

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



INTEGRACIÓN DE ENERGÍA Y PROPIEDADES SIMULTÁNEA CONSIDERANDO INTERACCIONES ENTRE LAS PROPIEDADES Y LA TEMPERATURA

Opción 2 –Titulación Integral –Tesis profesional

Elaborada por:

Roberto Jesús Alvarez Ariza

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Asesor:

Dr. Fernando Jonathan Lona Ramírez

Uriangato, Gto.

Mayo de 2019

**“INTEGRACIÓN DE ENERGÍA Y PROPIEDADES SIMULTÁNEA
CONSIDERANDO INTERACCIONES ENTRE LAS PROPIEDADES Y LA
TEMPERATURA”**

Elaborada por:

Roberto Jesús Alvarez Ariza

Aprobado por.

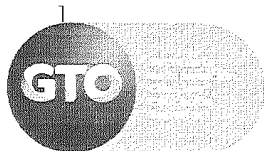
Dr. Fernando Jonathan Lona Ramírez
Docente de la carrera de Ingeniería ambiental
Asesor de tesis profesional

Revisado por.

M.C. Susana Ramírez Guizar
Docente de la carrera de Ingeniería ambiental
Revisor de tesis profesional

Revisado por.

Q. Brenda Huichapa Rocha
Docente de la carrera de Ingeniería ambiental
Revisor de tesis profesional



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
 Instituto Tecnológico Superior del Sur de
 Guanajuato



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 13/Mayo/2019

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

Ing. J. Trinidad Tapia Cruz
 Director Académico y de Estudios Profesionales
 ITSUR
 PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado: Roberto Jesús Álvarez Ariza	
Carrera: Ing. Ambiental	Núm. de control: A15120013
Nombre del proyecto: INTEGRACIÓN DE ENERGÍA Y PROPIEDADES SIMULTÁNEA CONSIDERANDO INTERACCIONES ENTRE LAS PROPIEDADES Y LA TEMPERATURA	
Producto: Tesis Profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.


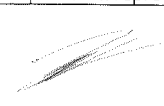
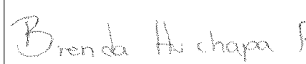
ATENTAMENTE


Dr. Fernando Jonathan Lona Ramírez
 Coordinador de Ingeniería Ambiental
 ITSUR



Instituto Tecnológico Superior
 del Sur de Guanajuato
 COORDINACIÓN
 INGENIERÍA AMBIENTAL

La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

		
Dr. Fernando Jonathan Lona Ramírez	M.C. Susana Ramírez Guizar	Lic. Brenda Huichapa Rocha

c.c.p.- Expediente



Av. Educación Superior # 2000 Cal. Benito Juárez Uriangato, Guanajuato, C.P. 37100
 Av. San Jerónimo # 61 Tel. (412) 4573499 ext 711 Fax (412) 4573499
 email: ambiental@itsur.edu.mx
 www.itsur.edu.mx



Agradecimientos

Gracias a mis gatos Jacqueline y Cheeto que siempre estuvieron para mí en las buenas y en las malas.

Resumen

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un algoritmo de programación matemática que permite simular la integración simultánea de energía y propiedades en corrientes de proceso con la finalidad de reducir costo de operación, considerando el efecto que la temperatura tiene sobre las diferentes propiedades. Son considerados costos de intercambiadores de calor, servicios externos de enfriamiento y calentamiento, agua fresca y el costo de desperdicio.

Los interceptores de propiedad son considerados procesos isotérmicos que tienen la capacidad de alterar una sola propiedad.

Se toma en cuenta el efecto que tiene la temperatura en las diferentes propiedades, pero no se toma en cuenta los posibles efectos e interacciones entre las demás propiedades.

El algoritmo de programación genera una superestructura en la cual se ven repartidos los flujos del proceso, la cantidad de interceptores por los cuales podría si es necesario que entre a un intercambiador de calor, todo esto con la finalidad de recircularlas a alguna unidad de proceso o preparándolas para ser mandadas al desperdicio.

Como resultado se obtienen ahorros de hasta el 97.6% dentro del proceso de producción, así como la disminución de la demanda del agua fresca en el proceso todo esto cumpliendo con las regulaciones y restricciones ambientales inherentes a las propiedades contenidas en el flujo del proceso.

Abstract

This work was focused on the development of a mathematical programming algorithm that simulates the simultaneous energy and properties integration in process streams with the purpose to reduce operating cost, considering the effect that temperature has on the different properties. They are considered costs of heat exchangers, external services of cooling and heating, fresh water and the cost of waste.

Property interceptors are considered isothermal processes that have the ability to change a single property.

The programming algorithm generates a superstructure in which the flows of the process are distributed, the among of interceptors could pass through and, if necessary, use a heat exchanger, all with the purpose of recircularizing them to any unit of process or preparing them to be sent to waste.

The effect of temperature on the different properties is taken into account, but the possible effects and interactions between the other properties are not taken into account.

As a result, savings of up to 97.6% are obtained within the production process as well as the decrease in the demand for fresh water in the process, all this complying with the environmental regulations and restrictions inherent to the properties contained in the process flow.

Palabras claves (*keywords*)

Integración, energía, optimización, proceso, industria.

Índice general

Capítulo 1	1
Introducción.	1
Capítulo 2.....	5
Marco teórico (Antecedentes).	5
Capítulo 3.....	20
Planteamiento del problema	20
3.1. Identificación.	20
3.2. Justificación.	20
3.3. Alcance.	20
Capítulo 4.....	22
Objetivos	22
4.1. Objetivos generales.	22
4.2. Objetivos específicos.	22
Capítulo 5.....	23
Metodología	23
Capítulo 6.....	33
Resultados	33
Capítulo 7	35
Análisis de Resultados.....	35
Capítulo 8.....	37
Conclusiones y trabajo a futuro.....	37
Referencias bibliográficas	38
Anexos	41

Índice de figuras

Figura 1 Método de ‘pinch point’ para la determinación de la mínima cantidad de servicios externos.....	6
Figura 2 Superestructura de un HEN.	7
Figura 3 Curva compuesta por la integración de masa.....	9
Figura 4 Superestructura de una red de recicl/re-uso de agua.	10
Figura 5 Superestructura de un problema de integración de propiedades sin interceptores de propiedad.....	11
Figura 6 Curva compuesta para la integración de propiedades.....	12
Figura 7 Superestructura de un problema de integración de propiedad con interceptores de propiedad.....	13
Figura 8 Superestructura de un problema de integración de masa y energía simultáneo.....	15
Figura 9 Estructura de la integración de masa para el problema de integración de energía y masa simultáneo multi-contaminante.....	15
Figura 10 Estructura de la integración de energía para el problema de integración de energía y masa simultáneo multi-contaminante.....	16
Figura 11 Definición de corriente caliente y fría.....	17
Figura 12 Superestructura del problema de integración simultánea de energía y propiedades.....	18
Figura 13 Superestructura problema de integración simultánea de energía y propiedades.....	24
Figura 14 Diagrama del proceso de producción de fenol a partir de cumeno.....	31
Figura 15 Solución gráfica del problema.....	33

Índice de tablas

Tabla 1 Datos de las corrientes de proceso	31
Tabla 2 Datos de las unidades de proceso.	32

Capítulo 1

Introducción.

1.1 Generalidades

Un pensamiento antiguo generalizado en gran parte de la humanidad, que proviene de épocas remotas cuando la humanidad era poco numerosa, es la idea de estar viviendo en un mundo infinito con áreas naturales infinitas y con recursos inagotables. A partir de esta concepción del mundo y de la naturaleza, todos los actos y emprendimientos humanos nunca tuvieron en cuenta su costo ambiental (1).

Hoy día enfrentamos una realidad distinta, en la que no sólo nos hemos dado cuenta de que nuestros recursos naturales son finitos, sino que además ahora somos conscientes del impacto que nuestras acciones tienen sobre la naturaleza, tales como los cambios climáticos, la deforestación, el calentamiento global, el agujero de la capa de ozono, el deshielo polar, la destrucción y desaparición de ecosistemas, entre otros.

Por su parte, en la medida que la situación energética se deteriora y con la globalización de la economía, se hace patente la necesidad de que la energía sea considerada como un factor de costos que requiere especial atención.

En la mayoría de las empresas, en especial aquellas en las que el costo energético representa un porcentaje importante de los costos de producción o explotación, comienzan a implementar sistemas de gestión energética, que optimicen en el uso eficiente de la energía, justificado por la rentabilidad en la reducción de los costos energéticos (2), y como beneficio ambiental extra, se reduce la cantidad de gases contaminantes emitidos provenientes de la combustión de estos combustibles.

La industria se enfrenta a dos tareas de suma importancia, la de reducir sus costos energéticos hoy y en el futuro, mejorando al mismo tiempo el balance energético de

la producción (ser humano/producto) reduciendo las pérdidas de energía, así como diseñar procesos ambientalmente amigables, reduciendo a la vez las emisiones de gases contaminantes provenientes de la combustión de los energéticos (3).

Nuestro país no ha quedado exento de esto, México se encuentra en el 16º lugar respecto a los países que más gases de efecto invernadero emiten a la atmósfera, siendo este el segundo país de América Latina que más gases emiten a la atmósfera sólo por debajo de Brasil.

En 2015, México emitió 683 millones de toneladas de bióxido de carbono; del total de las emisiones, 64% corresponde al consumo de combustibles fósiles; 10% se originan por sistemas de protección pecuaria; 8% provinieron de los procesos industriales; 7% se emitieron por el manejo de residuos; 6% por las emisiones de fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías y 5% se generó por actividades agrícolas.

La generación de residuos peligrosos tales como aceites gastados, resultado de la limpieza de maquinaria e instalaciones, materias primas y productos químicos que caducan son sólo algunos ejemplos de lo que se genera en las diversas industrias. La industria nacional produce 450 mil toneladas por día de residuos peligrosos lo que equivale a cerca de cinco millones de toneladas anuales (4).

Algunas ramas industriales se han visto afectadas por los costos de los energéticos; la Cámara Nacional de la Industria Textil reportó que 100% de sus agremiados han reportado incrementos en el costo energético de hasta el 80% emitidos por la CFE situación que provoca paros técnicos, corriendo el riesgo de que estos costos se trasladen directamente al consumidor (5).

La industria minera también se ha visto afectada en este sentido debido a sus altos requerimientos energéticos (6).

En los países desarrollados que ya han implementado algunas estrategias para la optimización de recursos energéticos; el consumo de energía en los últimos veinte años no sólo no ha crecido como se había previsto, sino que ha disminuido.

Las industrias fabrican sus productos empleando menos energía; los aviones y los coches consumen menos combustible por kilómetro recorrido y se gasta menos combustible en la calefacción de las casas porque los aislamientos son mejores (7).

Casos como la transformación y remodelación en el edificio de un laboratorio en Friburgo (Alemania) que redujo las emisiones de CO₂ en el área en más de 70% y al mismo tiempo disminuyeron los costos anuales en 40%, incluida la recuperación de la inversión y los gastos de mantenimiento y operación, o la fábrica de materiales de embalaje en Malasia que logró disminuir en más de 80% las emisiones, con una amortización de la inversión de menos de 5 años(3) son ejemplos de que se ha avanzado exitosamente en el compromiso ambiental y la optimización de los recursos energéticos.

Sin embargo, aún queda camino por recorrer, pues en países en desarrollo, aunque el consumo de energía por persona es mucho menor que en los desarrollados, la eficiencia en el uso de energía no mejora. Sucede esto, entre otros motivos, porque muchas veces las tecnologías que implantan son anticuadas (7).

En México se ha trabajado en materia de desarrollo regulatorio e institucional ambiental. A pesar de que desde la constitución de 1917, en su artículo 27 se sentaron las bases de la utilización de los recursos naturales, no es sino hasta 1988, con la promulgación de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y otras leyes locales y reglamentos que se da el primer paso real para el desarrollo regulatorio en beneficio del ambiente.

Capítulo 1. Introducción.

En 1994 con la creación de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca y todos los institutos sectorizados y desconcentrados de ésta, se puede hablar de un país en vías de consolidación regulatoria ambiental.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

1.1 Antecedentes

Con el objeto de desarrollar procesos sustentables amigables con el ambiente, se han desarrollado diversas tecnologías, metodologías y estrategias que permiten a las industrias reducir sus costos de operación optimizando los recursos energéticos y cumpliendo con las restricciones ambientales de los desechos correspondientes.

1.1.1 Integración de energía

En la década de los 80's, se desarrolló la técnica de integración de energía (9) que permitía encontrar las condiciones de operación de un proceso industrial para minimizar el consumo recursos energéticos (agua de enfriamiento, vapor, etc.). La metodología consiste en un método gráfico denominado "pinch point" o punto de pliegue, el cual permite conocer la cantidad mínima necesaria de servicio de calentamiento y enfriamiento. Las corrientes son clasificadas en frías y calientes y se construye una curva con cada una de ellas, tal como se muestra en la Figura 1. Estas gráficas pueden moverse hacia la izquierda o derecha hasta el punto en el que ambas curvas se toquen, el punto de intercepción entre ambas curvas es el punto de pliegue, y de manera gráfica se determinan los servicios externos requeridos. El servicio de enfriamiento se calcula con la parte de la curva caliente que sobresale de la curva fría, y viceversa, el servicio de calentamiento se calcula con la parte de la curva fría que sobresale de la curva caliente.

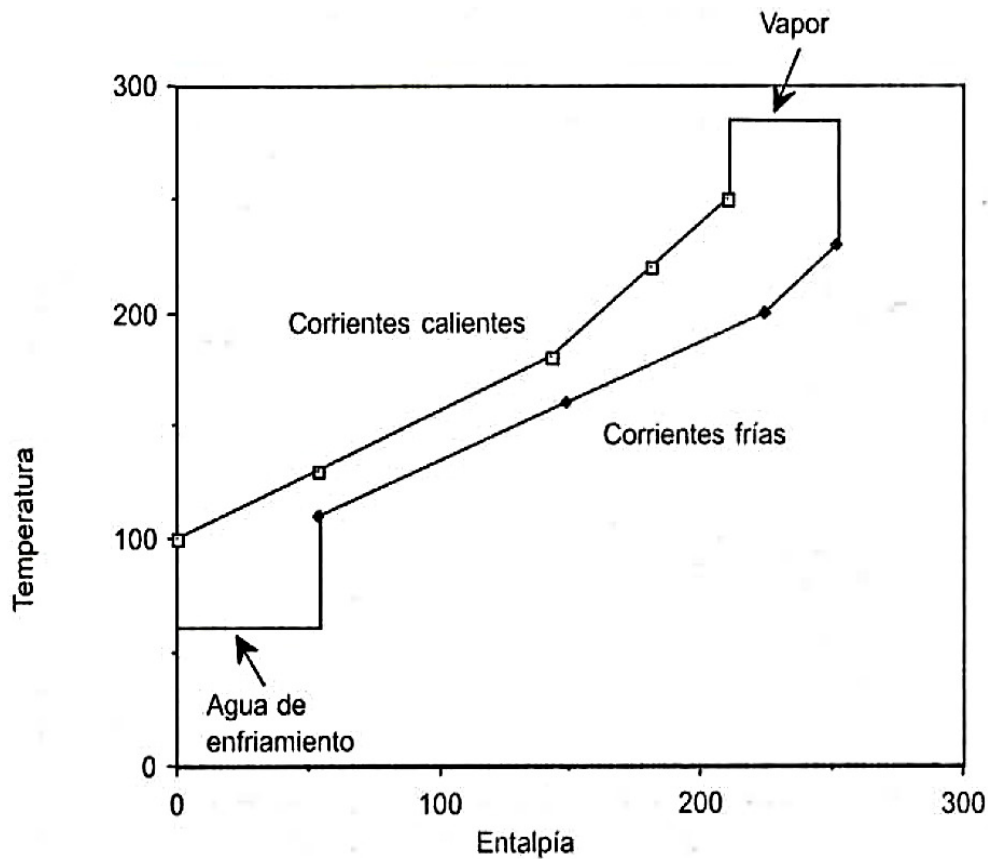


Figura 1 Método de “pinch point” para la determinación de la mínima cantidad de servicios externos(10).

Una vez determinadas las cantidades mínimas de servicios externos, se diseña una red de intercambiadores de calor o HEN (por sus siglas en inglés Heat Exchanger Network) que cumple con los requerimientos encontrados. Sin embargo, existen múltiples opciones de HEN's que permiten cumplir con los requerimientos mínimos de servicios externos.

Esta metodología es el precedente más importante de la integración de energía, del cual se desprendieron posteriormente otras metodologías gráficas como la curva compuesta o la del espagueti, cuyo objetivo es el mismo, aunque esta última

considera además la minimización de las áreas de los intercambiadores de calor (10).

Posteriormente se desarrollaron metodologías de programación matemática que, bajo la premisa de que no necesariamente la mínima cantidad de servicios externos corresponde al mínimo costo de operación del proceso, consideran no sólo los costos de los servicios externos, sino que además incluyen dentro de la optimización costos de los intercambiadores de calor (áreas) y proponen el uso de diferentes tipos de servicios externos de calentamiento y enfriamiento, con sus respectivos costos y condiciones de operación. Entre los trabajos más recientes en esta área se encuentran los realizados por Lona y col.(11) y Laukkanen y col.(12).

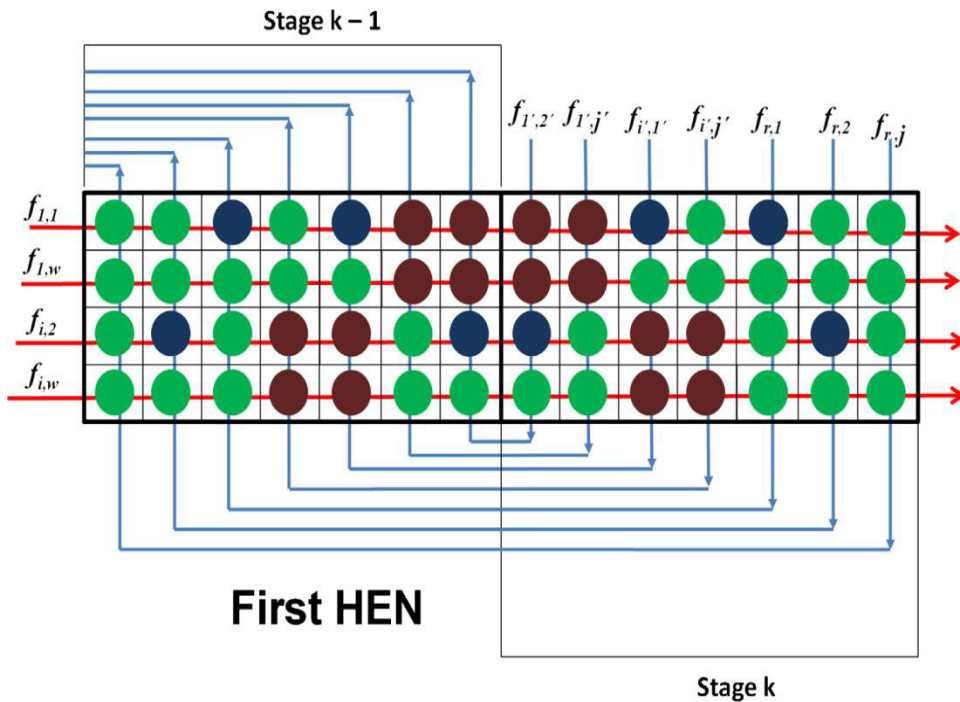


Figura 2 Superestructura de un HEN propuesta por Lona Ramírez(26).

En la Figura 2 se muestra la superestructura de un HEN en el que en cada una de las etapas de éste se representan todos y cada uno de los posibles

intercambiadores de calor que pudiera tener cada corriente. Además del posible uso de servicio externo, ya sea de enfriamiento o calentamiento de acuerdo al tipo de corriente.

Estas estructuras se programan en resolvers comerciales como GAMS o LINGO, y se encuentran los intercambiadores de calor que deben existir de tal manera que se minimice el costo de operación del proceso, lo cual incluye costos de servicios externos y costos de los intercambiadores de calor.

1.1.2 Integración de masa

En la década de los 90's, surge de una idea análoga a la integración de energía, considerando ahora en lugar de la temperatura, las composiciones de contaminantes en corrientes de proceso. Es decir, en lugar de tener corrientes frías y calientes, se tienen corrientes contaminadas o "sucias" y corrientes capaces de recibir contaminante denominadas "limpias". El objetivo de esta metodología consiste en retirar los componentes no deseados de las corrientes que van a ser desechadas y pasarlos a corrientes que puedan ser reutilizadas en el proceso, con objeto de que las corrientes de desecho cumplan con las restricciones ambientales de la cantidad de contaminante. En caso de que no todo el contaminante necesario para cumplir las restricciones ambientales pueda ser retirado de las corrientes "sucias", éstas requieren de agentes externos para retirar dicho exceso de contaminante. Estos agentes externos tienen un costo el cual puede ser minimizado seleccionando la tecnología más adecuada para el tratamiento de las corrientes.

Los primeros trabajos presentan una solución gráfica a este tipo de problemas basados en el punto de pliegue; sin embargo, en el caso de masa, se debe considerar las relaciones de equilibrio entre las diferentes soluciones. En la Figura 3 se muestra la curva compuesta en la que se observan las relaciones de equilibrio

(ecuaciones en la parte inferior derecha), se aprecia el punto de pliegue, y el exceso de contaminante que debe tratarse con agentes externos.

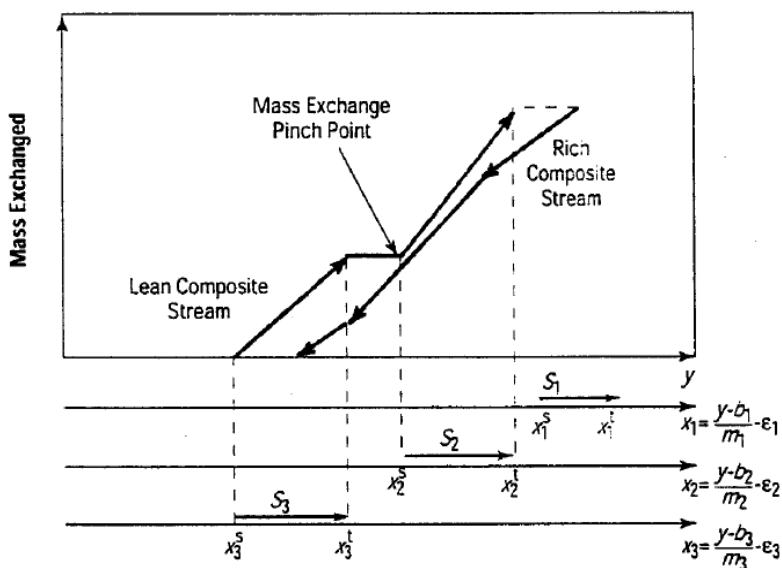


Figura 3 Curva compuesta para la integración de masa(13).

1.1.3 Redes de reciclo/re-uso de agua

Para finales de los 90's se introdujo una nueva forma de integración de masa que deja al lado el equilibrio entre corrientes y propone el mezclado directo de las mismas con el objeto de diluir la concentración de los contaminantes y que sea la misma corriente de desecho la que se regrese a las unidades de proceso. En la Figura 4 se muestra la superestructura de una red de reciclo/re-uso de agua (14) en la que se observa el uso de corrientes limpias, el uso de unidades de tratamiento para la corrección de los contaminantes, así como las corrientes que provienen del proceso y las unidades de proceso. El objetivo es la minimización del costo total

anual de proceso considerando los costos de operación de los interceptores de propiedad, los costos de tubería requerida y el costo de las corrientes frescas. Estos problemas se resuelven mediante la programación de la formulación matemática en paquetes comerciales como GAMS y LINGO, encontrando así las condiciones de operación óptimas del proceso.

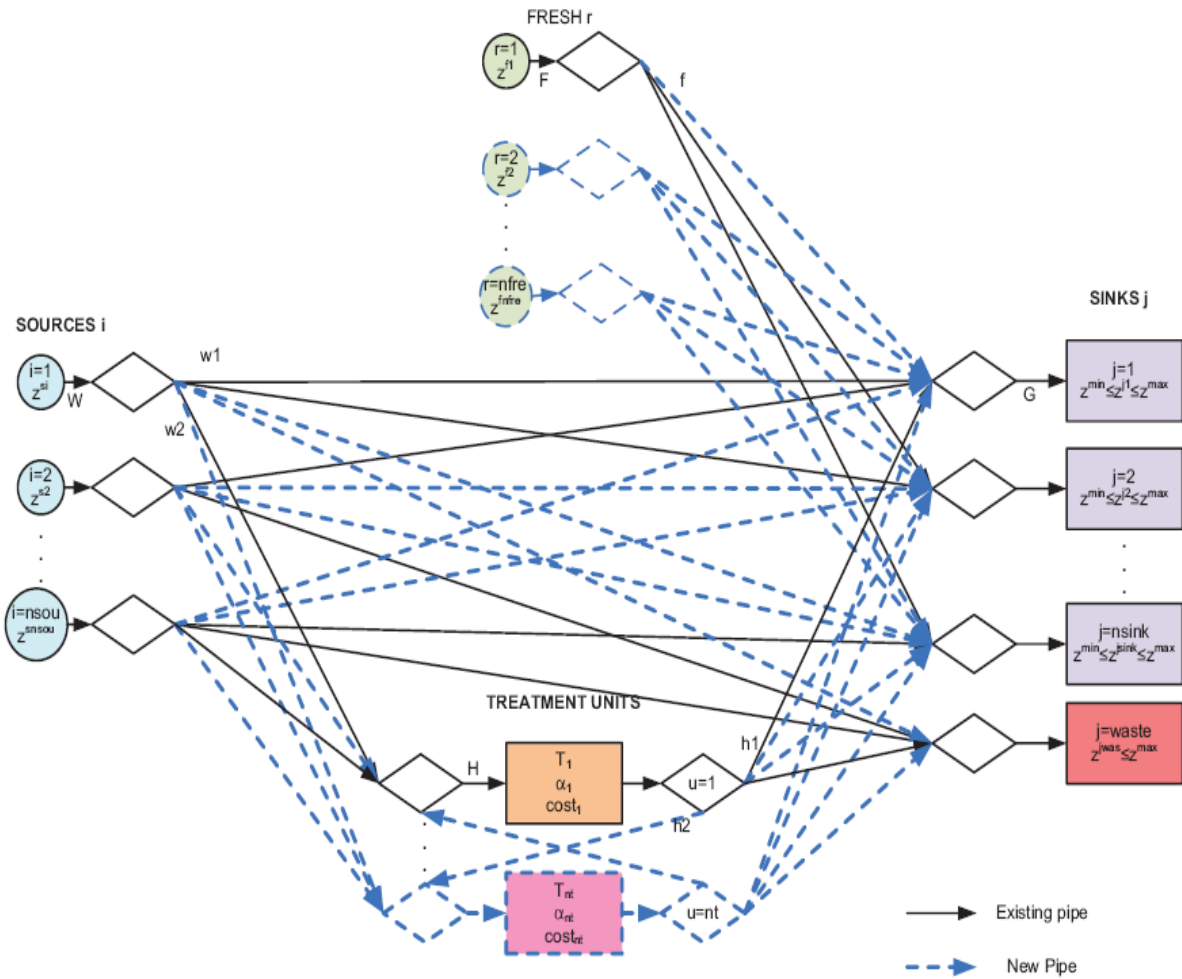


Figura 4 Superestructura de una red de reciclaje/re-uso de agua (14).

1.1.4 Integración de propiedades

A principios de siglo, surge la idea de agrupar a los contaminantes de la integración de masa y realizar la integración de propiedades (15). Por ejemplo, si una corriente contiene contaminantes como arsénico, cromo, plomo y mercurio, pueden ser agrupados en la propiedad toxicidad, de tal manera que en lugar de tratar los 4 contaminantes por separado, se trata únicamente una sola propiedad.

Algunas de las propiedades son toxicidad, pH, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, olor, color, densidad y viscosidad.

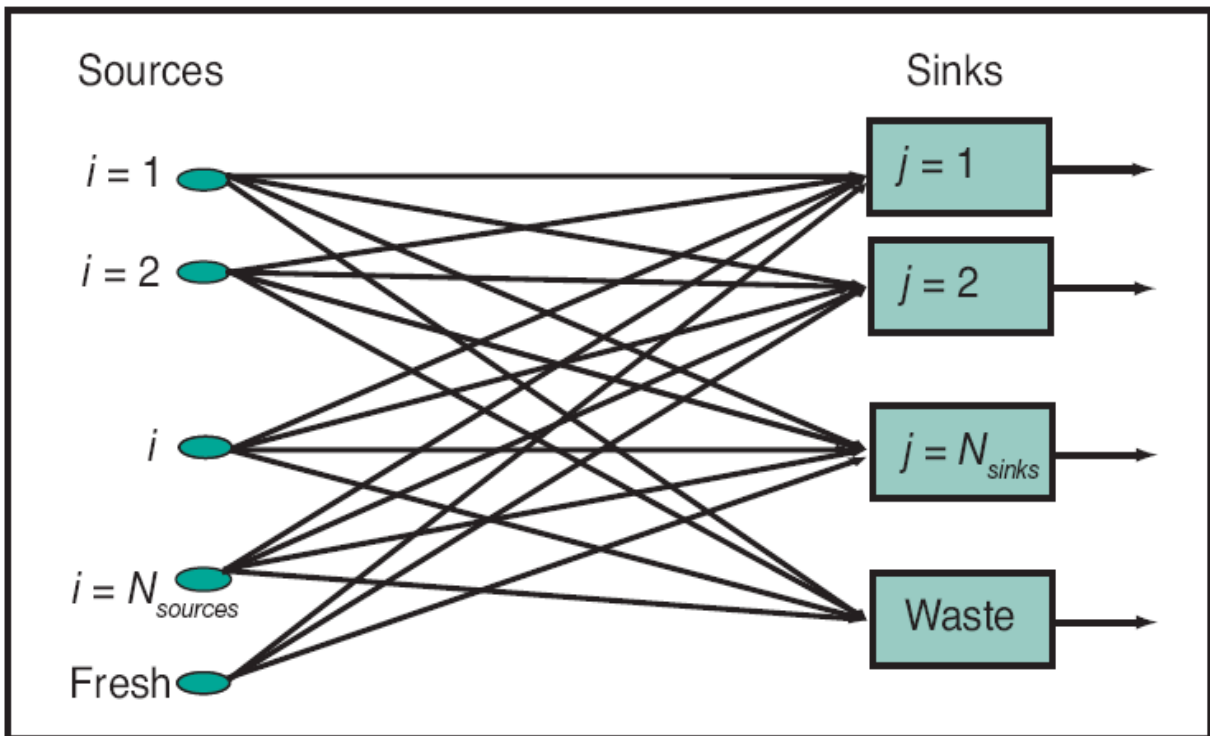


Figura 5 Superestructura de un problema de integración de propiedades sin interceptores de propiedad(16).

Existen métodos gráficos que permiten resolver este tipo de problemas. Sin embargo, están limitados a que sólo pueden tratar una sola propiedad y no consideran el uso de interceptores de propiedad. En la Figura 5 se muestra una superestructura de este tipo de problemas (16), y en la Figura 6 se muestra la curva compuesta que permite encontrar la solución gráfica determinando el requerimiento mínimo de agua fresca, así como el flujo de las corrientes que será enviado al desperdicio. De manera análoga a la metodología de energía, las curvas se construyen con el flujo de las corrientes de proceso y la cantidad de contaminante que contiene (línea negra de la gráfica de la Figura 6) o, en su defecto, con los flujos requeridos por cada unidad de proceso y la cantidad de contaminante capaz de procesar en éstos (línea roja de la gráfica de la Figura 6).

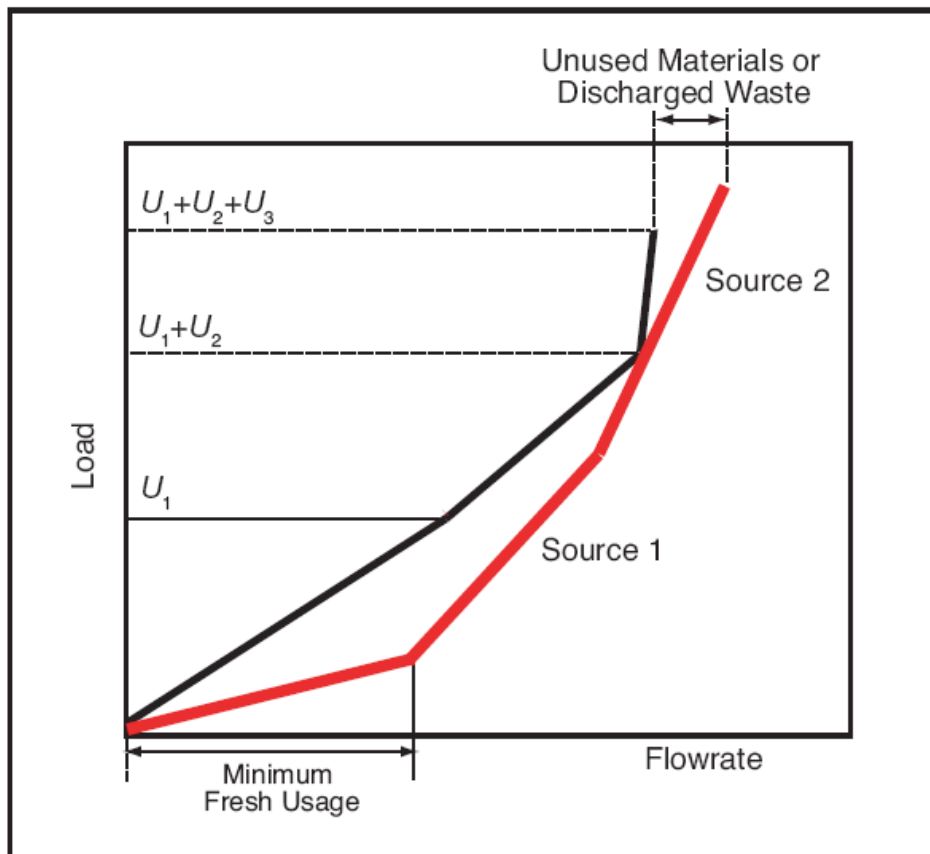


Figura 6 Curva compuesta para la integración de propiedades(16).

A la par, se han desarrollado metodologías de programación matemática que permiten la integración de más de una propiedad y el uso de interceptores de propiedad. En la Figura 7 se muestra de manera general la superestructura de este tipo de problemas, en los cuales el objetivo general es la minimización del costo total anual del proceso tomando en cuenta costos de agua fresca y costos de operación de los interceptores de propiedad. Los interceptores de propiedad son equipos capaces de modificar la propiedad de una corriente. Estos son diseñados de manera previa al proceso de optimización, determinando tanto su eficiencia como su costo.

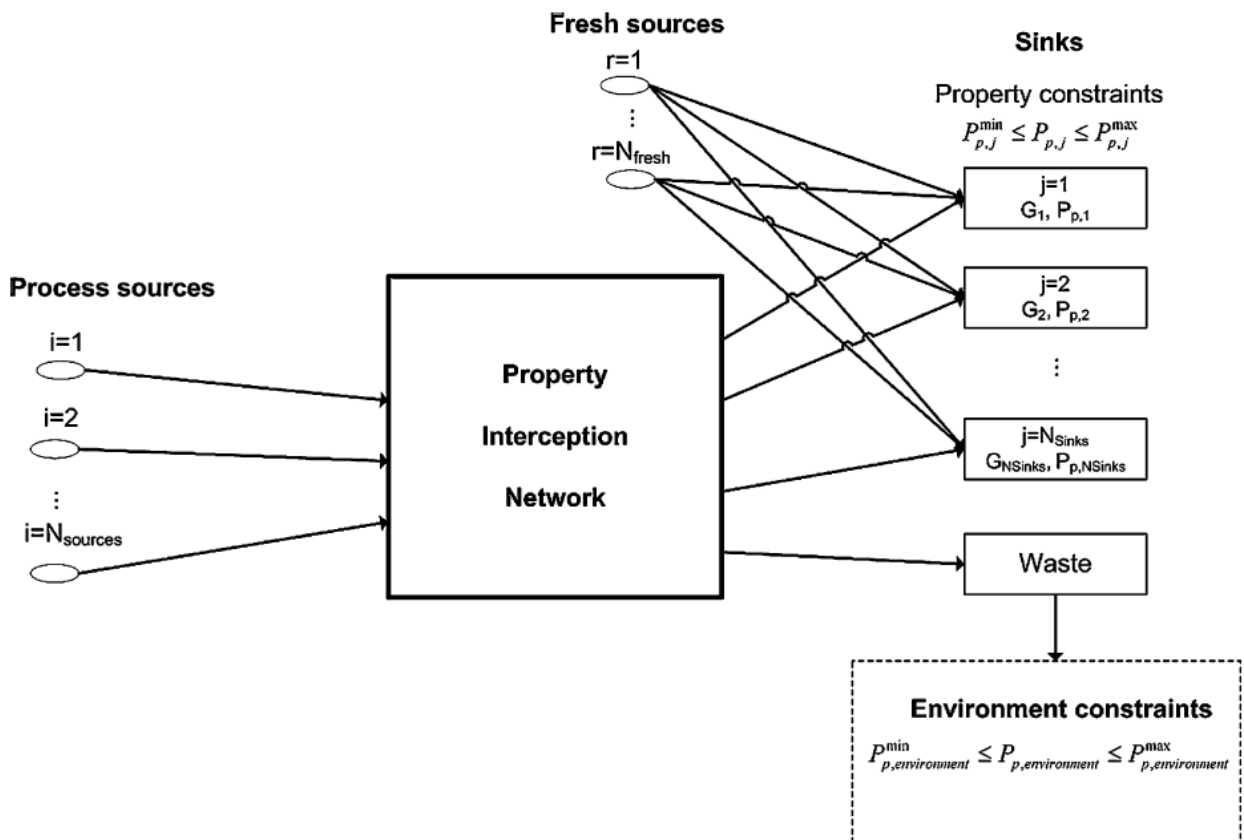


Figura 7 Superestructura de un problema de integración de propiedad con interceptores de propiedad(17).

1.1.5 Integración de masa y energía

Los procesos industriales reales no son únicamente de integración de energía ni tampoco solamente de masa, las corrientes de proceso presentan ambas características, contienen contaminantes y una temperatura dada, además de que las unidades de proceso también tienen temperaturas de operación específicas y especificaciones de operación en cuanto al contenido de los contaminantes. Es por esto que se han realizado diversos trabajos que conjuntan ambas metodologías y se han resuelto tanto de manera secuencial (18), como de manera simultánea(19). Este tipo de problemas son denominados WAHEN (por sus siglas en inglés Water Allocation Heat Exchanger Network).

Estos problemas se han abordado de manera gráfica considerando sólo un contaminante y sin unidades de tratamiento (21) y con el uso de programación matemática (22). Un trabajo que considera multi-contaminantes en las corrientes y el uso de unidades de tratamiento de contaminantes es el realizado por Bagajewicz et al.(20). En la Figura 8 se muestra la superestructura del problema con multi-contaminante en el cual se observa la utilización de agua fresca, la generación de corrientes de desperdicio y dos estructuras, una de integración de energía y otra de masa. La superestructura de masa se muestra en la Figura 9 en el cual se observa el uso de las unidades de tratamiento, y en la Figura 10 se muestra a detalle la estructura de integración de energía en el que se permite mezclado entre corrientes calientes con calientes y corrientes frías entre sí, pero no entre calientes y frías, esto con el objeto de mantener la fuerza motora del fenómeno de transferencia de calor dentro de un intercambiador de calor, es decir, las calientes mantenerlas calientes y las frías mantenerlas frías, según sea el caso.

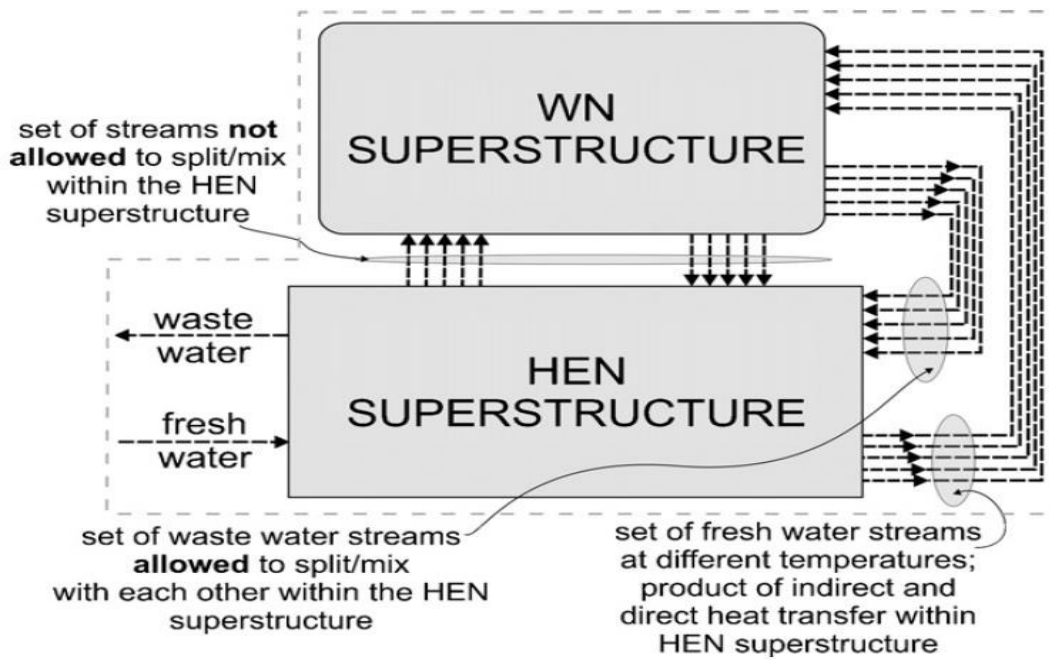


Figura 8 Superestructura de un problema de integración de masa y energía simultáneo (20)

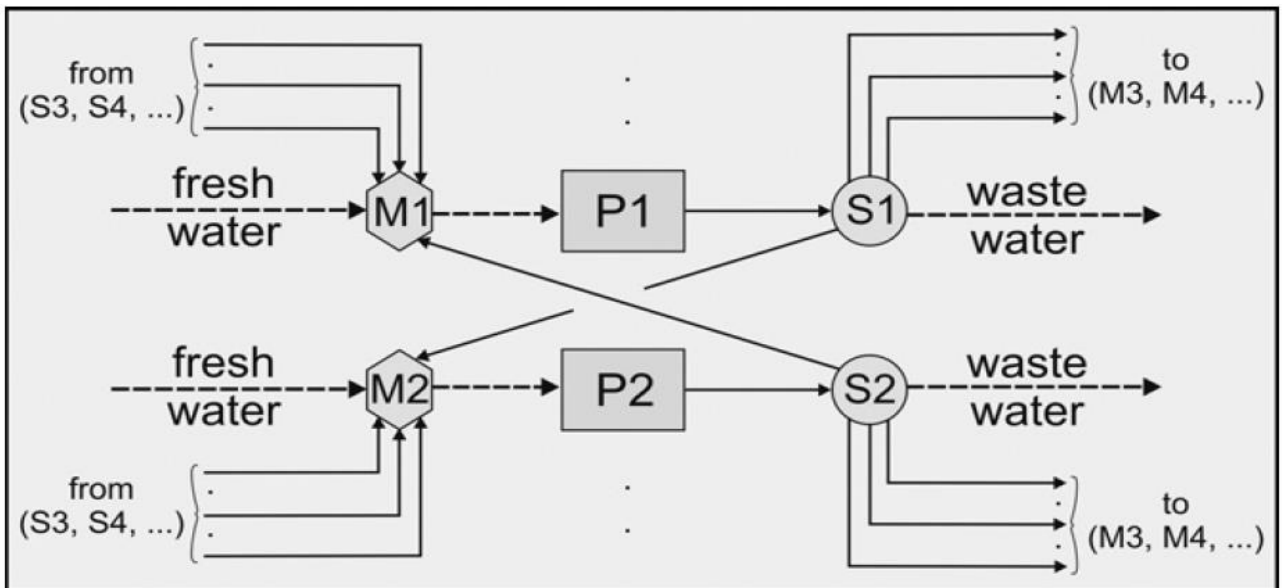


Figura 9 Estructura de la integración de masa para el problema de integración de energía y masa simultáneo multi-contaminante (20).

Un aspecto que se vuelve importante en este tipo de problemas es la definición de lo que es una corriente caliente y una fría, debido a que las corrientes salen del proceso con una cierta temperatura pero su siguiente destino es incierto previo a la solución de problema, es decir, no se sabe en qué unidad de proceso terminará o si terminará como corriente de desecho. La definición propuesta por Bagajewicz et al.(20) se muestra en la Figura 11, en la cual se considera la temperatura de la unidad de proceso del cual proviene y la temperatura de la unidad de proceso en la cual pudiera terminar, además de considerar un posible mezclado con la corriente fresca. Una desventaja de este método es que no consideran mezclado de corrientes que provienen de dos o más unidades de proceso diferentes e incluso éstas últimas con corrientes frescas. El objetivo del problema es minimizar el costo total anual del proceso considerando los costos de intercambiadores de calor, de unidades de tratamiento, de agua fresca y de servicios externos de enfriamiento y calentamiento, y en algunos casos costos de tubería.

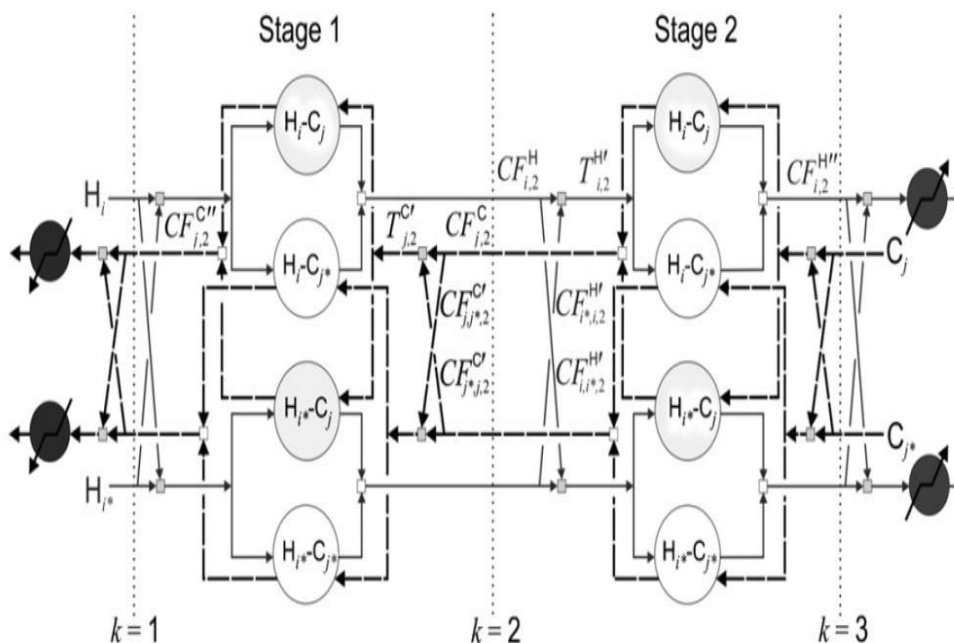


Figura 10 Estructura de la integración de energía para el problema de integración de energía y masa simultáneo multi-contaminante (20).

1.16 Integración de propiedades con restricciones de temperatura

Se encontró en la literatura un problema en el que se presenta integración de propiedades con restricciones de temperatura desarrollado por El-Halwagi et al.(23). Este trabajo es un primer intento de combinar la integración de propiedades con la integración de energía, sin embargo, no realizan propiamente la integración de energía pues no consideran la posibilidad de tener intercambio indirecto de calor entre las corrientes de proceso ni tampoco el uso de servicios externos de calentamiento o enfriamiento, además de no utilizar interceptores de propiedad. La superestructura es semejante a la mostrada en la Figura 5. Lo novedoso de este trabajo es que consideran el calor de mezclado de las corrientes dentro de sus balances de energía.

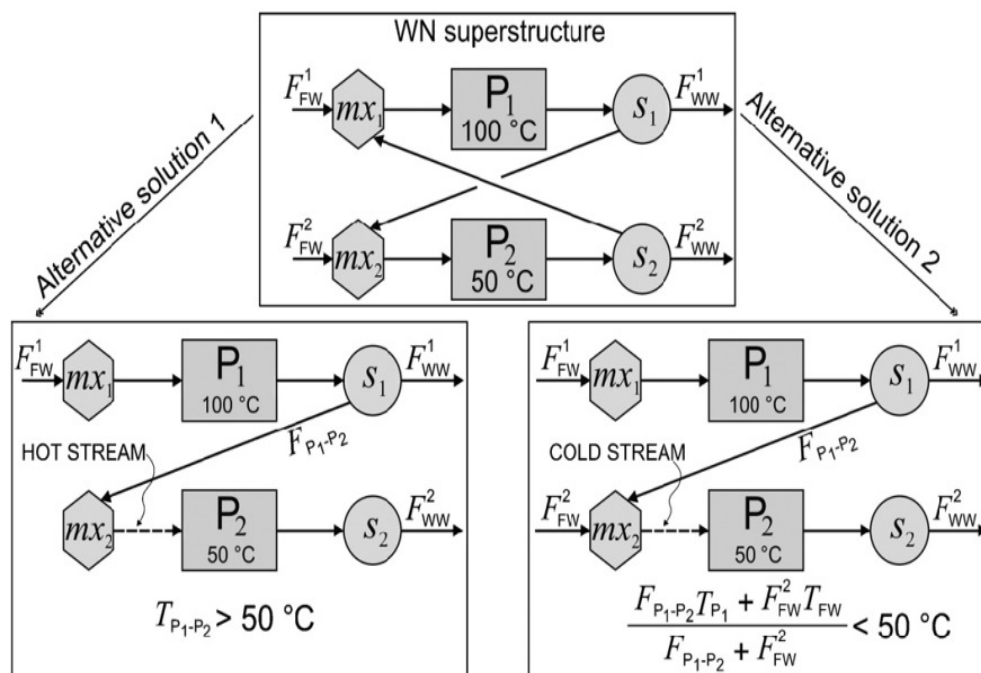


Figura 11 Definición de corriente caliente y corriente fría propuesta por Bagajewicz et al.(20).

1.2 Trabajos recientes

En la actualidad se sigue trabajando en la integración de propiedades siempre con la finalidad de reducir los costos de proceso anuales y cumplir con los requerimientos ambientales aplicables.

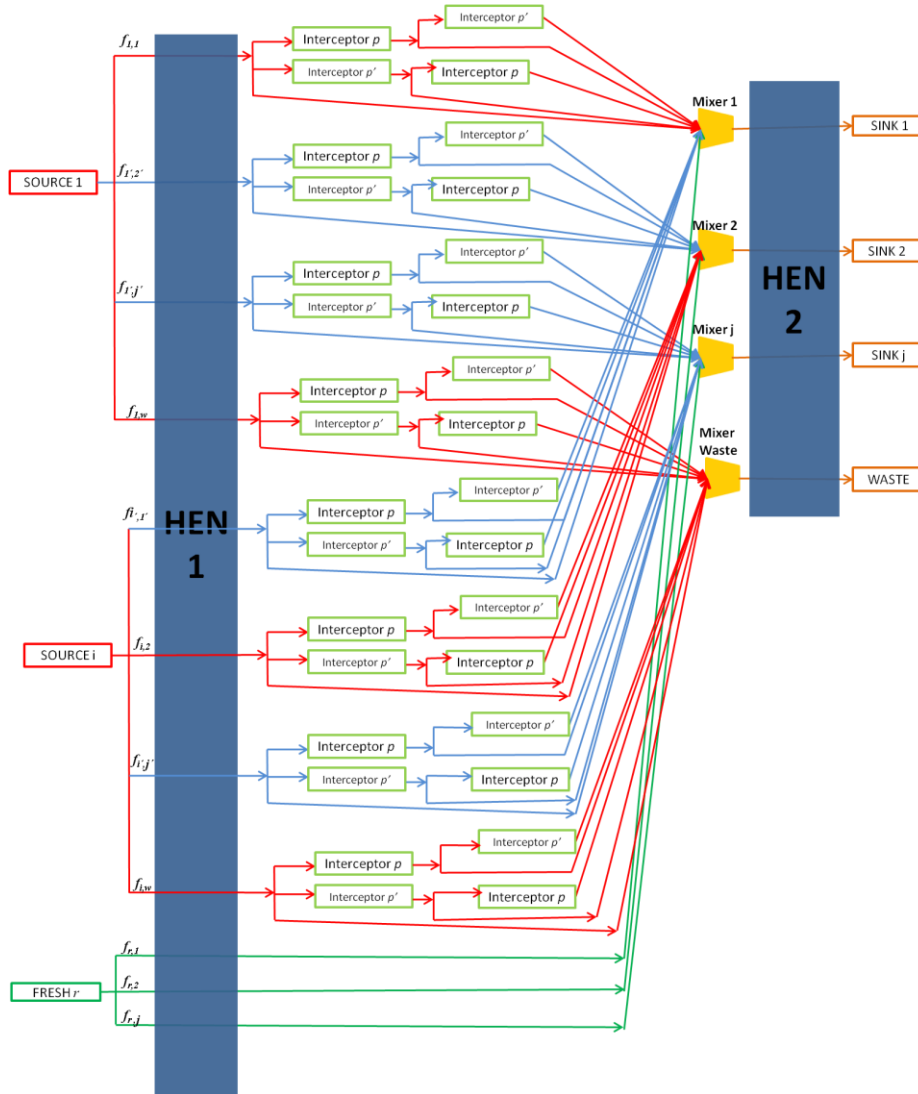


Figura 12 Superestructura del problema de integración simultánea de energía y propiedades (26)

Un claro ejemplo es el trabajo de Lona Ramírez (26) en el cual se realiza la integración de propiedades considerando la integración de energía, los interceptores de propiedad, los servicios externos de agua de enfriamiento, vapor de calentamiento, agua fresca, costos de intercambiadores de calor entre otros. En ambos trabajos la formulación es MINLP ya que requiere de variables de decisión para determinar la existencia de intercambiadores de calor y sólo pueden ser colocados en dos posiciones diferentes que son:

- Antes de los interceptores de propiedad.
- Después de los interceptores de propiedad.

Y todo esto es parte del proceso de optimización del algoritmo matemático de programación. En la figura 12 se muestra la superestructura del problema de integración simultánea de energía propiedades resuelto por el algoritmo de Lona Ramírez.

Capítulo 3

Planteamiento del problema

3.1. Identificación.

Debido a la sobrepoblación, se requiere una mayor cantidad de recursos naturales para satisfacer la demanda en todos los ámbitos conllevando a una escasez de recursos y a su vez encareciéndolos.

3.2. Justificación.

Debido a los incrementos en los costos de los energéticos y la crisis ambiental que estamos viviendo a causa de las actividades antropogénicas en nuestro medio ambiente, es de suma importancia seguir desarrollando nuevas tecnologías y técnicas que permitan a los procesos industriales optimizarlos aprovechando al máximo sus recursos y energía con la finalidad de tener un gasto menor y sean más amigables con el medio ambiente. Se convierte en una necesidad primordial la optimización de los recursos y el cumplimiento de normas ambientales. Si bien es cierto que se han desarrollado metodologías que han probado su eficiencia a nivel industrial, aún existe un gran campo de oportunidad en materia de optimización de recursos energéticos y procesos amigables al ambiente.

Mediante este trabajo se pretende aportar una nueva metodología de optimización que se acerque más a las necesidades reales de los procesos industriales mediante la integración de energía y propiedades de manera simultánea, buscando la minimización del costo total anual y cumpliendo con las restricciones ambientales correspondientes.

3.3. Alcance.

El alcance de este proyecto es realizar un algoritmo de programación capaz de minimizar los costos de operación de un proceso químico en el cual a partir de

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

cumeno se obtiene fenol, cumpliendo con las restricciones ambientales propias del problema.

Capítulo 4

Objetivos

4.1. Objetivos generales.

Desarrollar un algoritmo de programación matemática capaz de determinar el costo mínimo de operación de un proceso industrial, que contempla la integración de energía y propiedades simultáneamente, considerando de costos de intercambiadores de calor, servicios externos de enfriamiento y calentamiento, agua fresca y el costo de desperdicio.

4.2. Objetivos específicos.

Cumplir con las regulaciones y restricciones ambientales inherentes a las propiedades contenidas en el flujo del proceso.

Capítulo 5

Metodología

5.1 Algoritmo de programación matemática

Este capítulo describe la formulación matemática que modela el proceso, acompañada por la superestructura correspondiente que se muestra en la Figura 13 para obtener una percepción más clara de en qué consiste el problema a tratar.

El problema consiste en la asignación de los flujos que provienen del flujo de proceso i y cuyo destino será la unidad de proceso o el flujo de desechos, pasando a través de intercambiadores de calor y/o interceptores de propiedad, si es necesario, de tal manera que el costo anual total del proceso se minimice respetando las restricciones de propiedad y temperatura en las unidades de proceso, así como las restricciones ambientales en el flujo de residuos. Es importante mencionar que los interceptores de propiedad se consideran equipos que isotérmicos que solo tienen la capacidad de alterar una sola propiedad. También se supone que las propiedades son independientes entre sí, es decir, que un cambio en una de las propiedades o la temperatura no afecta a las otras.

5.2 Primera separación de corrientes

La corriente de proceso se separa en $j + 1$ corrientes, de modo que cada una de estas corrientes tiene un destino conocido, que es la unidad de proceso o el desperdicio. Esto nos permite definir si la corriente es caliente o fría, de acuerdo con la temperatura que tiene y la temperatura requerida por la unidad de proceso en la que terminará.

La primera separación de las corrientes de proceso se modela a través de la siguiente ecuación:

$$F_i = f_{i,w} + \sum_{j \in NSINK} f_{i,j} \quad \forall i, \quad i \in NSOURCE \quad \text{Ec.1}$$

Donde F_i corresponde al flujo total del flujo del proceso i , $f_{i,w}$ es el flujo i que se envía al desperdicio y $f_{i,j}$ corresponde al flujo de la corriente i que se va a la unidad de proceso j .

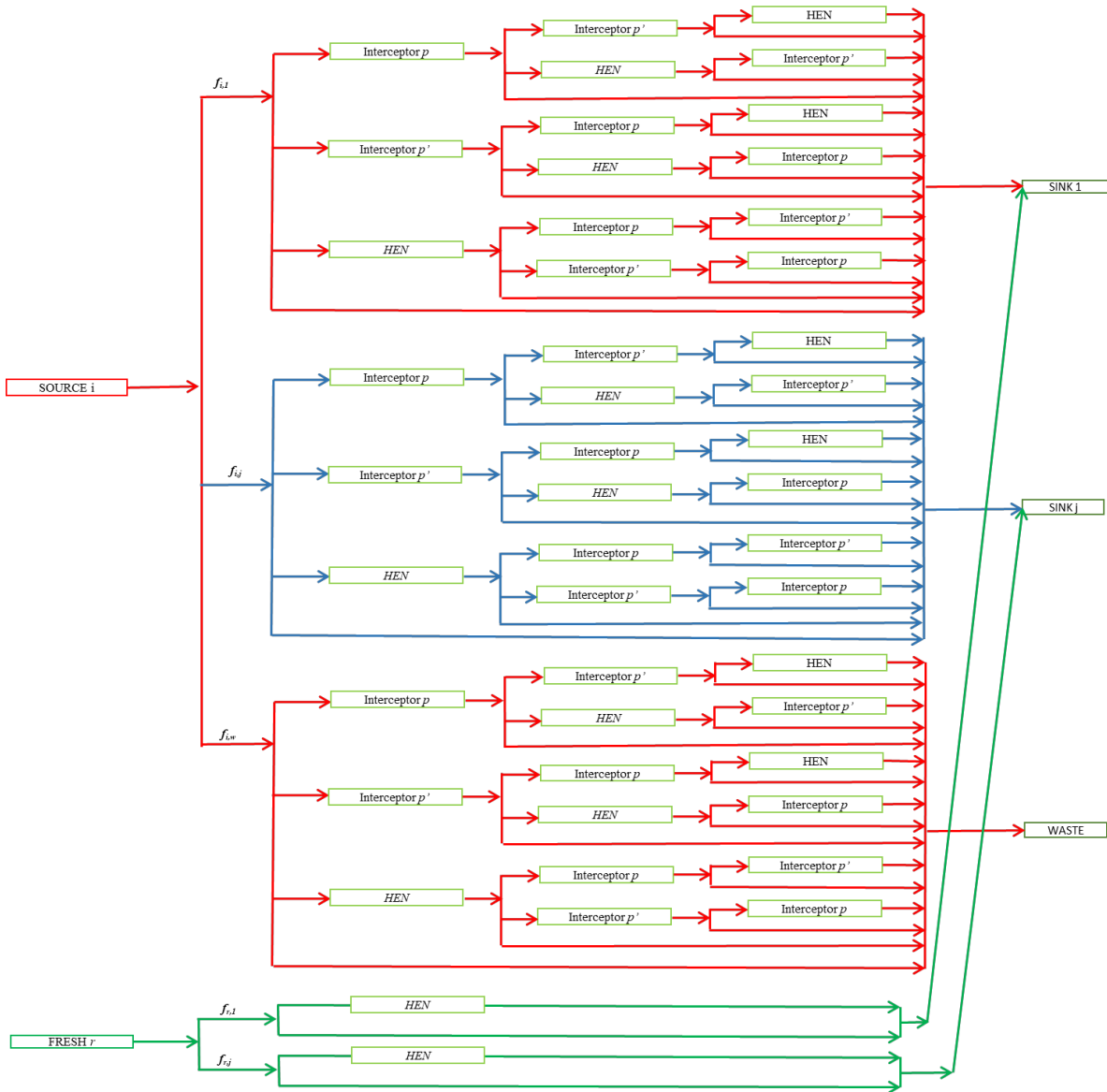


FIGURA 13 Superestructura del problema de integración simultánea de energía y propiedades.

5.2.1 Separación de corriente de agua fresca

De manera similar, la corriente de agua fresca se separa en corrientes que tienen una unidad de proceso definida. La ecuación que modela esta es la siguiente:

$$F_r = \sum_{j \in NSINK} f_{r,j} \quad \forall r, \quad r \in NFRESCA \quad \text{Ec.2}$$

Donde F_r es el flujo total de la corriente de agua fresca r y $f_{r,j}$ corresponde al flujo de agua fresca r que se envía a la unidad de proceso j .

5.3 Separación de corrientes para corrección de propiedades

Las corrientes son divididas con el objetivo de corregir sus propiedades para cumplir con los requerimientos de las unidades de proceso ya sea mandándolas a algún interceptor de propiedad, algún intercambiador de calor o mezclándolas.

5.3.1 Interceptor de la primera propiedad

La división se realiza de acuerdo con el número de propiedades diferentes que tienen las corrientes. La corriente se divide de tal manera que se puede enviar a uno de los interceptores de la propiedad p o se puede enviar directamente a la unidad de proceso. En cada interceptor de la propiedad p , esta propiedad se modifica para cumplir con los requisitos de propiedad de las unidades de proceso. Este proceso no tiene efecto en la temperatura de la corriente que lo atravesó. Pero la temperatura podría modificar la propiedad p .

Esta separación se formula de la siguiente manera:

$$F_{i,j} = f_{i,j,0} + \sum_{p \in \text{PROPIEDAD}} f_{i,j,p} \quad \forall i,j \in \text{corrientes del proceso} \quad \text{Ec.3}$$

Donde $f_{i,j,0}$ representa el flujo que no pasó a través de ningún interceptor de propiedad y se envía directamente a la unidad de proceso, y $f_{i,j,p}$ representa el flujo que pasa a través del interceptor de propiedad p .

5.3.2 Segundo interceptor de propiedad

Una vez que la corriente pasó a través del primer interceptor de propiedad, ésta es separada nuevamente de tal forma que puede ser enviada a la unidad de proceso correspondiente o a un nuevo interceptor de propiedad p_2 diferente, con el objeto de corregir alguna otra propiedad de la corriente antes de ser enviada a la unidad de proceso.

La siguiente separación de corrientes se modela de la siguiente manera:

$$f_{i,j,p} = f_{i,j,p,0} + \sum_{p_2 \neq p, p_2 \in \text{NPROPIEDAD}} f_{i,j,p,p_2} \quad \forall i, j, p, p_2 \neq p \quad \text{Ec.4}$$

Donde $f_{i,j,p,0}$ representa el flujo que no pasa a través de un segundo interceptor de propiedad y fue enviado a la unidad de proceso, y f_{i,j,p,p_2} representa el flujo que pasa a través del segundo interceptor de la propiedad p_2 .

5.3.3 Interceptor de propiedad P

Estas separaciones de corriente se repiten tantas veces como diferentes propiedades p tienen las corrientes, de tal manera que la misma corriente tiene la

opción de pasar a través de todos y cada uno de los diferentes interceptores de propiedad p existentes para el proceso.

5.4 Balances de materia las unidades de proceso

Una vez que las corrientes ya pasan a través de todos los diferentes interceptores de propiedades, se envían a su unidad de proceso j correspondiente. A éstos llegan las corrientes que provienen de las diferentes corrientes del proceso i , formando una nueva corriente F_j .

Cabe señalar que en este punto, la suma de todos los flujos que provienen de los diferentes flujos de proceso i debe ser igual al flujo total requerido por la unidad de proceso, además, deben cumplir con las restricciones de propiedad requeridas por dicha unidad de proceso. Los mezcladores están sujetos a las reglas de mezcla correspondientes. El modelado matemático se muestra a continuación.

El balance total de masa se representa de la siguiente manera:

$$F_j = \sum_i \left(f_{i,j,0} + \sum_p \left(f_{i,j,p,0} + \sum_{p'} f_{i,j,p,p_2} \right) \right) + \sum_r f_{r,j} \quad \forall j, \quad j \in NSINK \quad \text{Ec.5}$$

Para la corriente de desecho:

$$F_w = \sum_i \left(f_{i,w,0} + \sum_p \left(f_{i,w,p,0} + \sum_{p'} f_{i,w,p,p_2} \right) \right) \quad \text{Ec.6}$$

5.5 Balances de propiedades

La estimación de las propiedades en cada flujo se realiza a través de las respectivas reglas de mezcla de la propiedad a tratar. En general, la propiedad de la corriente se estima de la siguiente manera:

$$F_j * \psi_j(p) = \sum_i \left(f_{i,j,0} * \psi_i(p) + \sum_p \left(f_{i,j,p,0} * (\psi_i(p, \alpha) + \delta_T dT + \delta_C DC) + \sum_{p'} f_{i,j,p,p_2} * (\psi_i(p, \alpha, \alpha_2) + \delta_T dT + \delta_C DC) \right) \right) + \sum_r f_{r,j} * \psi_r(p) \quad \text{Ec.7}$$

Para la corriente de desechos:

$$F_w * \psi_w(p) = \sum_i \left(f_{i,w,0} * \psi_i(p) + \sum_p \left(f_{i,w,p,0} * (\psi_i(p, \alpha) + \delta_T dT + \delta_C DC) + \sum_{p'} f_{i,w,p,p_2} * (\psi_i(p, \alpha, \alpha_2) + \delta_T dT + \delta_C DC) \right) \right) \quad \text{Ec.8}$$

Donde Ψ es el operador de mezclado de la propiedad p , y la α representa la eficiencia de los interceptores de propiedad; δ_T , δ_C son el efecto que la temperatura o la concentración tiene sobre la propiedad.

El operador Ψ depende del tipo de propiedad que se considere, por ejemplo, si la propiedad es pH, el operador Ψ es 10^{pH} ; si la propiedad es la densidad, el operador Ψ es $1/\rho$, temperatura es $C_p * T$, etc.

La α es un número conocido que depende del interceptor de propiedad y está definido como la eficiencia del equipo. Dicha eficiencia permite calcular el valor de la propiedad a la salida del interceptor mediante la ecuación:

$$p_i^{\text{out}} = p_i^{\text{in}}(1 - \alpha) + \delta_T dT + \delta_C DC \quad \text{Ec.9}$$

Donde p_i^{in} es el valor de la propiedad de la corriente en la entrada, p_i^{out} es el valor de la propiedad de la corriente en la salida del interceptor respectivamente. Esto es válido para todas las propiedades excepto la temperatura.

5.6 Balances de energía

Los balances de energía se modelan de la siguiente manera:

$$F_j C_p T_j = \sum_i \left(f_{i,j,0} * C_p * T_{i,j,0} + \sum_p \left(f_{i,j,p,0} * C_p * T_{i,j,p,0} + \sum_{p'} f_{i,j,p,p_2} * C_p * T_{i,j,p,p_2} \right) \right) + \sum_i \left(f_{r,j,0} * C_p * T_{r,j,0} + \sum_p \left(f_{i,j,p,0} * C_p * T_{r,j,p,0} \right) \right) \quad \text{Ec.10}$$

Para la corriente de desecho:

$$F_w C_p T_w = \sum_i \left(f_{i,w,0} * C_p * T_{i,w,0} + \sum_p \left(f_{i,w,p,0} * C_p * T_{i,w,p,0} + \sum_{p'} f_{i,w,p,p_2} * C_p * T_{i,w,p,p_2,0} \right) \right) \quad \text{Ec.11}$$

5.7 Restricciones en las unidades de proceso

Las condiciones de operación de las unidades de proceso (temperatura y propiedades) deben ser satisfechas por las corrientes. Se aplican las siguientes restricciones para que dichas condiciones se cumplan:

➤ Para la temperatura:

$$T_j^K = T_j^{Sink} \quad \forall j \quad \text{Ec.12}$$

➤ Para las propiedades de las corrientes:

$$\psi_j(p)^{\min} \leq \psi_j(p) \leq \psi_j(p)^{\max} \quad \forall j \quad \text{Ec.13}$$

5.8 Función objetivo

La función objetivo consiste en minimizar el costo total anual, que incluye el costo de los equipos, el costo del agua fresca y la corriente de desperdicio. La expresión matemática es:

$$\begin{aligned}
 \text{Min TAC} = & \sum_{r \in \text{NFRESH}} \text{Cost}_r \cdot F_r + \text{Cost}_w \cdot F_w + \text{Cost}_c \sum_{j \in \text{NSINK}} q_{j,c,K} + \text{Cost}_h \sum_{j \in \text{NSINK}} q_{h,j,K} + \\
 & \left(\sum_{k \in \text{NSTAGE}} \left(\sum_{j \in \text{CALENTES}} \sum_{j' \in \text{FRIAS}} y_{i,j,j',k} + \sum_{j \in \text{NSINK}} \sum_{j' \in \text{NSINK}} y_{j,j',k} \right) + \sum_{j \in \text{NSINK}} (y_{h,j,K} + y_{j,c,K}) \right) * \\
 & \text{CostHE} + \text{Cost}_p \sum_p f_{i,j,p} + \text{Cost}_{p'} \sum_{p'} f_{i,j,p,p'}
 \end{aligned} \tag{Ec.14}$$

En donde los términos Cost representan los costos de operación de los diferentes equipos o recursos por unidad de flujo, el término CostHE representa el costo fijo de cada intercambiador de calor.

5.9 Caso de estudio

El presente problema es sobre un proceso de producción de fenol a partir de peróxido de cumeno, descrito en la integración de propiedades en un par de artículos científicos. Consiste en tres unidades de proceso capaces de recibir agua reciclada y tres flujos de residuos. La figura 14 muestra un diagrama gráfico del problema. Los datos de los flujos de proceso y de agua dulce, los flujos y las condiciones operativas del proceso y las unidades de desechos para este proceso se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente. Los costos de los interceptores de la propiedad, los servicios externos, el costo fijo de los intercambiadores de calor y el Cp de los flujos son \$ 15,000 y 4,12 kJ / Kg K.

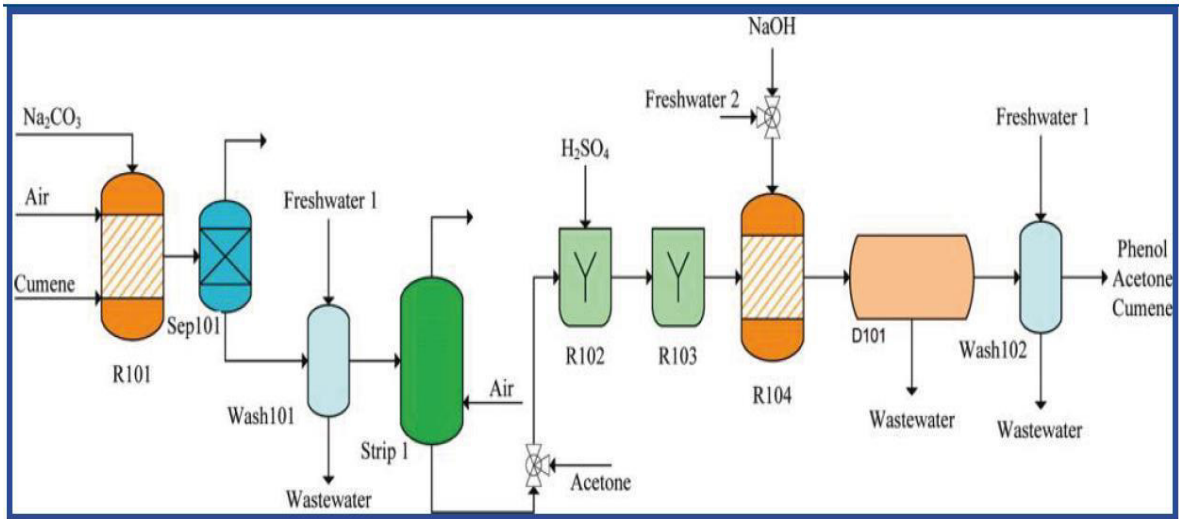


Figura 14 Diagrama del proceso de producción de fenol a partir de cumeno.

Corriente de agua de proceso	Flujo (Kg/hr)	Concentración de fenol (Fracción másica)	Toxicidad (%)	Temperatura (°C)	Densidad(Kg/m³)
Washer 101	3661	0.016	0.3	75	1.019
Decanter 101	1766	0.024	0.5	65	1.024
Washer 102	1485	0.22	1.5	40	0.98
Freshwater 1		0.000	0	25	1.00
Freshwater 2		0.012	0	35	0.99

Tabla 1 Datos de las corrientes de proceso. Datos tomados de la referencia (24)

Unidad de proceso	Flujo (Kg/hr)	Concentración máxima de fenol (fracción másica)	Toxicidad máxima (%)	Temperatura de operación (°C)	Densidad máxima (Kg/m ³)
Wash 101	2718	0.013	2	80	1.01
Wash 102	1993	0.011	2	75	1.00
Neutralizer R104	1127	0.1	2	65	0.98
Waste		0.15	0	30	1.00

Tabla 2 Datos de las unidades de proceso. Datos tomados de la referencia (24)

Capítulo 6 Resultados

El algoritmo se programó en la plataforma GAMS, aproximadamente tardó 3 horas en encontrar la solución. La clasificación de las corrientes para el HEN generó 48 posibles corrientes calientes y 192 corrientes frías. El problema contiene 113120 ecuaciones, 100954 variables continuas y 37104 variables discretas. En la figura 15 se muestra la solución óptima encontrada para el proceso de producción de fenol a partir de cumeno.

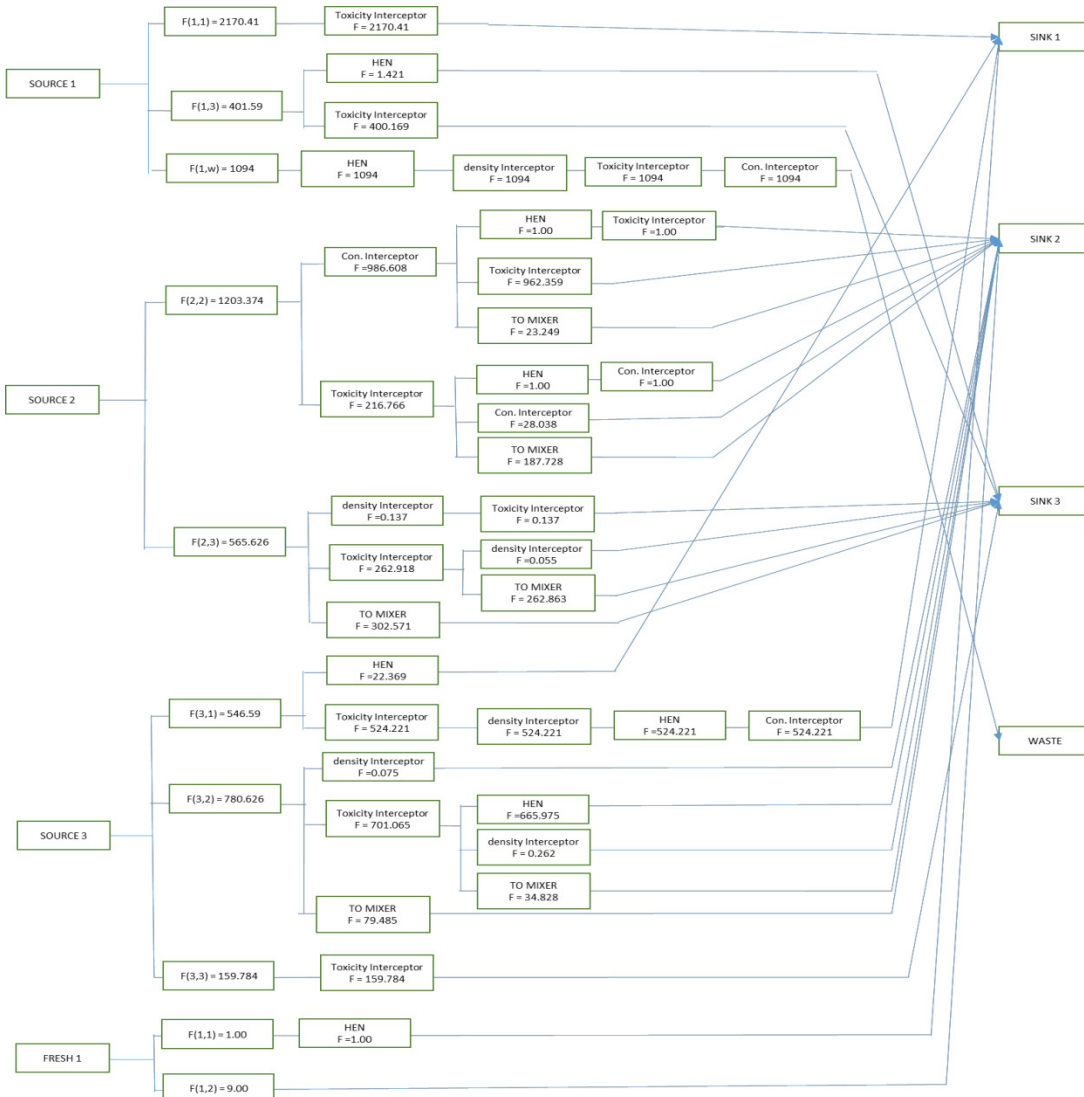


Figura 15 Solución gráfica del problema.

Con esta configuración el costo total anual es de \$ 217,690 dólares por año.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Un trabajo previo (27) analizó el mismo caso bajo las mismas condiciones excepto que no consideró las interacciones entre las propiedades y la temperatura obteniendo un costo anual de \$ 375, 000 dólares por año siendo este más elevado comparado con el resultado obtenido por el algoritmo que fue de \$ 217, 690 dólares por año, generando un ahorro del 41.95%.

En un análisis del proceso donde no se reciclan las corrientes de desecho y estas son tiradas, no sin antes ser tratadas para cumplir con las restricciones ambientales de temperatura, toxicidad, densidad y concentración; resultó en un costo total anual del proceso de \$ 10, 673,521.26 dólares por año, siendo un 97.6% más caro que el resultado obtenido por la configuración óptima encontrada por el algoritmo.

También con esta configuración por hora se manda a los mezcladores el 5.52% del total de las corrientes del proceso directamente sin pasar por ningún interceptor de propiedad ni por ningún intercambiador de calor.

El 47.13% del total de las corrientes del proceso sólo requirió pasar por un interceptor de propiedad o por algún intercambiador de calor para ser reutilizadas en los mezcladores.

El 23.93% del total de las corrientes del proceso requieren pasar por dos interceptores de propiedad o por algún intercambiador de calor y algún interceptor de propiedad para ser reutilizadas en los mezcladores.

El resto de las corrientes del proceso que equivale al 28.96% requiere pasar por tres interceptores de propiedad (considerando la temperatura como propiedad) para ser reutilizadas en los mezcladores o mandarlas al desecho.

El 100% de la corriente que se manda al desperdicio proviene de la corriente 1 y tuvo que pasar por todos los interceptores de propiedad así como por un intercambiador de calor.

El mezclador 3 es el único de los tres mezcladores en el cual no se agrega agua fresca.

En total se reutiliza el 84.2% del total de las corrientes del proceso, lo cual genera un ahorro muy importante para la empresa y disminuyendo de manera importante el uso de agua fresca en un 99.8%.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

El algoritmo ha demostrado ser una buena opción para determinar las condiciones óptimas de operación para procesos industriales disminuyendo los costos de operación y disminuyendo la demanda de recursos en el mismo.

Al utilizar menos recursos y energía en los procesos industriales nos conduce a tener un impacto antropogénico menor al medio ambiente y llegar al desarrollo sostenible.

Los resultados de este trabajo son importantes porque nos conduce a un uso energético y de los recursos más eficientes generando ahorros para las industrias y cumpliendo con las normativas ambientales.

Para trabajos futuros se recomienda incluir las corrientes de alimentación de reactivos, productos finales o intermedios que aunque no se integren las propiedades pueden ser incluidas dentro de los HEN's.

Referencias bibliográficas

1. **Universidad Libre del Ambiente.** El problema ambiental. [En línea] 7 de Agosto de 2009. [Citado el: 20 de Febrero de 2019.] <http://masambiente.wordpress.com/>.
2. **Jaramillo Díaz, Hebert.** *Gestión energética en la industria.* Estudios gerenciales, págs. 50-60.1999.
3. **Buschman, Rolf y Núñez Pesce, Rolando.** *Seminario Eficiencia energética en la industria.* Santiago, Chile, 2011.
4. **Cortinas de Nava, Cristina y Vega Gleason, Sylvia.** *Residuos peligrosos en el mundo y en México (Serie Monografías 3).* México: SEDESOL, 1993.
5. **Vanguardia.** Tarifa eléctrica aumentó 80% en un año.[En línea]21 de Septiembre de 2018.[Citado el: 25 de Marzo de 2019.]<https://vanguardia.com.mx>.
6. **Peña Donoso.** Expectativa de costos energéticos preocupa a la industria minera. *Chile renovables.* 22 de diciembre de 2010.
7. **Guzmán, Pablo.** El ahorro energético. [En línea] [Citado el: 21 de Marzo de 2019.] http://centros6.pntic.mec.es/cea.pablo.guzman/lecciones_fisica/ahorro_energetico.htm.
8. **Jiménez Cisneros, B. E.** *Nuevas y viejas necesidades en Ingeniería Ambiental.*Gaceta Ecológica, núm. 39, verano. 1996.
9. **Linnhoff y Vredeveld.** *Pinch technology has come of age.*Chemical Engineering progress, págs. 33-40.1984.
10. **Jiménez Gutiérrez, Arturo.** *Diseño de procesos en ingeniería química.* México: Reverte, 2008.
11. **Ponce Ortega, José María, López Maldonado, Lizbeth Anabel y Segovia Hernández, Juan Gabriel.** *Multiobjective synthesis of heat exchanger networks*

minimizing the total annual cost and the environmental impact. Applied thermal engineering, págs. 1099-1113.2011.

12. **Laukkanen, Timo, Ojalehto, Vesa y Fogelholm, Carl Johan.** *An interactive multi-objetive approach to heat exchanger network synthesis.* Computers and Chemical Engineering, págs. 943-952.2010.

13. **El-Halwagui, Mahmoud y Springgs, H.D.** *Solve design puzzles with mass integration.* Chemical engineering progress, págs. 25-44.1998.

14. **Ponce Ortega, José María, El-Halwagi, Mahmoud M y Frausto Hernández, Sergio.** *Optimal retrofit of water conservation networks.* Journal of Cleaner Production, págs. 1-22.2011.

15. **El-Halwagi, Mahmoud M, Glasgow, Ian M y Eden, Mario.** *Property integration: Component less design techniques and visualization tools.* AIChE Journal, págs. 1854-1869. 2004.

16. **El-Halwagi, Mahmoud M y Kazantzi, Vasiliki.** *Targeting material reuse via property integration,* págs. 28-37. 2005.

17. **Jiménez Gutiérrez, Arturo, Ponce Ortega, José María y El-Halwagi, Mahmoud M.** *Global optimization for the synthesis of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints.* Computers and Chemical Engineering, págs. 318-330.2011.

18. **Manan, Zainuddin Abdul, Yin Tea, Swee y Wan Alwi, Sharifah Rafidah.** *A new technique for simultaneous water and energy minimization in process plant.* Chemical Engineering Research and Design, págs. 1509-1519.2009.

19. **Liao, Zuwei, Wang, Jingdai y Yang, Yongrong.** *Systematic optimization of heat integrated water allocation networks.* Industrial & Engineering Chemistry Research, págs. 6713–6727.2011.

20. **Bagajewicz, Miguel J. y Bogataj, Milos.** *Synthesis of non-isothermal heat integrated water networks in chemical processes.* Computers and Chemical Engineering, págs. 3130-3142.2008.

21. **Savulescu, Luciana, Kim, Jin-Kuk y Smith, Robin.** *Studies on simultaneous energy and water minimization - Part II: Systems with maximum re-use of water.* Chemical Engineering Science, págs. 3291-3308.2005.
22. **Dong, Hong-Guang, Lin, Chih-Yao y Chang, Chuei-Tin.** *Simultaneous optimization approach for integrated water-allocation and heat-exchange networks.* Chemical Engineering Science, págs. 3664-3678.2008.
23. **El-Halwagi, Mahmoud M, Kheireddine, Houssein y Deng, Chung.** *Optimization of Direct Recycle Networks with the Simultaneous consideration of Property, Mass, and Thermal Effects.* Industrial & Engineering Chemistry Research, págs. 3754–3762.2011.
24. **Ponce-Ortega, José María, El-Halwagi, Mahmoud M. y Jiménez-Gutiérrez, Arturo.** *Global optimization for the synthesis of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints.* Computers and Chemical Engineering, págs. 318–330.2010.
25. **Ponce-Ortega, José María, Jiménez-Gutiérrez, Arturo y El-Halwagi, Mahmoud.** *A Property-Based Optimization of Direct Recycle Networks and Wastewater Treatment Processes.* AIChE Journal, págs. 2329-2344.2009.
26. **Jiménez-Gutiérrez, Arturo, Lona-Ramírez, Jonathan, y col.** An MINLP model for the simultaneous integration of energy, mass and properties in water networks. s.l.: Computers y Chemical Engineering, 2014, Vol. 71.

Anexos

NOMENCLATURA

F_x Flujo de la corriente x

$f_{x,y}$ Flujo de la corriente x que va a ser enviada a la unidad de proceso y

T_x Temperatura de la corriente x

$q_{x,y;k}$ Cantidad de calor intercambiado por la corriente caliente x y la corriente fría y' en la etapa k del HEN

Ω Número grande comparado con el valor del calor intercambiado en el HEN (q)

Ω_2 Número grande comparado con el valor la temperatura de las corrientes del proceso

$y_{x,y;k}$ Variable binaria para la selección de la existencia del intercambiador de calor entre la corriente caliente x y la corriente fría y' en la etapa k del HEN.

C_p Capacidad calorífica de la corriente

ψ Operador de mezclado de la propiedad, dependiente de la propiedad

α Eficiencia del interceptor de propiedad

p Propiedad no deseada en las corrientes

ΔT Mínima diferencia de temperaturas entre la corriente caliente y fría dentro de un intercambiador de calor

Subíndices

i Corriente de proceso i

i' Corriente de proceso i considerada como fría

j Unidad de proceso j

r Agua fresca

- k Etapa de la red de intercambiadores de calor (HEN)
- K Número total de etapas en el HEN
- h Servicio externo de calentamiento
- c Servicio externo de enfriamiento