

SÍNTESIS E INTEGRACIÓN MATERIAL DE PROCESOS



AUTOR

Carlos D. Fischer

Facultad Regional Reconquista,
Universidad Tecnológica Nacional,
calle 44 N° 1000, Reconquista,
Santa Fe, Argentina.

E-mail: cfischer@santafe-conicet.gob.ar

Resumen.

Este artículo presenta un procedimiento jerárquico de decisión para la síntesis de procesos integrados materialmente a una cadena agroindustrial existente. El procedimiento toma como entrada la información sobre los procesos ya instalados, incluyendo sus corrientes de entradas y salidas, de tal manera que las decisiones requeridas para completar el nuevo diseño, sean tomadas considerando este entorno.

El procedimiento decide entre las tecnologías alternativas para el nuevo proceso, si utiliza corrientes de salida del entorno como entradas al nuevo proceso y viceversa. También decide si esta utilización debe hacerse a través de nuevas instalaciones de proceso para acondicionar estas corrientes.

Para lograr este objetivo se adaptó el procedimiento jerárquico de decisión de Douglas para incluir decisiones de integración de masa y para recurrir a Síntesis de Redes de Intercambio de Materia y procedimientos de asignación Fuente-Sumidero en el nivel adecuado de la jerarquía. A su vez, se adicionaron restricciones a los procedimientos de asignación Fuente-Sumidero.

El procedimiento es ilustrado diseñando un nuevo proceso de biodiesel, integrado a un parque agroindustrial ya existente en las inmediaciones de la ciudad de Reconquista.

Palabras clave: Síntesis, Integración, Biodiesel

Introducción

Existen numerosas publicaciones sobre síntesis de procesos e integración de materia y energía. Entre ellos se destacan el trabajo publicado por Douglas en el cual se recomiendan en un orden jerárquico las decisiones a tomar en el desarrollo conceptual del proceso y su libro en el que se hace un estudio más minucioso de cada etapa de decisión y describen técnicas de integración de calor. En otras publicaciones se ha extrapolado todo el análisis de intercambio de calor (Pinch Diagram) al intercambio de materia en intercambiadores de materia. En lo referente a integración de procesos, en libros como “Process Integration” se describen las diferentes herramientas de integración de materia, básicamente agrupables en dos: la síntesis de sistemas de intercambio de materia MEN (Mass Exchange Networks) y la optimización del reciclado de corrientes mediante programación Fuente-Sumidero (Source-Sink) para asignar cada corriente que sale de alguna unidad del proceso (fuentes de materia) a alguna otra unidad del proceso (sumideros de materia). En otra bibliografía se describen procedimientos para minimizar el impacto ambiental de los procesos y disminuir la polución desde la etapa del diseño del proceso.

La contribución presentada radica en identificar y jerarquizar las decisiones a tomar a la hora de diseñar un nuevo proceso que ha de integrarse a un parque agroindustrial existente. En este artículo se hace una breve presentación de la metodología que se desarrolló y publicó anteriormente. En dicha metodología se agrupan las decisiones según su nivel de importancia, tal que las decisiones tomadas vayan acotando el número de alternativas de diseño. En la bibliografía existente no se explica que herramienta de integración aplicar al encarar un problema general de integración y diseño. Aquí se recomienda implementar las técnicas de integración y síntesis de procesos en un orden jerárquico para lograr un mayor aprovechamiento de los recursos disponibles y disminuir el impacto ambiental al reducir los residuos.

Definición del Problema de Estudio.

La Figura 1.a describe la información de entrada del problema. Hay un nuevo proceso a ser diseñado y

un número de procesos ya existentes. La única línea dibujada es la corriente de materia prima principal que es usada para alimentar el nuevo proceso: este sería el problema de diseño tradicional y se comparan los resultados con este caso. La Figura 1.b representa la solución óptima del problema que se está buscando: hay varios enlaces adicionales conectando el nuevo proceso con los existentes y también hay nuevos vínculos generados por la integración de flujos de materiales dentro del nuevo proceso. Los elementos dibujados sobre algunas conexiones son lo que se denominó Operadores, los cuales acondicionan las corrientes para permitir su integración.

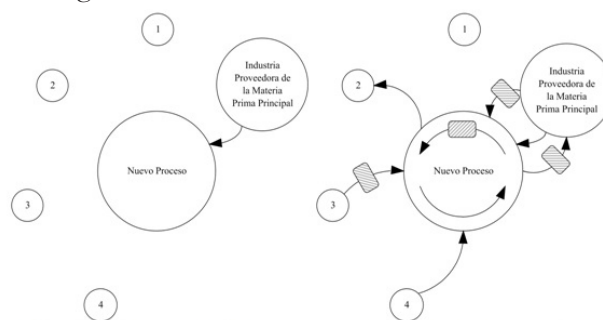


Figura 1: (a) información de entrada del problema
(b) solución óptima del problema

Jerarquía Propuesta para las Decisiones de Síntesis.

Se desea generar un procedimiento para sintetizar un nuevo proceso agroindustrial, integrado a un parque industrial ya instalado que se concentre en el aprovechamiento de productos, co-productos y residuos de los procesos analizándolos como alimentación de otros y considerando posibles intercambios de materia entre ellos. Si bien la literatura de integración de procesos es extensa y existen muchos métodos desarrollados, no se ha abordado la integración de procesos entre si y sólo se considera la integración de materia y energía dentro de un determinado proceso. Tampoco hay una regla para decidir que método utilizar ni en qué orden. Este desarrollo se basa en subdividir las decisiones según su orden jerárquico de tal modo que en cada nivel se agregue información, se procese y se tomen decisiones que limiten las opciones a considerar en los subsecuentes niveles.

Podemos resumir la propuesta en cuatro niveles jerárquicos:

Nivel 1: Recopilación de la información de entrada

1.1. ¿Qué es lo vamos a producir? ¿Qué calidad? ¿Qué cantidad?

1.2. ¿A quiénes va a ir destinada la producción?

1.3. Información de diferentes procesos para producir lo que queremos

1.4. Plantas existentes en el parque industrial

Nivel 2: Selección del proceso considerando las posibilidades de integración

2.1. Identificación de Fuentes-Sumideros

2.2. Análisis y Preselección de Procesos Alternativos

2.3. Selección del proceso más favorable

Nivel 3: Completar la integración de materia de los procesos restantes

3.1. Integrar los procesos con las Fuentes y Sumideros externos.

3.2. Integrar las corrientes dentro del nuevo proceso.

Nivel 4: Realizar la integración energética de los procesos

Ejemplo: Integración de una planta de Biodiesel al Parque Agroindustrial de Reconquista.

Para ilustrar el procedimiento se considera la integración de una planta de producción de Biodiesel a un parque industrial ya instalado.

Nivel 1: Recopilación de la Información de Entrada

Nivel 1.1-2: ¿Qué es lo vamos a producir? ¿Qué calidad? ¿Qué cantidad? ¿A quiénes va a ir destinada la producción? Se sabe que se desea producir biodiesel pero la calidad y cantidad del mismo, se determinan en base a los requerimientos de los potenciales consumidores. El primer mercado objetivo es el parque automotor de transporte público local, al cual puede ofrecerse un Biodiesel de menor refinamiento debido a la robustez de dichos motores. Otro potencial consumidor es el parque de maquinaria agrícola de media-baja tecnología que tampoco requiere combustibles refinados. Para estos consumos, se podría utilizar la infraestructura de cooperativas agrícolas para que fraccionen y vendan el producto. Si se piensa en el Biodiesel como commodity debe ser producido según normas internacionales, y el mercado objetivo de este producto es la exportación. El inconveniente aquí radica en que

los precios de los commodities son bastante variables y pueden tornar no rentable el negocio en cualquier momento. Por último, un Diesel de calidad de exportación también podría ser vendido en la red actual de comercialización de diesel, aunque el margen de ganancia se vería considerablemente afectado.

Nivel 1.3: Información de diferentes procesos para producir lo que queremos. El Biodiesel puede producirse por tres métodos diferenciados principalmente en las características del medio donde se produce la reacción de transesterificación. Las reacciones de transesterificación pueden ser realizadas en medios catalizadores alcalinos, ácidos, o enzimáticos. Los primeros dos tipos han recibido gran atención. En cuanto a la catálisis con enzimas, el sistema requiere más tiempo de reacción que los otros dos. El mismo sólo se ha llevado a cabo a pequeña escala en laboratorios y por consiguiente no se discutirá por no ser actualmente aplicable a escala industrial.

Nivel 1.4: Plantas existentes en el parque industrial. En el Parque agroindustrial donde se desea acoplar la producción de Biodiesel existen los siguientes procesos: Alcoholera (bioetanol para combustible automotor); Aceiteras (soja, girasol) con refinería; Desmotadora de algodón; Hilandería; Frigorífico de aves; Frigorífico Vacuno; Producto balanceado; Feed lots. También se considera posibilidad de incorporar una planta alcoholera a partir de glicerina. Esta tecnología todavía está en etapa de evaluación.

Nivel 2: Selección del proceso considerando las posibilidades de integración.

Nivel 2.1: Identificación de Fuentes-Sumideros. Se analizan los procesos del parque para detectar oportunidades de integración. Las decisiones quedan fundamentadas haciendo un análisis de las ventajas y desventajas, entradas y salidas de los procesos y operaciones con sus respectivos compuestos y composiciones. De esta forma se identifican que corrientes contienen componentes similares y pueden ser utilizadas para alimentar otras operaciones del mismo u otro proceso. Aquí tenemos una gran cantidad de compuestos en común y estos son salidas en algunos procesos y entradas en otros. Considerando las salidas como fuente, y las entradas como sumideros, identificamos rápidamente las fuentes y sumideros disponibles.

Nivel 2.2: Análisis y Preselección de Procesos Alternativos. Resumiendo, se tiene que la catálisis alcalina es muy sensible a la concentración de ácidos grasos libres, no así la catálisis ácida que es indiferente a la misma. La catálisis alcalina presenta un tiempo de reacción mucho menor que la catálisis ácida y para la misma pueden usarse materiales comunes como acero al carbono y plásticos. El alcohol más conveniente es el metanol, ya que es más económico y se lo puede obtener sin contenido de agua, que no es deseada en el medio donde se produce la transesterificación. Como catalizadores es común el uso de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH). El hidróxido de sodio es más económico y por eso es el que más se usa. La opción más conveniente para el aceite de refinería es la catálisis alcalina usando hidróxido de sodio, pero ésta no da la posibilidad de aprovechar las grasas animales y aceites usados disponibles en el parque industrial. Para aprovechar estos residuos, se considera como alternativa utilizar el proceso ácido, pero deben implementarse no solo el reactor sino también las separaciones en forma independiente del proceso alcalino. Otra opción considerada es utilizar un pretratamiento de desgomado y esterificación para este pequeño volumen relativo y una vez reducida su acidez enviarlo al reactor principal del proceso alcalino.

Nivel 2.3: Selección del Proceso más favorable. De todas las fuentes y sumideros que se identifican en el parque en el Nivel 2.1, solo se utilizan las más abundantes en este nivel.

Dentro de estas corrientes significativas, están las fuentes de cebos y grasas animales, y para poder aprovecharlas en el proceso básico, se utiliza un Operador que realiza operaciones de pretratamiento. Este Operador se comporta como un sumidero para estas fuentes, mientras que para los sumideros es considerado como una fuente de aceites y grasas pretratados. En este punto, no solamente se plantean las ecuaciones del método Fuente-Sumidero tradicional, sino que también son agregadas restricciones adicionales y modificamos totalmente la función objetivo. La función objetivo es económica y se está minimizando el Costo Total Anualizado. La misma considera el costo anual de fuentes-sumideros, y los costos totales anualizados de los Operadores y procesos alternativos (como bloques de proceso disponibles de la literatura). En ella se diferencia el tratamiento de las fuentes si estas son internas o externas.

Como resultado de esta optimización, se obtiene

que el proceso básico más el Operador de Pretratamiento es la alternativa más económica. Las gomas son asignadas a la producción de producto balanceado, mientras que los cebos y las grasas vacunas, son enviados al pretratamiento. La glicerina se distribuye casi equitativamente entre el proceso de bioetanol y el de producto balanceado, saturando primero el proceso de bioetanol, mientras que el resto se asigna al proceso de producto balanceado. Esta alternativa presenta un costo que es un 13,35 % menor en comparación al diseño de procesos tradicional.

Nivel 3: Completar la integración de materia de los procesos restantes.

En este nivel se hace la optimización completa, pero las decisiones tienen un impacto económico y medioambiental más pequeño, porque las decisiones sobre las corrientes más abundantes, es decir, sobre las materias primas y productos ya fueron tomadas en el nivel anterior

Nivel 3.1: Integración material del Proceso con el ambiente. Este nivel es similar al nivel 2.3 en el sentido del modelo, la programación y optimización. La diferencia es que se tiene uno de los procesos alternativos y algunos Operadores ya seleccionados (es decir, ya adoptados) y se realiza la integración de este con todas las corrientes disponibles en el ambiente. También se consideran otros Operadores y las asignaciones entre fuentes, sumideros y Operadores resultan distintas al caso anterior.

Para ejemplificar se considera que de la refinería se obtiene un residuo de desodorización, cuya titulación de tocoferoles es del 10,67 % cuando se refina aceite de soja y alrededor del 3,55 % cuando se trata de aceite de girasol. Se tiene que el valor de venta por kg de residuo de desodorización es de U\$S 1,5383 cuando se refina aceite de soja y de U\$S 0,00 cuando se trata de girasol ya que no es posible venderlo al ser la titulación menor al 5 %. Independientemente de la cantidad de tocoferoles, podrían aprovecharse enviándose al Pretratamiento de esterificación. Por otro lado, para poder aprovechar estos residuos de desodorización en la formulación de alimento, hay que considerar un Operador para separarlos de los ácidos grasos libres y los volátiles. Si se considera que se destila girasol, de la optimización de este nivel obtenemos un reacondicionamiento en los niveles de las corrientes anteriores. Asignándose los

residuos de desodorización y grasas animales Aviares al pretratamiento, mientras que la burlanda se la asigna al proceso de balanceado. Vemos que al refinar aceite de girasol el Operador propuesto no es adoptado. El costo total anualizado se reduce un 1,32 % en comparación con el inciso anterior, y un 14,50 % comparado con el diseño de procesos tradicional.

Nivel 3.2: Integración material dentro del Proceso. En este nivel se considera la integración utilizando el método de redes de integración de materia (MENS). Para utilizar este método primero se identifican los componentes que son agregados en una parte del proceso y luego quitados en otra parte. Este es el caso típico de catalizadores o cuando se usa exceso de algún reactivo para acelerar la reacción y luego se lo recupera. Para este caso se considera el metanol y soda cáustica que deben ser agregados a la entrada del reactor y luego recuperados o neutralizados a la salida del reactor. Para recuperar este reactivo y catalizador podríamos considerar un sistema de intercambio con membranas. Un sistema configurado de esta forma trabajando entre la entra y salida del reactor, podría dejar pasar solamente el metanol y la soda cáustica, reteniendo la glicerina, el biodiesel y el aceite residual. Por lo tanto, la decisión de colocar o no un sistema de este tipo, entra en competencia con el sistema de separación y reciclo, por lo que se propone que estas decisiones sean tomadas en el nivel de diseño conceptual de la estructura de reciclo y especificación del sistema de separación de la jerarquía de Douglas (1988). Como al metanol sería difícil separarlo completamente, se toma como objetivo separar solo una parte por este método. El metanol restante debe ser retirado en una torre de destilación. Por lo tanto, se plantean como alternativas el uso de un sistema de membrana seguido de una destilación convencional, versus una destilación convencional.

Según los resultados obtenidos de la optimización, la alternativa de un sistema de membranas seguido de destilación, resulta favorable frente a una destilación convencional. El costo total anualizado de esta alternativa es un 19,30 % más bajo que el de una destilación convencional, y al considerar que se recupera parte de NaOH la alternativa resultaría más económica todavía.

Nivel 4: Integrar energéticamente los procesos

Este nivel es el paso de integración de calor convencional en la metodología de Douglas. Debido a que esta es una metodología muy conocida, no se la describe.

Análisis de Sensibilidad

Una de las ventajas de la metodología propuesta, es la facilidad para identificar el óptimo cuando las condiciones del entorno cambian, no solo por una modificación del valor o costo de las materias primas, fuentes, co-productos, servicios, equipos, sino también por una variación de la disponibilidad de los mismos. Al variar cualquiera de los valores mencionados, rápidamente se puede llegar a una nueva asignación que dé el nuevo óptimo. Para ejemplificar esta característica, se utiliza como ejemplo el aprovechamiento de los residuos de desodorización. En el nivel 3.1 se detalló que se dispone de diferentes residuos de desodorización, pero se trabajó con el residuo de desodorización de girasol. Ahora se considera el uso del residuo de desodorización de aceite de soja. De la optimización se obtiene que el operador planteado anteriormente es adoptado, por lo tanto, el residuo es enviado al Operador, en vez de al pretratamiento. Los tocoferoles concentrados conviene ser vendidos, y los ácidos grasos destilados, enviados al pretratamiento. También se observan pequeños reajustes en las corrientes ya asignadas. Esta nueva distribución de corrientes reduce levemente los costos totales anualizados respecto al uso de aceite de girasol.

Conclusiones

En este artículo se presentó un procedimiento para sintetizar la integración de procesos agroindustriales a un parque industrial ya instalado. Se trató el aprovechamiento de productos, co-productos y residuos de los procesos utilizándolos como alimento de otros procesos y realizando intercambio de masa entre ellos. Para lograrlo, se dividieron las decisiones a tomar según su tipo y jerarquizó en un orden descendente. A su vez, se propuso un orden de aplicación de las metodologías de integración y síntesis, y realizado algunas modificaciones en la definición y estructuración del problema para alcanzar un mayor grado de integración. Siguiendo el orden jerárquico expuesto, se determinó qué proceso utilizar y con cuales va a interactuar, para luego establecer en qué proporción se va a dar tal interacción. Se aplicó un método de asignación Fuente-Sumidero modificando la función objetivo, agregando y modificando las restricciones del problema para determinar el flujo óptimo de intercambio y el menor costo. Se ejemplificó el uso de Operadores realizando todo un proceso de pretratamiento y trabajando con técnicas de separación con reciclado dentro y fuera del proceso, usando lo recuperado con resultados positivos en todos los casos. Además se consideró el método MENs y su competencia en el nivel de diseño conceptual de la estructura de reciclado y especificación del sistema de separación. A su vez, se plantearon las opciones y luego de la optimización se tuvo como resultado un intercambiador de materia entre la salida y entrada del reactor. Por último, se mostró el potencial de la metodología para determinar rápidamente el nuevo óptimo, ante las condiciones cambiantes del entorno.

Bibliografía

- Douglas, J. M. (1985). "A Hierarchical Decision Procedure for Process Synthesis." *Am. Inst. Chem. Eng. Journal* 31(3): 353-361.
- Douglas, J. M. (1988). *Conceptual Design of Chemical Processes*. New York, McGraw-Hill.
- Douglas, J. M. (1992). "Process synthesis for waste minimization." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 31(1): 238-243.
- El-Halwagi, M. M. (1997). *Pollution Prevention through Process Integration*. San Diego, Elsevier Science Inc.
- El-Halwagi, M. M. (2006). *Process Integration*. New York, Elsevier Science Inc.
- El-Halwagi, M. M. and V. Manousiouthakis (1989). "Synthesis of Mass Exchange Networks." *Am. Inst. Chem. Eng. Journal* 35(8): 1233-1244.
- Fischer, C. D. and O. A. Iribarren (2011). "Synthesis of a Mass Integrated Biodiesel Process." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50(11): 6849-6859.
- Fraser, D. M., M. Howe, et al. (2005). "Determination of Mass Separating Agent Flows Using the Mass Exchange Grand Composite Curve." *Chemical Engineering Research and Design* 83(12): 1381-1390.
- Hallale, N. and D. M. Fraser (1999). "Optimum design of mass exchange networks using pinch technology." *Computers & Chemical Engineering* 23(Supplement 1): S165-S168.
- Yazdani, S. S. and R. Gonzalez (2007). "Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry." *Current Opinion in Biotechnology* 18(3): 213-219.

