

# **DISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE ENERGÍA, SU ENSEÑANZA EN DISEÑO DE PROCESOS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

Julieta Martínez\*, Orlando Domínguez y Julián Enrique Finetti

Diseño de Procesos. Facultad de Ingeniería Química

(Universidad Nacional de Salta)

Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta - Argentina

E-mail: [julemartinez@unsa.edu.ar](mailto:julemartinez@unsa.edu.ar)

**Resumen.** El diseño de redes de intercambio de energía es una actividad importante en el diseño en ingeniería química, el mismo ha pasado por diferentes etapas, partiendo desde los métodos conceptuales, heurísticos, hasta hoy que se presentan métodos específicos, para cada etapa del diseño. El diseño de redes de intercambio de energía está presente en todas las curriculas de Ingeniería Química, en especial se encuentra en el plan de estudio de la materia de Diseño de Procesos, de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Salta. Por lo que nuestra propuesta es la enseñanza de este tema a través de dos etapas. Como primera etapa presentaremos aquí la enseñanza del método específico para el diseño de redes de intercambio de energía, mediante la aplicación del método de Análisis Pinch y su resolución en primera instancia mediante la aplicación del cálculo riguroso en lápiz, papel y hoja de calculo. Una vez finalizada la primera etapa y utilizando el mismo problema resulto en la primera etapa, se le enseña a los alumnos a usar la herramienta computacional como una segunda etapa. La herramienta computacional utilizada es el paquete Aspen Energy Analyzer del simulador ASPEN v8.3, cuya licencia posee la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta. Finalmente los alumnos realizan una comparación de los resultados, presentan las

---

\* A quien debe enviarse toda la correspondencia

conclusiones de utilizar ambos métodos, con sus ventajas y desventajas. Los alumnos, a través de los resultados, las conclusiones del trabajo práctico y debate entre los diferentes grupos, presentan una mejora en relación a los cursos anteriores que solo se presentaba el cálculo riguroso mediante la primera etapa, además de una mayor incorporación de conocimiento.

**Palabras clave:** Analisis Pinch, Diseño, Redes de Intercambio.

## 1. Introducción

El aumento del costo de la energía y una conciencia cada vez mayor puesta al cuidado del medio ambiente y a la sustentabilidad, llevan a la inquietud por parte de las industrias por aplicar métodos eficientes para reducir el consumo de energía en las operaciones. Muchos algoritmos han sido desarrollados con el objetivo de disminuir los consumos de servicios auxiliares dentro de una línea de procesos productivos. Uno de estos métodos, es la denominada integración energética, el cual consiste en primera instancia en, diseñar redes de intercambio de energía de tal manera que las corrientes del proceso que se desean enfriar lo hagan mediante las corrientes del mismo proceso que deben ser calentadas y viceversa. La integración energética constituye una poderosa herramienta que encierra un procedimiento termodinámico bien estructurado para una optimización técnico-económica de cada red de intercambio de calor. La integración térmica de una planta industrial busca aprovechar cantidades de energía disponibles en algún punto del proceso para abastecerse, por ejemplo, el calor que se retira de las corrientes calientes, se lo puede utilizar para precalentar la alimentación del horno, y de esta manera requerir menor energía calórica.

La Integración Energética de procesos tiene su fundamento en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica y constituye una etapa fundamental en el diseño de una nueva planta o en la optimización de una ya existente, haciendo énfasis en el uso eficiente de la energía y la reducción de los efectos medioambientales.

En la actualidad se reportan en la literatura científica varios métodos de integración energética para lograr este objetivo, entre los que se destacan: métodos heurísticos,

métodos basados en el conocimiento, y métodos termodinámicos. Los métodos termodinámicos pueden ser clasificados en:

- Métodos basados en el análisis de la Primera Ley (Tecnología Pinch, Métodos basados en la Programación Matemática).
- Métodos basados en el análisis de la Segunda Ley (Análisis Exergético).
- Métodos basados en la combinación del análisis Económicos y la segunda ley (Análisis Exergoeconómico).

En la aplicación de estos métodos se hace primordial la selección de un proceso en el cual sea posible la integración de calor, es decir, en el cual existan corrientes energéticas que estén siendo desaprovechadas.

Los datos necesarios en el Análisis Pinch son los de las corrientes en el proceso que va a ser analizado, es decir las corrientes que necesitan ser calentadas o enfriadas. Los datos de estas corrientes que se necesitan son las temperaturas de entrada y salida y la capacidad de flujo de calor de la corriente (flujo másico por el calor específico de la corriente).

Las reglas básicas para diseñar el área de consumo mínimo de utilidades según el Análisis Pinch son:

- No se transfiere calor a través del punto de Pinch.
- No se usan utilidades frías sobre el punto de Pinch.
- No se usan utilidades calientes por debajo del punto de Pinch.

El análisis Pinch permite determinar:

- # Meta del mínimo costo de operación (mínima necesidad de servicios).
- # Meta del mínimo costo de inversión (mínimo número de intercambiadores y mínima superficie total de intercambio, sin diseñar el sistema, en forma simple y rápida).

La Tecnología Pinch proporciona herramientas para acometer el diseño de una red de intercambio de calor, obteniendo un diseño preliminar de la red con los valores mínimos para varios parámetros del proceso como son: las utilidades mínimas y nivel de dichas utilidades (proporcionando los costos de operación), y el número mínimo de unidades de intercambio de calor, así como el área de dichas unidades (proporcionando una estimación de los costos de inversión).

Las metas de diseño se obtienen sin realizar un diseño detallado de la topología de la red de intercambio, o de los intercambiadores que la forman, sino únicamente a partir de los datos térmicos de las corrientes que constituyen el proceso. Por este motivo, la tecnología Pinch es muy útil para realizar una estimación rápida del rendimiento de una alternativa de diseño; para obtener información que permita proponer modificaciones y mejoras en esta alternativa de diseño; o para comparar varias alternativas sin tener que completar el diseño de cada una de ellas.

La Tecnología Pinch, por tanto, provee una metodología consistente para ahorrar energía, desde el balance de materiales y energía básico hasta el sistema de utilidades completo de un sitio. (Linnhoff, 1993)

La metodología del Análisis Pinch, ampliamente difundida, se ha venido aplicando a redes de intercambiadores de calor en diferentes procesos industriales. Esta tecnología ha producido mejoras significativas en la eficiencia de la energía y del capital en diferentes industrias a nivel mundial. Ha sido sustancialmente aplicado en procesos petroquímicos, en industrias de química básica, de alimentos y de papel, (Cheresources, 2004)

En el presente trabajo se realiza un estudio energético de cuatro corrientes de proceso comparando el análisis Pinch siguiendo a Linhoff (1993) y utilizando la herramienta de Aspen Energy Analyzer (AEA) de Aspen HYSYS. La integración energética en el AEA es diseñada para analizar y mejorar la performance de las redes de intercambiadores de calor. AEA se enfoca en analizar las redes tanto desde el punto de vista operativo como de diseño.

## **2. Descripción del proceso**

El objeto del análisis son las corrientes, caracterizadas por sus temperaturas de origen y destino y su flujo de entalpía. Los instrumentos básicos de integración son los intercambiadores de calor entre las corrientes, caracterizados por una temperatura mínima de aproximación. Los datos se presentan en forma de una tabla del problema donde se consignan las corrientes, sus temperaturas inicial y final y otros datos. En Tabla 1 se presenta las temperaturas de entrada y de salida ( $T_{\text{entrada}}$  y  $T_{\text{salida}}$ ) y el flujo

entálpico específico (CP) de cada corriente de proceso al que se realiza el estudio energético. Las corrientes calientes, son aquellas que requieren ser enfriadas, están presentadas en color rojo y las corrientes frías, son las que necesitan ser calentadas, están presentadas en color azul.

**Tabla 1.** Corrientes del proceso

Nombre corriente	T <sub>entrada</sub> (°C)	T <sub>salida</sub> (°C)	CP (W/°C)
Corriente 1	250	120	1000
Corriente 2	200	100	4000
Corriente 3	90	150	3000
Corriente 4	130	190	6000

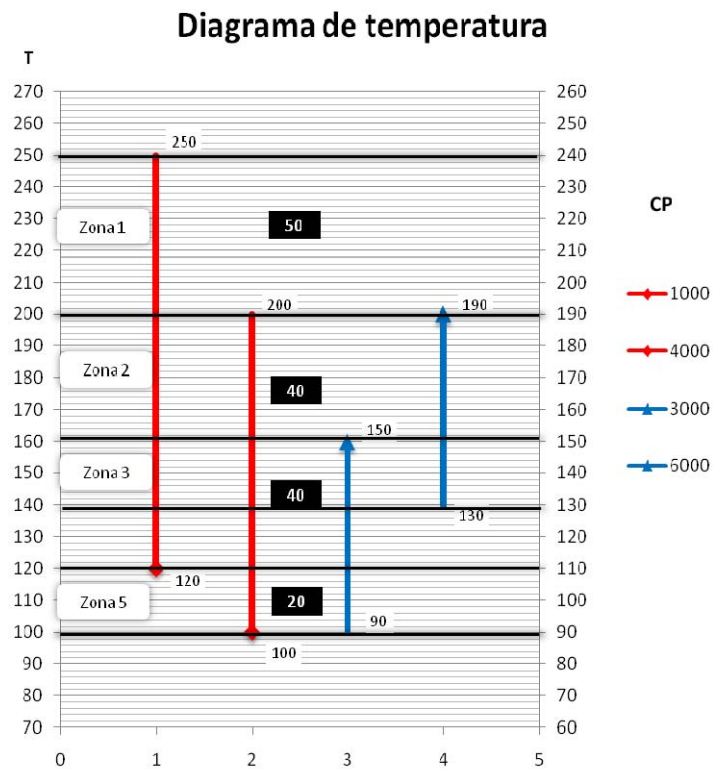
A partir de esta tabla se les pide a los alumnos realizar el diagrama de temperatura, el diagrama de bloques, determinar el punto Pinch, determine los requerimientos de los servicios auxiliares y construir las curvas compuestas. Cada alumno deberá adoptar un valor de  $\Delta T_{min}$  para comparar los resultados. Para el propósito de este trabajo solo se reportara los resultados de  $\Delta T_{min} = 10\text{ °C}$  y  $\Delta T = 36\text{ °C}$ .

### 3. Metodologías

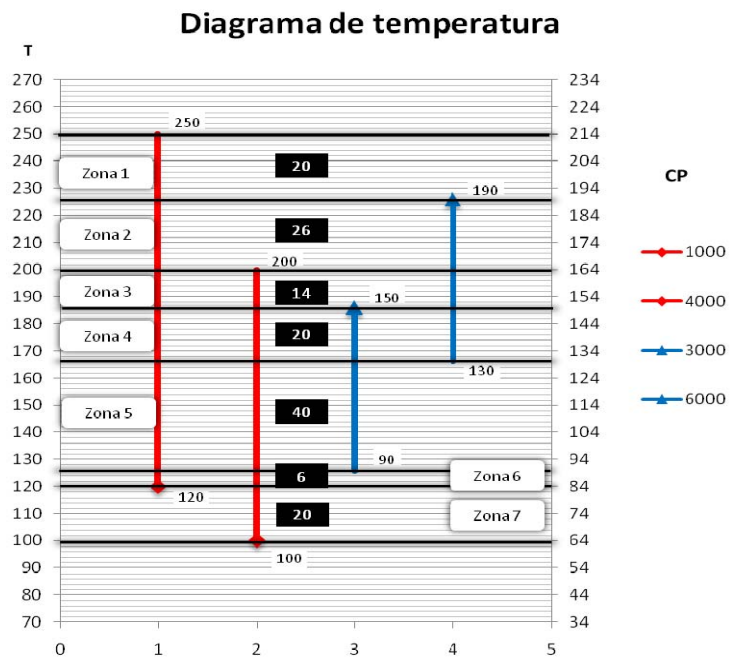
#### 3.1. Análisis Pinch

Las corrientes se pueden representar en un diagrama de temperatura donde se definen dos escalas de temperatura, una para las corrientes calientes y otra para las frías, desplazadas entre sí por el valor de  $\Delta T_{min}$ . Sobre esas escalas se representan las corrientes por rectas determinadas por sus temperaturas iniciales y finales. Los puntos extremos de esas rectas definen intervalos de temperaturas en los que el intercambio es posible, donde se cumple el  $\Delta T_{min}$ , que es la fuerza impulsora que requiere los intercambios. Para que el intercambio sea posible se estableció que el  $\Delta T_{min}$  es de  $10\text{ °C}$ . Siguiendo la metodología presentada en Domínguez (2011).

Con los datos de la corrientes se construyen el diagrama de Temperatura para dos casos: considerando un  $\Delta T_{min} = 10\text{ °C}$  y un  $\Delta T = 36\text{ °C}$ , los que se presentaran en Figura 1 y Figura 2.

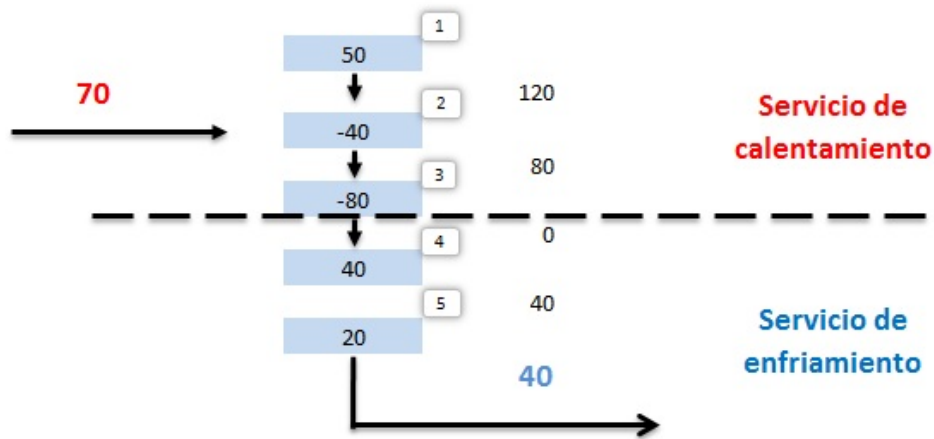


**Fig. 1.** Diagrama de Temperatura para un  $\Delta T_{min}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$

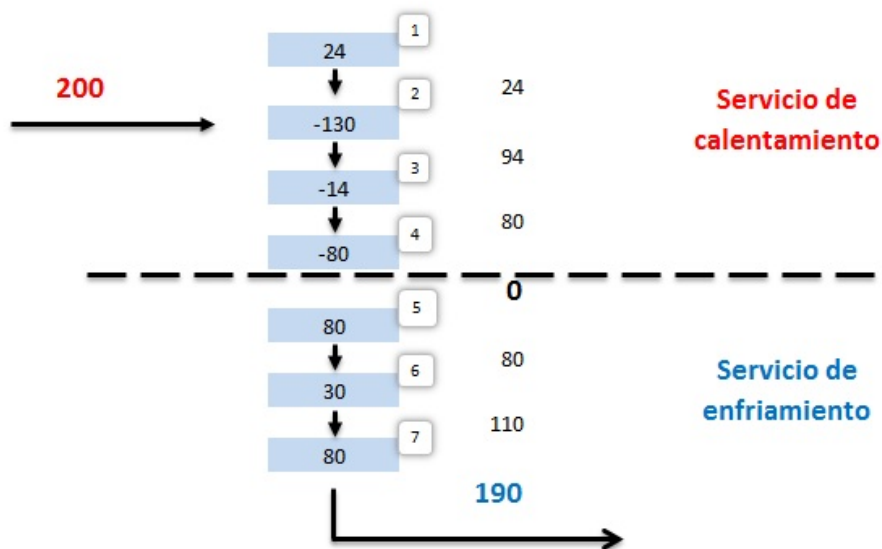


**Fig. 2.** Diagrama de Temperatura para un  $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$

En esta figura se pueden identificar las diferentes zonas del sistema, lo que permite generar el diagrama de bloque para cada caso, lo que se presenta en Figuras 3 y 4. Cada bloque representa cada zona con su respectivo requerimiento energético.



**Fig. 3.** Diagrama de bloque para un  $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



**Fig. 4.** Diagrama de bloque para un  $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$

De ambas figuras es importante recalcar que a mayor  $\Delta T$  menor integración energética y por lo tanto mayor utilización de servicios.

La temperatura Pinch, es la temperatura para la cual, en el diagrama de cascada, no se transfiere energía desde un intervalo de temperatura (bloque) superior al intervalo siguiente inferior. El punto Pinch divide al sistema en dos, arriba del Pinch donde solo

se usa servicio de calentamiento y debajo del Pinch donde se utiliza solamente servicio de enfriamiento.

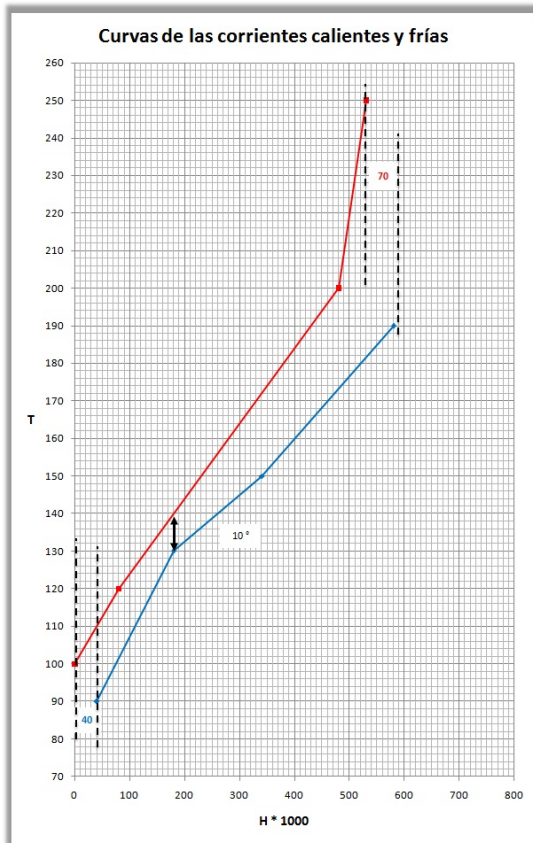
El bloque 5 de la Figura 3 y el bloque 7 de la Figura 4, presentan exceso de energía, los cuales no pueden ser removidos por corrientes de proceso disponibles, por lo que se necesita una cantidad de agua de enfriamiento (utility), equivalente, tal que remueva este remanente.

Los datos del proceso se representan como un conjunto de flujos de energía, o corrientes, como una función de la carga de calor frente a la temperatura. Estos datos se combinan para todas las corrientes del proceso para dar curvas compuestas, uno para todas las corrientes calientes (liberación de calor) y uno para todos los flujos de frío (que requieren calor). Estas dos curvas compuestas se pueden manejar de la misma forma para determinar el punto Pinch, y calcular con base en éste el gasto de operación (servicios) y el costo de capital (número de intercambiadores implicado y área de transferencia de energía cada intercambiador).

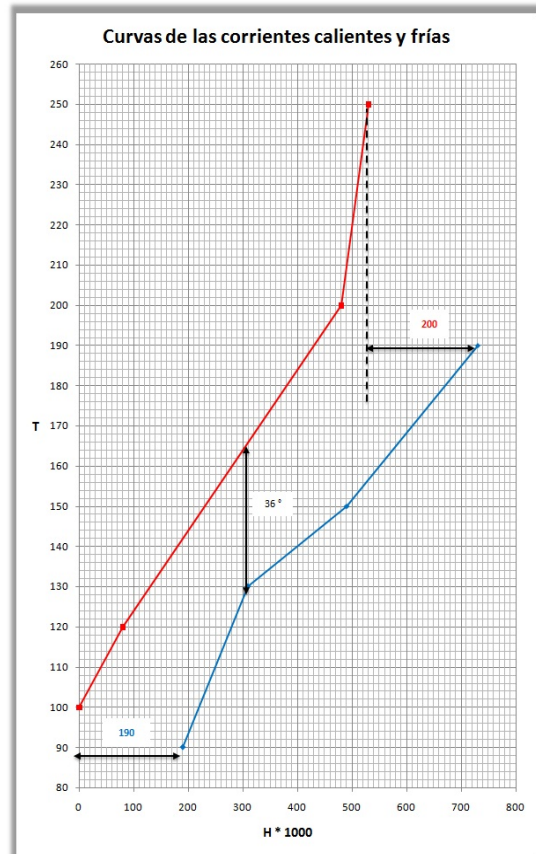
El punto de mayor acercamiento entre las curvas compuestas caliente y fría es el punto crítico de separación (o también denominado pellizco) con una temperatura Pinch de la corriente caliente y una temperatura Pinch de la corriente fría. Aquí es donde el diseño es más limitada. Por lo tanto, mediante la búsqueda de este punto de partida y el diseño allí, los objetivos de energía se puede lograr utilizando intercambiadores de calor para recuperar el calor entre corrientes caliente y fría en dos sistemas separados, uno para temperaturas superiores a las temperaturas de arrastre y uno para temperaturas inferiores a las temperaturas de pellizco. La eliminación de los intercambiadores de adaptación alternativa hace que el proceso alcance su objetivo de energía.

En las Figuras 5 y 6 se observa en un diagrama de Temperatura vs Entalpía las curvas compuestas con los respectivas servicios auxiliares necesarios del proceso y se identifica el punto Pinch para cada caso. Para un  $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  el punto Pinch es de  $130^{\circ}\text{C} - 140^{\circ}\text{C}$  y para un  $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$  el punto Pinch es de  $130^{\circ}\text{C} - 166^{\circ}\text{C}$ .





**Fig. 5.** Curvas compuestas ( $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



**Fig. 6.** Curvas compuestas ( $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Para representar el diseño de la red de intercambio, se utiliza el *diagrama de grilla*, donde las corrientes se representan por líneas horizontales.

- La temperatura decrece hacia la derecha, sin escala.
- Se identifican las corrientes y se indican sus datos de temperatura y CP.

El Pinch se representa por una línea vertical que divide el conjunto de corrientes, los intercambiadores se representan por pares de círculos sobre las corrientes. Se indica su identificación y sus datos de temperatura y entalpía.

En las siguientes Figura 7 y 8 se presenta los diagramas de grilla del sistema de intercambiadores de calor para cada caso.

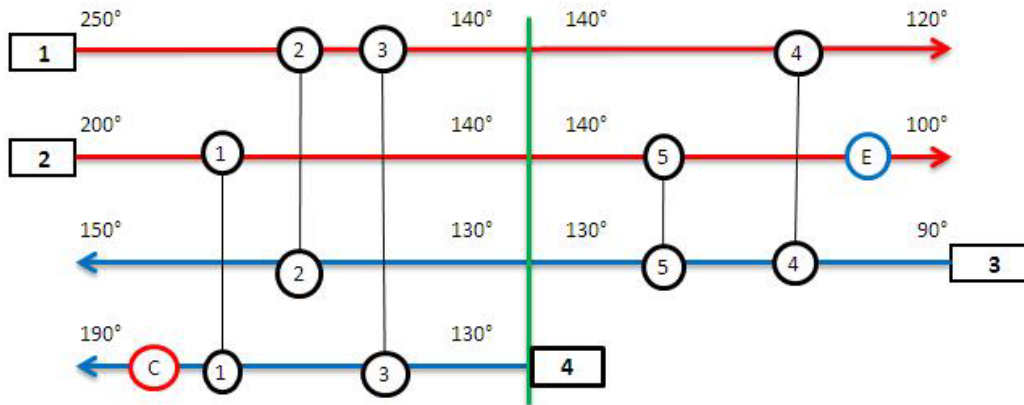


Fig. 7. Diagrama de grilla del sistema de intercambiadores de calor. ( $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ )

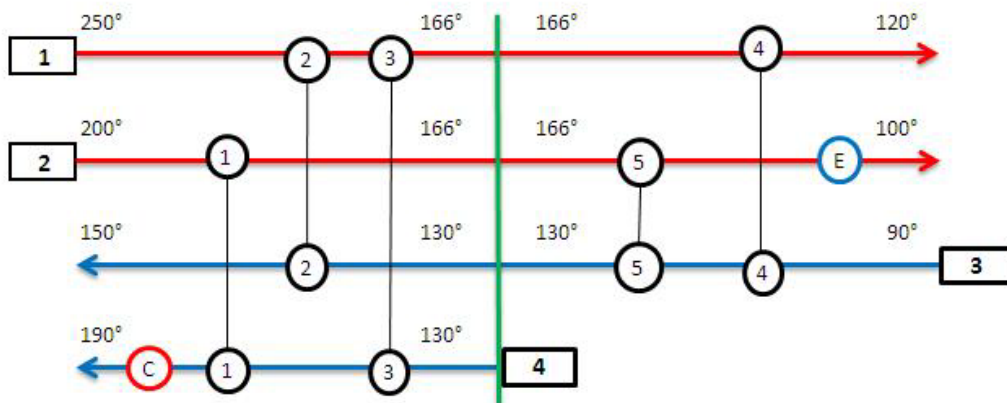


Fig. 8. Diagrama de grilla del sistema de intercambiadores de calor. ( $\Delta T = 36^\circ\text{C}$ )

### 3.2 Simulación en Aspen Energy Analyzer (AEA)

Los datos de las corrientes del proceso (Process Streams) y de los servicios (Utility Streams) son ingresadas en las solapas correspondientes, al generar un Project de Integración Energética (HI Project) en el software AEA, Figura 9.

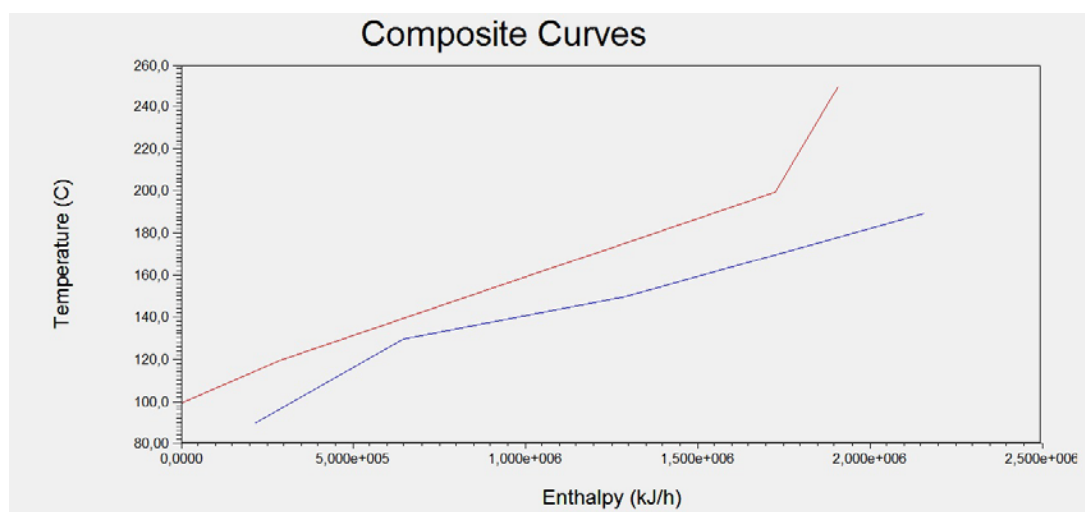
Captura de pantalla del software Aspen Energy Analyzer (AEA) mostrando la entrada de datos para un proyecto de Integración Energética (HI Project). La tabla de datos de las corrientes del proceso es la siguiente:

Name	Inlet T [C]	Outlet T [C]	MCp [kJ/C-h]	Enthalpy [kJ/h]	Segm.	HTC [kJ/h-m2-C]	Flowrate [kg/h]	Effective Cp [kJ/kg-C]	DT Cont. [C]
Corriente 1	250.0	120.0	3600	4.680e+005		720.0	...	...	Global
Corriente 2	200.0	100.0	1.440e+004	1.440e+006		720.0	...	...	Global
Corriente 3	90.0	150.0	1.080e+004	6.480e+005		720.0	...	...	Global
Corriente 4	130.0	190.0	2.160e+004	1.296e+006		720.0	...	...	Global
"New"									

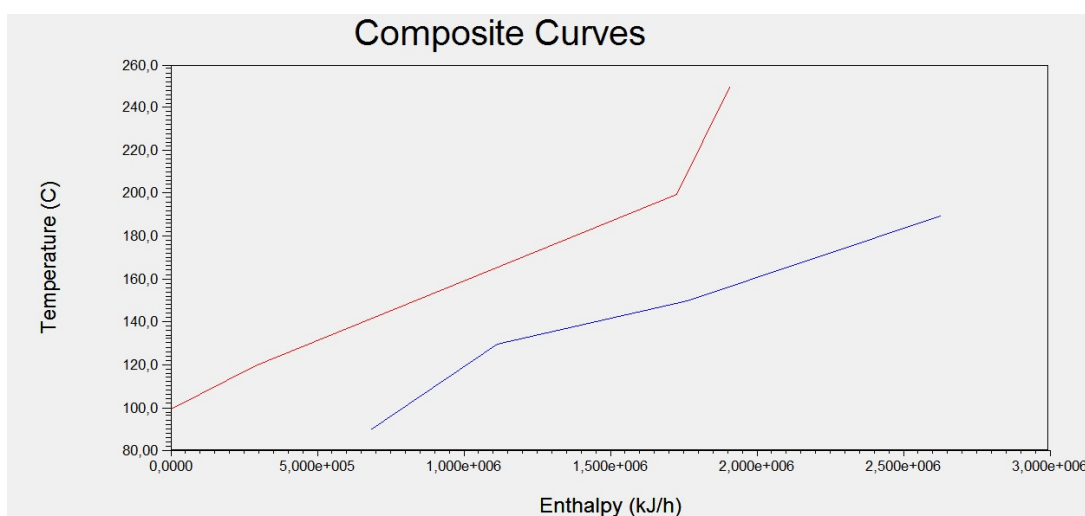
El software muestra también pestañas para "Process Streams", "Utility Streams", "Economics", "Options" y "Notes", y botones para "Set Up Operations", "Convert to HI Project" y "Forbidden Matches".

Fig. 9. Ingreso de datos en el Aspen Energy Analyzer (AEA)

En Figura 10 y 11 se presentan las curvas compuestas para cada caso reportado por AEA.

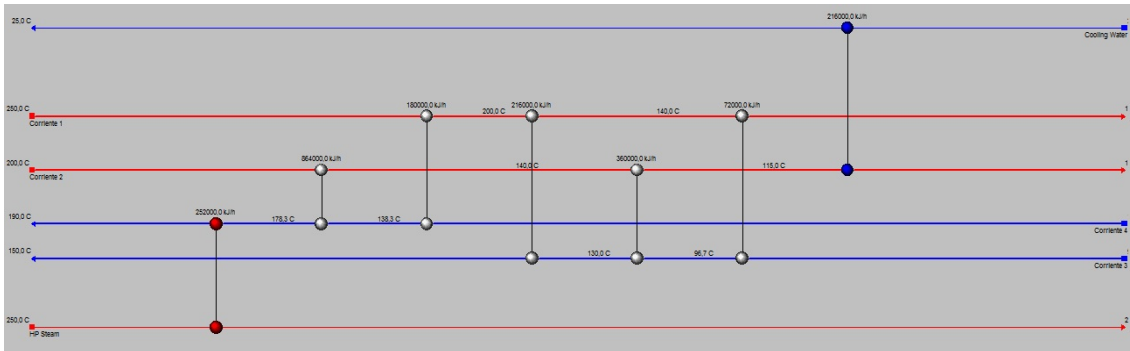


**Fig. 10.** Curvas compuestas reportado por AEA ( $\Delta T=10$  °C)

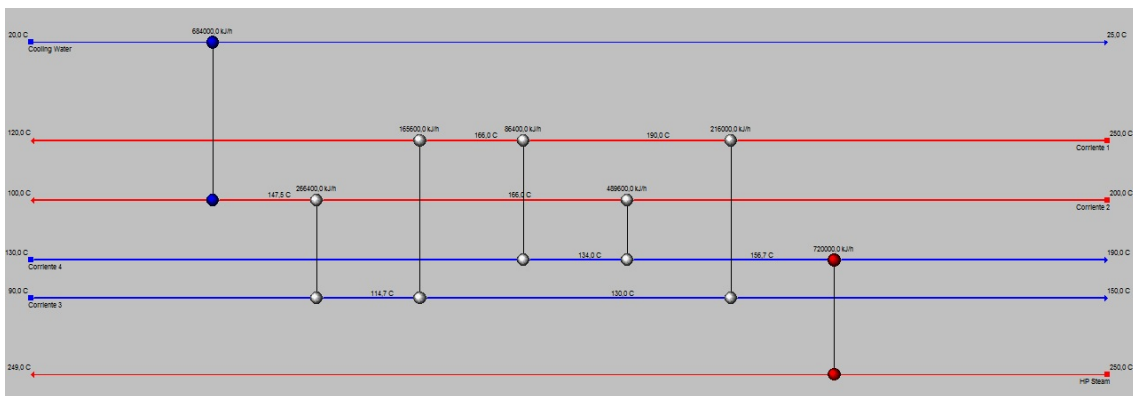


**Fig. 11.** Curvas compuestas reportado por AEA ( $\Delta T=36$  °C)

En Figura 12 y 13 se presentan los diagramas de grilla del sistema de intercambiadores de calor que son adicionados en la grilla provista por AEA, mediante el cálculo efectuado al aplicar el método y obtener las grillas de Figuras 7 y 8, y de esta manera se verifica la satisfacción de las corrientes frías y calientes.

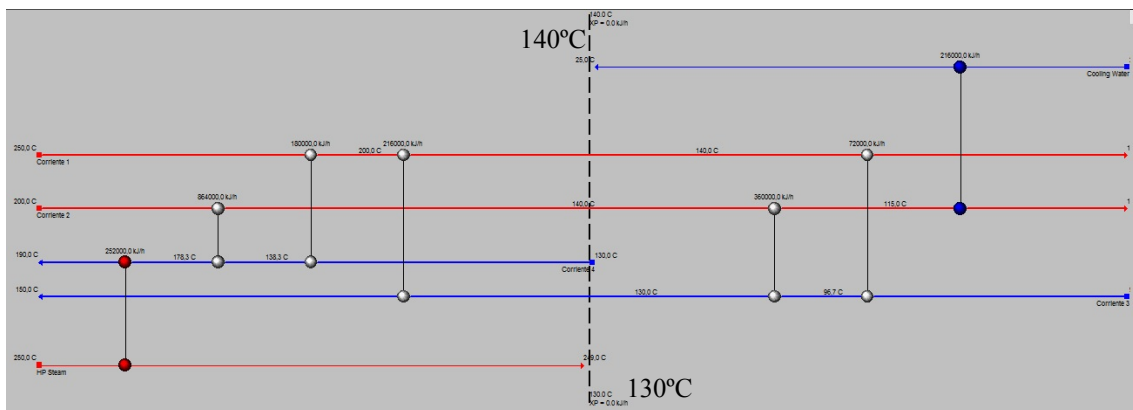


**Fig. 12.** Diagrama de grilla del sistema de intercambiadores de calor. ( $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

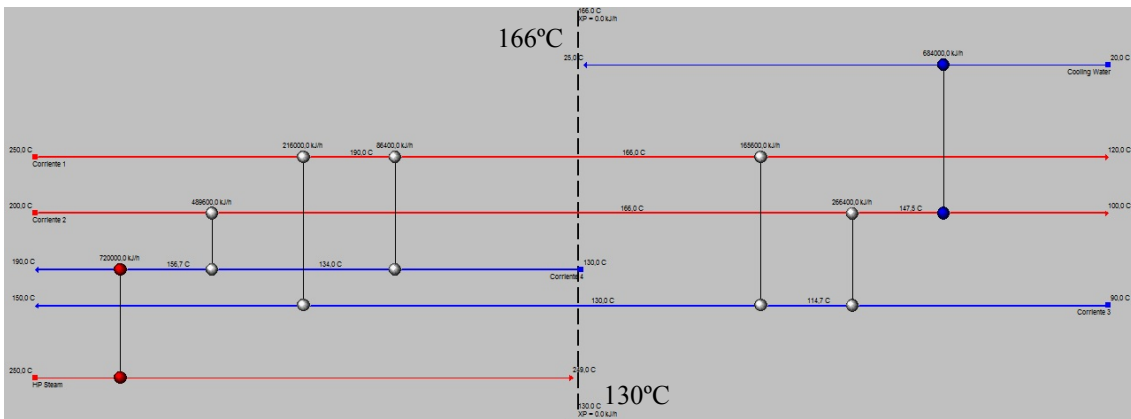


**Fig. 13.** Diagrama de grilla del sistema de intercambiadores de calor. ( $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Aplicando PINCH en AEA, se obtienen los siguientes resultados para cada caso:

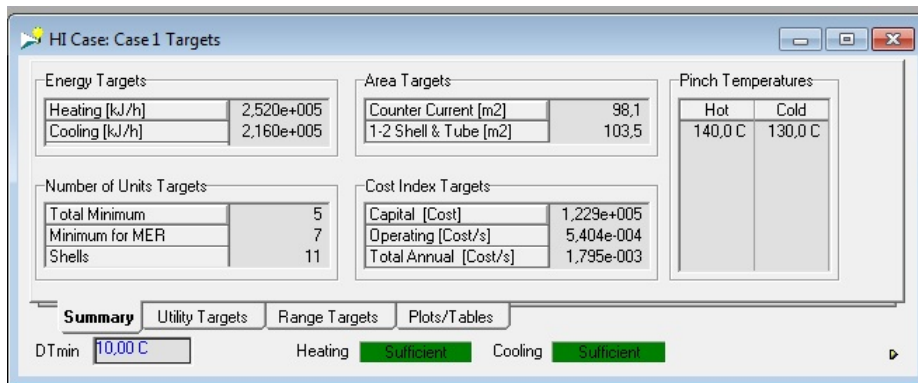


**Fig. 14.** Diag. de grilla del sist. de interc. de calor con línea Pinch. ( $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

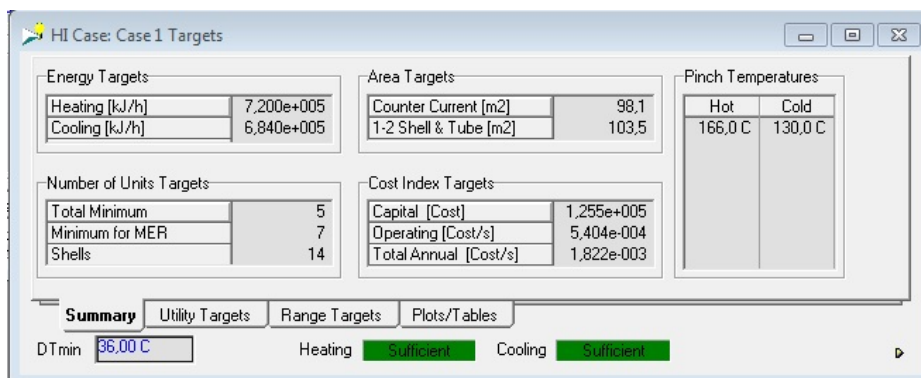


**Fig. 15.** Diag. de grilla del sist. de interc. de calor con línea Pinch. ( $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Como se puede observar los valores del punto pinch coinciden con los calculados previamente en el punto 3.1., en las figuras 16 y 17 se presentan los reportes de AEA para cada caso.



**Fig. 16.** Targets de AEA ( $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



**Fig. 17.** Targets de AEA ( $\Delta T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

#### 4. Resultados Académicos

Este trabajo nos permitió aplicar la metodología del análisis Pinch, y de esta manera hacer uso de la herramienta provista por HYSYS, ya que en un software de simulación es necesario saber que metodología se usa para que la simulación sea exitosa. La etapa de simulación se debe considerar como una más dentro del ciclo de actividades secuenciales para el diseño del proceso, y no como la herramienta para el diseño.

*No es lo mismo ser un excelente operador de un simulador comercial (conocer todas las opciones disponibles, cómo imprimir resultados, cómo ingresar en forma rápida los datos, etc.) que conocer cómo programar módulos para el mismo, qué métodos fisicoquímicos utilizar para cada problema, cuándo se podrían esperar múltiples estados estacionarios en la simulación de torres de destilación, etc.; y para esto, resulta indispensable una adecuada formación teórica. (Scenna, 1999 )*

El trabajo práctico realizado con los estudiantes es evaluado con coloquios y evaluación por tema donde se observa que en porcentaje los alumnos tienen mejor rendimiento versus las mismas evaluaciones en la enseñanza clásica sin utilizar el software. Consideramos que los alumnos presentan una mayor predisposición a la utilización del simulador, presentando en definitiva una mayor comprensión del tema.

#### 5. Conclusión

Este estudio ha permitido ampliar los conocimientos acerca de los fundamentos de la Integración Energética, así como de las metodologías más usadas, proporcionando las herramientas teóricas necesarias para darle solución a cualquier problema que se pueda presentar, concluyendo que:

La Integración Energética constituye un paso fundamental en la síntesis y diseño de una planta, ya que puede ser considerada como una herramienta para mejorar la eficiencia económica de cualquier proceso químico.

El método termodinámico de Análisis Pinch es una herramienta simple para la integración y optimización energética de cualquier proceso, su aplicación requiere sólo del conocimiento de algunas variables termodinámicas.

## Referencias

- ASPEN (2011). Aspen Energy Analyzer: Reference Guide. Aspen Technology, Inc., USA.
- ASPEN (2011). Aspen Energy Analyzer: Tutorial Guide. Aspen Technology, Inc., USA.
- Cheresources (2004). "Pinch Technology: Basics for Beginners". (2004). [on line] [citado el 29 de enero del 2005]. Disponible en Internet: <http://www.cheresources.com>
- Domínguez Orlando J. (2011). Diseño de Redes de Intercambio de Energía en Diseño de Procesos. Actas VII Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca, Catamarca. Argentina. Octubre de 2011 en la ISSN: 1853-7871.
- Kemp, I.C. (2007) Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for Efficient Use of Energy. Elsevier. Burlington, USA.
- Linhoff, B. (1993). User Guide on Process Integration for Efficient Use of Energy. The Institution of Chemical Engineers, London, England.
- Scenna, N.J. (1999). Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos. ISBN: 950-42-0022-2 - ©.
- Seider W.D., Seader J.D., Lewin D.R (1999) Product and Process Design Principles Synthesis, Analysis, and Evaluation, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Turton R., Bailie R.C., Whiting W.B., Shaeiwitz J.A. (1998) Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, Prentice Hall, PTR.