

Redes de intercambio calórico en la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales usados

María Fernanda Laborde

Correo electrónico:mfernandalaborde@gmail.com

Laura Ivana Orifici

Correo electrónico:lorifici@fio.unicen.edu.ar

Ana María Pagano

Correo electrónico:apagano@fio.unicen.edu.ar

María Cristina Gely

Correo electrónico:cgely@fio.unicen.edu.ar

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Resumen

Con el objetivo de abordar uno de los retos en la enseñanza de la Ingeniería: ¿Cuál es la aplicación en la práctica profesional?, en este trabajo, atendiendo a la necesidad actual del logro de la eficiencia energética en los procesos industriales y a la reutilización de desechos de la industria alimenticia, se presenta la aplicación de redes de intercambio de calor a la resolución de un caso real: pretratamiento de aceites vegetales usados (AVUs) con catálisis ácida para la producción de biodiésel. Se aplican distintos métodos y software para obtener las cantidades mínimas de calor y la red de intercambio para una capacidad de procesamiento de 0,19 kg/s de AVUs. Se considera una diferencia de temperatura mínima (ΔT_{min}) de 10°C y los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento, resultan ser de 4 629,87 W y de 10 066,30 W, respectivamente. Si no se utiliza red de intercambio estos valores se incrementan a 26 838,33 W y 21 958,33 W, respectivamente. Al aplicar la red de intercambio calórico disminuye en un 78,92% el servicio de vapor requerido en el proceso y en un 62,48 % el servicio de agua de enfriamiento, lo que demuestra que la integración reduce los requerimientos energéticos respecto al proceso no integrado.

Palabras claves: punto de pliegue, redes de intercambio de calor, biodiésel, aceites vegetales

Recibido: 7 de octubre del 2013 Aprobado: 18 de julio del 2014

INTRODUCCIÓN

El incremento en el uso de combustibles no renovables de origen fósil ha transformado estos recursos en escasos, de modo que se está en plena etapa de desarrollo y optimización de combustibles alternativos a partir de fuentes renovables.

El biodiésel es una alternativa a los combustibles fósiles, debido a que es natural, renovable y tiene bajas emisiones tóxicas [1]. Se obtiene mediante la reacción de transesterificación de triglicéridos con alcoholes de cadena

corta, generalmente a temperaturas de 50 - 70°C [2], con una concentración de catalizador de 0,5-1% [2] y una relación molar aceite/alcohol de entre 1/5 y 1/10 [3], siendo las más aconsejables 1/5 o 1/6.

Si bien el aceite es de origen vegetal y no es biodegradable, los malos hábitos de la población causan la inadecuada disposición final de los AVUs (aceites vegetales usados), produciéndose un incremento en la contaminación ambiental. Si se vierte a los desagües el aceite que ha sido usado para

freír los alimentos de consumo diario, se convierte en un contaminante potencial para las aguas de diferente índole, impidiendo el intercambio de oxígeno y la entrada de luz. Se estima que un litro de AVUs contamina unos 1 000 L de agua [4]. Sin embargo, dado que el biodiésel se puede obtener a partir de aceites vegetales, es una buena opción utilizar a los AVUs como materia prima en la obtención de biodiésel [5]. El tema del reciclado de los AVUs es importante a nivel mundial, por lo tanto, el uso de estos desechos de la industria alimentaria en la producción de biodiésel resultaría adecuado y provechoso.

Generalmente los aceites sometidos a frituras elevan su nivel de ácidos grasos libres (FFA), motivo por el cual, para producirse sin inconveniente la reacción de transesterificación en la producción de biodiésel es necesario disminuir su nivel, evitándose de esta forma una reacción de indeseable de saponificación. El grado de acidez debe ser inferior a 0,5 % [6] y el tratamiento para disminuir el porcentaje inicial es a través del proceso de esterificación, que resulta de la mezcla de AVUs con un alcohol, en presencia de un catalizador.

El elevado crecimiento de la economía en los últimos años se traduce en un extraordinario incremento en el consumo de energía, por lo que el logro de la eficiencia energética se ha convertido en un tema fundamental para la economía del sector industrial. Los costos energéticos representan una proporción elevada en los presupuestos globales de producción de los diferentes sectores industriales.

Bajo estas premisas la mayoría de las empresas se centran en incrementar la eficiencia energética de los procesos, principal herramienta para disminuir el consumo de energía en el mundo. A su vez, la promoción del uso eficiente de la energía, contribuiría a una mayor competitividad de la industria a través de la reducción de la incidencia de los costos energéticos en el precio final de los productos.

Por tanto, la búsqueda de la eficiencia energética es fundamental en industrias de procesos químicos. Una herramienta para lograr este objetivo es la utilización de redes de intercambiadores de calor para la recuperación de la energía. La utilización de redes de intercambio de calor frente a la utilización de servicios externos de calentamiento y enfriamiento disminuye el consumo energético viéndose reflejado en los costos operativos.

Dos son las principales metodologías propuestas para sintetizar redes de intercambio de calor: secuenciales y simultáneos. Entre los primeros, el método del punto de pliegue permite encontrar la mínima demanda de servicios, mínimo número de intercambiadores y red óptima en forma secuencial utilizando reglas heurísticas. Por otro lado, los segundos aplican metodologías de programación matemática [7]. El método punto de pliegue (tecnología pinzamiento o *Pinch*) permite maximizar la recuperación de energía entre las corrientes del proceso, y calcular el mínimo requerimiento termodinámico de servicios externos de calentamiento y enfriamiento, reduciendo por tanto los costos involucrados [8]. Este método puede ser utilizado durante el proceso de diseño

o cuando este ya está en funcionamiento para realizar una optimización del mismo [9].

La tecnología de pinzamiento proporciona uno de los mejores métodos usados para evaluar la eficiencia en la utilización de la energía [10]. Linnhoff *et al.* (1982) y Linnhoff y Hindmarsh (1983) desarrollaron la tecnología *Pinch* en procesos individuales diseñando redes de intercambio de calor [11, 12].

La tecnología de pinzamiento ha sido utilizada en el proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales usados con catálisis enzimática, minimizando el requerimiento energético en un 15,65 % [13]. En otro caso de producción de biodiésel [14], la metodología punto de pliegue brindó una herramienta para establecer la renta máxima que se espera de un diseño de redes de intercambio de calor y la mejora de un 5 % del calor recuperado.

A partir del análisis del punto de pliegue es posible construir la gran curva compuesta, utilizada para seleccionar los valores mínimos de servicios auxiliares requeridos [15, 16]. Mediante la aplicación de esta metodología, se obtuvieron los requerimientos mínimos de calor aportados por servicios externos para el proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de microalgas [17], logrando disminuir en un 11,3 % y 13,3 % los requerimientos energéticos de los servicios de enfriamiento y calentamiento respectivamente respecto al proceso no integrado.

Los métodos matemáticos como la programación lineal son de mayor complejidad en su planteamiento [18], pero permiten identificar la mejor solución a un problema determinado, hallando el mínimo consumo de servicios externos.

El estudio de casos es una técnica que consiste en el análisis de situaciones problemáticas reales que deben ser resueltas con la finalidad de que los estudiantes reflexionen respecto al tema que se encuentran analizando [19]. Esta opción de enseñanza se justifica para que los estudiantes desarrollen competencias para vincular la teoría con la práctica profesional, que por años fue un problema generalizado de desmotivación de estos. Por lo tanto, la metodología de casos sigue objetivos específicos dirigidos al proceso de enseñanza-aprendizaje. Los sistemas de aprendizaje basados en la resolución de proyectos reales han demostrado ser eficientes para el aprendizaje en los distintos niveles educativos [20]. Uno de los retos en la enseñanza de la ingeniería es la aplicación de los métodos sobre la práctica [21], por lo que los estudiantes necesitan realizar aplicaciones sobre casos reales para abordar cuestiones significativas.

En este trabajo se presenta la aplicación de métodos de obtención de redes de intercambio de calor a la resolución de un caso real: pretratamiento de aceites vegetales usados (AVUs) con catálisis ácida para la producción de biodiésel, con el objetivo de realizar una aplicación a un caso real y atender a la necesidad actual de optimizar la eficiencia

energética en los procesos industriales, conjuntamente con la reutilización de desechos de la industria alimenticia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de realizar la aplicación de la metodología estudio de casos, en este trabajo se realizará la optimización energética de una planta de pretratamientos de AVUs para la obtención de biodiésel con una capacidad de procesamiento de 680 kg/h de AVUs desarrollada por Capdevila *et al.* (2012) para una localidad del centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina [4], a partir de estudios realizados por Zhang, *et al.* [6].

Se utilizó la herramienta de simulación de procesos Aspen HYSYS® para simular la etapa correspondientes a la esterificación (reacción con metanol y H₂SO₄ como catalizador, y separación de productos), para reducir el contenido de FFA (ácidos grasos libres) hasta niveles menores al 0,5 % [6]. De esta manera se evita una posible reacción de saponificación en la posterior transesterificación catalítica que dificultaría la separación de los ésteres de la glicerina reduciendo el rendimiento de biodiesel. Este proceso cuenta con seis equipos de intercambio de calor con servicios externos de vapor y agua de enfriamiento.

Mediante la aplicación del método de punto de pliegue se realiza la optimización energética del proceso de pretratamiento de aceites usados para la obtención de biodiésel. El punto de pliegue es un punto crítico en el diseño de redes de intercambio de calor que divide a la red en dos zonas en las que se establecen los siguientes criterios esenciales [22, 23]:

- No transferir calor a través del punto de pliegue
- No usar calentamiento abajo del punto de pliegue
- No usar enfriamiento arriba del punto de pliegue
- Y las siguientes reglas básicas (1)-(10), [22, 27]

Inmediatamente encima del punto de pliegue:

Condición 1: Número de corrientes:

$$N_h \leq N_c \quad (1)$$

Condición 2: Flujos calóricos específicos:

$$WCp_h \leq WCp_c \quad (2)$$

Condición 3: Diferencial de flujos calóricos:

$$\Delta WCp \leq \Delta WCp_{total} \quad (3)$$

$$\text{Siendo: } \Delta WCp = WCp_c - WCp_h \quad (4)$$

$$\Delta WCp_{total} = \sum WCp_c - \sum WCp_h \quad (5)$$

Inmediatamente debajo del punto de pliegue:

Condición 1: Número de corrientes:

$$N_h \Rightarrow N_c \quad (6)$$

Condición 2: Flujos calóricos específicos:

$$WCp_h \Rightarrow WCp_c \quad (7)$$

Condición 3: Diferencial de flujos calóricos:

$$\Delta WCp \leq \Delta WCp_{total} \quad (8)$$

$$\text{Siendo: } \Delta WCp = WCp_h - WCp_c \quad (9)$$

$$\Delta WCp_{total} = \sum WCp_h - \sum WCp_c \quad (10)$$

donde:

N_h : Número de corrientes calientes.

N_c : Número de corrientes frías.

W : Flujo másico.

Cp_h : Capacidad calorífica de las corrientes calientes.

Cp_c : Capacidad calorífica de las corrientes frías.

Cuando las condiciones (1), (2), (6) o (7) no se cumplan se deberá dividir la corriente correspondiente a fin de lograr su verificación [23].

El punto de pliegue puede también obtenerse mediante la aplicación del software HINT® [28].

Tres puntos importantes para el diseño de redes de intercambio de calor son: la cantidad mínima de calor necesario para calentamiento suministrado por servicios externos (Q_h) en el nivel máximo de temperatura, la cantidad mínima de calor a extraer para enfriamiento (Q_c) en el nivel mínimo de temperatura, y la temperatura a la cual el flujo calórico es nulo (punto de pliegue) [22].

Se determinó el punto de pliegue realizando el ajuste de las temperaturas: a) A las temperaturas de las corrientes calientes se les resta el valor $\Delta T_{\text{mín}}/2$ y b) A las temperaturas de las corrientes frías se les suma el valor $\Delta T_{\text{mín}}/2$ [23, 24] ordenando luego las temperaturas de manera decreciente.

Para cada intervalo de temperatura establecido se efectuó el balance de entalpía a través de la ecuación (11) para cualquier intervalo i , [22, 23, 25].

$$\Delta H_i = (\sum wCp_h - \sum wCp_c) \cdot (T_i - T_{i+1}) \quad (11)$$

siendo:

ΔH_i : Diferencia de entalpía del intervalo.

W : Flujo másico.

C_{ph} : Capacidad calorífica de las corrientes calientes.

C_{pc} : Capacidad calorífica de las corrientes frías.

T : Temperaturas

i : Intervalo de temperatura.

Para realizar el cálculo de la ecuación (11) es conveniente trazar un gráfico auxiliar [23, 29, 30], donde se representan todas las corrientes con sus WCp sobre los intervalos de temperaturas ajustados, ya que esto permite determinar las corrientes consideradas en cada intervalo con una visión más clara.

A partir de estos resultados se forma una cascada de calor de T_i a T_f (f : final), suponiendo que no hay una fuente de calor externa ($Q_h = Q1 = 0$) [22], evaluándose la cantidad de calor que fluye desde un nivel de temperatura T_i hasta un nivel T_{i+1} mediante la ecuación (12).

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta H_i \quad (12)$$

donde:

Q_i y Q_{i+1} : Cantidades de calor en los intervalos de temperatura i e $i+1$, respectivamente.

ΔH_i : Entalpía en el intervalo de temperatura i .

Esta cascada de calor puede presentar valores negativos, lo que implicaría la violación de la segunda Ley de la Termodinámica. Para corregir este efecto, es necesario agregar calor de una fuente externa coincidente con el valor negativo más alto representado por Q_h , y calcular nuevamente la ecuación (12) con un valor inicial igual a Q_h , de esa forma se obtiene el calor corregido ($Q_{\text{corregido}}$); este valor debe cumplir con el flujo natural de calor, es decir, Q_i debe ser mayor o igual a cero [22, 25].

A partir del análisis del punto de pliegue es posible construir la gran curva compuesta (T vs. $Q_{\text{corregido}}$), que es la representación en una sola curva de las corrientes calientes y frías del proceso disponibles para realizar el intercambio de calor. La gran curva compuesta es utilizada para seleccionar los valores mínimos de servicios auxiliares requeridos [15, 16].

Estos mínimos requerimientos de calentamiento y enfriamiento pueden también calcularse a partir de un modelo matemático lineal surgido del balance calórico (12) para cada uno de los niveles de la cascada de calor, pudiendo ser resuelto mediante la metodología de Programación Lineal para lo que se aplicó el software GAMS®.

Mediante la utilización del software Aspen HYSYS® se simularon los diferentes intercambios obtenidos como una herramienta para verificar el funcionamiento del intercambiador y comprobar las temperaturas calculadas en forma analítica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del diagrama de flujo desarrollado por Capdevila *et al.* (2012) [4] en Aspen HYSYS® el cual se muestra en la figura 1, se consideraron las corrientes que requieren de servicios de calentamiento y enfriamiento sobre las que se aplicó el método punto de pliegue. En la tabla 1 se presentan los datos correspondientes a cada una de esas corrientes.

A partir de considerar una diferencia de temperatura mínima ($\Delta T_{\text{mín}}$) de 10°C se realiza el ajuste y ordenamiento de las temperaturas de entrada y salida para cada corriente analizada, ordenándolas posteriormente en sentido decreciente de temperaturas (tabla 2).

En la tabla 3 se muestra el balance de entalpía calculado a partir de la ecuación (11), la cascada de calor obtenida mediante la ecuación (12) y el $Q_{\text{corregido}}$. En la figura 2 se presenta el diagrama auxiliar que se realizó a partir de las temperaturas ajustadas de cada corriente y sus correspondientes valores de WCp . La cascada de calor presentó valores negativos en dos niveles, esto implica que viola la segunda Ley de la Termodinámica, ya que significaría que se estaría transfiriendo calor de una región de baja temperatura a otra de alta temperatura. Para corregir este efecto, se necesitó agregar calor de una fuente externa, eligiéndose el valor negativo más alto, Q_h a partir del cual se obtuvo el $Q_{\text{corregido}}$.

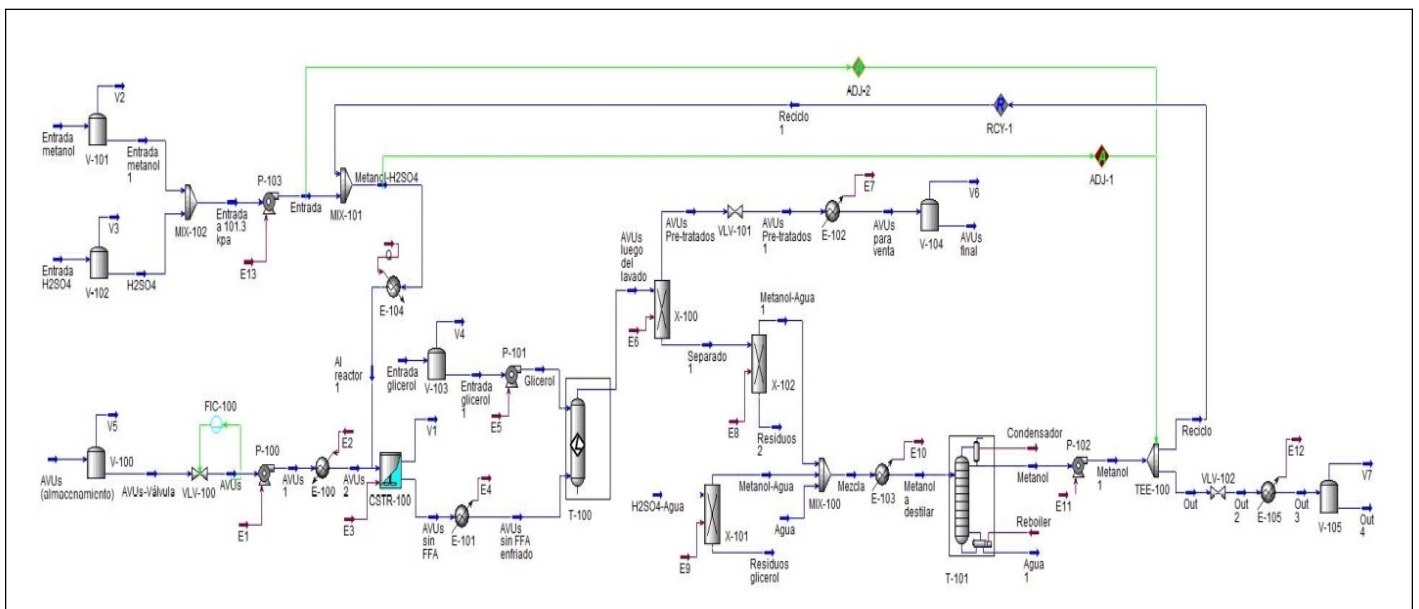


Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso de biodiésel a partir de AVUs

Tabla 1
Características y propiedades de corrientes del proceso de pretratamiento de AVUs

Corriente	T entrada (°C)	T salida (°C)	Cp (J/kg °C)	W (kg/s)
C ₁ : AVUs1	24,8	70	1 502	0,19
C ₂ : Metanol-H ₂ SO ₄	28,1	70	5 019	0,04
H ₁ : AVUs sin FFA	70	46	2 229	0,23
H ₂ : Mezcla	70,58	48	5 133	0,06
H ₃ : Out 2	35,58	25	5 119	0,02
H ₄ : AVUs pretratados1	45,42	25	1 573	0,19

Tabla 2
Ajuste de temperaturas y orden decreciente de las mismas

Corriente	T entrada (°C)	T salida (°C)	T ajustada (°C)	Orden
C ₁	24,8		29,8	T ₉
		70	75	T ₁
C ₂	28,1		33,1	T ₇
		70	75	Duplicado
H ₁	70		65	T ₃
		46	41	T ₅
H ₂	70,58		65,58	T ₂
		48	43	T ₄
H ₃	35,58		30,58	T ₈
		25	20	T ₁₀
H ₄	45,42		40,42	T ₆
		25	20	Duplicado

A partir de los cálculos mostrados en la tabla 3 se determina la temperatura de pliegue correspondiente a la temperatura con flujo nulo de calor, resultando de 70°C para las corrientes calientes y 60°C para las corrientes frías. Se encuentra que el requerimiento externo de calentamiento es de 4 629,87 W y el de enfriamiento es de 10 066,30 W, correspondientes a los flujos calóricos para la menor y mayor temperatura respectivamente.

La información de la tabla 1 fue introducida en el software HINT®, obteniendo el diagrama de calor presentado en la figura 3.

Los resultados obtenidos en la aplicación del método del punto de pliegue y el software HINT® pueden apreciarse también en la figura 4, donde se presenta la gran curva compuesta, la cual muestra la variación de la temperatura vs. cantidad de calor.

A partir del diagrama de la cascada de calor que se presenta en la figura 5, se planteó la función objetivo con la ecuación (13) y los balances calóricos mediante la ecuación (12) aplicada para cada uno de los niveles; dichos balances se evidencian en las ecuaciones (14) a (22). De esta manera se

genera un modelo lineal factible de ser resuelto con la aplicación del software GAMS®, pudiendo hallarse entonces los mínimos valores de requerimientos calóricos tanto de calentamiento como de enfriamiento.

Tabla 3
Cálculo de la entalpía para cada intervalo y el calor corregido

T _i (°C)	ΔH _i (W)	Q (W)	Q _{corregido} (W)
75	-4 531,01	0	4629,87
65,58	-98,86	-4 531,01	98,86
65	7 447,06	-4 629,87	0,00
43	55,91	2 817,18	7 447,06
41	-278,98	2 873,10	7 502,97
40,42	-1 337,66	2 594,12	7 223,99
33,1	35,92	1 256,46	5 886,33
30,58	100,33	1 292,38	5 922,25
29,8	4 043,73	1 392,70	6 022,58
20		5 436,43	10 066,30

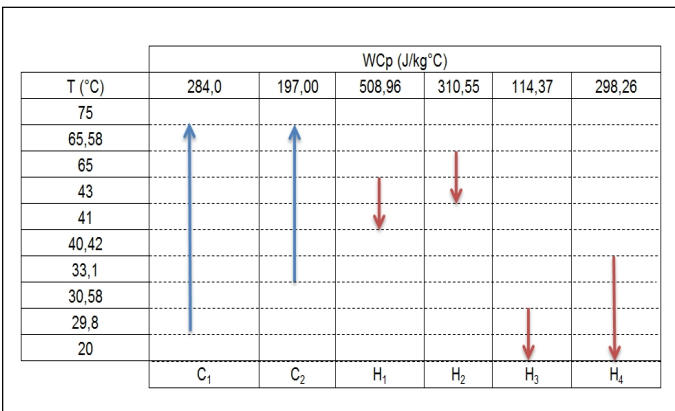


Fig. 2. Diagrama auxiliar para cálculo de la entalpía por intervalo

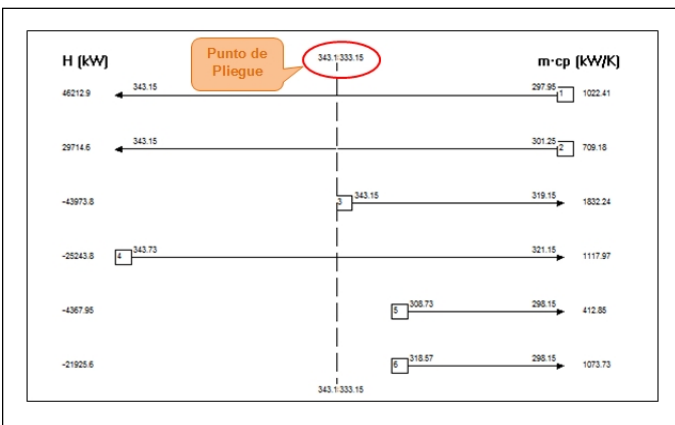


Fig. 3. Diagrama realizado por software HINT® (punto de pliegue: 70°C, 60°C)

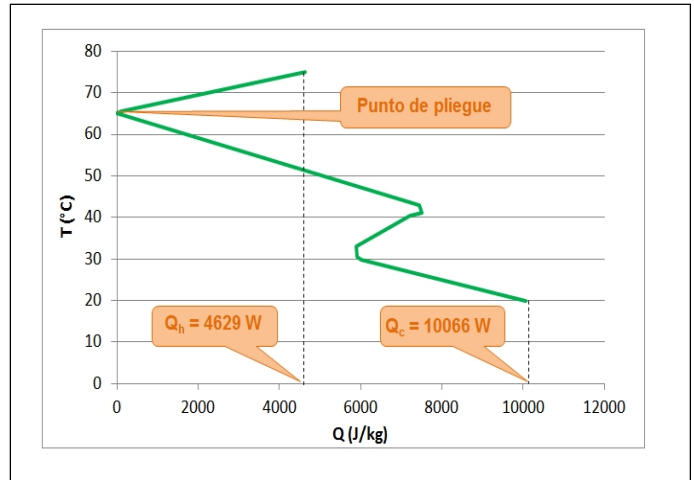


Fig. 4. Gran curva compuesta

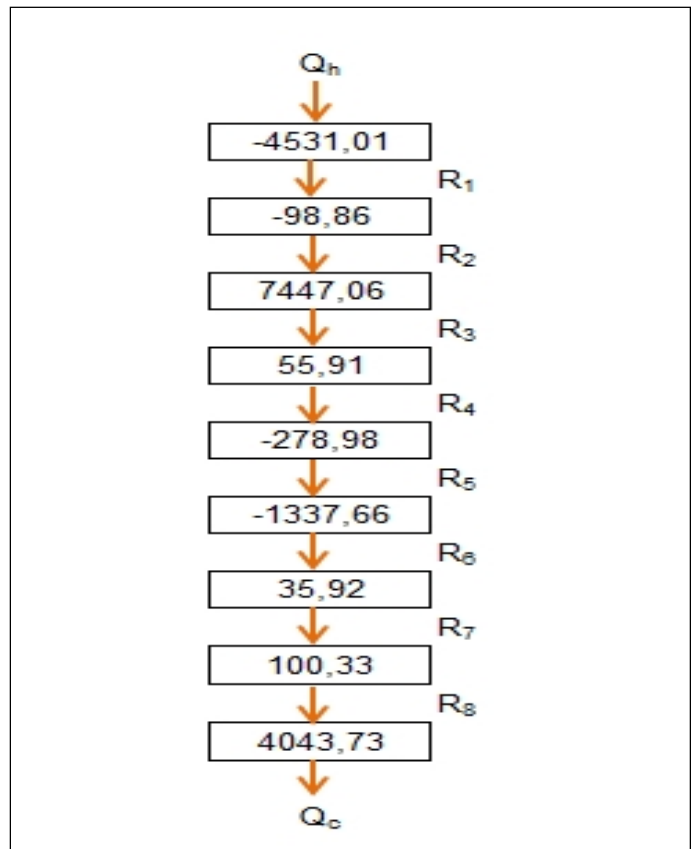


Fig. 5. Diagrama de cascada

Programación lineal:

Sujeto a: $Z = \text{Minimizar } Q_h$ (13)

$Q_h - R_1 - 4\ 531,01 = 0$ (14)

$R_1 - R_2 - 98,86 = 0$ (15)

$R_2 - R_3 + 7\ 447,06 = 0$ (16)

$$R_3 - R_4 + 55,91 = 0 \quad (17)$$

$$R_4 - R_5 - 278,98 = 0 \quad (18)$$

$$R_5 - R_6 - 1\,337,66 = 0 \quad (19)$$

$$R_6 - R_7 + 35,92 = 0 \quad (20)$$

$$R_7 - R_8 + 100,33 = 0 \quad (21)$$

$$R_8 - Q_c + 4\,043,73 = 0 \quad (22)$$

El resultado presentado por el software GAMS® utilizando el Solver MIP es $Q_h = 4\,629,87\text{ W}$ y $Q_c = 10\,066,31\text{ W}$, similar al hallado por el método punto de pliegue.

La red que se obtuvo luego de aplicar las reglas básicas del método punto de pliegue, y a partir de los datos anteriormente hallados se presenta en la figura 6.

Esta red (figura 6) presenta una situación de división de corriente debido a que por encima del punto de pliegue no se cumple la condición 2 (2) de las reglas básicas. La división de corriente se realizó otorgándole a cada subcorriente un valor de WCp igual a la mitad del original. De esta manera los requerimientos calóricos de $4\,629,87\text{ W}$ y $10\,066,30\text{ W}$ por encima y debajo del punto de pliegue coinciden con lo hallado anteriormente en la tabla 3, lo que indica que la red hallada es óptima.

Una aclaración importante es que, si bien a efectos del aprendizaje de la resolución de la red se considera el enfriamiento desde $70,58\text{ °C}$ a 70 °C y se realiza la correspondiente división de corrientes para aplicar el método punto de pliegue, en la práctica profesional habría que analizar el costo de inversión correspondiente a la incorporación de dos intercambiadores frente a un ínfimo ahorro energético de $180,12\text{ W}$. El hecho de no considerar este enfriamiento de $0,58\text{ °C}$ implicaría un calentamiento adicional por debajo del punto de pliegue de $180,12\text{ W}$.

A partir de la comparación de los requerimientos calóricos para los sistemas con y sin red de intercambio calórico (tabla 4) es posible observar que su aplicación genera una disminución de un $78,92\%$ en el servicio de vapor requerido y un $62,48\%$ para el servicio de agua de enfriamiento, redundando en una reducción de los costos de operación del proceso.

Utilizando el software Aspen HYSYS® se simularon los dos intercambiadores entre las corrientes C_1, H_1 y H_2, C_2 ; los resultados obtenidos con Aspen HYSYS® se muestran en la figura 7 a) y b), respectivamente.

	Con red de intercambio	Sin red de intercambio
Agua de enfriamiento ($Q_c = \text{W}$)	10 066,30	26 838,33
Vapor de calentamiento ($Q_h = \text{W}$)	4629,87	21 958,33

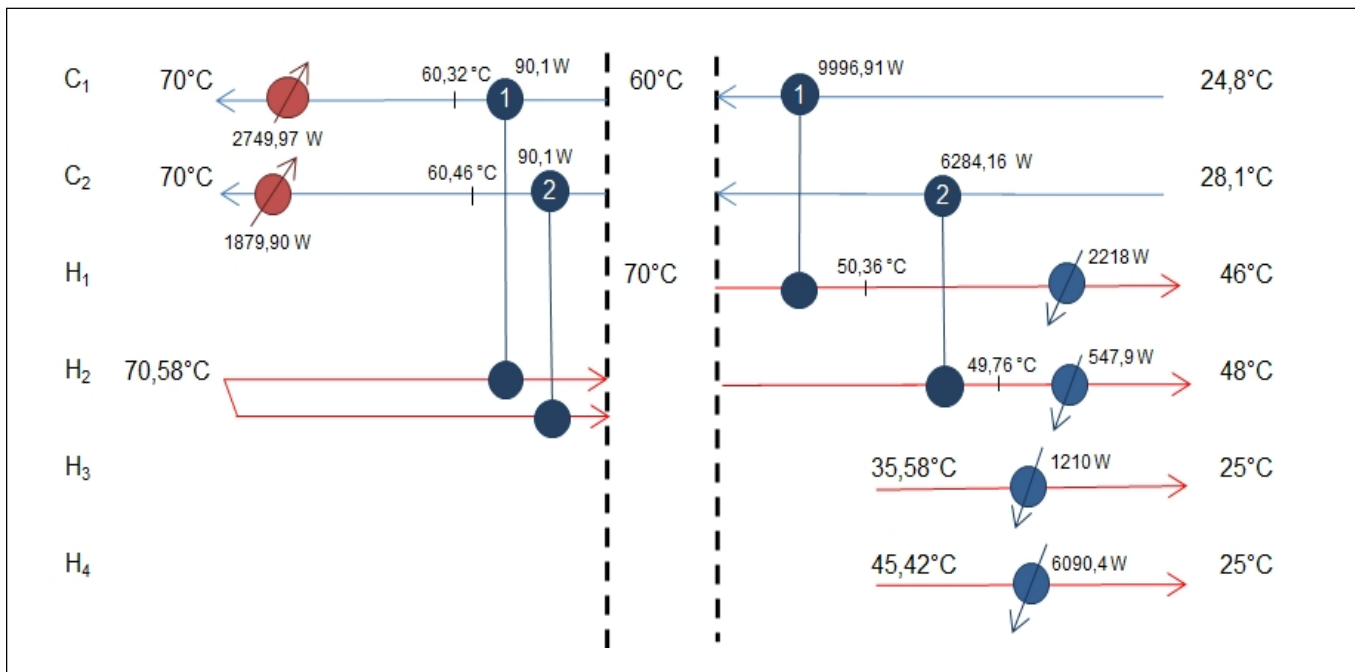


Fig. 6. Red de intercambio obtenida mediante el método punto de pliegue

En la figura 8 a) y b), se presentan los valores finales de temperatura para las corrientes H_1 y H_2 , respectivamente.

Al comparar las figuras 6 y 7, se establece que los valores de contenido calórico hallados por el método punto de pliegue resultan similares a los encontrados a partir de la simulación de Aspen HYSYS® de las redes de intercambio.

Y al comparar las figuras 6 y 8, se establece que las temperaturas de salida de las corrientes H_1 y H_2 son prácticamente iguales por el método analítico que el computacional.

CONCLUSIONES

En este trabajo se planteó la aplicación de una metodología de enseñanza de la ingeniería basada en estudio de casos como una herramienta educativa. Para esta situación se trabajó sobre un caso simulado en el que se busca una reducción del consumo energético para un proceso de pretratamiento de aceites vegetales usados.

Mediante la aplicación al caso de pretratamiento de aceites vegetales usados (AVUs) con catálisis ácida para la producción de biodiésel, se logra el objetivo de determinar una aplicación en la práctica profesional del método de obtención de redes de intercambio de calor para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

Por otra parte, con la aplicación de la red de intercambio calórico se logra la optimización energética, disminuyendo para este caso un 78,92 % el servicio de vapor requerido y en un 62,48 % el servicio de agua de enfriamiento. Esto se traduce a una reducción en los costos de operación del proceso.

Finalmente, se verificó que para la búsqueda del punto de pliegue y la determinación de la cantidad de calor de los servicios externos requeridos se pueden aplicar equivalentemente los métodos analíticos y computacionales.

Esta metodología de enseñanza se aplicó en una materia de quinto año de la currícula de Ingeniería Química en la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. En dicha experiencia los alumnos participaron de manera entusiasta ya que pudieron realizar una aplicación a un caso real y atender a la necesidad actual de optimizar la eficiencia energética en los procesos industriales, conjuntamente con la reutilización de desechos de la industria alimenticia.

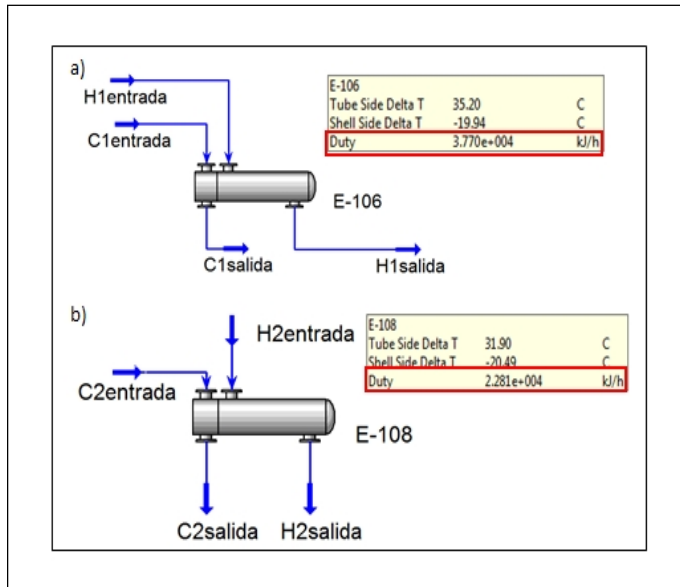


Fig. 7. Simulación de los intercambiadores: a) Intercambio entre H_1 y C_1 ; b) Intercambio entre H_2 y C_2

a)

Name	C1entrada	C1salida	H1entrada	H1salida
Vapour	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature [C]	24.80	60.00	70.00	50.06
Pressure [kPa]	400.0	400.0	400.0	400.0
Molar Flow [kgmole/h]	0.8672	0.8672	5.148	5.148
Mass Flow [kg/h]	680.7	680.7	822.0	822.0
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0.7450	0.7450	0.9183	0.9183
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.671e+006	-1.628e+006	-4.779e+005	-4.852e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	1867	2005	377.9	355.9
Heat Flow [kJ/h]	-1.449e+006	-1.412e+006	-2.460e+006	-2.498e+006

b)

Name	C2entrada	C2salida	H2entrada	H2salida
Vapour	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature [C]	28.10	60.00	70.00	49.51
Pressure [kPa]	400.0	400.0	100.0	101.3
Molar Flow [kgmole/h]	4.281	4.281	8.926	8.926
Mass Flow [kg/h]	141.3	141.3	217.8	217.8
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0.1730	0.1730	0.2514	0.2514
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.575e+005	-2.522e+005	-2.646e+005	-2.672e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-0.3704	16.44	47.52	39.84
Heat Flow [kJ/h]	-1.102e+006	-1.080e+006	-2.362e+006	-2.385e+006

Fig. 8. Datos de las corrientes: a) Temperatura de salida de H_1 ; b) Temperatura de salida H_2

REFERENCIAS

1. **NASIR, N. F.; DAUD, W. R. W.; KAMARUDIN, S. K.; YAAKOB, Z.** "Process system engineering in biodiesel production: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, pp. 631-639. ISSN: 1364-0321.
2. **FOON, C. S.; MAY, C. Y.; NGAN, M. A.; HOCK, C. C.** "Kinetics study on transesterification of palm oil". *Journal of Oil Palm Research*, 2004, vol. 16, núm. 2, pp. 19-29. ISSN: 1511-2780.
3. **KAPILAKARN, K.; PEUGTONG, A.** "A comparison of costs of biodiesel production from transesterification". *International Energy Journal*, 2007, vol. 8, pp. 1-6. ISSN 1513-718X.
4. **CAPDEVILA, V.; ORIFICI, L.; GELY, M. C.; PAGANO, A.** "Biodiesel a partir de aceites vegetales usados (avus)". En *Proceedings of the Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas "Clicap 2012*, San Rafael, Mendoza, Argentina, 2012. ISBN/ISSN: 978-987-575-106-4.
5. **BURÍN, M.** "Utilización de aceite de fritura usado para fabricación de biodiésel en plantas medianas para autoconsumo". e+renova. Diciembre 2009, pp. 1-7. Disponible en Web: http://www.inti.gob.ar/e-renova/erBI/pdf/Aceite_fabricacion_biodiesel.pdf. Consultado el 11/07/2013.
6. **ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; MCLEAN, D. D.; KATES, M.** "Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment". *Bioresource Technology*, 2003, vol. 89, núm. 1, pp. 1-16. ISSN: 0960-8524.
7. **OLIVA, D. G.; FRANCESCO, J. A.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. A.** "Modeling, synthesis and optimization of heat exchanger networks. Application to fuel processing systems for pem fuel cells". *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, núm. 15, pp. 9098-9114. ISSN: 0360-3199.
8. **CASTIER, M.** "Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting". *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, núm. 8-9, pp. 1653-1656. ISSN: 1359-4311.
9. **BEAMAN, R.; REESE, C.** "Energy optimization using pinch analysis". *Chemical Engineering* noviembre, 2011, núm. 11, pp. 36-41. ISSN 0009-2460.
10. **STAINÉ, F.; FAVRAT, D.** "Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors". *Applied Thermal Engineering*, 1996, vol. 16, núm. 6, pp. 497-507. ISSN: 1359-4311.
11. **LINHOFF, B.; FLOWER, J.** *User guide on process integration for the efficient use of energy*. Ed.: Institution of Chemical Engineers Rugby, Warwickshire, UK, 1982. ISBN: 0852951566.
12. **LINHOFF, B.; HINDMARSH, E.** "The pinch design method for heat exchanger networks". *Chemical Engineering Science*, 1983, vol. 38, núm. 5, pp. 745-763. ISSN: 0009-2509.
13. **YUN, H.; WANG, M.; FENG, W.; TAN, T.** "Process simulation and energy optimization of the enzyme-catalyzed biodiesel production". *Energy*, 2013, vol. 54, pp. 84-96. ISSN: 0360-5442.
14. **PALMEIRA, J. V. N.; SILVAA, J. M.; MATOS, H. A. S.** "Industry energy optimization: A case study in a biodiesel production site". *Chemical Engineering Transactions*, 2012, vol. 29, pp. 919-924. ISSN: 1974-9791.
15. **RAŠKOVIĆ, P.; STOILJKOVIĆ, S.** "Pinch design method in the case of a limited number of process streams". *Energy*, 2009, vol. 34, núm. 5, pp. 593-612. ISSN: 0360-5442.
16. **RENEDO ESTÉBANEZ, C. J.; FERNÁNDEZ DÍEZ, P.** "Tecnología pinch para el diseño de redes de intercambiadores (i). Principios, reglas básicas, suministros". *Ingeniería Química*, 2003, núm. 402, pp. 111-120. ISSN: 0210-2064.
17. **SÁNCHEZ, E.; OJEDA, K.; EL-HALWAGI, M.; KAFAROV, V.** "Biodiesel from microalgae oil production in two sequential esterification/transesterification reactors: Pinch analysis of heat integration". *Chemical Engineering Journal*, 2011, vol. 176-177, pp. 211-216. ISSN: 1385-8947.
18. **RODRÍGUEZ, A.; SOUTO, J. A.; CASARES, J. J.** "Síntesis de redes de intercambiadores. Análisis comparativo de dos procedimientos basados en la programación lineal". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1990, vol. 6, pp. 527-541. ISSN: 0213-1315.
19. **DÍAZ BARRIGA, F.** *Enseñanza situada: Vínculo entre la escuela y la vida*. Ed.: McGraw-Hill, 2005.
20. **REDONDO, M.; BRAVO, C.; BRAVO, J.; ORTEGA, M.** "Colaboración en entorno de aprendizaje basados en casos reales. Aplicación en ambientes de diseño y simulación". En *Proceedings of the Interacción 2000. I Jornada de Interacción Persona-Ordenador*, Granada España, 2000, pp. 143-153.
21. **ROSSON, M. B.; CARROLL, J. M.; RODI, C. M.** "Case studies for teaching usability engineering". *Proceedings of the 35th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, 2004, pp. 36-40.
22. **JIMENEZ GUTIERREZ, A.** *Diseño de procesos en ingeniería química*. Ed.: Editorial Reverté, 2003. ISBN: 8429172777.
23. **KEMP, I. C.** *Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the efficient use of energy*. Ed.: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 0080468268.
24. **CERVERO, J.; LUQUE, S.; ÁLVAREZ, J.** "La tecnología pinch en la industria de procesos químicos". *Ingeniería Química*, 2006, núm. 436, pp. 124-135. ISSN: 0210-2064.

25. **SEIDER, W. D.; SEADER, J. D.; LEWIN, D. R.** "Product & process design principles: Synthesis, analysis and evaluation (with cd)". Ed.: Wiley. com, 2004. ISBN: 8126520329.
26. **RENEDO ESTÉBANEZ, C. J.; FERNÁNDEZ DÍEZ, P.** "Tecnología pinch para el diseño de redes de intercambiadores (ii). Cálculo de la red por encima del pinch". *Ingeniería Química*, 2003, núm. 403, pp. 210-226. ISSN: 0210-2064.
27. **RENEDO ESTÉBANEZ, C. J.; FERNÁNDEZ DÍEZ, P.** "Tecnología pinch para el diseño de redes de intercambiadores (iii). Cálculo de la red por debajo del pinch, unión de las dos redes y optimización". *Ingeniería química*, 2003, núm. 404, pp. 131-145. ISSN 0210-2064.
28. **MARTÍN, Á.; MATO, F. A.** "Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method". *Education for Chemical Engineers*, 2008, vol. 3, núm. 1, pp. e6-e14. ISSN: 1749-7728.
29. **SMITH, R.** *Chemical process design*. McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN: 0-07-059220-9.
30. **WELLS, G. L.; ROSE, L. M.** "The art of chemical process desing". ELSEVIER, 1986. ISBN: 0-444-42699-X.

AUTORES

María Fernanda Laborde

Ingeniera Química, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Argentina

Laura Ivana Orifici

Ingeniera Química, Docente-Investigadora en Evaluación, Ayudante Exclusiva, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNCPBA, Argentina

Ana María Pagano

Ingeniera Química Industrial, Máster en MEF y Simulación, Profesora Asociada Ordinaria Exclusiva, Investigadora Categoría II, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNCPBA, Argentina

María Cristina Gely

Ingeniera Química, Magíster en Gestión Empresarial, Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNCPBA, Argentina

Heat Exchange Networks in Biodiesel Production from Waste Cooking Oils

Abstract

With the objective to aboard one of the challenges in Engineering teaching: It's the application in professional practice?, along with attending to the actual requirements of achieve energetic efficiency in industrial process and to reuse wastes of food industry, this work, presents the application of heat exchange networks for the resolution of a real case: pre-treatment of waste cooking oils (WCO) with acid catalysis for biodiesel production. Different methods and software are applied to obtain the minimum amounts of heat and the heat exchange network for a processing capacity of 0,19 kg/s of WCO. A minimum temperature difference (ΔT_{min}) of 10°C is considered and the minimum requirements of heating and cooling result 4629,87 W and 10066,30 W, respectively. If this exchange network is not considered, this values increase to 26838,33 W and 21958,33 W, respectively. Applying heat exchange network, decrease 78,92% the required steam service in the process and water cooling service decreases 62,48%, demonstrating that integration reduces energetic requirements respect the non-integrated process.

Key words: pinch, heat exchange networks, biodiesel, waste cooking oil, optimization