

EXPERIENCIA EN LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA PAPELERA, UTILIZANDO EL ASPEN PLUS

Yenlys Catá Salgado*, Erenio González Suárez*, Meilyn González Cortes*,
Gabriela Corsano**

*Facultad Química-Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, **INGAR Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Argentina

El presente trabajo se realizó con el objetivo de brindarles a los ingenieros, una herramienta más fácil para el análisis global de los procesos, una vez integrados utilizando un único software, el Aspen Plus. Se analizan las posibilidades de integración de calor y masa en la Papela Damuji, ubicada en la provincia de Cienfuegos, utilizando herramientas de integración de procesos modernas.

Se emplearon métodos de síntesis de procesos, utilización de técnicas de optimización para obtener las alternativas más viables desde el punto de vista técnico y ambiental, para un posterior análisis económico a través de métodos dinámicos.

La estrategia desarrollada permitió detectar las principales deficiencias en el proceso y su repercusión sobre el medio ambiente. Se parte de aplicar el análisis Pinch energético, lo cual conlleva a aumentar la eficiencia energética y disminuir la utilización de agua fresca, lo que se traduce en la minimización de residuales a tratar al final del proceso. La estrategia puede ser aplicada a otras plantas con vista a obtener tecnologías más limpias. Se concluye que utilizando las ventajas que ofrece el simulador Aspen Plus se puede llevar a cabo la integración material y energética analizando el proceso de estudio de una forma más integradora.

Palabras clave: Aspen Plus, integración de procesos, método de pellizco.

The present work was carried out with the objective of offering to the engineers, an easier tool for the global analysis of the processes, once integrated using only the software, Aspen Plus. The possibilities of integration of heat and mass are analyzed in Paper Mill Damuji, using modern tools of processes integration.

Were used methods of processes synthesis, use of optimization technical to obtain the viable alternatives from the point of view technical and environmental, for an economic later analysis through dynamic methods.

The developed strategy allowed to detect the main deficiencies in the process and its repercussion on the environment. Begin to apply the analysis energy Pinch that which carry to increase the energy efficiency and to diminish the use of fresh water, what is translated in the minimization of residual to treat to the final of the process. The strategy can be applied to other plants with view to obtain cleaner technologies.

This work conclude that using the advantages offers the simulator Aspen Plus can carry out the material and energetic integration analyzing the process of study in a way more integrative.

Key words: Aspen Plus, processes integration, method pinch.

Introducción

Las crisis energéticas de los años 70 despertaron la preocupación acerca de la duración de los recursos energéticos que abastecían al mundo, poniendo interrogantes sobre cuál podría ser el futuro de la sociedad humana, las fuentes energéticas que la sostendrían y las perspectivas de crecimiento económico.

La integración de procesos se ha convertido en una herramienta muy útil para disminuir los

consumos de energía, los vertimientos de residuales contaminantes al medio ambiente en los procesos. Para ello se usan avanzadas herramientas analíticas para identificar las posibilidades de reducir el consumo energético y de residuales en facilidades industriales y alcanzar significativos ahorros en costos y utilidades.

Las herramientas de análisis de procesos desarrolladas con la integración de procesos, son técnicas de diseño genéricas, sistemáticas y de uso sencillo, tienen como base el tratamiento de

programación matemática, se trabaja con funciones objetivos, modelos matemáticos y el tratamiento termodinámico en el cual se encuentra el análisis de pellizco, específico para los estudios energéticos.

Encontrar una solución que minimice la agresividad de los residuales que se generan en el proceso de producción de papel, ligada a una mejor eficiencia energética dentro del mismo, ha sido siempre una prioridad de los especialistas en este sector y en particular en la industria de papel para ondular donde no se justifica, por los bajos precios del producto.

En estudios realizados en nuestro país en la industria del papel, hasta el momento, se han utilizado varias herramientas para llevar a cabo estos objetivos. La aplicación de las mismas han tenido consigo varias limitantes, entre ellas: que se ha utilizado la aplicación manual del método de análisis de pellizco, el uso de programas académicos y el uso de software con versiones soportadas en sistema MSDOS para lograr los objetivos propuestos en el análisis energético dentro de esta industria.

Por lo ante expuesto nuestro objetivo general es: Utilizar el software Aspen Plus en el análisis de la integración energética en la papelería Damují logrando un análisis más detallado de las modificaciones propuestas dentro de la empresa.

Fundamentación teórica

Integración de energía en fábricas de papel

En general, la reducción del consumo de agua a través de su reciclo también ahorra energía en la industria de la pulpa y el papel, por lo cual es imprescindible comprender bien la interacción entre estos elementos. Sin embargo, la acción para resolver estos problemas requiere un análisis global y sistemático del consumo de agua y energía, tal como han sido aplicados por CEDRL¹ /1, 2/. Estos proyectos condujeron a un ahorro de 37 t/h de vapor, una reducción en la descarga de efluentes de 6 000 m³/d, una reducción en 3 °C la temperatura de la descarga de los mismos y un ahorro de 6 000 000 \$ USD de los costos anuales. El procedimiento seguido en esta fábrica consistió en un análisis sistemático y global

de los sistemas de energía para identificar las oportunidades de recuperación del calor. Para mejorar la integración del calor se utilizó el análisis Pliegue (*Pinch*). Esto se realizó en paralelo con el análisis de las posibilidades de mejor uso de agua fresca y reciclado de aguas blancas dentro de la fábrica, las cuales tienen un impacto en el balance de energía. Se identificaron un total de 19 proyectos potenciales para el ahorro de la energía, /3/ En otra fábrica de papel de Minnesota /4, 5/ se realizó un estudio integrado de análisis de las posibilidades de reducción del calor y conservación del agua. En este caso se implementaron cuatro proyectos y dos modificaciones del proceso fueron ejecutadas para extraer 45,6 MMBtu/hr de los efluentes.

Otro ejemplo de estudios de este tipo aplicados en fábricas de papel es el realizado en una fábrica de Georgia, /6/, donde se identificaron 31 proyectos de ahorro energético. De estos, siete fueron seleccionados como proyectos para ejecutar en un período corto, resultando en un ahorro anual estimado de 9,5 millones \$ USD.

Los estudios de integración de procesos en fábricas de este tipo han demostrado oportunidades para reducir la demanda de vapor en un rango de 5 -20 % en procesos eficientes y reducciones de 10 -40 % en procesos menos eficientes. Las modificaciones pueden implementarse en muchos casos con períodos de pago de menos de treinta meses.

Desde la introducción comercial de la tecnología Pinch en 1982, /7/ ésta ha alcanzado un récord de éxitos en el diseño y mejoramiento de procesos químicos entre los que se encuentra la industria de la pulpa y el papel. En la literatura aparecen resultados que lo demuestran, como la reducción de costos energéticos de 15-40 %, capacidad de solucionar puntos críticos de 5 -15 %, reducción de costos de capital de 5 -10 % para nuevos diseños, y mejoras en la operabilidad y flexibilidad del proceso. /8/

Koufos D., /9/ describe la tecnología Pinch, como una herramienta práctica para el manejo eficiente de la energía en la industria de la pulpa y el papel, combinando el análisis Pinch térmico y el análisis Pinch para la reducción del consumo de agua. En su trabajo se aprecian buenos resultados en el ahorro de energía.

Importancia de simuladores en la Industria Química. Uso en la integración de procesos

La industria química se diferencia de otras industrias fundamentalmente porque sus procesos son de estructura compleja, conformada por muchas etapas cada una de las cuales contiene varios componentes. Esto hace que las ecuaciones que describen las relaciones entre las variables de importancia en el proceso puedan ser desde muy simples hasta muy complejas. Por otra parte, en general se trabajan grandes flujos y cuando estos tienen un alto valor económico cualquier pequeño cambio en las características del diseño o la operación puede tener una importancia considerable. Otra característica es que en ocasiones las propiedades de los componentes que se procesan no son perfectamente conocidas /10/.

Antes de que pudieran desarrollarse programas generales para la simulación de procesos en computador fue necesario construir programas específicos para cada problema de procesos a tratar. En la actualidad gran parte del trabajo preciso para desarrollar una simulación puede aliviarse con la ayuda de los lenguajes de simulación que permiten “escribir” el problema para que el ordenador pueda elaborarlo.

En la década de los setenta los simuladores eran propios de un proceso, ejemplo de ello se encontraban los siguientes; GPSS II (desarrollado por IBM para simular problemas de espera complejos), GASP (desarrollo con el fin de simular situaciones como operación de un horno Siemens-Martin), CHEVRON (simulación de balances de masa y energía). /11/

A partir de allí se ha generado una sucesión de acontecimientos que permiten en la actualidad la existencia de varios y eficientes simuladores comerciales como por ejemplo SPEED UP, ASPEN PLUS, PRO II, HYSYM, HYSYS, CHEMCAD, y otros. /12/

Pero con la utilización de softwares el ingeniero debe tener cuidado ya que se puede demostrar con muchos casos que, si en un simulador de procesos, por muy sofisticado que este sea, se introduce información errónea (datos inadecuados de las corrientes de alimentación, elección

errónea de la termodinámica, elección errónea de las correlaciones para estimar las propiedades o una mala elección del proceso); puede obtenerse una solución que el programa puede dar como buena, pero en realidad conduce a resultados malos que pueden tener graves consecuencias, según sea la importancia del proyecto. Es por eso que no debemos fiarnos de los resultados que nos ofrecen los simuladores y siempre hay que buscar vías para comprobar los mismos /13/.

Para llevar a cabo la integración de procesos es necesaria la utilización de software especializado /14, 15 16/. Utilizaron varios software para llevar a cabo el objetivo propuesto en los casos de estudio analizados, con respecto a la Integración de Procesos, sin embargo se pueden utilizar software que analice en conjunto la Integración material y energética y que a la vez contemple el aspecto económico.

En la industria química existen grandes empresas industriales que se han dedicado al desarrollo de simuladores especiales para el análisis de problemas de gran envergadura. Su puesta a punto ha requerido de varios hombres, años y miles de dólares; sin embargo con frecuencia se amortizan por sí mismo con gran rapidez al facilitar considerablemente la toma de decisiones.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

En este epígrafe se abordarán los pasos a seguir para utilizar el Aspen Plus en la integración de procesos. Entre los paquetes que contiene el mismo se encuentra el Aspen Pinch para la integración energética, de allí que nos centraremos en la estrategia a seguir para su utilización en un caso de síntesis de proceso.

Desarrollo de la estrategia de integración de procesos utilizando el Aspen Plus

Después de realizar un estudio detallado de varios trabajos /17, 14/ en los que se aplicaban unas y otras herramientas a diferentes casos de estudios, se comprobó que dentro de las metodologías de diseño de procesos integrados existen metodologías que se aplican al final de la

planta y otras en su interior, pero son estas últimas, las aplicadas en el interior de la planta, la que mayor importancia atendiendo a su impacto y aceptación, han cobrado para las tareas de reducción de residuales y la conservación de la energía. Atiendo a ello hemos planteado una estrategia general en siete pasos, que incluye los aspectos a tener en cuenta cuando se lleva a cabo la integración de procesos en una planta, y posteriormente se explicará con detalles la utilización del Aspen Plus en los pasos más importantes de la misma. Los pasos a tener en cuenta para llevar a cabo esta estrategia general son:

1. Plantear con claridad el problema a resolver.
2. Identificar los corrientes intermedias y residuales que pueden ser utilizadas dentro de la misma planta o intercambiada a otra.
3. Analizar las características energéticas de la fábrica, priorizando la etapa de generación de vapor y energía.
4. Reunir los datos requeridos para la aplicación de las herramientas de integración de procesos, necesarios para resolver el problema específico.
5. Estudio de Integración de Procesos para reducir el consumo energético en la planta como fase inicial.
6. Estudio de integración de procesos para la minimización de residuales en la planta.
7. Aplicar la metodología de diseño para la minimización del consumo energético y reducción de residuales a partir de las mejores alternativas económicas.

Es valido aclarar que no se es categórico cuando planteamos que se lleve a cabo la integración energética antes que la material. La prioridad esta dada por el objetivo fundamental del caso de estudio donde se lleve a cabo la investigación.

A partir de ahora se hará hincapié en el paso cinco ya que nuestro objetivo fundamental es llevar a cabo la integración energética con el uso del Aspen Plus. Para ello se ha propuesto una estrategia de trabajo que ayudará a los usuarios a aplicar esta herramienta de una forma más fácil.

Paso cinco: *Estudio de integración de procesos para reducir el consumo energético en la planta como fase inicial*; como ya se menciono anteriormente, se utiliza dentro del Aspen Plus un paquete llamado Aspen Pinch, el cual permite realizar el análisis energético de los procesos en estudio. A continuación se presenta una guía de pasos con el objetivo de facilitar el estudio de casos, con el uso de esta herramienta:

1. Crear un nuevo proyecto.
2. Plantear el problema a resolver.
3. Obtención de las Curvas compuestas.
4. Obtención de las Curvas compuestas grandes.
5. Obtención del diseño de la red de intercambio de calor.
6. Análisis de los datos económicos.

Análisis energético en la papelera Damují

En la papelera existen pérdidas en las tomas de vapor de los cilindros secadores de la máquina de papel y teniendo en cuenta que en esta sección es donde se consume la mayor cantidad de vapor estas pérdidas pueden ser significativas en el análisis económico global de la fábrica.

En la planta de pulpa: la energía en el flasheo cuando ocurre el soplado: en la sección de soplado de la planta de la pulpa se produce un flasheo a presión atmosférica en el cual emanan vapores de alto contenido energético los cuales son expulsados a la atmósfera perdiéndose de esta forma el valor calórico de este flujo.

La energía en el licor negro: el licor negro es un efluente de la planta de pulpa, a su salida del digestor tiene una alta temperatura y un alto contenido energético, el mismo tiene un alto poder contaminante y es arrojado a las aguas del río Damují sin tratamiento previo.

Máquina de papel: pérdidas en las tomas de vapor de los cilindros secadores, este aspecto incide negativamente en la eficiencia energética de la planta porque como se ha planteado anteriormente es aquí donde se consume la mayor cantidad de

vapor además, por esta razón actualmente se encuentran fuera de servicio varios de los cilindros secadores razón por la cual se ve disminuida la capacidad de producción de la planta.

Planta de fuerza: se tiene la purga continua que es una corriente de vapor que se pierde continuamente en la planta de generación de vapor teniendo un gran valor calórico y una alta temperatura, esta corriente se puede utilizar en los calentadores, en los cuales se utiliza vapor con las mismas características que la purga continua para el calentamiento del combustible y el agua de alimentación a la caldera y deaeradores de la planta de tratamiento de agua.

Resultados y su discusión

En nuestro trabajo se toma como referencia el análisis realizado por /14/, en la papelera Damují ubicada en la provincia de Cienfuegos, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas en los resultados obtenidos al utilizar esta nueva herramienta.

Análisis energético en la planta de fuerza. Aplicación de la tecnología Pinch

En este caso se aplicará la tecnología Pinch sólo en la planta de fuerza, ya que es aquí donde existen las mayores potencialidades para el ahorro de vapor de forma tal que pueda ser destinado al resto del proceso aumentando la eficiencia energética en el mismo. Además partiendo que existe una distancia considerable entre la planta de generación de vapor y las otras plantas (planta de pulpa y papel); no es rentable el intercambio de corrientes entre plantas, ya que estas pueden llegar con menor temperatura afectando el proceso productivo.

En la planta de fuerza pueden identificarse varios requerimientos de calentamiento de flujos, por ejemplo se necesita calentar el agua de alimentación a la caldera, el combustible, se calienta también el condensado que es recuperado de la sección de secado de la máquina de papel.

Para comenzar el análisis se identifican los flujos fríos y calientes en la planta de fuerza, estos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1
Corrientes frías y calientes identificadas en el proceso en condiciones actuales

	Corrientes	F (kg/s)	Ti(°C)	TF (°C)	S (kJ/kg°C)	(F*S) ó (F*H) kw/°C	H (kJ/kg)	Calient. o Frío	Q (kW)
1	Agua + Cond	5,77	35	125	4,18	24,11	-	Frío	2 16 9,9
2	Agua + Cond	5,77	125	216	4,59	26,48	-	Frío	2 41 0,1
3	Vapor frío	5,77	216	216	2,5	-	187 5,2	Frío	108 19,9
4	Vapor frío	5,77	216	373,8	2,25	12,9	-	Frío	2 04 8,5
5	Combustible	0,47	35	95	2,00	0,934	-	Frío	56,20
6	Humos	7,29	1500	341,8	1,18	12,6	-	Caliente	145 92,6

Se escoge un $Dt = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ según lo recomendado por /18/ para este tipo de industria con ello se obtuvo un Pinch en $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se requiere de un servicio adicional de calentamiento solamente, para lograr nuestro objetivo,

siendo el valor de $Q_{Hmin} = 2\ 905\text{ kW}$. Luego se obtiene el diagrama de las curvas compuestas para los flujos fríos y calientes; y el diagrama de las curvas compuestas grandes mostrándose en las figuras 1 y 2, respectivamente.

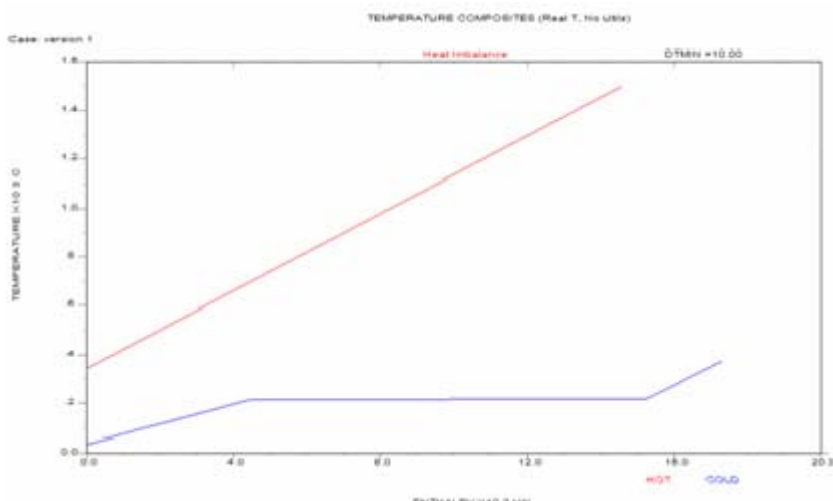


Fig. 1 Diagrama de las curvas compuestas de los flujos fríos y calientes.

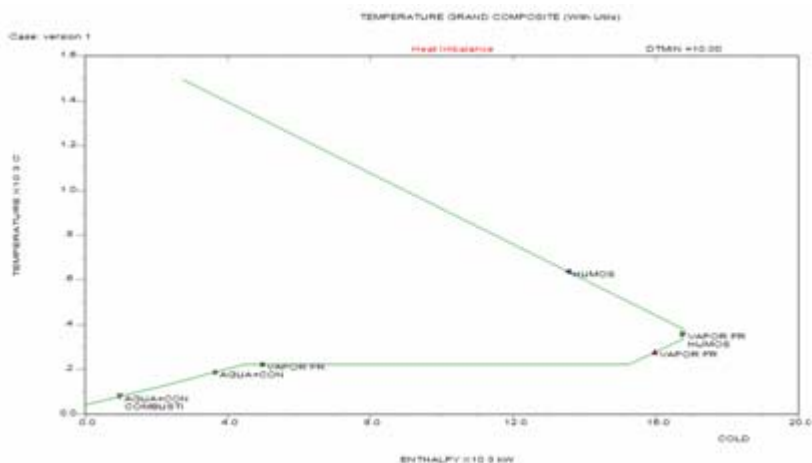


Fig. 2 Diagrama de las curvas compuestas grandes de los flujos fríos y calientes.

A partir de este análisis se determinó que las pérdidas corresponden a un valor de 127 1,7 kW por no utilizar los humos de la caldera para el calentamiento de las corrientes. Valorando la posibilidad de usar un flujo externo para mejorar el proceso energéticamente se realiza un nuevo estudio incluyendo la variante que se describe a continuación. El software brinda los resultados a través de un reporte

Aplicación del método Pinch en la variante que utiliza la purga para el calentamiento de los flujos fríos

Para reducir las pérdidas, se incluye un flujo externo para realizar el calentamiento del com-

bustible y el agua de alimentación a la caldera. Lo anterior puede implementarse incluyendo en el análisis como flujo caliente, el flujo de una purga que de forma continua es vertida al medio en este sistema. De esta forma además, se ahorra vapor que en el sistema actual es utilizado para calentar el combustible y el agua de alimentación. En la tabla 2 aparecen los flujos a considerar en el nuevo análisis donde se incluye la purga.

Con estos datos se obtienen las curvas compuestas de los flujos fríos y calientes para esta nueva variante observándose en la figura 3. En esta gráfica podemos observar otras de las ventajas que ofrece el simulador donde se puede incluir dentro de cada tramo de las

curvas el nombre de cada corriente. Se utilizó el mismo DT que en la variante anterior, obteniendo un Pinch de 40 . En este caso sólo se puede trabajar con requerimientos calientes en

la curva compuesta fría, en la figura 4 se observa una ampliación de la misma mostrándose el punto Pinch partiendo de las potencialidades que tiene este software.

Tabla 2
Corrientes frías y calientes identificadas en el proceso.
Variante que incluye la purga

Corrientes	F (kg/s)	Ti (°C)	TF (°C)	S (KJ/Kg °C)	(F*S) ó (F*H) kw/°C	H (KJ/Kg)	Calient. o Frío	Q (KW)
Agua + Cond	5,77	35	125	4,18	24,11	-	Frío	2 16 9,9
Agua + Cond	5,77	125	216	4,59	26,48	-	Frío	2 41 0,1
Vapor frío	5,77	216	216	2,5	-	187 5,2	Frío	10 8 19,9
Vapor frío	5,77	216	373,8	2,25	12 982	-	Frío	2 04 8,5
Combustible	0,47	35	95	2,00	0,934	-	Frío	56,20
Humos	7,296	150 0	341,8	1,18	8,6	-	Caliente	5 64 4,69
Purga	0,69	470	469	-	-	304 1,5	Caliente	2 09 8,06
Purga cond	0,69	469	125	2,3	1,58	-	Caliente	543,5

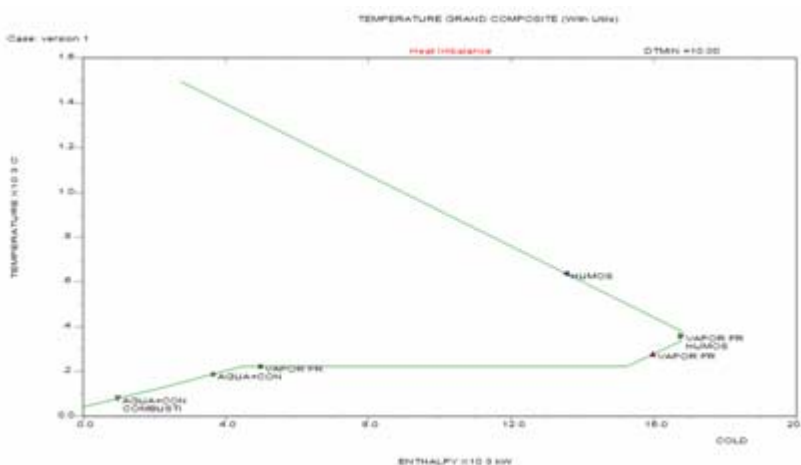


Fig. 3 Curva de composición de los flujos fríos y calientes.

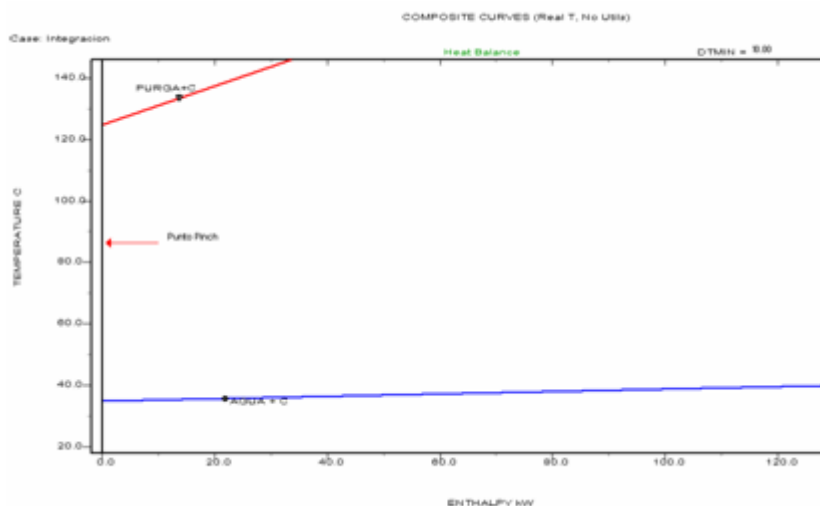


Fig. 4 Ampliación de la curva de composición de los flujos fríos y caliente para mostrar el Punto Pinch en el proceso.

Luego pasamos a obtener las curvas compuestas grandes que tiene como objetivo principal determinar donde será transferido el calor entre las utilidades y el proceso y donde este último puede satisfacer

su propia demanda de calor, así como el lugar apropiado para los equipos del proceso. En la siguiente figura se muestra con color rojo las utilidades y la curva verde representa el proceso.

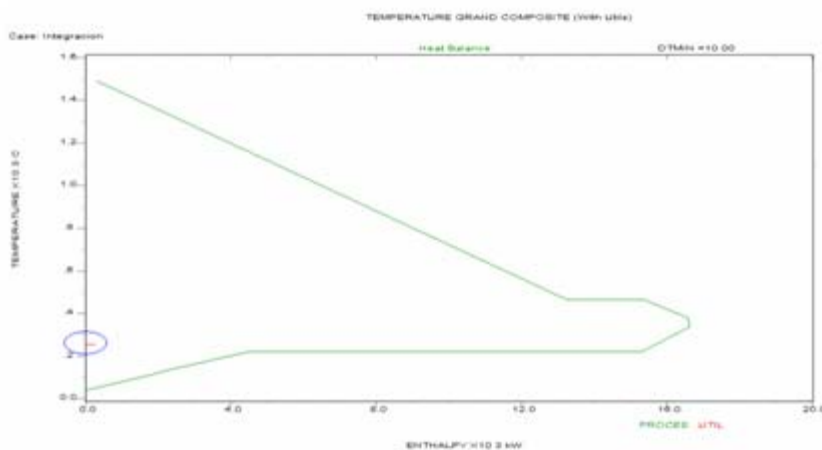


Fig. 5 Curva compuesta grande para la variante donde se incluye la purga.

Después de la obtención de las curvas corresponde buscar una estructura de la red que minimice el consumo de energía. Mediante el diagrama de rejilla se facilita la determinación de los niveles mínimos de recuperación de calor y los consumos

mínimos de utilidades. Primeramente se deben analizar los intervalos necesarios para determinar el área Total mínima teniendo en cuenta las necesidades de áreas en cada intervalo, la misma es calculada a través de la siguiente ecuación:

$$A_{\min} = \sum_1^{\text{int ervalo}} \frac{1}{\Delta T_{me}} * \sum_1^{\text{corriente}} \frac{q_i}{h_i} \quad [m^2] \quad (1)$$

donde:

DT_{me} = Media logarítmica de la diferencia de temperatura; °C

q_i = Carga por equipo; W/m²

h_i = Coeficiente de cada corriente, W/m²-°C.

El Aspen Pinch realiza el cálculo, esta infor-

mación se puede obtener mediante el reporte del diseño de la red de intercambio de calor. El Área total mínima de intercambio es de 229,7 m². Luego se pasa a determinar el número mínimo de equipos para esta red en el proceso de integración el que queda definido por la ecuación 2 que se presenta a continuación:

$$\begin{matrix} \text{Número de} \\ \text{Intercambiadores} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Números de} \\ \text{intercambiadores} \\ \text{Arriba del Pinch} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{intercambiadores} \\ \text{Debajo del Pinch} \end{matrix} \quad (2)$$

donde:

$$\begin{matrix} \text{Número de} \\ \text{Intercambiadores} \\ \text{Arriba del Pinch} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{de corrientes} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{de utilidades} \end{matrix} - 1 \quad (3)$$

$$\begin{matrix} \text{Número de} \\ \text{Intercambiadores} \\ \text{Debajo del Pinch} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{de corrientes} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{de utilidades} \end{matrix} - 1 \quad (4)$$

Para este caso de estudio, el número mínimo de intercambiadores es 8. A partir de aquí estamos listos para la construcción del diagrama de rejillas, el cual se muestra en la figura 6, pero debemos tener en cuenta la siguiente condición:

$$\text{Por encima del Pinch: } F_h C p_h \leq F_c C p_c \quad (5)$$

$$\text{Por debajo del Pinch: } F_h C p_h \geq F_c C p_c \quad (6)$$

A partir de aquí se pueden analizar tres variantes de diagrama de rejilla usando diferentes criterios: Combinación de la integración de la planta original con corrientes calientes y frías identificadas en el nuevo estudio, Integración con aprovechamiento de la mayor cantidad de corrientes e Integración con aprovechamiento de la corriente de mayor capacidad térmica.

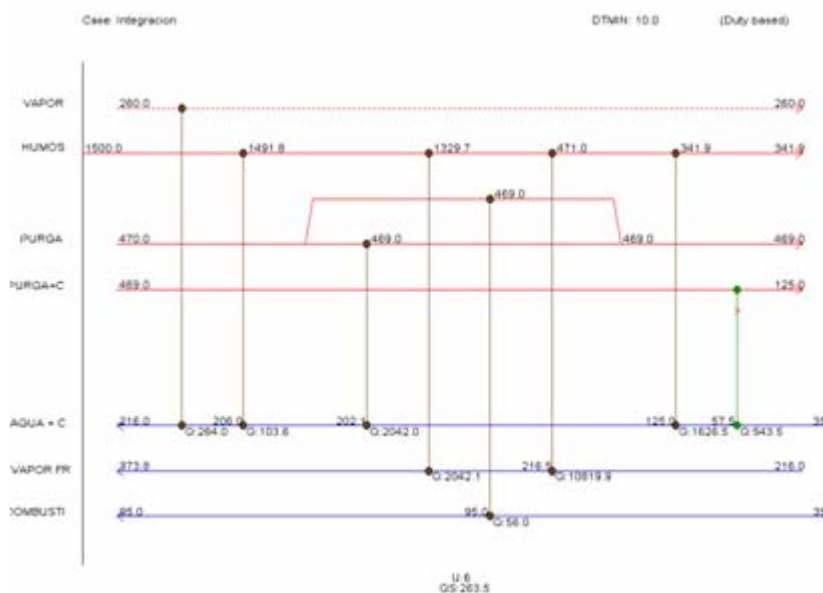


Fig. 6 Representación del diagrama de rejilla para la planta de fuerza.

inforComo se puede observar en el diagrama de rejilla se muestra además el calor intercambiado por cada equipo. Esta gráfica es muy útil para el ingeniero ya que se visualiza como se lleva a cabo el intercambio del calor entre las corrientes, explicaremos solamente la corriente que se incluye en esta modificación que es la purga. En este caso la purga se divide para calentar completamente la corriente de combustible desde 35 °C hasta 95 °C, el resto de la corriente es utilizada para calentar la corriente de agua+condensado desde 125 °C a 202 °C. Además se puede observar que sólo se utiliza vapor para calentar la corriente de agua +condensado desde la temperatura de 206 °C hasta 216 °C.

Luego se determinó el área total real de intercambio de calor para el diseño propuesto, donde se obtuvo los mejores resultados en la variante con aprovechamiento de la corriente de mayor capacidad térmica con un 13 % de área en exceso por encima del área total mínima. Estos resultados se pueden observar también dentro del reporte ofrecido por el Aspen Pinch donde se detalla como es calculada el Área total requerida para este diseño propuesto que es de 260 m².

A continuación en la tabla 3 se muestra un resumen de los datos más importante de los intercambiadores propuestos.

Tabla 3
Resumen de los intercambiadores propuestos en la red de intercambio

No equipo	Nomenclatura	Corrientes	T _i (°C)	T _f (°C)	Área de transferencia (m ²)
1	HX2	Purga+condensado	469	125	17,1
		Agua+condensado	35	57	
2	HX7	Humos	471	341,9	34,5
		Agua+condensado	57,5	125	
3	HX9	Purga	470	469	55,9
		Agua+condensado	125	202,1	
4	HX16	Humos	1 50 0	1 49 1	0,7
		Agua+condensado	202,1	206	
5	HX14	Humos	1 49 1	1 32 9	12,2
		Vapor frío	216,5	373,8	
6	HX11	Humos	1 32 9	471	92,9
		Vapor frío	216	216,5	
7	HX5	Purga	470	469	1,8
		Combustible	35	95	
8	HX017	Vapor	260	260	45,1
		Agua+condensado	206	216	

También mediante las opciones que nos ofrece el simulador podemos ver el intercambio de calor dentro de la curva compuesta de

los flujos fríos y calientes en cada equipo propuesto en la red, es decir la fuerza impulsora mostrándose en la figura 7.

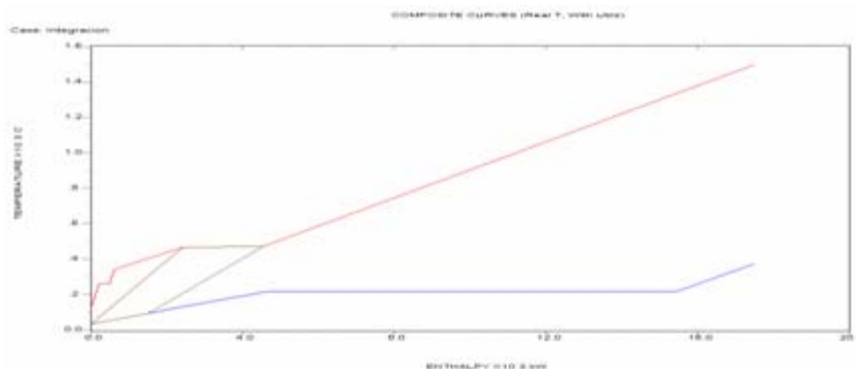


Fig. 7 Intercambio de calor dentro de la curva compuesta de los flujos fríos y calientes por el equipo 7.

Después de aplicar el método se realiza la propuesta de cómo quedará el diagrama flujo de los intercambiadores mostrándose el mismo en la figura 8.

En el trabajo de /14/ sólo se llega hasta el análisis de las curvas compuestas grandes, viendo que es posible ahorrar utilidades pero no se pro-

pone la forma en que se llevará a cabo considerando los equipos intercambiadores de calor. En el diagrama de flujo de la planta de fuerza en las condiciones actuales, se puede observar que existen cinco intercambiadores de calor, de los cuales sólo se puede usar uno, el representado por el número ocho.

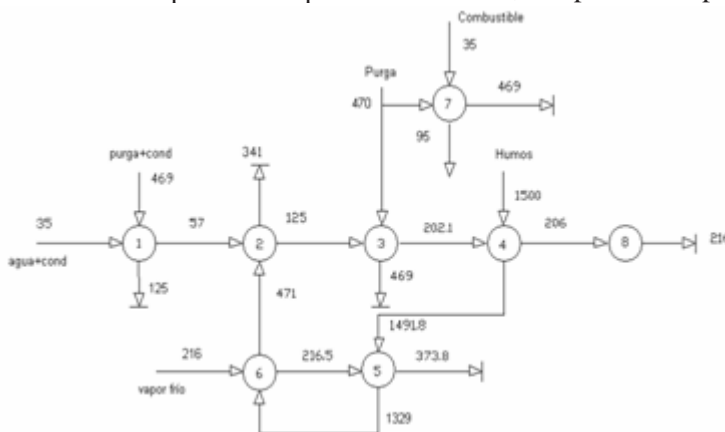


Fig. 8 Diagrama de flujo de los intercambiadores con la propuesta de utilizar el flujo de pulga.

Con el análisis del diagrama de flujo de los intercambiadores dentro de la red de diseño propuesta se culmina el estudio en la planta de fuerza. Pasando a analizar la repercusión que tiene esta variante en el aspecto económico.

Análisis económico de la variante propuesta

Se comenzará por el análisis económico de

la red de intercambio de calor. En este caso nos corresponde analizar la inversión que trae consigo la propuesta de integración al usar la corriente de purga como medio de calentamiento, la cual ha sido abordada en el acápite anterior. Estos resultados son calculados automáticamente por el Aspen Pinch. A continuación se muestra una tabla resumen de los costos de los intercambiadores.

Tabla 4
Costo de los intercambiadores dentro de la red de intercambio de calor propuesta para la nueva variante

No equipo	Nomenclatura	Corrientes	Costo de inversión (\$)
1	HX2	Purga+condensado	15 291,19
		Agua+condensado	
2	HX7	Humos	15 509,95
		Agua+condensado	
3	HX9	Purga	15 750,10
		Agua+condensado	
4	HX16	Humos	15 021,74
		Agua+condensado	
5	HX14	Humos	15 221,97
		Vapor frío	
6	HX11	Humos	16 126,02
		Vapor frío	
7	HX5	Purga	15 049,07
		Combustible	
Costo total de inversión			107 970, 04

Luego se continúa el análisis haciendo una comparación de los costos energéticos de las dos variantes teniendo en cuenta que la empresa trabajará 300 días al año las 24 horas:

Variante 1: situación actual en la planta de fuerza

Consumo de vapor = 20 916,2 kg/h.

Consumo de agua para la alimentación a la caldera: 17 95,4 kg/h.

Costo energético = 1 057 945 \$/a

Variante 2: Uso de la purga para el calentamiento de las corrientes en la planta de fuerza

Consumo de vapor = 570,96 Kg/h.

Consumo de agua = 43,5 Kg/h

Costo energético = 28 831,38 \$/a

Ahorro en costos energético: Costo energético variante 1- Costos energético variante 2

$$= 1\,057\,945 \text{ \$/a} - 28\,831,38 \text{ \$/a}$$

$$= 1\,029\,114,5 \text{ \$/a.}$$

Tiempo de recuperación: inversión/ganancia

$$= 107\,970,04 \text{ \$} / 1\,029\,114,5 \text{ \$/a}$$

= 0,1 año.

Con ello podemos exponer que es factible llevar a cabo la inversión para lograr disminuir los consumos energéticos en la planta de fuerza de la papelera Damují.

Conclusiones

1. Se demuestran las ventajas que ofrece para el análisis energético en los procesos el uso del simulador Aspen Pinch a través del caso de

estudio, en la Papelera Damují a través de la obtención de un mayor volumen de información, efectividad y rapidez.

2. Se logra un ahorro considerable de energía en la planta de fuerza cuando se utiliza la purga para el calentamiento del combustible y el agua de alimentación a la caldera, lo cual reporta un beneficio para la fábrica de 142 \$/h.
3. Con el diseño de la red de intercambio de calor propuesta se logra aumentar la eficiencia energética en el proceso a pesar de las inversiones a ejecutar demostrándose que es factible a partir del tiempo de recuperación de la inversión.

Bibliografía

1. RODERA H., Bagajewics M., 1999, "Targeting procedures for energy savings by heat integration across plants". Aiche Journal, Vol. 45, No. 8, August.
2. González C. M., González S., E, S., Cata S., Y., 2004, , Impacto del pulpeo con etanol en la obtención de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular. Diversificación 2004, Junio.
3. www.ipst.edu/epri/newpubs.htm Minimizing Mill Water Use with Water Pinch Technology Energy and Water Successive Design Methodologies. 2002. Bajado 26/01/03.
4. www.oit.doe.gov/bestpractices.htm/inlandpaper1.pdf Inland paperboard and packing, Rome Linerboard mill energy assessment. February 2001. Bajado 29/11/02
5. www.oit.doe.gov/bestpractices.html Boise Cascade Mill Energy Assessment. December 2000. Bajado 29/01/03
6. King, C. J.; Gantz, D.W. and Barnes F.J., 1998, Systematic evolutionary process synthesis. Ind. Eng. and Chem. Vol. N°2.
7. Linnhoff, B., 1986, User guide on process integration for efficient use of energy. Inst. Chem. Eng. London.
8. Ahmad, S., Hui C., 1991, Heat recovery between areas of integrity. Computer Chemical Engineering, 12, 809,
9. Koufos D., Retsina T., 2001, Practical energy and water management through pinch analysis for the pulp and paper industry. Water Science & Technology Vol 43 No 2 pp 327-332.
10. Viera, B "Modelacion matematica para ingenieros quimicos". Editorial Pueblo y educación. 1988.
11. Rudd and Watson. "Strategy of Process engineering". Editorial Pueblo y Educacion. Pp 447-456. 1979.
12. Scenna N y col. Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos. 1999. Argentina. ISBN: 950-42-0022-2.

-
13. Hurme, M. "Conceptual Desing of Clean Processes: Tools and Methods". AICHE Journal, 1999.
 14. González M. Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV. 2004
 15. López B., Alternativa para la obtención de productos de alto valor agregado a partir de bioetanol mediante técnicas de destilación. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara.2005.
 16. Catá. S. Metodología para la consideración de la incertidumbre en la integración de procesos en la industria azucarera y sus derivados. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV.2006.
 17. Bonachea M. Análisis de la posibilidad de integración en un complejo de fábricas de azúcar-papel-alcohol-torula. Trabajo de diploma. UCLV.2004.
 18. Linhoff, B., "Use pinch Analysis to Knock Down Capital Cost and Emissions" Chem. Eng. Progress, 90 (8) , pp 33-57 Aug. 1994.