

---

# Integración Óptima en el Sistema de Reciclado de Aguas en Procesos Papeleros

M. González<sup>1</sup>, E. González<sup>1</sup>, P. Aguirre<sup>2</sup> y G. Corsano<sup>2</sup>

(1) Univ. Central Marta Abreu de Las Villas, Centro de Análisis de Procesos, Carretera a Camajuani, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara-Cuba

(2) Inst. de Desarrollo y Diseño, INGAR, Avellaneda N° 3657, (3000) Santa Fe-Argentina  
(e-mail: paguir@ceride.gov.ar)

\*autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

---

## Resumen

En este trabajo se propone un novedoso modelo de programación no lineal que resuelve el problema de minimizar el consumo de agua fresca utilizada en el proceso paplero, obteniendo considerables reducciones del agua consumida y de los residuos vertidos. Se determina el grado de contaminación de los flujos a ser reciclados, así como la máxima composición de contaminante que pueden aceptar los diferentes equipos y en base a esto se identifica la máxima posibilidad de reciclado de flujo de residuales al proceso. Se modela matemáticamente el problema y se obtienen como respuesta el mínimo consumo de agua fresca, el caudal máximo de residual vertido, la masa de fibra en suspensión que puede ser recuperada y la cantidad de contaminante a ser removida en el proceso. Se concluye que el modelo utilizado, es una herramienta sistemática, potente y genérica y puede ser utilizada en cualquier proceso de reducción de residuos.

## Optimal Integration of Water Recycling Systems in Paper Manufacturing Processes

### Abstract

This work proposes a novel non-linear programming model that solves the problem of minimizing fresh water consumption in the paper manufacturing process, as well as reducing waste release. The degree of pollution of the flows to be recycled and the maximum contaminant composition treatable by different equipment units are determined; on the basis of this data, the maximum amount of recycleable residual flow is determined. The problem is modeled mathematically, determining the minimum consumption of fresh water, the maximum flow of waste water, the mass of fiber in suspension which can be recuperated, and the amount of pollutant to be removed in the process. It is concluded that the model used is a powerful generic systematic tool which can be used in any process for the reduction of residues.

*Keywords: paper industry, wastewater treatment, water recycling, mathematical model*

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han observado avances significativos en la optimización y síntesis de procesos, cobrando importancia las herramientas de integración de procesos que han sido desarrolladas para llevar a cabo tareas ambientales y son utilizadas en la prevención de la contaminación (Eastwood y Tainsh, 1998).

Las herramientas de síntesis de procesos desarrolladas son técnicas que tienen como base el tratamiento de programación matemática, se trabaja con funciones objetivos, modelos matemáticos y termodinámicos en el cual se encuentra el análisis Pinch, siendo ésta última la de mayor aplicación en el ámbito industrial (El-Halwagi y Sheley, 2000). Tener una tecnología eficiente para el ahorro de agua fresca y la minimización de residuos, convierte a la integración de sistemas de agua en un enfoque interesante (Wang et al., 2003).

La industria de la pulpa y el papel tradicionalmente ha sido una de las mayores consumidoras de agua fresca. El agua siempre se había considerado un recurso libre; pero en los últimos años se ha incrementado el costo de la misma así como el tratamiento de los efluentes (Cripps, 2000). Como es lógico una reducción del agua requerida en el proceso, generará menor cantidad de residuales acuosos. Esto podría lograrse maximizando el reciclo de flujos con la implementación de un lazo cerrado en el ciclo del agua (Jodicke et al., 2001).

La tendencia actual al encarar estas dificultades está en el desarrollo de una metodología de diseño sistemático que no sólo identifique un sistema que lleve a cabo la tarea de reducción de residuales, sino que también represente el sistema más rentable (Gilbert y Hsieh, 2000). Además del desarrollo de herramientas para el diseño de integración de procesos, una serie de herramientas de sistemas de análisis han sido desarrolladas para dirigir y simplificar el proceso de diseño (Dunn y Bush, 2001).

En este trabajo se desarrolla una metodología sistemática, genérica y potente para la integración de procesos con el objetivo de minimizar el impacto ambiental provocado por los residuales originados en una fábrica de papel, y lograr una producción limpia a un costo rentable.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada para resolver el problema de reducción del consumo de agua se esquematiza en la figura 1.

En primer lugar, se identifica el consumo de agua en las diferentes operaciones, así como los flujos de efluentes que pueden ser reciclos potenciales. Como base del análisis se toma el por ciento de fibras en las corrientes. El caso estudiado considera 22 sumideros y 3 flujos fuentes (Desaguador de Médula, Safe Alls y Prensa Lamort). A través de balances de masa se determinó que el proceso demanda 2519,2 m<sup>3</sup>/d de agua y genera 2580,14 m<sup>3</sup>/d de residuales acuosos. Con la selección y los datos de las fuentes (F) y sumideros (S) se procedió a su representación en el diagrama fuente-sumidero (figura 2), en los mismos se analizó las posibilidades de división (D), mezcla (M) y tratamiento (T) de flujos fuentes que serían suministrados a los sumideros. Para ello primero fue necesario caracterizar flujos y composición de fibra de los flujos fuentes. Para los sumideros se establecieron intervalos aceptables de composición y flujos.

El problema puede formularse por medio de un modelo de programación no lineal (NLP) con el objetivo de minimizar el consumo de agua a través del reciclo de los efluentes.

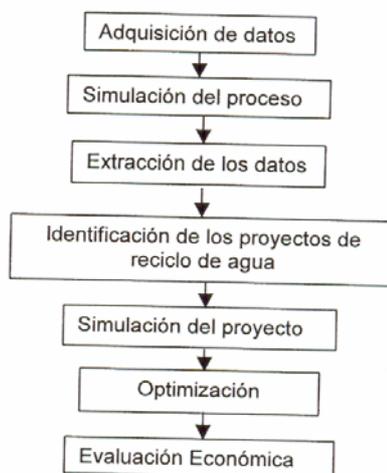


Fig. 1: Metodología de solución propuesta

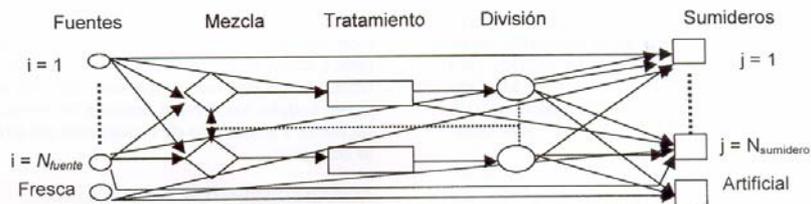


Fig. 2: Esquema de la distribución de flujos entre fuentes y sumideros

El proceso tiene  $N_{\text{sumideros}}$  y  $N_{\text{fuentes}}$ . Los  $N_{\text{sumideros}}$  se corresponden con el número de unidades que requieren agua fresca como entrada. Las fuentes corresponden a las corrientes a reciclar más una fuente de agua fresca (AF). Dentro del conjunto de sumideros, existe uno artificial (SA) que representan los residuales vertidos.

Se tienen en cuenta restricciones de división, mezclado y tratamiento de flujos, ecuaciones de balances materiales en las fuentes y sumideros, balances de composición de entrada a los sumideros, restricciones para intercepción de fuentes, restricciones de reciclo de residuales a los sumideros que previamente se decidió que utilizarían agua fresca y restricciones de no negatividad para flujos y composiciones.

Como se considera sólo una fuente de agua fresca, se establece como objetivo:

$$\text{Min } Q_{N_{\text{fuente}}} \quad (1)$$

donde  $Q_{N_{\text{fuente}}}$  es el caudal de agua fresca que puede expresarse en término de los sumideros como:

$$Q_{N_{\text{fuente}}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{sumidero}}} q_{N_{\text{fuente}},j} \quad (2)$$

donde  $q_{N_{\text{fuente}},j}$  representa el caudal que va desde la fuente de agua fresca al sumidero  $j$ , con  $j=1, \dots, N_{\text{sumidero}}$ .

El modelo fue implementado y resuelto utilizando el software LINGO™ (Schrage, 1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El reciclo y el mezclado, son limitados ya que conducen a la acumulación de la especie de interés (fibras), esto puede traer como resulta-

do la violación de algunas restricciones de composición en determinados equipos del proceso. En este caso de estudio las fuentes tienen un bajo por ciento de fibras por lo que resulta muy difícil que a causa del reciclo se violen las restricciones de composición en los sumideros, no obstante no puede obviarse, que el reciclo traerá como resultado la acumulación de fibras en estos flujos. Para eliminar este inconveniente deben tenerse en cuenta técnicas de intercepción que logren la disminución de la especie de interés hasta niveles aceptables.

De la optimización del modelo planteado se obtuvo que las fuentes generadas por el Desaguador de Médula, el Safe Alls y la Prensa Lamort pueden ser recicladas directamente a varios sumideros, ya que el rango de composición de fibras de estas fuentes es permisible para varios equipos y no se incurre en violaciones de composición que puedan traer problemas operacionales debido a la acumulación de fibra reciclada en el proceso. Por otro lado, existen algunos equipos a los que por necesidades del proceso no serán reciclados flujos fuentes y en consecuencia utilizarán agua fresca, ya que el utilizar agua reciclada en los mismos ocasionaría problemas de tупición y corrosión entre otros. Estos equipos son: Depurador, Ecopulper, Pera, Diábolo, Mesa Formadora y la Caja Cabecera. Por lo tanto en la modelación del problema se planteó sólo el uso de agua fresca para los mismos. De estos equipos los cuatro primeros consumen pocas cantidades de agua, además como requerimiento del proceso, éstos deben consumir agua de mayor calidad, por lo que resulta de mayor beneficio utilizar agua fresca. En el caso de la Mesa Formadora y la Caja Cabecera realizan el suministro del agua a través de duchas de agujas y el uso de

agua reciclada podría traer problemas operacionales. Por otra parte de la demanda de agua de la Mesa Formadora es suplida con flujos reciclados del Desaguador de Médula, esto es posible ya que estas duchas tienen un mayor diámetro de boquilla que las anteriores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones en el modelo se obtiene una reducción del 87,38% en el consumo de agua fresca y una reducción de los residuales vertidos del 85,31%. Se determina además, que la cantidad óptima de remoción de fibra para evitar problemas operacionales en el proceso es de 69 m<sup>3</sup>/d y que el circuito de agua en el proceso debe ser renovado cada 15 días con el objetivo de limpiar el agua recirculada.

El flujo de residual que queda para ser vertido debe ser sometido a un tratamiento en el exterior de la planta. Este residual ya tendrá un nivel de DBO menor al que es generado en el proceso actual ya que al interceptar la fuente Desaguador de Médula y separar de la misma cierta cantidad de fibras, se disminuye su carga orgánica y por tanto su DBO.

Las modificaciones tecnológicas necesarias para reordenar los flujos de acuerdo a los resultados obtenidos implican cambios de bajo costo que incluyen redistribución de tuberías y accesorios e inversión en equipos de bombeo.

#### CONCLUSIONES

La integración material de procesos, es una herramienta sistemática, potente y genérica que puede ser utilizada en cualquier proceso para llevar a cabo una de reducción de residuales.

El método gráfico fuente–sumidero empleado, permite determinar las soluciones iniciales de varias opciones de reciclaje y reuso de los efluentes, a través de la cual se apreciaron oportunidades para la reducción del consumo de agua y el vertimiento de residuales.

La modelación matemática y la estrategia de solución implementada permitió la valoración de diversas variantes de distribución de flujos. La solución óptima del problema planteado, presenta una reducción del 87,38% en el consumo de agua fresca y del 85,31% en los residuales vertidos.

La estrategia matemática y luego su optimización permitió considerar aspectos tan importantes como la acumulación e interceptación de fibras en diferentes corrientes del proceso, obteniéndose los niveles óptimos de remoción de fibras y el período de renovación del circuito de agua.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Nacional de Promoción Científica, CONICET, a la UNL de Argentina, al Subprograma IV.15 de CYTED y a la Universidad Central de las Villas de Cuba.

#### REFERENCIAS

- Cripps, H., Process integration in the pulp and paper industry. *Tappi Journal*: 81, (10), 23-29 (2000).
- Dunn, R. F. y G.E. Bush, Using process integration technology for cleaner production. *Journal of cleaner production*. Vol. 9, 1-23. (2001).
- Eastwood, A.R. y R.A. Tainsh, Minimizing waste water emissions using Water Pinch™ Analysis. Technical white paper. August. Copyright 1998, Linnhoff March (1998).
- El-Halwagi, M.M. y M. Sheley, Mass integration for the optimal design of optimal recovery and allocation of infinite pollutants. *American Chemical Society. Spring Meeting Session* (2000).
- Gilbert, Ch.D. y J.S. Hsieh, Effects of white-water closure on the physical properties of liner board, *Tappi Journal*: 23, (4), 67-72 (2000).
- Jodicke, G., U. Fischer y K. Hungerbuhler, Wastewater reuse: a new approach to screen for designs with minimal total costs, *Computers and Chemical Engineering*, 25, 203-215 (2001).
- Schrage, L., *Optimization Modeling with Lingo*, 2ª edición. Lindo System Inc., Chicago-USA (1998).
- Wang B., X. Feng y Z. Zhang, A design methodology for multiple-contaminant water networks with single internal water main, *Computers and Chemical Engineering*, 27 903-911 (2003).