bfw y el calor debajo del Pinch de bfw para cada una de las corrientes calientes y se procedió a colocar los intercambiadores de calor de modo que bfw recepte 21562,41353 kW de calor de las corrientes calientes entre el Pinch del proceso y el Pinch de bfw y los enfriadores eliminaron 9705,22747kW de calor (Figura 22). Finalmente se obtuvo una red global con 18 intercambiadores de calor 3 enfriadores y 1 calentador, un total de 22 unidades de intercambio de calor como se puede observar en la Figura 23.

Cabe mencionar que, para realizar la comparación de costos entre la red realizada por el método de diseño Pinch con múltiples utilidades y la red reportada en la literatura, se agregó las mismas utilidades a la red reportada en la literatura como se puede ver en la Figura 24 y la red de diseño Pinch (Figura 23).

Figura 22

Red de intercambiadores de calor incluido bfw en el lado frio del Pinch.

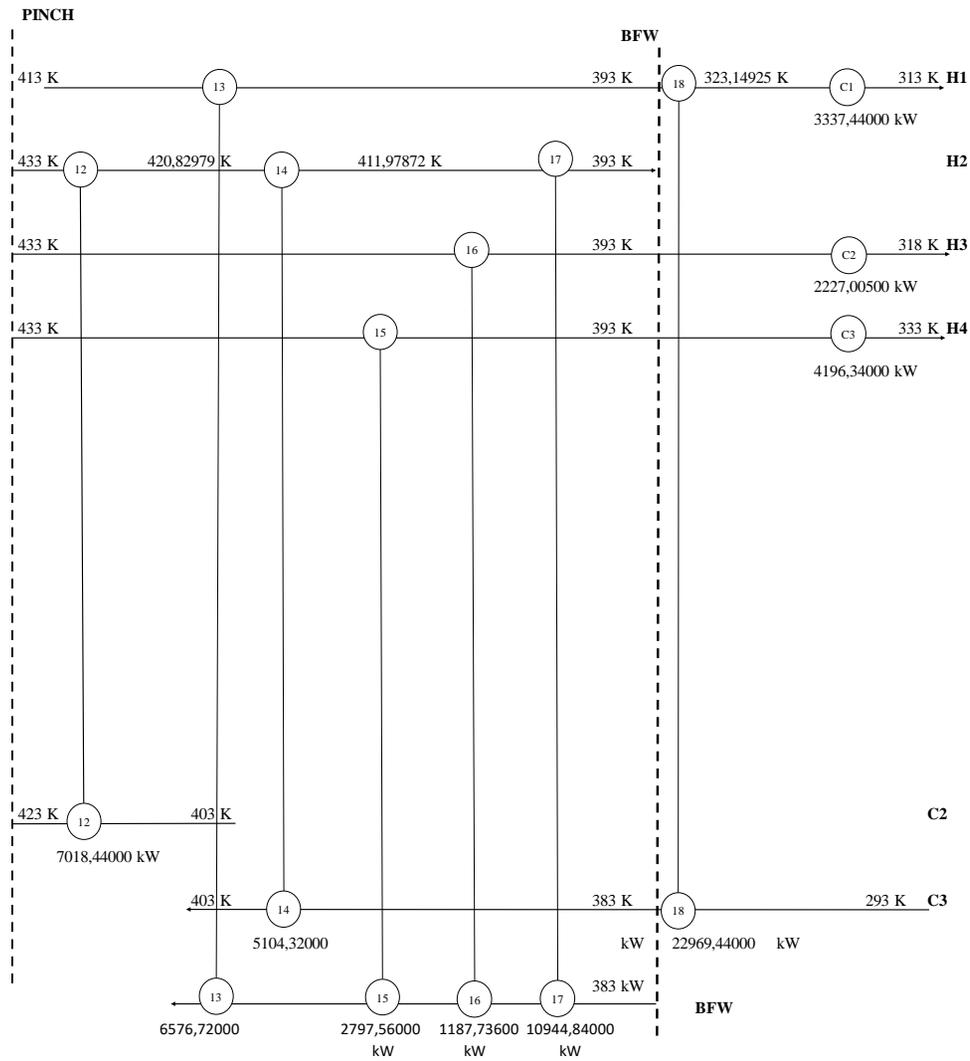


Figura 23

Red de intercambiadores de calor con múltiples utilidades.

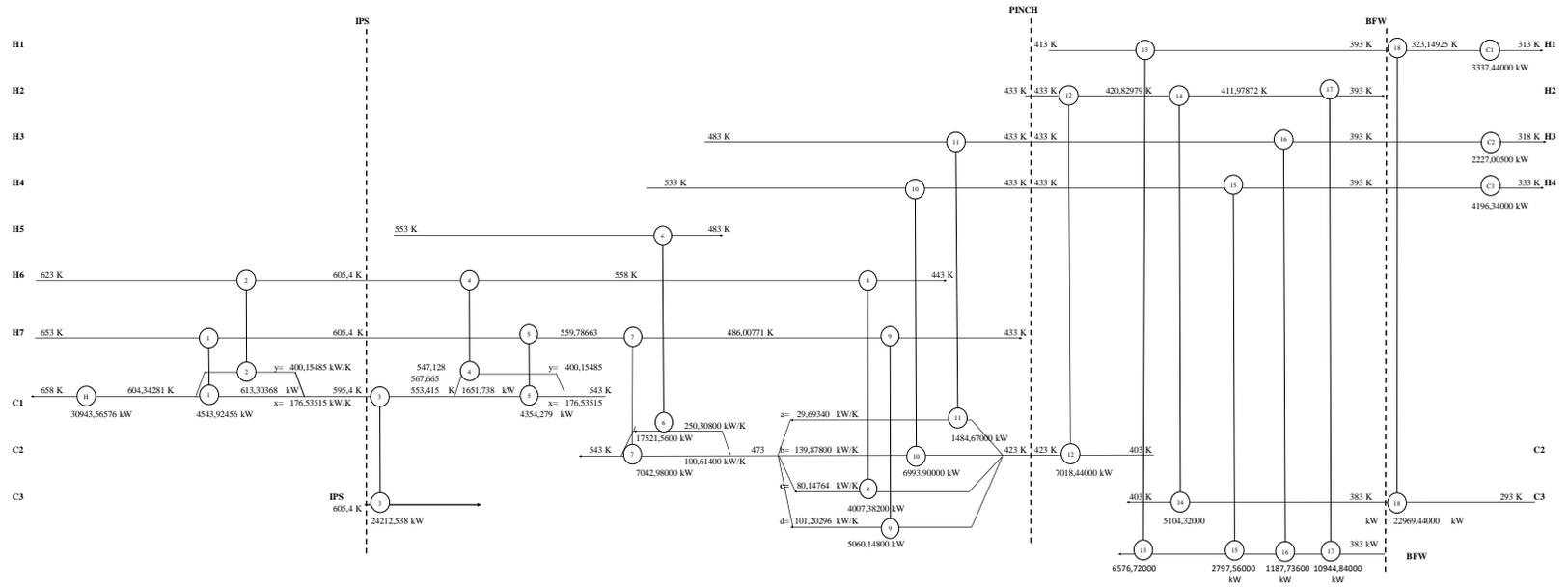
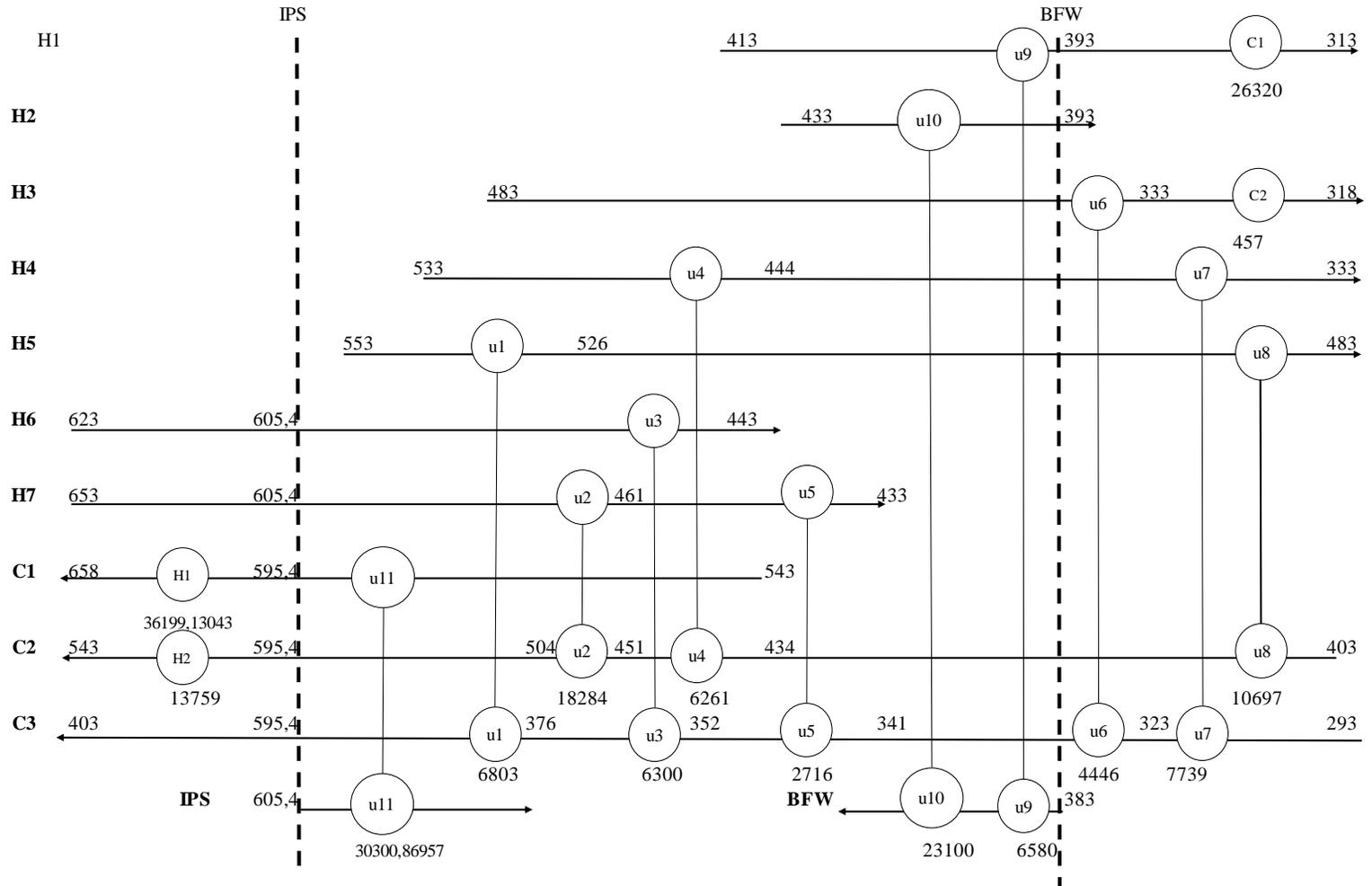


Figura 24

Red de intercambiadores de calor reportada en la literatura con Múltiples Utilidades.



El vapor de presión intermedia suministra 24212,53824 kW de calor a la corriente fría C2 de la red de diseño Pinch y por lo tanto el calentador disminuye su aportación a 30943,56576 kW a la corriente C1 para llegar a las temperaturas objetivo. La corriente de agua de alimentación a la caldera se vaporiza aprovechando 9760,78500 kW del calor que liberan las corrientes calientes, dicho vapor puede encontrar usos en otros procesos como las calderas. El calor restante de las corrientes calientes es retirado por tres enfriadores en las corrientes H1, H3 Y H4, el calor retirado fue de 21506,85600 kW.

De la misma manera se añadió múltiples utilidades en la red proporcionada por la literatura, el vapor de presión intermedia suministró 30300,86957 kW a la corriente C1 y los calentadores suministraron 49958,13043 kW de calor a las corrientes frías para cumplir con las temperaturas objetivo. En bfw retiró 29680 kW de las corrientes calientes, mientras que con los calentadores se removió 26777 kW para obtener las temperaturas objetivo de cada una de las corrientes.

El uso de utilidades múltiples disminuyó una unidad de enfriamiento tanto en la red reportada en la literatura como en la red de diseño Pinch. Como se puede observar en la Tabla 22, cuando se añade múltiples utilidades el costo anualizado de la red reportada por Mizutani et al. (2003) es 3775432,283 \$/año mayor al costo anualizado que presenta la red de diseño Pinch. Por lo tanto, se puede apreciar que el método de análisis Pinch permite reducir en gran medida el costo anualizado debido a la minimización del uso de utilidades de energía.

Tabla 22

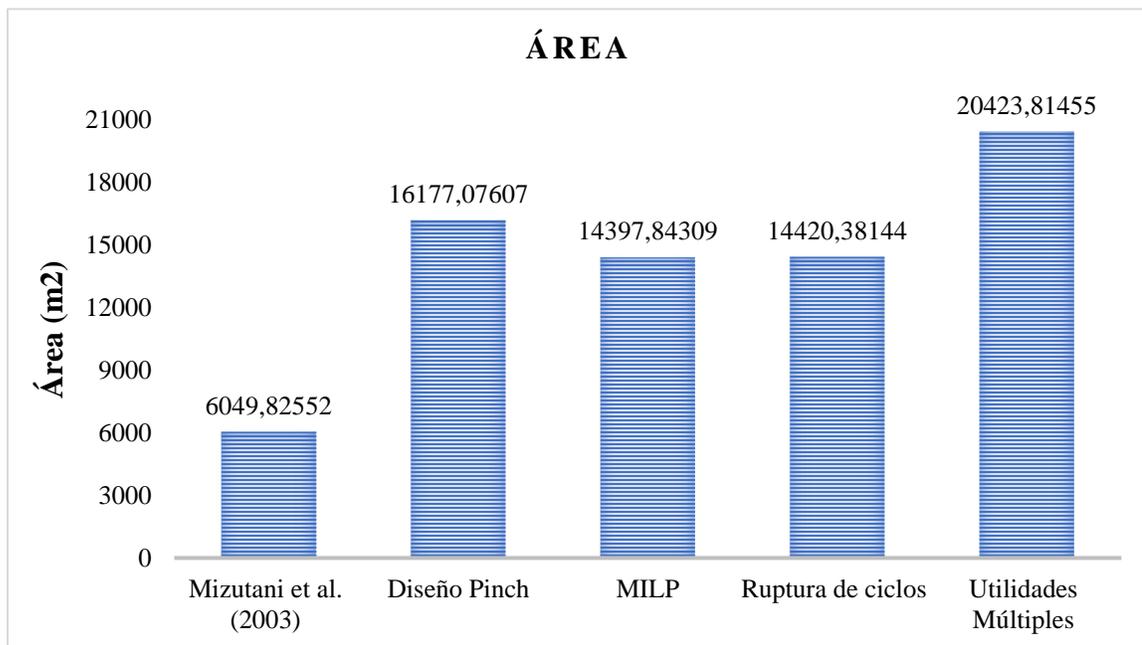
Comparación de costos entre los diseños de red con utilidades múltiples.

	Mizutani et al. (2003)	Método de análisis Pinch
Utilidad de calentamiento (kW)	49958,13043	30943,56576
Utilidad de enfriamiento (kW)	26777	21506,85600
IPS (kW)	30300,86957	24212,53824
BFW (kW)	29680	9760,78500
Área total de la red (m²)	10013,51263	20423,81455
C. utilidades de energía (\$/año)	3158149,82580	1915178,65560
C. utilidades adicionales (\$/año)	4424465,21967	1880207,27476
Costo de compra (\$/año)	186494,36804	304462,69084
Costo total anual (\$/año)	7601264,48228	3825832,19944

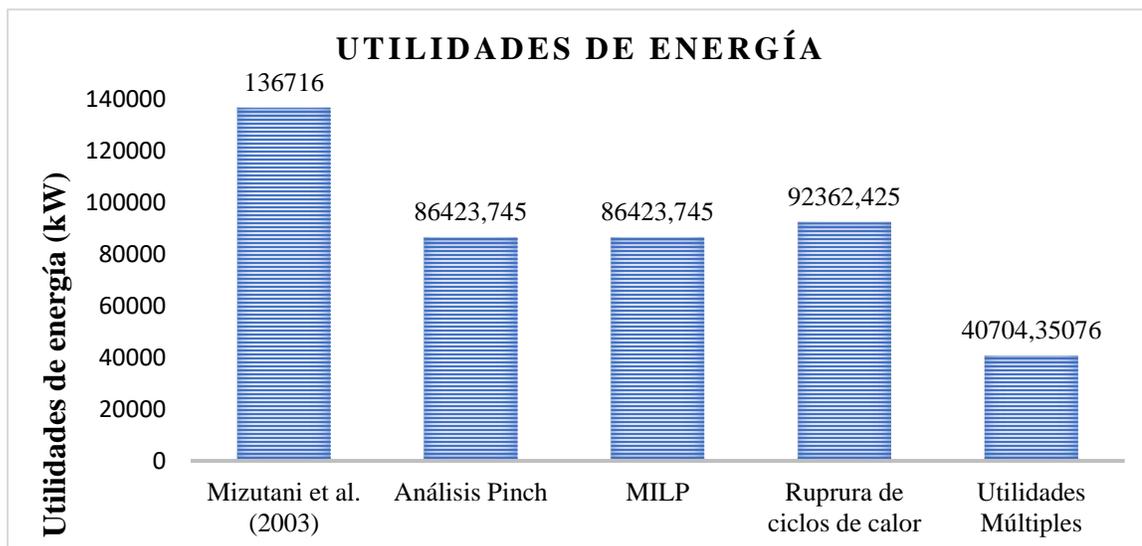
La red reportada en el trabajo de Mizutani et al. (2003) presenta el área más pequeña en comparación a las redes reportadas en este trabajo como se puede observar en la Figura 26(a), sin embargo, utiliza la mayor cantidad de utilidades de energía como se observa en la Figura 25 (b) y por lo tanto representa el mayor costo total anual (Figura 25 c).

Figura 25

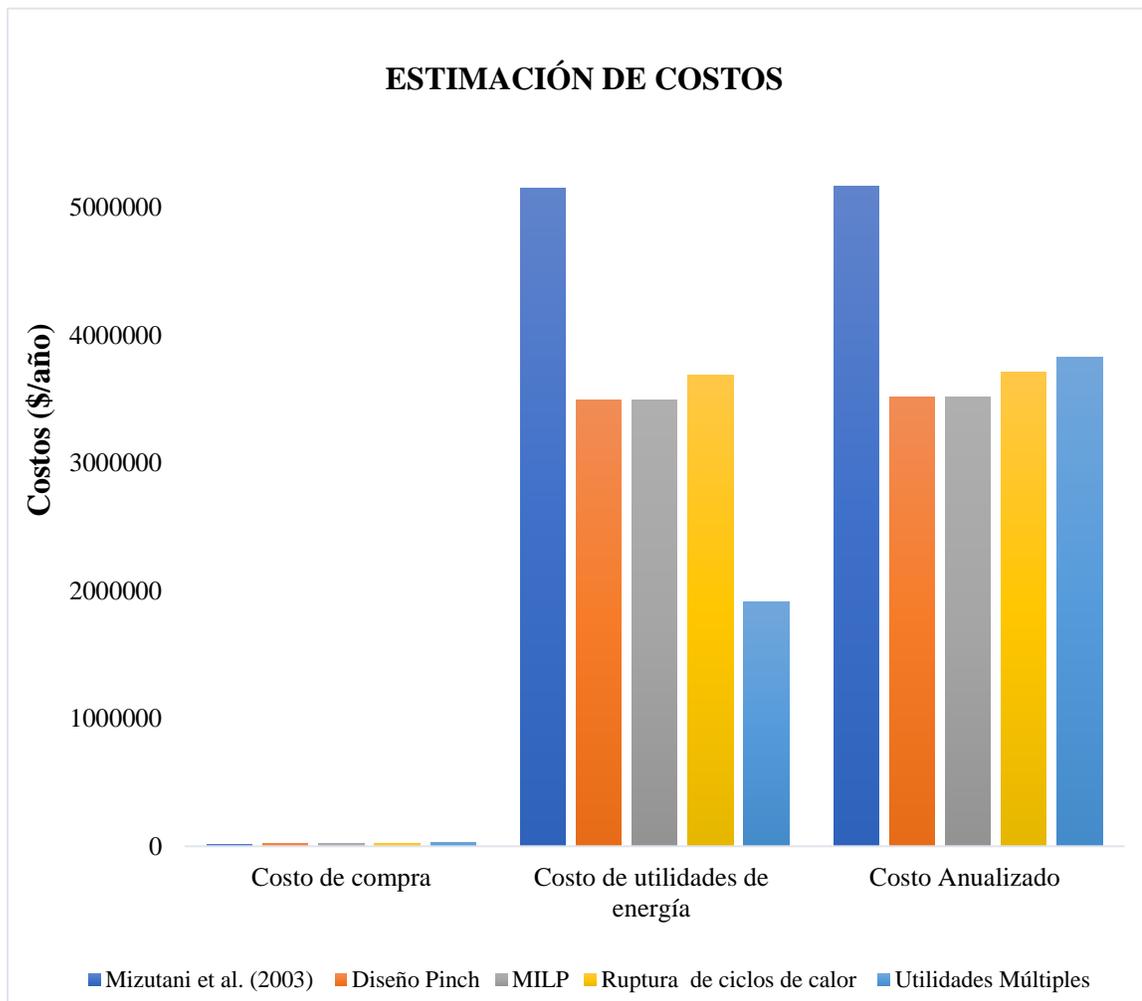
(a) Área total de la red de intercambiadores de calor, (b) utilidades de energía y (c) costos.



(a)



(b)



(c)

En la Figura 25 (c) se puede observar que el costo de las utilidades de energía constituye aproximadamente más del 99% en el costo total anual por lo que se puede decir que la cantidad de utilidades de energía usadas determina el aumento o la reducción del costo total anual. Cabe enfatizar que dicho valor puede variar, dependiendo del costo del combustible, el cual no es constante con el tiempo y varía de acuerdo al precio del petróleo crudo y el costo de refinación. La oferta y demanda mundial del petróleo es otro factor que determina el cambio en el precio del petróleo debido al crecimiento económico actual (Administración de Información de Energía de

EE. UU. (EIA), 2021b). El análisis Pinch minimiza el uso de utilidades de calentamiento y enfriamiento, lo que permite optimizar el costo de operación de una red de intercambiadores de calor. En la Figura 23 (c) se puede verificar que el diseño Pinch y la programación lineal de enteros mixtos son los métodos que presentan menor costo anualizado debido a que parten de los requerimientos mínimos de energía, siendo que este último método es el que reporta mejores resultados dado que además de utilizar la mínima cantidad de utilidades de energía tiene menor área, como consecuencia de que dicho método disminuye la cantidad de unidades de intercambiadores de calor.

La ruptura de ciclos de calor disminuye el área de la red de intercambiadores de calor en comparación con el método de diseño Pinch, pero el aumento del uso de utilidades tanto de calentamiento como enfriamiento (Figura 23 b), posibilita un alza en el costo anualizado, sin embargo, presenta menor costo total anual que la red reportada en la literatura.

La red obtenida al añadir múltiples utilidades muestra mayor área en comparación a las demás redes de intercambiadores de calor (Figura 23 a) debido a que se aumenta el número de unidades de intercambio de calor. Además, el costo de las utilidades adicionales añadidas ha ocasionado que el costo anualizado de esta red aumente en comparación a las redes obtenidas en este trabajo, por lo que se puede decir que no es conveniente añadir más utilidades. Sin embargo, si se compara con la red reportada en la literatura, la red con múltiples utilidades resulta ser menos costoso.

Finalmente, después de analizar las distintas redes de intercambiadores de calor realizadas en este trabajo se puede decir que la red que mejores resultados presenta es

la red obtenida por el método de programación lineal de enteros mixtos, además dicho método es rápido y eficiente y se puede adaptar a problemas que contengan un gran número de corrientes calientes y frías.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 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 y se identificó que el costo de las utilidades de energía constituye aproximadamente 99,37% del costo total anualizado.

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. Sin embargo, es una diferencia bastante pequeña.

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. En el caso del área se observó una reducción del 10,86% y se evidenció un aumento en el uso de utilidades de energía de 6,43% lo que produjo un aumento de 5,20% en el costo anualizado al comparar con la red obtenida mediante el Diseño Pinch, sin embargo, se evidenció una reducción del 28,18% en comparación al costo anualizado correspondiente a la red reportada en la literatura.

El uso de múltiples utilidades de energía demostró que la red obtenida a través del análisis Pinch presenta mejores resultados que la red de la literatura. Al añadir vapor de presión intermedia y agua de alimentación a la caldera como utilidades de energía adicionales se consiguió reducir 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 que corresponde al 31,94% de reducción en comparación con el costo anualizado correspondiente al de red proporcionada en la literatura.

5.2 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.

Calcular los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento mediante programación lineal (LP).

Usar vapor de presión intermedia a temperaturas menores a 605,4 K para identificar si el costo total anual aumenta o disminuye.

Realizar la eliminación de ciclos de calor en la red obtenida mediante Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP).

Bibliografía

- Abdelwali, H. A., Swilem, S. M., Shiaty, R. El, & Murad, M. M. (2019). *Solving A Transportation Problem Actual Problem Using Excel Solver*. 0869(12), 13-17.
- Campos, A. M. (2008). *Excel XP avanzado*. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=egmHbYFkkGEC&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). Termodinámica. En *Termodinámica* (Séptima ed). <https://doi.org/10.35537/10915/68983>
- Chemical Engineering*. (2020, marzo 20). Recuperado 16 de marzo de <https://www.chemengonline.com/2019-chemical-engineering-plant-cost-index-annual-average/>
- Ciric, A. R., & Floudas, C. A. (1990). A comprehensive optimization model of the heat exchanger network retrofit problem. *Heat Recovery Systems and CHP*, 10(4), 407-422. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(90\)90090-7](https://doi.org/10.1016/0890-4332(90)90090-7)
- Delgado, D. (2016). Balance Energético Nacional. En *Ministerio coordinador de sectores estratégicos* (Vol. 53). Recuperado de <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00366.pdf>
- Edgar, T., Himmelblau, D., & Lasdon, L. (2001). *Optimization of Chemical Processes*. Recuperado de [https://gymkhana.iitb.ac.in/~scp/scp/ocw/chemical/cl_603_optimization/Optimization_of_Chemical_Processes - Edgar Himmelblau and Lasdon 2nd ed.pdf](https://gymkhana.iitb.ac.in/~scp/scp/ocw/chemical/cl_603_optimization/Optimization_of_Chemical_Processes_-_Edgar_Himmelblau_and_Lasdon_2nd_ed.pdf)
- EL-Temtamy, S. A., & Gabr, E. M. (2012). Design of optimum flexible heat exchanger networks for multiperiod process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 21(2), 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.11.007>
- Ensinas, A. V., Nebra, S. A., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2007). Analysis of process

steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, 48(11), 2978-2987.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.038>

EU Science Hub. (2020). Recuperado 16 de marzo de 2021, de

<https://ec.europa.eu/jrc/en/news/global-co2-emissions-continue-rise-eu-bucks-global-trend>

Floudas, C. A., Ciric, A. R., & Grossmann, I. E. (1986). Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. *AIChE Journal*, 32(2), 276-290.

<https://doi.org/10.1002/aic.690320215>

Fraser, D. M., Howe, M., Hugo, A., & Shenoy, U. V. (2005). Determination of mass separating agent flows using the mass exchange grand composite curve. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(12 A), 1381-1390.

<https://doi.org/10.1205/cherd.04110>

Grossmann, I. E. (1985). Mixed-integer programming approach for the synthesis of integrated process flowsheets. *Computers and Chemical Engineering*, 9(5), 463-

482. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(85\)80023-5](https://doi.org/10.1016/0098-1354(85)80023-5)

Herreras, E. B. (2005). Utilidad de la hoja de cálculo Excel en el análisis de datos cuantitativos. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 2(6), 1-6.

Huang, K. F., Al-mutairi, E. M., & Karimi, I. A. (2012). Heat exchanger network synthesis using a stagewise superstructure with non-isothermal mixing. *Chemical Engineering Science*, 73, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.032>

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.032>

Industrial & Engineering Chemistry Research. (2021). Recuperado 13 de marzo de 2021, de <https://pubs.acs.org/journal/iecred>

International - U.S. Energy Information Administration (EIA). (2017). Recuperado 6 de abril de 2021, de <https://www.eia.gov/international/analysis/country/ECU>

- Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2020). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design* (Fourth Edition). Recuperado de https://books.google.es/books?id=xaDLDwAAQBAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Kamel, A., & Noureldin, M. (2013). Heat exchanger network retrofit for energy savings. *Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells*, 621-650. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-098221-2.00019-9>
- Li, Y., Liu, H., Tao, J., & Li, J. (2011). Application of pinch technology in heat recovery system optimization of coated paper machine. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 23(2), 113-116.
- Linnhoff, B., & Flower, J. R. (1978). Synthesis of Heat Exchanger Networks: I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 24(1), 107-119.
- 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>
- Londoño, D., & Boada, A. (2017). Enseñanza con el uso directo de las TIC . Potencialidades del Solver (Microsoft Excel) para la Enseñanza de Programación Lineal y Modelos de Transporte. *XVIII Virtual Educa Colombia 2017*, (June), 15. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317624466_Ensenanza_con_el_uso_directo_de_las_TIC_Potencialidades_del_Solver_Microsoft_Excel_para_la_Ensenanza_de_Programacion_Lineal_y_Modelos_de_Transporte
- Mizutani, F. T., Pessoa, F. L. P., Queiroz, E. M., Huan, 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>
- Moncayo-Martínez, L. A., & Muñoz, D. F. (2018). Un Sistema de Apoyo para la Enseñanza del Método Simplex y su Implementación en Computadora. *Formación universitaria*, 11(6), 29-40. <https://doi.org/10.4067/s0718-50062018000600029>
- Mukherjee, R. (1998). Effectively design hell-and-tube heat exchangers. *Chemical Engineering Progress*, 94(2), 21-37.
- Papoulias, S. A., & Grossmann, I. E. (1983). A structural optimization approach in process synthesis-II. Heat recovery networks. *Computers and Chemical Engineering*, 7(6), 707-721. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(83\)85023-6](https://doi.org/10.1016/0098-1354(83)85023-6)
- Rathjens, M., & Fieg, G. (2019). Cost-optimal heat exchanger network synthesis based on a flexible cost functions framework. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050784>
- Ravagnani, M. A. S. S., & Caballero, J. A. (2007). Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design. *Computers and Chemical Engineering*, 31(11), 1432-1448. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.12.005>
- Reyes, M. B., Moya, J. L., & Cruz, O. M. (2014). Review sobre el diseño y la optimización de los Intercambiadores de calor de Tubo y Coraza. *VII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica.*, (November), 104-112. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4448.3040>
- Sánchez, C. (2010). *Funciones en Excel* (primera). Recuperado de https://books.google.es/books?id=VeY3ym3LNasC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- 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.

- Shenoy, U. V., Sinha, A., & Bandyopadhyay, S. (1998). Multiple utilities targeting for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(3), 259-272. <https://doi.org/10.1205/026387698524910>
- 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__OP1KbvAhUIq1kKHdKuBBwQ6AEwAXoECAQQAg#v=onepage&q=chen approximation of the log mean temperature&f=false
- Sun, K. N., Wan Alwi, S. R., & Manan, Z. A. (2013). Heat exchanger network cost optimization considering multiple utilities and different types of heat exchangers. *Computers and Chemical Engineering*, 49, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.10.017>
- Tarighaleslami, A. H., Walmsley, T. G., Atkins, M. J., Walmsley, M. R. W., Liew, P. Y., & Neale, J. R. (2017). A Unified Total Site Heat Integration targeting method for isothermal and non-isothermal utilities. *Energy*, 119, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.071>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2019). Recuperado 7 de abril de 2021, de <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2021a). Recuperado 6 de abril de 2021, de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=47397>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2021b). Recuperado 6 de abril de 2021, de <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/consumption/sub-topic-01.php>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2021c). Recuperado 7 de abril de 2021, de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=47357>

Urbaniec, K., Zalewski, P., & Zhu, X. X. (2000). Decomposition approach for retrofit design of energy systems in the sugar industry. *Applied Thermal Engineering*, 20(15), 1431-1442. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00017-X)

Zhang, B. J., & Hua, B. (2007). Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization. *Journal of Cleaner Production*, 15(5), 439-448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.08.004>

ANEXOS