

# *Integración de masa para la prevención de la contaminación*

\*Meilyn González Cortés<sup>1</sup>, Yenlys Catá Salgado, Erenio González Suárez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central de Las Villas; Carretera a Camajuaní km 5 y ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

*Mass integration for pollution prevention  
Integració de massa per a la prevenció de la contaminació*

*Recibido: 15 de junio de 2009; revisado: 29 de junio de 2010; aceptado: 13 de julio de 2010*

## RESUMEN

La minimización de residuos se ha convertido en un aspecto fundamental en las industrias de procesos, motivado principalmente por el incremento de los costos de disposición, las responsabilidades legales y las regulaciones ambientales que cada vez con mayor fuerza se imponen a las industrias. Para la prevención de la generación de residuales en los procesos pueden emplearse técnicas de integración de masa, herramientas sistemáticas y genéricas como el diagrama fuente-sumidero, diagrama de ruta, redes de intercambio de masa, entre otras. En el trabajo se realiza una revisión bibliográfica de las herramientas de integración de masa empleadas para la prevención de la contaminación. Se exponen bibliografías sobre casos en las que estas herramientas han sido aplicadas con efectividad para resolver problemas ambientales. Se realiza un análisis detallado del diagrama fuente sumidero, muy útil para identificar oportunidades de reciclado y intersección de corrientes en un proceso.

**Palabras claves:** integración de masa, prevención de la contaminación, diagrama fuente sumidero

## SUMMARY

Residual minimization has become a fundamental aspect in process industries, mainly as a result of increasing disposal costs, and growing legal responsibilities and environmental regulations imposed on industries. Preventing process residuals generation can include mass integration techniques, systematic and generic tools such as the source-sink diagram, path diagram, and mass exchange networks, among others. This work presents a bibliographical revision of mass integration tools used for preventing pollution. Some cases from the literature are exposed

in which these tools have been effectively applied to solve environmental problems. A detailed analysis of the source-sink diagram is carried out, which is useful to identify opportunities to recycle, mix and intersect flows in a process.

**Key-words:** mass integration, pollution prevention, source sink diagram

## RESUM

La minimització de residus s'ha convertit en un aspecte fonamental en les indústries de processos, motivat principalment per l'increment dels costos de deposició, les responsabilitats legals i les regulacions ambientals que s'imposen cada vegada amb més força a les indústries. Per a la prevenció de la generació de fraccions residuals en els processos, hom pot emprar tècniques d'integració de massa, eines sistemàtiques i genèriques com el diagrama font-embornal, diagrama de ruta i xarxes de bes-canvi de massa, entre d'altres. En aquest treball, es realitza una revisió bibliogràfica de les eines d'integració de massa emprades per a la prevenció de la contaminació. S'exposa la bibliografia sobre casos en els que aquestes eines s'han aplicat amb efectivitat per resoldre problemes ambientals. Es realitza una anàlisi detallada del diagrama font-embornal, molt útil per identificar oportunitats de reciclatge, mescla i intersecció de corrents en un procés.

**Mots clau:** integració de massa, prevenció de la contaminació, diagrama font-embornal

\***Correspondencia autores:** M. González: Tel. 053 42 281164; [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu), Y. Catá: [yenlys@uclv.edu.cu](mailto:yenlys@uclv.edu.cu); E. González: [erenio@uclv.edu.cu](mailto:erenio@uclv.edu.cu)

## INTRODUCCIÓN

En los años 1970, la principal actividad ambiental en los procesos químicos era el tratamiento del efluente al final del proceso a través de la instalación de una unidad de control de la contaminación que podía reducir la composición de contaminantes en los flujos de residuales a niveles aceptables. La mayoría de estas unidades empleaban técnicas destructivas (incineración, tratamiento biológico, etc.). A partir de los años 1980, se comenzó a mostrar interés en la implementación de políticas que analizaran el flujo de contaminantes como flujos de materiales de valor que podían ser recuperados de manera efectiva.

En los últimos años se han observado avances significativos en la optimización y síntesis de procesos ambientales. Estos avances también han sido en respuesta a regulaciones ambientales cada vez de mayor exigencia que han presionado a las industrias a desarrollar estrategias de prevención y minimización de la contaminación a un costo rentable (El-Halwagi, 1992; El-Halwagi y Srinivas, 1994; Simpson y Lam 1997; El-Halwagi, 1997).

En el trabajo se realiza una revisión bibliográfica de las herramientas de integración de masa empleadas para la prevención de la contaminación. Se exponen bibliografías sobre casos en las que estas herramientas han sido aplicadas con efectividad para resolver problemas ambientales. Se realiza un análisis más detallado del diagrama fuente sumidero, herramienta de integración de masa de fácil aplicación, muy útil para identificar oportunidades de reciclaje, mezclado e intersección de corrientes en un proceso.

## 1. DESARROLLO

### Integración de Procesos. Integración de Masa.

La Integración de Procesos es una tecnología sistemática, basada en un enfoque hacia el desarrollo de procesos que permite identificar los objetivos globales de eficiencia antes de cualquier actividad de desarrollo y encontrar la estrategia óptima para llevarlo a cabo. La minimización de la generación de residuales, minimización de los requerimientos energéticos, maximización de la eficiencia del proceso, entre otros se encuentran entre estos objetivos.

Las herramientas desarrolladas son técnicas de diseño genéricas, sistemáticas, 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 Pinch, siendo ésta última la de mayor aplicación en la industria. (Pauli, 1997; Eastwood y Tainsh, 1998).

La integración de procesos se caracteriza por dos elementos: la energía y la masa (Cripps, 2000). La integración de energía caracteriza el flujo de energía dentro del proceso e identifica las políticas óptimas para su distribución (y redistribución). La integración de masa es una técnica relativamente nueva que se ha desarrollado mucho en los últimos años. Las investigaciones en este tema han conducido al desarrollo de una herramienta sistemática y potente para el entendimiento total del proceso y explotar así sus posibilidades de integración (Dunn y Bush, 2001). La integración de masa facilita un entendimiento global de los flujos de masa dentro del proceso, (El-Halwagi y Dunn 1996). Algunas de las herramientas de integración de masa que han sido implementadas en diferentes procesos para llevar a cabo tareas de minimización de la contaminación son:

Diagrama fuente /sumidero: Herramienta gráfica de fácil aplicación que permite determinar las oportunidades de reciclaje mezclado e intersección dentro de un proceso determinado. Unida a ella debe desarrollarse el diagrama de ruta del elemento de análisis, con lo cual se podrá valorar la influencia del reciclaje y mezclado de las corrientes en el proceso (Parthasarathy y Krishnagopalan, 2000; Garrison y El-Halwagi, 2000).

Redes de intercambio de masa, MEN<sub>1</sub>: Este procedimiento, cuya aplicación se ha extendido a la prevención de la contaminación, es una extensión del análisis Pinch y las Redes de Intercambio de Energía en Transferencia de Calor. El primer reporte que incluye la similitud entre el análisis Pinch en Transferencia de Masa y Calor fue desarrollado en 1989, por El-Halwagi y Manousiousthakis (El-Halwagi y Manousiousthakis, 1992).

Las MEN es un procedimiento para la generación de una red de intercambiadores de masa con un costo aceptable. La tarea de la MEN es determinar el tipo, número, tamaño y unidades de interconexión que optimicen la transferencia de masa. Varios autores han hecho referencia que en la eficiencia de una MEN es muy importante la selección adecuada de agentes separadores de masa MSA<sup>2</sup>. (Srinivas, 1997; Tripathi, 1996; El-Halwagi y Spriggs, 1998).

Síntesis de redes de reacción, RN<sup>3</sup>: Para un mecanismo de reacción dado, RN identifica una red de reactores los cuales transforman las materias primas en productos. Cuando en la reacción se producen productos intermedios las RN tienen un efecto significativo en la minimización de los residuales.

A través de la extensión de los principios que rigen al diseño de estas redes de procesos integrados se han desarrollado otras herramientas para su aplicación a diferentes procesos, estas son: redes de intercambio de masa con reacción, REAMEN; combinación de Redes de Intercambio de Masa con Reacción y Redes de Intercambio de Energía, CHARMEN; Redes de Separación de Energía Inducida, EISEN; Redes de separación de Calor Inducido, HEISEN. Como se ha visto la metodología de las MEN ha sido extendida y se han desarrollado metodologías de síntesis de redes de intercambio de masa con reacción, REAMEN<sup>4</sup>. Como las MEN, las REAMEN involucran el uso de equipos de contacto directo sin embargo esta metodología incluye contactos con los MSA que reaccionan con los constituyentes residuales. En muchos casos esta reacción puede convertir el residual en un componente reusable o vendible. En los últimos años se han desarrollado otras importantes categorías de la síntesis de MEN: MEN para sistemas de múltiples componentes; MEN con sistema de regeneración; MEN con reacción química; MEN con integración de calor; MEN para la reducción de residuales; MEN con flexibilidad; MEN para la remoción de carga fija; MEN con controlabilidad.

Algunas de estas herramientas incluyen segregación, mezcla y reciclaje de flujos, intersección con equipos de separación, cambios en las condiciones de diseño y operación de los equipos, sustitución de materiales, así como cambios en la tecnología. De acuerdo a los cambios que comprendan las mismas se han clasificado y se ha establecido una jerarquía de cuatro categorías: 1. Cambios de bajo/ ningún costo; 2. Cambios con nuevos equipos; 3. Cambios con nuevos productos químicos y 4. Cambios de tecnología.

1 Mass Exchange Network.

2 Mass Separating Agent.

3 Reaction Network

4 Reaction Mass Exchange Networks.

Tres factores principales se han tenido en cuenta en el establecimiento de esta jerarquía, estos son factor económico, impacto y aceptabilidad. El aspecto económico puede ser valorado por una variedad de criterios económicos tales como costo capital, retorno de la inversión, valor neto presente, y periodo de pago. El impacto, es una medida de la efectividad de la solución propuesta en la reducción de las consecuencias ecológicas y de peligrosidad negativas del proceso, tales como reducción en emisiones y efluentes de la planta. La aceptabilidad es una medida de la probabilidad que tiene una estrategia propuesta a ser aceptada e implementada por la planta (Noureldin y El-Halwagi, 1999; El-Halwagi y El-Halwagi, 1992). En la figura 1, se observan las herramientas que pueden utilizarse en cada uno de sus puntos:



Figura 1. Jerarquía para el uso de herramientas para la integración de procesos

De acuerdo a lo que se ha explicado, puede observarse en la figura anterior, que las estrategias y los cambios que estas provocan en el proceso aparecen en orden ascendente en relación al costo y al impacto y en orden descendente de acuerdo a la aceptabilidad.

## ESTRATEGIA DE INTEGRACIÓN DE PROCESOS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN.

Sólo una fracción de las herramientas que se han señalado serán necesarias para resolver una tarea en específico, pero los pasos para llevarla a cabo deben estar bien claros para no obviar etapas que pueden ser importantes, así como para no utilizar herramientas de mayor complejidad y que involucran un mayor costo, en casos en que la problemática pudiera resolverse a través de una solución más económica, (Dunn y Bush, 2001). Los pasos a seguir se describen a continuación: Plantear con claridad el problema a resolver, así como en base a que contaminante se va a realizar el análisis, en caso de que sean varios contaminantes debe escogerse aquel que provoque un efecto más negativo ó aquel que se encuentre en una mayor concentración en las corrientes que se analizan.

Reunir los datos requeridos para la aplicación de las herramientas para resolver el problema específico.

Identificar las posibilidades de mezclado, reciclaje directo y las necesidades de intersección de flujos.

Analizar el potencial de tecnologías de intersección (operaciones unitarias) que puedan ser empleadas en el caso de estudio para la separación de la especie contaminante.

Selección y aplicación de la tecnología para la reducción de residuales más rentable.

### 2.1 Representación del diagrama fuente-sumidero.

El diagrama fuente sumidero es una herramienta gráfica que ofrece soluciones iniciales de las posibilidades de reuso de flujos de residuales en el proceso. Es un gráfico donde en el eje y se representan los flujos de las corrientes en (kg/h), tanto de los residuales que son vertidos al medio como aquellas corrientes que pueden ser sustituidas por el reciclo de alguna de las corrientes que son vertidas al medio. En el eje x se representa la composición del contaminante de análisis en las diferentes corrientes, (% peso), el contaminante de análisis constituirá la especie de interés en el proceso de estudio, figura 2.

Para realizar la representación es necesario identificar las fuentes y los sumideros en el proceso. Las fuentes son flujos del proceso que llevan las especies de interés, los sumideros son diferentes unidades de proceso que son capaces de procesar las fuentes que llevan la especie objetivo. Por ejemplo en un caso en el que lo que se quiere es reducir el consumo de solvente en un proceso y reducir además el vertimiento de residuales que tengan una concentración determinada de ese solvente. En este ejemplo supuesto, las fuentes son los flujos de residuales, es decir cualquier flujo que contiene alguna cantidad del solvente y que sale de cualquier operación unitaria y los sumideros son los equipos que demandan el suministro del solvente. Los sumideros son llamados además generadores ya que ellos pueden producir fuentes que quizás puedan ser recicladas al proceso. En el diagrama fuente/sumidero también se identifican las siguientes posibilidades: segregación (separación de fuentes en el proceso); mezcla (dos o más fuentes son mezcladas para satisfacer los requerimientos de cierto sumidero); reciclo o reuso (la fuente características de composición y flujo admisibles con las de un sumidero); intersección (separación de la especie de interés desde una fuente objetivo).

En el diagrama, los sumideros son representados como bandas ya que pueden tener límites de composición y relaciones de flujo inferiores o superiores entre los cuales éste podrá ser operado, estos límites ó intervalos pueden ser escogidos por experiencias en el laboratorio, de trabajos anteriores realizados en fábricas de ese tipo ó pueden ser establecidos dentro de un intervalo que sea 5-10% la operación en ese sumidero. La intersección de estas dos bandas proporciona la región de operación del respectivo sumidero.

Las fuentes son representadas por puntos, si una fuente cae en la banda de operación de un sumidero significa que esta puede ser reciclada directamente al sumidero. Se establece que debe considerarse primero para el análisis aquella fuente que tenga menor diferencia de composición con un sumidero determinado y así sucesivamente, pueden ser identificadas todas las oportunidades de reciclo, mezcla y segregación para el proceso, figura 2.

El diagrama fuente-sumidero es muy útil para obtener soluciones iniciales, pero al existir diversas variantes de solución, esta herramienta siempre debe acompañarse de una estrategia de optimización. Múltiples diagramas fuentes-sumideros, pueden ser desarrollados para las mismas fuentes y sumideros.

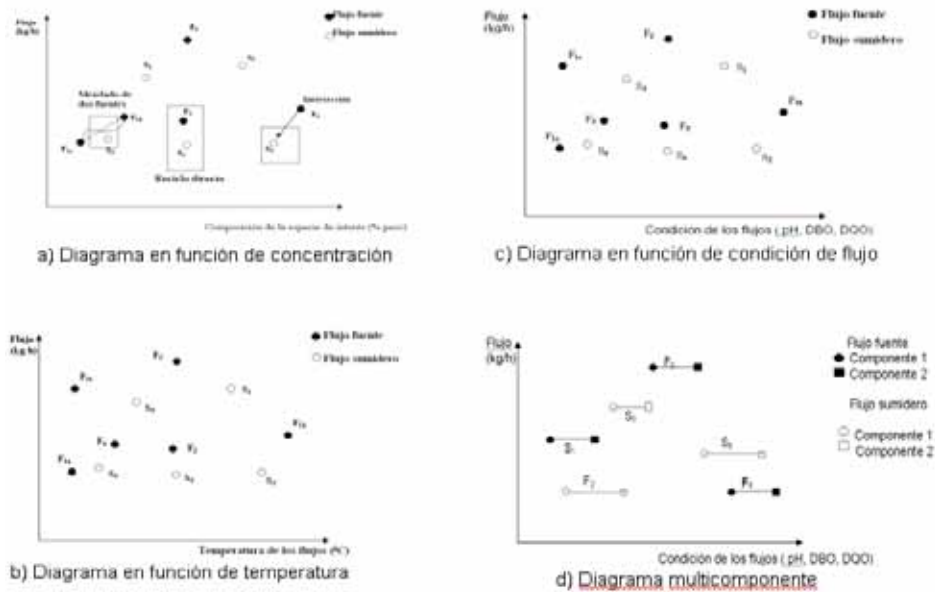


Figura 2. Diagramas fuente sumidero para la identificación de oportunidades de prevención de la contaminación

Por ejemplo: la calidad térmica de flujos fuentes y sumideros puede ser crítica y debe ser representada como un diagrama térmico como se indica en la figura 2 b. También estos diagramas pueden ser representados indicando la relación de flujos versus una condición particular del flujo como puede ser: pH, DBO, DQO; figura 2 c. Finalmente un diagrama multicomponente puede ser desarrollado como se indica en la figura 2 d. Este último es usado para determinar el componente limitante para el diseño de las oportunidades de segregación/reciclo y segregación/intersección/reciclo, en caso de que se analicen dos componentes a la vez.

### 2.2 Oportunidades de reciclo directo.

Estos son diseños que permiten el reciclo directo y reuso de una fuente, por ejemplo en la figura 2 a,  $F_2$  puede reciclarse de forma directa al sumidero  $S_1$ . Estas oportunidades de diseño involucran flujos de composición similar de la especie de interés pero no necesariamente de la misma relación de flujo. Por ejemplo: del flujo fuente  $F_2$ , puede ser reciclado al sumidero  $S_1$ , puesto que el flujo de este sumidero tiene una relación de flujo limitada, sin embargo esto aún representa una oportunidad de reciclo.

### 2.3 Oportunidades de intersección.

Con frecuencia los flujos fuentes no están dentro de los niveles aceptables de composición y relación de flujo para las oportunidades de reciclo directo. En estas situaciones es necesario intersectar ciertos flujos fuentes y ajustar su relación de flujo y/o composición usando tecnologías de tratamiento, como pueden ser: adsorción en carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, de tal forma que puedan ser reciclados a los sumideros. Esta idea se representa esquemáticamente en la figura 3.

Existen numerosas tecnologías que pueden ser empleadas para esta tarea y la identificación de la tecnología de intersección más rentable es crucial. Para dirigir este asunto una serie de herramientas de integración de procesos han sido desarrolladas, las cuales permiten al ingeniero

identificar la menos costosa a emplear en una tarea de separación dada.

Estos diseños permiten el reciclo y reuso de fuentes como  $F_4$ , a sumideros como  $S_3$ , después que las fuentes han sido tratadas con alguna operación de intersección para la reducción de la composición a un nivel aceptable para el uso en un sumidero.

No sólo puede el diseñador identificar los flujos mejores candidatos para la intersección, sino que también puede identificar la composición objetivo que debe alcanzar por la operación de intersección para permitir que la fuente pueda ser reciclada.

Debido a que la economía de la mejor tecnología de purificación es grandemente dependiente de la pureza a ser alcanzada, la identificación del nivel mínimo aceptable de la pureza para el reciclo puede ofrecer significativas reducciones de costo dentro del diseño de la tecnología de intersección. La identificación de la necesidad de separación de una especie, previo al diseño del sistema de intersección es un aspecto particularmente útil del diagrama fuente sumidero.

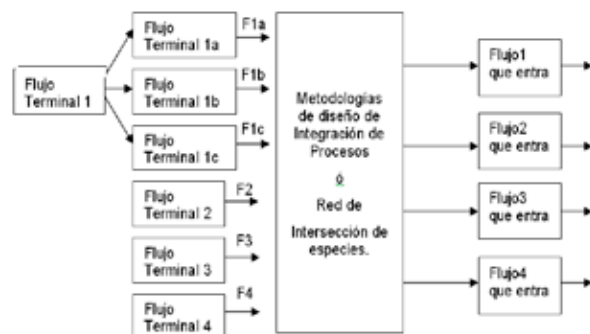


Figura 3. Intersección de las fuentes para satisfacer las composiciones de los sumideros.

---

## CONCLUSIONES

El desarrollo creciente de estas herramientas ha llevado a la ampliación de estos conceptos y en los últimos 5 años se ha introducido una nueva filosofía de diseño: el Manejo Total de Residuos, ya que si bien el centro de la manipulación de los residuales es la reducción del impacto negativo al ambiente, Manejo Total de Residuos es un concepto más general que se refiere a cualquier actividad de derroche que es lo que en la mayoría de los procesos atenta a su eficiencia y economía. En este contexto se incluyen los siguientes aspectos: pérdidas de residuales que podían ser reciclados o usados, ineficiente uso de la energía en el proceso, pérdidas por costos de tratamiento de residuales que podían prevenirse desde las fuentes, rendimientos bajos, pérdidas de residuales en emisiones al aire o al agua.

## BIBLIOGRAFIA

1. El-Halwagi, M. M. "Synthesis of Reverse -Osmosis Networks for Waste Reduction". AICHE Journal. Vol. 38, No 8, pp 1185- 1198, 1992.
2. El-Halwagi, M. M.; Srinivas B.K. "Synthesis of Reactive Mass -Exchange Networks with General Nonlinear Equilibrium Functions". AICHE Journal. Vol. 40, No 3, pp 463-472, 1994.
3. El-Halwagi, M. M; Dunn, R. F. "Design of cost-effective VOC recovery systems". TVA Department of economics development and EPA center for waste reduction. pp. 1-82, 1996.
4. Simpson, C. W; Lam, R. "Recycling "low value" post-conceiver fibers to imprime quality and reduce costs". Tappi journal. Vol. 80, No 9. September,1997
5. Pauli, G. "Zero emissions: the ultimate goal of cleaner production". Journal of cleaner production. Vol. 5, No 1-2, pp. 109-113, 1997.
6. Eastwood, A. R; Tainsh, R. A. "Minimizing waste water emissions using Water Pinch™ Analysis". Technical white paper. Copyright 1998 Linnhoff March. August,1998
7. Cripps, H. "Process integration in the pulp and paper industry". Tappi journal. Vol. 81, No 10. February, 2000.
8. Dunn, R; Bush, G. E. "Using process integration technology for cleaner production". Journal of cleaner production. Vol. 9, pp 1-23, 2001
9. Parthasarathy, G; Krishnagopalan, G. "Systematic reallocation of aqueous resources using mass integration in a typical pulp mill". Advances in environmental research. August, 2000.
10. Garrison, G. W; El-Halwagi, M. M. "A Global Approach to Integrating Enviromental, Energy, Economic, and Technological Objectives" American Chemical Society. Spring Meeting Session, 2000.
11. El-Halwagi, M. M; Manousiouthakis, V. "Synthesis of mass exchange networks". AICHE Journal. Vol. 35, No 8, pp. 1233-1244, 1992.
12. Srinivas, B. K. "An overview of mass integration and its application to process development". Advances in environmental research. January, 1997.
13. El-Halwagi M., "Pollution prevention through process integration. Systematic Design and Tools". ISBN 0-12-236845-2, Elsevier Science (USA). 1997.
14. Tripathi, P. "Pinch technology reduces waste water". Chemical engineering. Vol. 103, No 11, pp. 87-90. November, 1996.
15. El-Halwagi, M. M; Spriggs, H. D. "Solve design puzzles with mass integration". Chemical engineering progress. pp. 25-42 August, 1998.
16. Noureldin, M. B; El-Halwagi, M. "Interval-based targeting for pollution prevention via mass integration". Computers and Chemical Engineering, 23 pp 1527-1543, 1999.
17. El-Halwagi, A. M. and El-Halwagi, M. M. Waste minimization via computer aided
18. chemical process synthesis—A new design philosophy, TESCEJ., 18(2), 155-187, 1992.