

## **REDUCCIÓN DE DESECHOS EN LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CARMÍNICO APLICANDO TECNOLOGÍA PINCH**

Raymundo Erazo E., Jorge L. Cárdenas R. y Juan C. Woolcott H.

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

### **RESUMEN**

Se esbozó un análisis de integración de energía por aproximación para el diseño y análisis de una red de transferencia de calor (HEN). Se utilizó un caso estudio, ácido carmínico, para ilustrar esta vía de integración por aproximación y resaltar el ahorro del 60% de consumo de energía con respecto al proceso convencional.

**Palabras claves:** Redes de transferencia de calor (HEN), integración de energía, pinch, síntesis de procesos.

### **ABSTRACT**

An integrated approach to the design and análisis of heat exchanger network (HEN) is outlined. A case study is used, carminic acid, to illustrate this integrated approach, to emphasize the economy of 60% energy with respect to conventional process.

**Keywords:** Heat Exchanger Networks (HEN), energy integration, pinch, process synthesis.

### **INTRODUCCIÓN**

Uno de los métodos actuales en el diseño de los procesos químicos es el relacionado a la aproximación por jerarquía en niveles o estructuras siguiendo el principio de irrelevancia. Cualquier fenómeno natural, social, económico, etc. puede ser explicado, reconociendo que es posible organizar cada uno de ellos en niveles, e identificar las reglas o leyes, así como sus alcances, que rigen en cada nivel de tal modo que, definidas estas fronteras y sus interrelaciones, el sistema o fenómeno se hace irrelevante.

De acuerdo a este principio, uno de los niveles en el diseño de nuevos procesos químicos (aplicado también a los procesos existentes o en operación) es el correspondiente al modo de producción: batch o continuo. Un

heurístico fundamental en este nivel de decisión es el planteado por Malone e Iribarren<sup>[1]</sup>, «la mejor aproximación al diseño de procesos batch es primero diseñar un proceso continuo», con esta aproximación es simple hacer luego una selección de los procesos alternativos y determinar el mejor diagrama de flujo del proceso.

Dentro de este contexto, el presente trabajo tiene por finalidad desarrollar el diseño de un proceso continuo para la reducción de desechos en la producción de ácido carmínico aplicando tecnología PINCH, conducente al ahorro de materia prima y energía, así como lograr un proceso más eficiente. Un siguiente trabajo consistirá en desarrollar el proceso batch a partir de los resultados obtenidos aquí.

## DISEÑO DE PROCESOS POR APROXIMACIÓN DE JERARQUÍAS

El método ingenieril en la solución de problemas de diseño de nuevos procesos, o la optimización de un proceso existente, es por naturaleza muy complejo, ya que siempre existen interacciones entre las unidades que constituyen el proceso, que hacen imposible el enfoque de diseño de cada una de estas unidades en forma individual. Una aproximación al diseño de los procesos consiste en aplicar el principio de irrelevancia reconociendo que los mismos están constituidos por niveles o estructuras que obedecen a una jerarquía. El procedimiento comienza primero buscando soluciones simples y luego ir adicionando sucesivamente aportes mayores de detalles.

El procedimiento de diseño se puede resumir en los pasos siguientes: Se comienza el diseño en el nivel más interno que corresponde al sistema de reacción y que representa la parte fundamental del proceso, pues el funcionamiento de este nivel interno afecta a todos los niveles externos. Se diseña por lo tanto un sistema de reacción que obedece a condiciones óptimas utilizando la información de entrada disponible. Luego, se diseña el sistema de separación y recuperación de los productos, con lo que los balances de materia y energía quedan definidos. El procedimiento culmina con el diseño del sistema de transferencia de calor y de recuperación de energía del proceso que incluyen el sistema de servicios generales (calor y frío). Este proceso de diseño es iterativo, pues la información lograda del diseño de los niveles exteriores permite modificar y optimizar los niveles más internos.

La tecnología PINCH representa una herramienta moderna en la gestión tecnológica para acometer el diseño del nivel correspondiente a la red de transferencia de calor y los servicios generales.

En un diseño preliminar de la red de transferencia de calor, la tecnología PINCH permite obtener los valores mínimos para varios parámetros del proceso. Estos son, los cálculos de los servicios mínimos y la disponibilidad de dichos servicios, lo que proporciona

los costos de operación, y los cálculos del número mínimo de unidades de transferencia de calor, y áreas de dichas unidades, lo que proporcionará una estimación de los costos de capital. Estos valores mínimos se pueden obtener sin realizar un diseño detallado de la topología de la red de transferencia de calor, o de los intercambiadores que lo constituyen, sino sólo en base a los datos térmicos de las corrientes del proceso. Por esta razón, la tecnología PINCH es muy útil para lograr una estimación rápida del rendimiento de una alternativa de diseño, para obtener información que permita plantear modificaciones y mejoras en esta alternativa de diseño, que afecten a los niveles más internos, o para comparar varias alternativas sin tener que completar el diseño de cada uno de ellas.

Logrado el diseño preliminar de la red de transferencia de calor, la tecnología PINCH proporciona herramientas para diseñar una red de transferencia de calor que alcance los valores mínimos de costos de capital y de operación; para simplificar esta red e incluir en el diseño niveles de control o su simplicidad; y realizar el diseño de los servicios generales del proceso.

## TECNOLOGIA PINCH

Desde el punto de vista de la energía, las corrientes que forman parte de un proceso, son de dos tipos: las denominadas «corrientes calientes», que son aquellas que por necesidades del proceso deben enfriarse; y las «corrientes frías», que por el contrario deben calentarse. Tanto los calentamientos como los enfriamientos comprometen disponibilidad y remoción, respectivamente, de energía, lo que conduce a utilizar una corriente caliente del proceso para calentar una fría y reducir de esta forma los costos operativos del proceso. Sin embargo, en procesos donde las corrientes son numerosas, la forma óptima de realizar estos emparejamientos no es tan evidente. La tecnología PINCH proporciona una metodología que permite encontrar esta configuración óptima de los emparejamientos de corrientes calientes y frías.

El primer paso, en un nuevo problema de tecnología PINCH, es obtener los datos necesari-

rios a partir de un diagrama de flujo del proceso, que puede haberse obtenido en etapas previas del diseño, o puede ser el diagrama de flujo de un proceso existente que se desee integrar energéticamente. Aunque en principio cualquier corriente caliente se puede emparejar con cualquier corriente fría, existen algunos emparejamientos que es preferible evitar, sea por motivos de seguridad, porque en la planta estas corrientes están muy alejadas o por cualquier otro factor que justifique tal decisión.

Para el proceso de ácido carmínico a partir de cochinilla utilizando tecnología más limpias<sup>[2]</sup>, se desarrolló el diseño que condujo al diagrama de flujo para un proceso continuo. En este proceso se deben resaltar las etapas de extracción, precipitación, separación y recuperación como las más importantes, por su involucramiento de requerimientos de energía y agentes de separación másico. De los resultados del trabajo en mención, el ácido carmínico se obtiene con una pureza del 100% y el rendimiento de proceso es mayor del 90% referido a la recuperación de ácido carmínico contenido en la materia prima, la cochinilla, por lo que nuestro análisis estará fundamentalmente orientado a la integración de la energía en el proceso. Las corrientes de proceso más importantes para el análisis de integración térmica se dan en la tabla N.º 1. En ella se reportan aquellas corrientes del proceso que actúan como fuentes (corrientes calientes) o como sumideros (corrientes frías) de calor.

Al identificar las corrientes que se deben integrar, hay que tener en cuenta que por lo general, lo que se rotula como corriente en el diagrama de flujo, y lo que se debe considerar como una corriente en la integración energética, son cosas diferentes. Por esta razón, al definir la tabla de corrientes, hay que tener más presente el objetivo que se pretende lograr con los distintos elementos del diagrama de flujo, que la forma de nombrar las corrientes de este diagrama. Por ejemplo, uno de los objetivos del diagrama de flujo es enfriar la corriente de reciclo del solvente orgánico utilizado en la recuperación del ácido carmínico, por lo que en la

integración energética habrá que considerar una corriente caliente. De modo muy similar, son identificadas las otras corrientes del proceso e incorporadas en el análisis de integración energética, las mismas que se resumen en la tabla N.º 1.

**Tabla N.º 1.** Corrientes de proceso para análisis de integración térmica.

N.º	CORRIENTE	CONDICIÓN	FLUJO TÉRMICO KW/°C	T <sub>ent</sub> , °C	T <sub>sal</sub> , C
100	Reciclo de solvente orgánico	Caliente	0,10	80	35
101	Producto de extracción	Caliente	0,40	80	35
102	Producto de evaporación	Caliente	0,20	60	35
201	Alimentación al extractor	Frío	0,40	25	70
202	Aire de secado	Frío	0,15	25	50
203	Alimentación al evaporador	Frío	0,30	40	60

A partir de la información dada en la tabla N.º 1 y aplicando el método de análisis de integración de energía (análisis PINCH) dado por B. Linnhoff<sup>[3]</sup>, se procede como sigue: primero se levanta un diagrama de intervalos de temperatura para un gradiente de temperatura de 10 °C para transferencia de calor entre corrientes de proceso-proceso, a partir del cual se hacen los cálculos de las cargas térmicas en cada intervalo para identificar los requerimientos o disponibilidad de calor. Luego, se aplica la segunda ley de la termodinámica en el mejor sentido de su concepto «todo cuesta», es decir, la transferencia de calor espontáneo es en el sentido de un gradiente positivo de temperatura (ó de alta o baja temperatura), nunca a la inversa, obteniéndose una cascada de transferencia de calor. Un análisis de esta cascada de energía nos permite encontrar una temperatura de 50 °C para el lado caliente y 40 °C para el lado frío: que lo identificamos como la temperatura PINCH, cuyo valor promedio es de 45 °C, a través del cual no hay ningún flujo de calor (condición PINCH). En estas condiciones se tiene un consumo de energía mínimo  $Q_{Hmin}$  de 2,5 Kw que significa un ahorro aproximado de 60% comparado con la demanda de energía para el proceso convencional, y una remoción de calor desde el proceso  $Q_{Cmin}$  de 2,25 Kw.

La construcción de la red de transferencia de calor para análisis de integración energética resulta de considerar ciertas reglas o heurísticos siguientes:

- No hacer intercambio de calor a través de la temperatura PINCH.
- Por encima de la temperatura PINCH sólo calentar.
- Por debajo de la temperatura PINCH sólo enfriar.
- Iniciar los emparejamientos de corrientes de proceso a partir de la temperatura PINCH.
- El número de corrientes de proceso que salen de la temperatura PINCH debe ser mayor o igual que aquellas entrantes, lo contrario bifurcar.
- La entalpía a ceder por cada corriente que sale de la temperatura PINCH debe ser mayor o igual al de alguna que entra, lo contrario bifurcar.
- Eliminar siempre primero la corriente de proceso de menor carga térmica.

En la figura N.º 2 se observa la integración de energía mediante una red de transferencia de calor entre las corrientes del proceso, obtenidos conforme al procedimiento antes señalado, y en donde se muestra la necesidad de incorporar nueve intercambiadores de calor para desarrollar la integración del proceso.

La optimización energética no lleva automáticamente asociado el ser la mejor solución económica. El esquema encontrado siempre es sujeto de una depuración utilizando los conceptos de ciclos o sendas. Uno u otro criterio lleva consigo asociado la alternativa de reducir el número de intercambiadores. Es frecuente que en el diseño de la red de transferencia de calor, algunos de los intercambiadores propuestos son de tan escasa dimensión que su costo no compensa el calor recuperado, o cuando alguna bifurcación del arreglo óptimo da lugar a una estructura complicada en exceso. Por cierto que este tipo de consideraciones, en los que está en juego el costo de los equipos y los coeficientes de transferencia, es preferible realizarlo cuando se ha determinado la forma

más apropiada de utilizar los servicios auxiliares.

### GRAN CURVA COMPUESTA PARA ANÁLISIS DE INTEGRACIÓN DE PROCESO

El análisis final de integración de proceso para la reducción de desechos (considerando sólo energía), se realizó a partir de la gran curva compuesta. El procedimiento consiste en levantar un diagrama T-H (temperatura-entalpía) tomando como referencia la temperatura PINCH promedio de 45 °C, en cuya condición el flujo de calor es cero. Luego, arriba y por debajo de dicho valor para los intervalos de temperatura promedio (determinados en el diagrama de intervalos de temperatura), se hacen los cálculos de transferencia de calor cuyos resultados se muestran en la figura N.º 3. La gran curva compuesta presenta las propiedades siguientes:

- Toca al eje de ordenadas en la temperatura PINCH.
- El extremo superior de la curva representa el mínimo consumo de energía desde la facilidad caliente externa al proceso, mientras que el extremo inferior corresponde a la mínima remoción de calor desde el proceso al sumidero final.
- Para temperaturas superiores a la temperatura PINCH, existe una necesidad neta de calentamiento, y a la inversa, para temperaturas inferiores al referido, la necesidad neta es de enfriamiento.
- Los tramos de rectas con pendiente negativa significan disponibilidad de calor en ese intervalo de temperatura, mientras que los tramos de recta con pendiente positiva significan necesidad de calor en dicho intervalo de temperatura.
- Proporciona una fácil visión de los servicios auxiliares requeridos.

El análisis de las curvas compuestas conduce a determinar si en el proceso se está introduciendo un suministro caliente por debajo de la temperatura PINCH, o uno frío por encima; en tal caso habrá que estudiar el traslado de estos suministros a la región correcta para minimizar

los servicios auxiliares de frío y calor. Se entiende por suministro aquí a la acción de desplazar parte del calor suministrado o extraído con los servicios auxiliares desde los rangos extremos de temperaturas hacia temperaturas intermedias, lo que permite conseguir servicios de calor a temperaturas inferiores y frío a temperaturas superiores. Esto debe procurarse respetando las reglas básicas, de tal forma que los suministros calientes se realizarán sólo en la región superior de la temperatura PINCH, mientras que los fríos se realizarán sólo en la región inferior del mismo.

Del análisis de la gran curva compuesta para el proceso de ácido carmínico se establece que la operación térmica de ningún equipo de proceso como el extractor, evaporador y el secador cruzan la temperatura PINCH. Es decir, el proceso de integración térmica de dichos equipos es correcto, por encima del punto PINCH sólo hay transferencia de calor al proceso y por debajo de dicho valor sólo hay remoción de calor. Podemos, asimismo, observar que en el intervalo de temperatura de 65 a 75 °C existe una disponibilidad de energía adicional que muy bien puede ser aprovechado en beneficio del mismo proceso, reduciendo de esta manera los costos de operación referidos a los servicios o facilidad caliente.

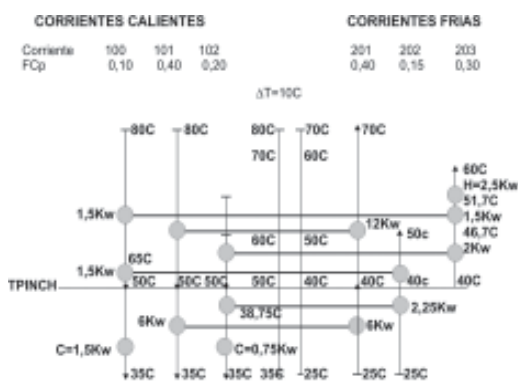


Figura N.º 2. Red de transferencias de calor para integración térmica del proceso.

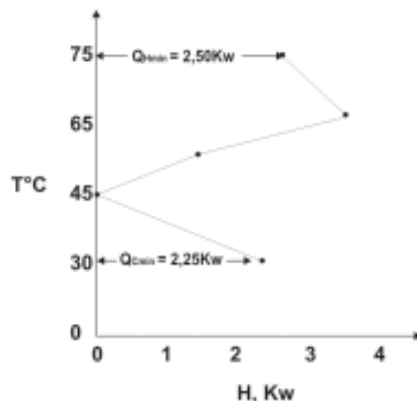


Figura N.º 3. Gran curva compuesta para análisis de integración de proceso.

### CONCLUSIONES

El análisis de integración de energía por el análisis PINCH nos permite obtener un ahorro del 60% de energía de entrada al proceso comparado con el proceso convencional, esto se puede observar de los resultados de la red de transferencia de calor que proporciona un valor de 2,5 Kw de energía mínima de entrada al proceso y una remoción de 1,5 Kw de energía desde el proceso. Por otro lado, el análisis de integración de proceso mediante la gran curva compuesta permite establecer una clara correspondencia entre las facilidades calientes y frías del proceso y las operaciones individuales de extracción, evaporación y secado, observándose que ninguna de estas operaciones cruza el punto PINCH. Estos resultados tienen acuerdo con otros trabajos<sup>[4,5,6,7]</sup>. De otro lado, es preciso señalar que el método de integración aquí utilizado, la tecnología PINCH, se constituye como una herramienta fundamental de gestión tecnológica de diseño de nuevos procesos o de procesos que están en operación, que conduce, como en este trabajo, a las determinaciones del costo total mínimo del proceso (costo de capital + costos operativos), reflejados en el número mínimo de intercambiadores, 09, y en los costos mínimos de las facilidades de calor y frío.

## AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Superior de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el financiamiento de este trabajo de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Irribarren and M. F. Malone. A Systematic Procedure to Batch Process Synthesis. Paper presented at the 1985 Annual AIChE Meeting. Chicago (1985).
- [2] R. Erazo E., J. L. Cárdenas R y M.J. Caso H. *Rev. Per. Quím. e Ing. Quím.* Vol. 7 N.º 1 p. 51 (2004).
- [3] B. Linnhoff and J.R. Flower. *AIChE Journal* 24:633, 642 (1978).
- [4] Nishida, N. Stephanopoulos, G. and Westerberg, A. W. *Journal Review. Process Synthesis, AIChE. J.* 27, 321 (1981).
- [5] Boland, D. Energy management: emphasis in the 80s. *The Chem. Eng.* March, 23 (1983).
- [6] Guy, A. R. and Marsland, R. H. An user guide on process integration for the efficient use of energy. *The Inst. Chem. Eng.* Rugby. England (1982).
- [7] Westerberg, A. W. and Grossmann, I. E. Process synthesis techniques in the process industries and their impact on energy use. Report for EPRI U.S.A. (1985).