

Metodología para la optimización de la integración de procesos en esquemas de biorefinería bajo incertidumbre

Methodology for optimization of process integration schemes in a biorefinery under uncertainty

Meilyn González-Cortés, Yenisleidys Martínez-Martínez, Yaillet Albornas-Carvajal, Julio Pedraza-Garciga, Marlen Morales-Zamora

Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba. mgonzalez@uclv.edu.cu

Resumen

La incertidumbre tiene un gran impacto en las decisiones de inversión, operatividad de las plantas y en la factibilidad de las oportunidades de integración de procesos químicos. Este artículo, presenta los pasos a considerar para la optimización del proceso inversionista en la integración de procesos bajo condiciones de incertidumbre. Se muestra las potencialidades de la biomasa caña de azúcar para la integración de varias plantas en un esquema de biorefinería para la obtención de productos químicos, energía térmica y eléctrica. Entre las fábricas con potencialidades para esta integración se tienen las de producción de pulpa y papel y las de azúcar, ya que de las mismas se genera una variedad de productos que a la vez constituyen materias primas para otras producciones. La metodología desarrollada guía la obtención de proyectos de inversión óptimos en condiciones de incertidumbre. Como función objetivo se plantea la maximización del valor actual neto de diferentes escenarios que se generan del esquema de integración.

Palabras clave: integración de procesos, planeación de inversión, modelación basada en escenarios.

Abstract

The uncertainty has a great impact in the investment decisions, operability of the plants and in the feasibility of integration opportunities in the chemical processes. This paper, presents the steps to consider the optimization of process investment in the processes integration under conditions of uncertainty. It is shown the potentialities of the biomass cane of sugar for the integration with several plants in a biorefinery scheme for the obtaining chemical products, thermal and electric energy. Among the factories with potentialities for this integration are the pulp and paper and sugar factories and other derivative processes. These factories have common resources and also have a variety of products that can be exchanged between them so certain products generated in one of them can be raw matter in another plant. The methodology developed guide to obtaining of feasible investment projects under uncertainty. As objective function was considered the maximization of net profitable value in different scenarios that are generated from the integration scheme.

Keywords: process integration, biorefinery, pulp and paper industry, sugar cane industry, investment planning, scenario-based modelling.

INTRODUCCION

Las plantas industriales operan bajo escenarios de cambios continuos, en un ambiente en el que se presenta incertidumbre en parámetros que pueden involucrar cambios a largo plazo de aspectos tales como: precio y disponibilidad de las materias primas, productos y energía, regulaciones económicas y ambientales, así como el desarrollo tecnológico de tecnologías emergentes, como es el caso de las biorefinerías.

La industria de la caña de azúcar, así como la de pulpa y papel tiene un uso intensivo de la energía y manipulan recursos renovables como materia prima, por tanto están claramente bajo presiones para responder a estos cambios. Al mismo tiempo en las industrias hay oportunidades para reaccionar ante las condiciones de cambio debido a la experiencia y al control que los ingenieros tienen de sus procesos. El hecho de que estas industrias manipulan un recurso renovable que es fuente de recursos materiales y energéticos, hace que esas incertidumbres amplíen las posibilidades de manejar de forma exitosa las decisiones ante la competencia tecnológica, dada las disímiles posibilidades de insertarse en el mercado. Estas oportunidades no sólo incluyen los productos tradicionales como electricidad cogenerada, combustible propio, sino también transformación de las fábricas en biorefinerías para la producción de combustibles, productos químicos, biomateriales, en adición a los productos tradicionales de azúcar, pulpa y papel.

La integración de procesos para un uso eficiente de la energía y de los recursos materiales que pueden intercambiar estos procesos es un requerimiento para la factibilidad y sostenibilidad de estas tecnologías.

La incertidumbre asociada a los precios futuros de la energía es considerable, tanto la energía que se consume en los procesos existentes como aquella relacionada con

las tecnologías que se incluyen en las biorefinerías, es por esto, que de las nuevas tecnologías en el concepto de biorefinerías no se tiene ninguna en estado comercial y por eso se hace muy difícil para los inversores planear qué productos deben ser los considerados en fábricas que persigan la obtención de varios productos.

Las estrategias de integración de procesos y el concepto de biorefinerías deben considerar las oportunidades de inversiones actuales y futuras, así como las incertidumbres que afectan las decisiones de inversión. Un modelo para la optimización de la inversión que incluya de forma adecuada los cambios y parámetros inciertos, es una herramienta de valor para la identificación de decisiones de inversión robusta, es por ello que en este artículo se presentan los pasos a considerar para la optimización del proceso inversionista en la integración de procesos bajo condiciones de incertidumbre y específicamente se aplica a proyectos de investigación en dos fábricas con potencialidades para ello: una fábrica de papel y una fábrica de azúcar.

La metodología desarrollada permite guiar los proyectos de inversión óptima bajo incertidumbre. Como función objetivo se plantea la maximización del valor actual neto bajo diferentes escenarios.

FUNDAMENTACION TEORICA

En la literatura se pueden encontrar varios artículos que tratan matemática de integración de procesos bajo incertidumbre, por ejemplo [1, 2], presentan una metodología para la optimización de la inversión en la integración de procesos con incertidumbre en los precios de la energía. La metodología de optimización presentada se basa en la programación estocástica multietapa que se describe en 5 pasos, en [2], se presenta un caso de estudio donde se aplica al esquema de una biorefinería que toma como base una fábrica de pulpa y papel como proceso básico.

Durante los últimos años numerosos estudios también se han publicado sobre la síntesis óptima y evaluación de diseño de procesos de biorefinería [3,4]. Estos autores plantearon métodos de análisis de riesgo en las etapas tempranas de diseño de procesos de biorefinerías los que también han sido resumidos por [5]. Estos autores abordan la incertidumbre inherente al proceso tecnológico de los procesos que pueden generarse en un esquema de biorefinería, en los precios de las materias primas y en los productos del mercado, así como en modelos de escalado laboratorio/piloto para completar la escala de operación y disponibilidad financiera.

En estos trabajos se apunta, que especialmente las incertidumbres externas deben considerarse en las etapas tempranas de diseño [6]; y reflejan una clasificación de diferentes fuentes de incertidumbre en el diseño de procesos [7], concluyen que la consideración de la incertidumbre no es común en los problemas de diseño de procesos, y que rara vez los resultados de su consideración se tienen en cuenta explícitamente en las decisiones de diseño.

Verderame y *col.* [8], incluyen un módulo real que tiene en cuenta la incertidumbre en la demanda del producto, precios y rendimiento de la biomasa, también para el concepto de fábricas que funcionan bajo el esquema de biorefinerías. Este modelo asume precios constantes de electricidad y combustible, así como la integración de procesos a través del uso de corrientes residuales como materias primas y a través de la generación de la utilidad centralizada, es decir la utilidad que requiere la biorefinería se genera en uno sólo de los procesos que involucra el esquema de

integración.

En Sammons [9], la integración de calor para la utilización óptima de la biomasa y la energía se incluyen en el marco de la optimización de la biorefinería. La metodología de optimización propuesta en ese artículo incluye rutas de proceso y su correspondiente eficiencia económica y ambiental la cual se obtiene a través de una estrategia basada en simulaciones, experimentos e integración de procesos. El objetivo es determinar el portafolio de productos óptimos o la configuración óptima de una biorefinería que pueda constituirse en una facilidad que supla los requerimientos necesarios. Se considera la incertidumbre en aspectos tales como: precios de la energía en el mercado, productos de la biorefinería y costos de inversión de las nuevas tecnologías.

Liu y col., [10], se propone un enfoque para considerar la incertidumbre en el diseño de un sistema de poligeneración de energía. Estos autores consideraron la incertidumbre en la demanda y precios de la energía, asumiendo distribución normal, pero no consideraron esquemas a largo plazo. La incertidumbre ha ganado una atención especial en los últimos años en los problemas de optimización de cadenas de suministro de redes de biorefinerías.

Inversión en condiciones de incertidumbre

En la literatura aparecen referidas varias herramientas de modelación que pueden ser empleadas para el análisis de problemas de decisión de inversión en condiciones de incertidumbre [11,12], como ejemplo en la tabla se muestra un resumen de algunas publicaciones que abordan esta temática.

Tabla
Resumen de proyectos de inversión en condiciones de incertidumbre

Proceso	Tipo de modelo	Tipo de incertidumbre	Observaciones	Referencia
Sector de la energía regional/global	Modelación estocástica difusa inexacta	Incertidumbres que no pueden ser descritas por distribuciones de probabilidad solamente	Las incertidumbres son expresadas por conjuntos fuzzy e intervalos de valores y/o distribuciones de probabilidad	[13,14]
Sistema de absorción con enfriamiento	Programación estocástica	Costos de la energía	Proceso de conversión de energía simple. Formulación multiobjetivo: minimización de los costos esperados y del riesgo asociado	[15]
Sistema de recuperación de calor en máquinas de papel	Algoritmos evolutivos	En parámetros de procesos que asumen distribución normal	El estudio se limita a la máquina de papel más que a la fábrica de papel completa	[16]
Inversión en	Programación	En políticas climáticas en	Estudian cómo	[17]

sistemas de generación de potencia en el sector energético	estocástica	combinación con la incertidumbre de la energía en el mercado	se afecta el comportamiento de inversión de las compañías privadas.	
Inversiones en el sector industrial (eficiencia en la producción de calor y energía)	Programación estocástica	Precios de la energía	Selección de la mejor combinación para producir potencia y calor, así como el tiempo de inversión.	[18]
Tecnología para el ahorro de energía sector horticultor	Programación estocástica	Precios de la energía	Identificación de mejoras de ahorro de energía en condiciones de incertidumbre	[19]

Para el caso de las tecnologías emergentes, los costos de inversión, comúnmente son modelados a través de las llamadas curvas de aprendizaje, [20, 21].

Optimización de inversiones en condiciones de incertidumbre

Con incertidumbre, las soluciones del modelo de optimización deben proveer una vía para asegurarse de la incertidumbre y reaccionar ante resultados inesperados, que usualmente son los mejores. Esto se puede asegurar si se incorpora al modelo de optimización la incertidumbre explícitamente, y las decisiones son modeladas teniendo en cuenta ya esos parámetros.

El enfoque de opciones reales, [17], es otro método que se usa en la optimización de inversiones bajo incertidumbre, para ello se emplean modelos apropiados de decisión estructura, con decisiones hechas con informaciones imperfectas de los escenarios futuros. Otro método para la optimización bajo incertidumbre son los métodos de programación difusa, [22]; se emplean cuando no hay información disponible en las distribuciones de probabilidad de los parámetros con incertidumbre, de modo que los parámetros son modelados como números difusos.

Integración de procesos para biorefinerías eficientes

Existen varias definiciones del término biorefinería. Todas las definiciones involucran una descripción de una planta en la cual la biomasa es procesada para la obtención de uno o más productos de valor. En dependencia del contexto se consideran diferentes alimentaciones de biomasa, tecnologías y productos [23,24].

La industria de la pulpa y el papel y de la caña de azúcar son industrias que procesan biomasa para la obtención de sus producciones principales, papel y azúcar respectivamente, pero a la vez tienen claras oportunidades para la operación bajo esquemas de biorefinería, como se muestra en la figura.

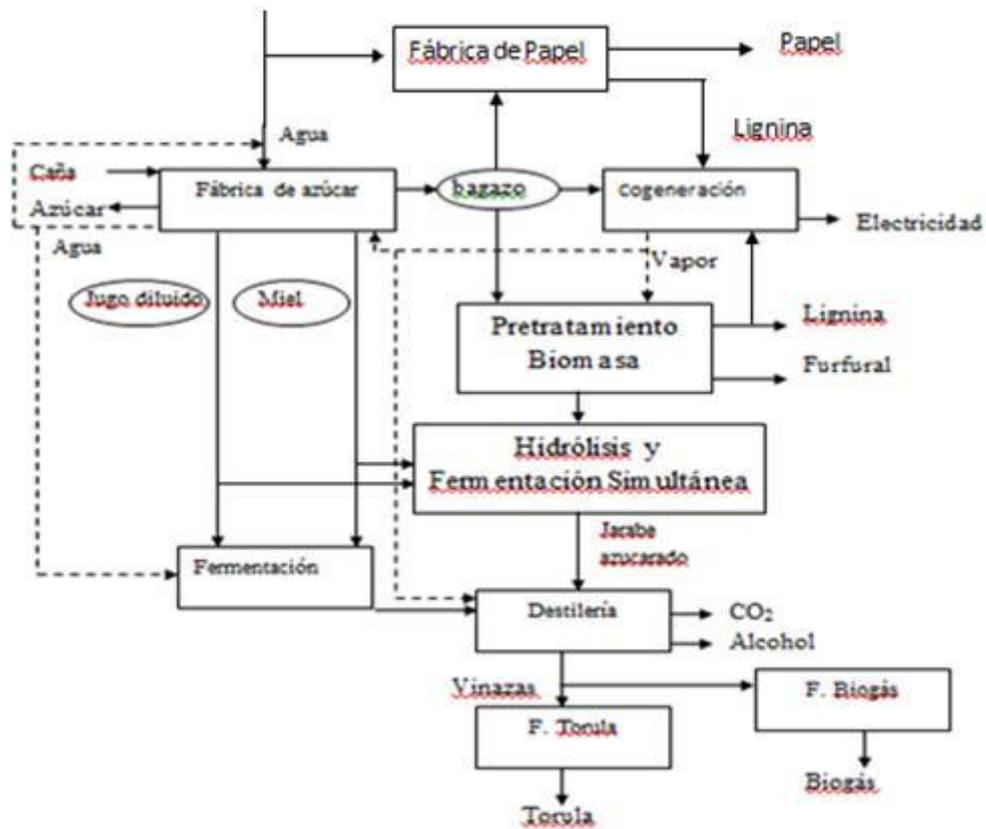


Fig. Esquema de una biorefinería a partir de una fábrica de papel y de azúcar.

Muchas de estas fábricas ya producen electricidad, para los procesos que en las mismas se desarrollan y para el sistema electroenergético. Esto constituye una vía para mejorar la eficiencia energética de las fábricas y por ende su factibilidad.

Como se muestra en la figura, tanto la fábrica de azúcar como la de papel aportan combustible, (bagazo y lignina), para la cogeneración del vapor y la electricidad necesarios en las plantas de la biorefinería. Estos combustibles a su vez son materia prima para otras producciones, por tanto se deducen escenarios de operación en función del destino de estos recursos en el esquema integrado, un análisis similar puede hacerse para otros recursos que se generan.

Es por lo anterior que la adopción del esquema de biorefinerías en este tipo de fábricas también está condicionada a la necesidad de un portafolio de productos diversificados seguido por la tendencia negativa de los precios de la pulpa, el papel y el azúcar en determinados períodos de tiempo.

Evaluación de la inversión

La función objetivo para la optimización del modelo es el valor actual neto (VAN). Este criterio de optimización económica se recomienda en los textos de análisis económico, [25, 26], y ha demostrado ser apropiado en múltiples aplicaciones de estrategia de diseño de procesos e inversiones. En Pintaric, [25], se analizó la característica del diseño óptimo de diagramas de flujos obtenido con varios objetivos económicos, y se concluyó que el VAN es el más apropiado, ya que representa un compromiso entre los criterios cuantitativos (flujos de caja grande) y criterios cualitativos (factibilidad/tiempo de retorno).

Existen otros criterios para optimizar las decisiones de inversión, entre estas se encuentra la minimización de los costos totales (costos de inversión y costos de operación), o maximización de la ganancia (diferencia entre ingresos por venta y costos), la minimización del tiempo de período de pago (costos totales dividido por el flujo de caja anual) [27].

RESULTADOS Y DISCUSION

Como se ha expresado existen varios aspectos que deben considerarse en la optimización de la integración de procesos en condiciones de incertidumbre por lo que se requiere de una metodología que guíe este proceso. La metodología tendrá los siguientes aspectos en consideración:

- Formulación de un modelo de optimización que considere:
- Objetivo económico para maximizar el valor de las tecnologías
- Inversiones necesarias para la integración de procesos e implementación de la biorefinería en los casos de estudio
- Oportunidades de inversión actuales y futuras, modelado en múltiples períodos de tiempo
- Incertidumbre en el mercado de parámetros de la energía tales como: precio, política, regulaciones ambientales
- Incertidumbre tecnológica con relación a los costos de inversión de las tecnologías emergentes

Desarrollo de modelos y metodología

Si se trata de una oportunidad para el manejo eficiente de la energía térmica, por ejemplo, los pasos que incluye la metodología deben ser desarrollados como se describen a continuación:

Paso 1. Identificación y caracterización del potencial de opciones de inversión para la integración de procesos

El objetivo de esta etapa es identificar qué oportunidades de inversión deben ser incluidas en el modelo de optimización. Esto define un conjunto de variables de inversión en el modelo.

En el modelo pueden existir dos tipos de inversión en relación al esquema energético: primero inversiones relacionadas con ahorro de calor y la segunda; tecnologías de conversión de energía. La última categoría también puede incluir las tecnologías o procesos de transformación de las fábricas en estudio en biorefinerías, por ejemplo para la producción de biocombustibles. Es importante resaltar que es fundamental que se realice un estudio previo de tamizado de tecnologías de aquellas rutas de biorefinerías prometedoras con potencialidad de ser implementadas posteriormente.

Las medidas de ahorro de calor son definidas en el modelo como inversiones de costo fijo, que resultan en una cantidad fija de calor (vapor) ahorrada. El potencial para el ahorro de energía y las oportunidades para llevar a cabo este potencial son identificados con el análisis pinch. Ejemplos de medidas de ahorro de calor incluyen mejoras en el intercambio de calor interno para la reducción de utilidades de calentamiento y enfriamiento, equipos que manipulan energía de forma más

eficiente tales como procesos de secado o procesos de separación eficiente, unidades integradas más eficientes.

Por otro lado, para las tecnologías de conversión de energía, se optimiza la capacidad en el modelo y los costos de inversión se dan como una función de tamaño. La salida de estas tecnologías son productos tales como: electricidad, calentamiento de comunidades, biocombustibles u otro tipo de biomateriales o químicos, para el cual el producto de salida es una función del flujo de vapor dado por esa tecnología. Estas tecnologías de conversión tienen potencial para generar ingresos debido al ahorro de energía, así como el incremento de exportaciones de energía y productos. Por ejemplo, en el caso de una fábrica de pulpa y papel, entre las tecnologías y procesos que pueden ser consideradas se encuentran las siguientes:

- Incremento de la generación de electricidad
- Reducción del uso de fibra virgen
- Extracción de lignina
- Extracción de hemicelulosa
- Gasificación del licor negro
- Mejoras en la conversión de la biomasa, por ejemplo: secado y peletización
- Conversión del proceso de pulpeo para la producción de etanol

Los datos necesarios para el análisis pinch para identificar las medidas de ahorro de energía, así como la identificación de las metodologías de integración de procesos con potencialidades y las del esquema de biorefinería son de suma importancia para el proceso de optimización.

Paso 2. Definición del esquema de integración de procesos en el esquema de biorefinería

La industria de la caña de azúcar y la de pulpa y papel tienen potencialidades para trabajar de forma integrada a otros procesos favoreciendo la obtención de un complejo productivo con mayor eficiencia técnica, económica y ambiental.

Un análisis en detalle de la figura muestra que de la integración del proceso de fabricación de azúcar a otros como son la producción de etanol, levadura torula, biogás, electricidad, así como otros productos que pueden generarse de los procesos antes mencionados, se pueden reducir los recursos energéticos y acuosos y lograr un mejor aprovechamiento de los recursos materiales que los mismos involucran, ya que un análisis resulta en que entre los mismos existen recursos comunes, como son el agua, la energía, la electricidad y el hecho de que productos o corrientes residuales de un proceso pueden constituir materias primas de otros. No obstante, a las potencialidades que esto ofrece a primera vista, no puede obviarse que la selección de los productos y las tecnologías para producirlos se traduce en un gran problema combinatorio; ya que se generan múltiples alternativas de integración.

Es por lo anterior, que la selección del esquema óptimo de integración en la producción de azúcar y derivados se traduce en un problema de análisis de alternativas que refuerza las barreras a la integración de procesos limitando su aplicación en los procesos productivos desechándose oportunidades de mejora en los mismos como son el aprovechamiento de recursos materiales y energéticos para la obtención de otros productos.

De aquí se deduce la necesidad de expresar con claridad las consideraciones que permitan desarrollar una metodología para lograr esquemas integrados sostenibles

con la aplicación de un procedimiento de optimización que maximice las ganancias del complejo considerando como restricciones los balances de masa y energía de los procesos individuales y entre plantas, así como parámetros con incertidumbre que impactan en la rentabilidad y viabilidad de estos esquemas.

No obstante a las oportunidades que pueden representar los procesos integrados existen inconvenientes como son qué producto o proceso debe ser el líder, hacia dónde destinar un recurso material o energético que dentro del complejo es materia prima para varios productos, y cómo esto afecta cada proceso, así como la incertidumbre en la flexibilidad del esquema integrado ante variaciones en la demanda, los precios de la materias primas y productos, entre otros.

Paso 3. Definición de escenarios para la incertidumbre en los costos y precios futuros de la energía

La entrada de datos relacionada con los precios de la energía en el mercado es considerada como un parámetro con incertidumbre y es por esto que es modelado con un enfoque basado en escenarios. La modelación de los precios de la energía en el mercado como un árbol de escenarios tiene relevante importancia. Es parte de la metodología y es lo más novedoso comparado con otros métodos para la evaluación de las inversiones en integración de procesos.

Paso 4. Desarrollo del modelo de optimización, con ajuste a las condiciones específicas de las fábricas en cuestión

Los datos de entrada necesitan incluir costos de inversión y ahorro de vapor para las medidas de ahorro de energía, así como tecnologías de conversión de energía y de biorefinería.

En el modelo, un parámetro de conversión de energía se define como la relación entre la salida del producto energía y el flujo de vapor. Este parámetro típicamente se calcula basado en datos tales como: entalpía del vapor, eficiencia de equipamiento y valores de calentamiento.

Las restricciones que expresan cómo la integración de procesos y las tecnologías de energía pueden ser combinadas constituyen una parte importante del modelo. Debido al conjunto de requerimientos para resolver la optimización, las restricciones deben ser lineales si no se quiere que el proceso se haga más complejo.

Como en el modelo de optimización base, la única incertidumbre que se incluye es la de los precios de la energía en el mercado, el objetivo será encontrar la combinación de inversiones que resulte en el mayor VAN para todos los escenarios considerados y se expresa como sigue:

$$Max NPV = -C_o + \sum_{s \in S} p_s \sum_{t=1}^T \frac{C_{t,s}}{(1+r)^t}$$

donde

Co: costo inicial de inversión

S: conjunto de todos los escenarios s, de precios de la energía en el mercado

ps: probabilidad de ocurrencia del escenario s

T: tiempo de vida de la inversión

C_t, s : flujo de caja neto en el año t para el escenario s
 r : tasa de descuento

Para este modelo se pueden plantear restricciones de igualdad y/o desigualdad tales como:

Restricciones de igualdad

- Balances de masa y energía
- Ecuaciones de modelos del proceso
- Requerimientos termodinámicos

Restricciones de desigualdad

Ambientales: (la cantidad de un contaminante se limita a cierto nivel)

Técnicas: (temperatura, presión, flujo no pueden exceder ciertos valores)

Termodinámicas: (el estado del sistema no puede violar la 2da ley)

Paso 5. Identificación del plan de inversión óptima en relación a la maximización del VAN

La solución del problema de optimización es un plan de inversión óptimo con respecto al valor esperado, VAN, basado en la información sobre el futuro que está disponible hoy. La solución además contiene la información sobre la inversión que debe ser realizada en la actualidad y más tarde en el tiempo en diferentes escenarios. La capacidad óptima de las tecnologías de conversión son también resultados del modelo así como las decisiones operacionales para cada escenario y período de tiempo.

La solución debe contener información no sólo de la inversión óptima actual, sino además, de los óptimos de inversiones futuras bajo diferentes condiciones de energía en el mercado. Sin embargo, esta información sobre las inversiones futuras sólo es válida si el conocimiento y las suposiciones actuales son correctas.

Las incertidumbres en los costos de inversión se incluyen a través de la construcción del análisis de un árbol de escenarios. Para todos los escenarios se tiene la misma inversión inicial ya que la primera decisión de inversión es hecha antes de que los precios futuros de la energía sean conocidos.

CONCLUSIONES

- Este artículo presenta una metodología de cuatro pasos para la optimización de la estrategia de inversión en la integración de procesos en condiciones de incertidumbre en procesos que se relacionan a través de un esquema de biorefinería.
- Los pasos que se incluyen en la metodología son: identificación y caracterización del potencial de opciones de inversión para la integración de procesos y biorefinerías, definición de escenarios para la incertidumbre en los costos y precios futuros de la energía, desarrollo del modelo de optimización con ajuste a las condiciones específicas de las fábricas en

cuestión y por último identificación del plan de inversión óptima en relación a la maximización del VAN.

- Del análisis realizado se concluye que un modelo para la optimización de la inversión en integración de procesos debe exponer cómo los valores de diferentes parámetros varían en el tiempo, tal es el caso de las condiciones de la energía en el mercado.

BIBLIOGRAFIA

1. SVENSSON E., *et. al.*, "An optimization methodology for identifying robust process integration investments under uncertainty". *Energy Policy*, Vol. 37, núm. 2, p. 680-685, 2009.
2. SVENSSON E., *at. al.*, "Benefits of using an optimization methodology for identifying robust process integration investments under uncertainty - A pulp mill example". *Energy Policy*, Vol. 37, núm.3, p. 813-824, 2009.
3. EL-HALWAGI M., "Design of integrated biorefineries (Ch. 21). En *Sustainable Design through Process Integration*. UK, p. 365-375, 2012.
4. KOKOSSIS A., *et. al.*, "On the use of systems technologies and a systematic approach for the synthesis and the design of future biorefineries". *Computers & Chemical Engineering*, Vol 65, núm. 9, p. 1767-1781, 2010.
5. HYTÖNEN E. *et al.*, "Biofuel production in an integrated forest biorefinery-Technology identification under uncertainty", *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, Vol 4, núm.1, p. 58-67, 2010.
6. PISTIKOPOULOS E., "Uncertainty in process design and operations.Computers planning of sustainable biorefineries". *Computers & Chemical Engineering*, 2009, Vol. 35, núm. 9, p. 1767-1781.
7. HYTÖNEN E., "Techno-economic assessment and risk analysis of biorefinery processes". Elsevier. 2011, p. 687- 679.
8. VERDERAME P., *et al.*, "Planning and scheduling under uncertainty: A review across multiple sectors". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol 49, núm. 9, p. 3993-4017, 2010.
9. SAMMONS S., "Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems". UK, p. 1376-1380, 2010.
10. LIU P. *et al.*, "Decomposition based stochastic programming approach for polygeneration energy systems design under uncertainty", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol 49, núm.7, p.3295-3305, 2010.
11. SAHINIDIS N., "Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities". *Computers & Chemical Engineering*, Vol 28, núm. 6-7, p. 971-983, 2004.
12. NEIJ L., "Costdevelopment of future technologies for power generation - A study base don experience curves and complementary bottom-up assessments". *Energy Policy*, 2004, Vol. 36, núm. 6, p. 2200-2211.

13. LI Y. *et al.*, "Energy and environmental systems planning under uncertainty- An inexact fuzzy-stochastic programming approach". *Applied Energy*, Vol 87, No.10, p. 3189-3211, 2010.
14. XIE Y. *et al.*, "An interval fixed-mix stochastic programming method for greenhouse gas mitigation in energy systems under uncertainty". *Energy*, Vol.35, No12, p. 4627-4644, 2010.
15. GEBRESLASSIE B., *et al.*, "Economic performance optimization of an absorption cooling system under uncertainty". *Applied Thermal Engineering*, Vol 29, núm. 17-18, p. 3491-3500, 2009.
16. PETTERSSON F., *et al.* "Design of robust heat recovery systems in paper machines". *Chemical Engineering and Processing*, Vol 46, núm. 10, p. 910-917, 2007.
17. DIXIT A., *et al.* *Investment under Uncertainty*. USA, 1994.
18. WICKART M., *et al.*, "Optimal technology choice and investment timing: A stochastic model of industrial cogeneration vs. heat-only production". *Energy Economics*, Vol 29, núm. 4, p. 934-952, 2007.
19. DIEDEREN P. *et al.* "Returns on investments in energy-saving technologies under energy price uncertainty in Dutch greenhouse horticulture". *Environmental and Resource Economics*, Vol. 24, núm. 4, 2003, p. 379-394.
20. MCDONALD A., *et al.* "Learning curves and technology assessment". *International Journal of Technology Management*, Vol. 23, núm. 7-8, p. 718-745, 2002.
21. FUSS S. *et al.* Fuel price and technological uncertainty in a real options model for electricity planning. *Applied Energy*, Vol 87, núm. 9, p. 2938-2944, 2010.
22. ZIMMERMANN H., "Fuzzy Set Theory and its Application", 3rd (ed.) Boston. 1996.
23. BERNTSSON T. *et al.* "What is a biorefinery?". 2010.
24. GONZÁLEZ C. *et al.* "La integración de procesos y el esquema de biorefinería". *Afinidad*, Vol. 71, No 568, p. 567- 579, 2014.
25. PINTARIC ZN. *et al.*, "Selection of the economic objective function for the optimization of process flow sheets". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 45, núm. 12, p 4222-4232, 2006.
26. OMITAOMU O., "Economic methods for comparing investment alternatives (Ch. 4)". USA, p. 61-83, 2007.
27. JACKSON J., "Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools". *Energy Policy*, Vol 38, núm. 8, p. 3865-3873, 2010.

Recibido: Septiembre 2016
Aprobado: Diciembre 2016

Meilyn González-Cortés. Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba.
mgonzalez@uclv.edu.cu