



HERRAMIENTA PARA APOYAR LA TOMA DE DECISIONES EN EL DESARROLLO DE BIORREFINERÍAS

TOOL FOR DECISION-MAKING SUPPORT IN BIOREFINERIES DEVELOPMENT

I.Y. González-Herrera¹, G. Rabasa-Olazábal², A. Pérez-Martínez^{2,3*}, E. González-Suarez⁴, E. Castro-Galiano⁵

¹IRISA/INRIA, Universidad de Rennes 1. 44 boulevard de Sévigné. C.P. 35000. Rennes, Francia.

²Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey. Carretera Circunvalación s/n entre Camino viejo de Nuevitas y Avenida 26. C.P. 74650. Camagüey.

³Departamento de Ciencia de la Tierra, Universidad Estatal Amazónica. Km 2 ½ vía Puyo a Tena (Paso Lateral). CP. 160150. Puyo, Ecuador.

⁴Centro de Análisis de Procesos, Facultad de Química-Farmacia, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km. 5 ½. C.P. 50100. Santa Clara, Cuba.

⁵Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales. Universidad de Jaén. Edificio B. Campus Las Lagunillas, C.P. 23071. C.P Jaén, España.

Recibido 12 de Junio de 2015; Aceptado 20 de Diciembre de 2015

Resumen

La sostenibilidad de la industria química constituye en la actualidad un reto. Abarca las industrias nacientes y las ya establecidas. En particular la Industria cañera requiere del rediseño de proceso, a través de la integración de procesos, en la búsqueda de la sustentabilidad y el aumento de la competitividad. Ante esta problemática se requiere para el análisis y comparación de nuevas alternativas tecnológicas para lo que es necesario el estudio del rediseño, la macrolocalización, y la utilización de indicadores dinámicos computacionales que apoyen dichas tareas. En el presente trabajo se analizan las herramientas existentes para enfrentar esta problemática enfatizando en las tecnologías computacionales. Se plantea la necesidad de adecuar los métodos a este tipo de industria, no solo integrando las herramientas existentes sino crear nuevas herramientas que permitan la tomas de decisiones automatizadas. Este análisis se realiza a través de un estudio de caso típico de la integración de la industria azucarera, en la producción de furfural, etanol and ácido cítrico los cuales generan nuevas producciones a partir de mieles, bagazo y paja de caña como materias primas. Los resultados de la optimización de este problema muestran las ventajas de integrar las fuentes de materias primas.

Palabras clave: biomasa, caña de azúcar, rediseño, herramientas computacionales, toma de decisiones, biorefinería.

Abstract

Industries integration is a promising source of sustainability. Sugar cane industry must redesign the production processes, including new emerging technologies, in order to retain the status of competitive industry. The integration is a complex process accomplish by engineers where de main problems are alternative generation and alternative comparing. Engineers must execute several subtasks like: factory *retrofit*, macro-localization, dynamic indicators computing and so on. Processes engineer is complex, so, a good computation support is needed. In this work we state that existent tools are not enough to accomplish this supporting. In this paper we analyze industrial integration like a process, composite by several decisions, executed by engineers. Useful computational technologies and methods are presented. These methods are our bricks for a tool supporting every single process engineer task. Some of the presented methods had been used previously but need to be adapted to this industry. Our approach is not only to integrate existent tools o creating new tools but automating most decision making. Finally, we show a typical case of sugar cane industry integration. In this case several modifications are needed in order to be competitive; engineers must select raw materials and technologies to use in the production of furfural, ethanol and citric acid. The technologies involved in this case can use sugar molasses, bagasse and sugar cane straw as raw material. The optimization results for this problem show the advantages of integrating several raw materials sources.

Keywords: biomass, sugar cane, *retrofit*, computational support, decision making, biorefinery.

* Autor para la correspondencia. E-mail: amaury.perez@reduc.edu.cu

1 Introducción

La sinergia entre industrias es una de las fuentes de sustentabilidad con más perspectivas. En esencia consiste en interconectar los flujos de entrada y salida de varias instalaciones industriales para lograr un mejor aprovechamiento de los materiales y la energía. Los efectos positivos de la sinergia no son solo de tipo ambiental sino también económico. El problema es que ya existen zonas industriales completas que no han sido diseñadas aprovechando las posibilidades que estas relaciones ofrecen. Dado el monto de la inversión que estas instalaciones industriales representan y la urgencia de incrementar la sustentabilidad, a la vez que se aumenta la competitividad, la opción disponible es rediseñar estas zonas industriales.

Desde el punto de vista de la ingeniería este no es un problema nuevo, de hecho los problemas de adaptación industrial son los más comunes en el área de diseño. Tradicionalmente el llamado “*retrofit*” (reconversión, adaptación, rediseño) se ha aplicado dentro de una instalación industrial para mejorar el comportamiento de la misma según alguna dimensión. Las modificaciones principales son en el equipamiento aunque también en el control de procesos, cadena de suministros u otros. El interés en esta área de investigación es producto de varios hechos:

- El nivel de sinergia actual no cubre todas las posibilidades existentes.
- Las nuevas tecnologías emergentes brindan nuevas posibilidades de sinergia, la rápida implantación de las mismas puede marcar la diferencia desde el punto de vista competitivo y ambiental.
- No existe un apoyo computacional adecuado para todas las áreas tecnológicas.

La problemática fundamental que deben enfrentar los ingenieros durante un proyecto de rediseño es el número siempre creciente de alternativas disponibles. Los ingenieros deben recuperar la información sobre las tecnologías instaladas y en base a su experiencia deben generar y evaluar las diferentes alternativas. Un problema adicional es que durante el proceso de rediseño se utilizan un grupo de diferentes herramientas de cómputo que no están bien integradas, lo que dificulta el proceso y lleva a soluciones no óptimas.

2 Características de las biorefinerías

Si es aceptada la definición de biorefinería, dada por Agencia Internacional de Energía (IEA) en la que se define la “biorefinería como la instalación donde se generan un amplio espectro de productos de interés comercial a partir de la biomasa”, se observa que el objetivo de estas instalaciones es multipropósito con el fin de lograr de forma sostenible varios productos de interés comercial.

Además, considerando la definición dada el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, (NREL) que la define como: instalaciones con el equipamiento necesario para integrar los procesos de conversión de biomasa en combustibles, energía y coproductos de valor añadido que es análoga a la definición de las refinerías de petróleo, (Huang y col., 2008).

Como se comprende, como biomasa se considera un amplio grupo de materiales de origen diverso y con características muy diferentes, que tendrán que utilizar un abanico de tecnologías de transformación en la obtención en una gama de productos ya sean biocombustibles u otros coproductos, también por ello en las biorefinerías utilizan una variedad de métodos de separación para producir coproductos de alto valor de diferentes fuentes o corrientes de alimentación, de manera que en las mismas estarán presente las etapas esenciales de :

- Procesos de fraccionamiento y extracción.
- Tecnologías de conversión sean termoquímicas o bioquímicas;
- Los procesos de separación y purificación de los productos.

No obstante, aunque el etanol representa al producto líder para el desarrollo de una biorefinería, no podemos perder de vista que en esta industria se dan o pueden darse todos los procesos tecnológicos de conversión de biomasa en productos de alto valor agregado.

3 Proceso de rediseño, adaptación o reconversión

El procedimiento para la adaptación (reconversión) se ejecuta a través de una jerarquía de decisiones:

1. Estima el límite superior de incentivo para adaptación (reconversión, rediseño).

2. Estimar el incentivo económico para reemplazar las plantas existentes usando el mismo diagrama de flujo del proceso.
3. Estimar el incentivo económico para reemplazar la plana existente usando una mejor alternativa del proceso.
4. Estimar el costo de inversiones incremental y lo ahorrado en los costos de operación con el cambio del proceso existente.
5. Refinar el cálculo de la adaptación (reconversión).

Este procedimiento puede ser adaptado sin muchos inconvenientes al rediseño de regiones industriales.

3.1 Herramientas para el apoyo

Desde una perspectiva informática se puede afirmar que un amplio grupo de herramientas para el apoyo al proceso de diseño en la industria química existe. Estas herramientas no soportan el proceso completo - por razones tanto históricas como tecnológicas y también por cuestiones de competencia entre proveedores - sino que se enfocan en un subconjunto de tareas que tratan de ir incrementando con cada nueva versión. Esto tiene como consecuencia directa que los diseñadores deben utilizar varias herramientas y por tanto manejar datos entre plataformas lo que lleva a un proceso lento y a menudo ineficiente.

El proceso de rediseño puede y necesita ser muy bien apoyado por herramientas informáticas. Consideramos como base para ello los esfuerzos de integración previos descritos en (Marquardt & Nagl, 2004; Wiesner y col., 2011).

El apoyo informático al rediseño no es una idea nueva, un enfoque interesante basado en la puede

estudiarse en (Arévalo y col., 2004; López-Arévalo y col., 2004; Arévalo, 2006). La metodología está basada en una representación multinivel del diseño de una fábrica a partir de la inversión del proceso de Douglas (1988). La representación multinivel del diseño mediante múltiples niveles permite navegar por la secuencia de razonamientos llevada a cabo por los diseñadores originales, lo que permite analizar los componentes fundamentales del diseño. De esta forma se puede inferir que secciones son susceptibles a ser cambiadas manteniendo la funcionalidad del proceso.

Sin embargo, estos trabajos, así como otros, están enfocados en el rediseño *retrofit* de fábricas y las modificaciones analizadas se concentran en el cambio de equipos y secciones de las fábricas. Hasta donde sabemos, el apoyo informático al rediseño de una región industrial, para tener en cuenta la posible sinergia, no ha sido estudiado. La concepción básica de la clase de herramienta que consideramos es dada en los diagramas de las Figuras 1 y 2.

En el diagrama de la Fig. 1 se muestra el esquema lógico del sistema. El mismo recibe como entrada los diseños y otras informaciones que describen atributos de una región industrial. Un módulo de este sistema debe ser capaz de reconocer las características fundamentales de la región industrial y realizar un proceso de abstracción del diseño para desechar información irrelevante. Este es precisamente el proceso inverso que realizan los diseñadores que suelen comenzar con un modelo abstracto que luego van refinando y especificando. De esta forma se obtiene un modelo jerárquico de la región industrial que permite analizarla a diferentes niveles de complejidad. Este modelo jerárquico sirve como entrada al siguiente bloque del sistema pues permite identificar con mayor facilidad los flujos.

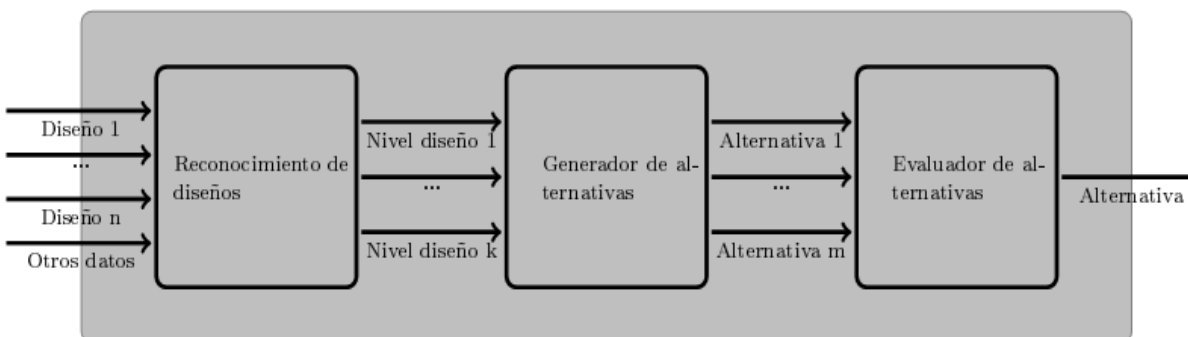


Fig. 1. Diagrama de bloques de la herramienta informática.

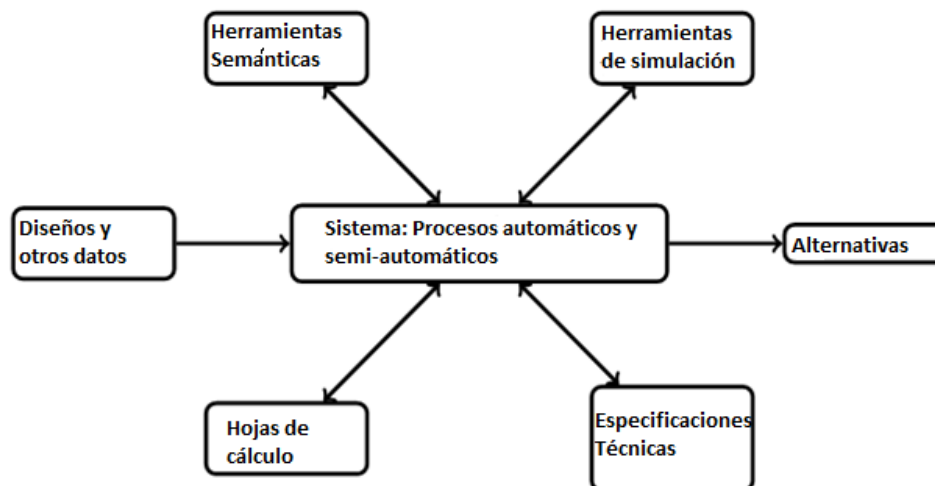


Fig. 2. Interacción con los datos y las herramientas externas.

El segundo bloque del sistema es responsable de generar alternativas. Estas alternativas pueden ser generadas utilizando gramáticas de grafos, superestructuras, razonamiento basado en casos u otros. De cualquier forma es importante ver que las alternativas pueden especificarse con diferentes niveles de detalle. Las alternativas generadas sirven como entrada al último bloque del sistema que es responsable de evaluar y elegir las mejores alternativas. Este bloque debe refinar en primero las alternativas, luego evaluar si son factibles desde una perspectiva tecnológica y económica y por último es responsable de seleccionar las mejores alternativas.

Durante el proceso de rediseño los ingenieros llevan a cabo un grupo de tareas complejas como por ejemplo la simulación de procesos químicos. Para estas tareas existen herramientas muy bien establecidas. Dada la complejidad de estas herramientas y su efectividad para realizar las tareas para las que fueron diseñadas es conveniente reutilizarlas. El diagrama de la Fig. 2 muestra la interacción de un sistema, para el apoyo al rediseño, con otros sistemas.

3.2 Representación de la información sobre tecnologías

La representación del conocimiento es un área conocida dentro de la inteligencia artificial. Consideramos que en el contexto que nos ocupa la representación de la información debe proveer la capacidad de llevar a cabo las siguientes actividades:

- Integración de herramientas.

- Inferencia usando el conocimiento.
- Uso por expertos.

Con el objetivo de utilizar el conocimiento como base para la inferencia la representación a utilizar debe ser de índole formal. A su vez, el uso con objetivos de integración, restringe las representaciones a aquellas que son generales y fácilmente extensibles (Marquardt & Nagl, 2004). Por último si se desea que la información sea utilizada directamente por expertos es conveniente la comprensibilidad de la misma.

Es fácil reconocer que una ontología formal cumple con todas estas propiedades. Una ontología es una descripción formal explícita de conceptos de un dominio de discurso, las propiedades de cada concepto describiendo sus características y las restricciones. Una ontología junta a instancias de los diferentes conceptos constituye una base de conocimientos (Noy & McGuinness, 2001; Ding y col., 2007). Una ventaja de la representación ontológica es que existen métodos para la inferencia sobre ontologías y existen herramientas de amplia distribución para el desarrollo y chequeo de ontologías. Ofrecen, adicionalmente, un modo sencillo para la "edición" del conocimiento por parte de los expertos.

En (Brandt y col., 2008; Nagl & Marquardt, 2008) consideran una ontología como la base para la integración de herramientas para el apoyo al diseño de industrias químicas. La ontología creada como parte de estos trabajos, *OntoCAPE* (Morbach y col., 2009) ofrece una base sólida para generar ontologías específicas que representen tecnologías.

Consideramos que las tecnologías pueden

ser representadas utilizando una combinación de ontologías y bases de datos. Las ontologías pueden usarse para representar las características fundamentales tales como operaciones efectuadas sobre los materiales, orden de las mismas, propiedades de las materias primas y relaciones entre diferentes tecnologías. Por otra parte, las bases de datos pueden usarse para representar los datos sobre equipamientos y materiales. Esta combinación es necesaria producto de que los métodos de inferencia no son capaces de manejar ontologías de complejidad arbitraria, así que la información menos relevante para la inferencia puede colocarse en bases de datos que ofrecen una gestión más eficiente.

3.3 Construcción de la representación multiniveles de los diseños existentes

En (López-Arévalo, Banares-Alcántara y col., 2004) se propone un método para generar la representación multinivel de un diseño. Con el objetivo construir dicha representación definen el concepto de meta-unidad. Una meta-unidad es en esencia un conjunto de unidades que tiene entradas, salidas y una función dentro del proceso químico. Estas funciones tienen una jerarquía de importancia dentro de un diseño. Esta jerarquía es la base para codificar reglas que permiten hacer la ingeniería inversa de un diseño. El proceso de ingeniería inversa parte de las unidades básicas y va construyendo, a partir del análisis de las unidades vecinas y de las propiedades de cada una, nuevas meta-unidades con funciones heredadas de estas meta-unidades básicas. De esta forma se obtiene un nuevo nivel de representación del diseño que se puede seguir abstrayendo hacia nuevas meta-unidades.

Resultados similares pueden obtenerse utilizando gramáticas de grafos y un método de reconocimiento de grafos. Dos clases de gramáticas particularmente útiles en esta área son las gramáticas de grafos y las gramáticas de forma.

El proceso inverso a la generación es el análisis. El propósito del análisis es determinar dada una sentencia y una gramática, si dicha sentencia pertenece al lenguaje generado por la gramática. En adición puede construirse durante el análisis una estructura jerárquica que representa el orden en que se deben aplicar las reglas de la gramática para generar la sentencia.

Es fácil ver el diseño de una instalación industrial como un grafo. La gramática para el análisis de los diseños puede construirse a partir de las reglas de Douglas (Douglas, 1988) y teniendo en

cuenta las características de los procesos químicos involucrados. La complejidad de esta gramática es la que determina en última instancia el algoritmo de análisis a implementar.

Este es un enfoque diferente al mostrado en (Arévalo, Martínez y col., 2004; Arévalo, 2006; López-Arévalo y col., 2007) y que brinda la ventaja adicional de chequear la integridad de los diseños presentados al sistema. Ofrece además la posibilidad de agregar información adicional a los símbolos de la gramática sin que esto conlleve a la modificación del método de construcción multiniveles del diseño.

4 Generación y evaluación de alternativas

La generación de alternativas es un proceso que debe llevarse a cabo de forma jerárquica. En primer lugar es necesario determinar los bienes que pueden producirse en base a las materias primas disponibles en la zona industrial y con las tecnologías conocidas. A continuación deben identificarse las tecnologías que ofrezcan mayores ventajas para una determinada producción. A continuación deben evaluarse los costos de implantación de una tecnología. Esto último se realiza a diferentes niveles de detalle y teniendo en cuenta los posibles procesos de rediseño (*retrofit*) necesarios en las industrias individuales.

Para la generación de las alternativas debe crearse automáticamente una superestructura que represente las alternativas viables. El modelo matemático que represente esta superestructura se puede ser creado a partir de las ontologías con un procedimiento similar al descrito en (Yang y col., 2004). Esta clase de modelos son de tipo MINLP.

A su vez la generación de los nuevos diseños puede llevarse a cabo utilizando gramáticas de grafo, aunque en este caso su uso estaría limitado a la interconexión entre industrias. Por último, sería necesario aplicar un rediseño (*retrofit*) en algunas industrias con el objetivo de modificarlas con vistas a reutilizar sus corrientes internas, los enfoques explicados con anterioridad son viables para ello.

En el proceso de generación de alternativas se debe tener en cuenta la capacidad de las instalaciones existentes (etanol) y las nuevas capacidades generadas (furfural y ácido cítrico), además de su localización con el objetivo de maximizar las ganancias. La Ec. (1) es la función objetivo donde se relacionan las ganancias generadas por cada uno de los productos.

Las ecs. (2-4) son expresiones para determinar las ganancias de cada uno de los productos bajo análisis.

La tecnología instalada para la producción de etanol es a partir de las mieles. Aunque existen se han analizado la incorporación de otras fuentes de materias primas (García-Prado y col., 2015). Se desea determinar si existe ventaja en introducir nuevas tecnologías para la producción de etanol y la producción de productos adicionales como ácido cítrico y furfural a partir de paja de caña y bagazo. La capacidad de las destilerías debe satisfacerse completamente y la capacidad y localización de las plantas de ácido cítrico y furfural está por determinarse.

La función objetivo se plantea para maximizar la ganancia:

$$G = G_{\text{etanol}} + G_{\text{furfural}} + G_{\text{ácido cítrico}} \quad (1)$$

donde:

$$G_{\text{etanol}} = \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} m_{i,d}^e (I_{me} \text{Precio}_e - CP_{me} - t_m(i,d)) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} b_{i,d}^e (I_{be} \text{Precio}_e - CP_{be} - t_b(i,d)) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} p_{i,d}^e (I_{pe} \text{Precio}_e - CP_{pe} - t_p(i,d)) \quad (2)$$

$$G_{\text{furfural}} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} b_{i,j}^f (I_{bf} \text{Precio}_f - CP_{bf} - t_b(i,j)) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} p_{i,j}^f (I_{pf} \text{Precio}_f - CP_{pf} - t_p(i,j)) \quad (3)$$

$$G_{\text{ácido cítrico}} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} m_{i,j}^a (I_{ma} \text{Precio}_a - CP_{ma} - t_m(i,j)) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} b_{i,j}^a (I_{ba} \text{Precio}_a - CP_{ba} - t_b(i,j)) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} p_{i,j}^a (I_{pa} \text{Precio}_a - CP_{pa} - t_p(i,j)) \quad (4)$$

Esta optimización está sujeta a las siguientes restricciones (ec. (5-10)). En primer lugar la materia prima que sale de un ingenio tiene que ser menor que la disponible, por tanto:

$$\sum_{d \in D} m_{i,d}^e + \sum_{j \in I} m_{i,j}^a \leq Miel_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{d \in D} b_{i,d}^e + \sum_{j \in I} b_{i,j}^a + \sum_{j \in I} b_{i,j}^f \leq Bagazo_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{d \in D} p_{i,d}^e + \sum_{j \in I} p_{i,j}^a + \sum_{j \in I} p_{i,j}^f \leq Paja_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

Adicionalmente, debe satisfacerse la demanda de materia prima para la producción de etanol puesto que las plantas ya están instaladas (Ec. 8)

$$\sum_{i \in I} m_{i,d}^e + IE_{bm} \sum_{i \in I} b_{i,d}^e + IE_{pm} \sum_{i \in I} p_{i,d}^e = Demanda_d \quad \forall d \in D \quad (8)$$

Se debe calcular también la capacidad de las plantas de furfural y ácido cítrico, para ello se utilizan las Ec (9 y 10)

$$I_{bf} \sum_{i \in I} b_{i,j}^f + I_{pf} \sum_{i \in I} p_{i,j}^f = F_j CF_j \quad \forall j \in I \quad (9)$$

$$I_{ma} \sum_{i \in I} m_{i,j}^a + I_{ba} \sum_{i \in I} b_{i,j}^a + I_{pa} \sum_{i \in I} p_{i,j}^a = A_j CA_j \quad \forall j \in I \quad (10)$$

4.1 Reutilización de herramientas existentes

Durante el proceso de rediseño un número significativo de tareas son llevadas a cabo con la asistencia de herramientas de cómputo. Entre las herramientas fundamentales se encuentran los simuladores de procesos, las herramientas de dibujo de flujo, las bases de datos sobre de propiedades físico-químicas, las bases de datos sobre equipamientos, las hojas de cálculo y los paquetes de optimización. El problema con el uso de estas herramientas es que son de diferentes proveedores por lo que utilizan interfaces diferentes. Esto complica el proceso de rediseño y lo hace ineficiente.

El problema de la integración de herramientas ha sido abordado por los proyectos (Marquardt & Nagl, 2004). La decisión de integrar las herramientas desarrolladas está basada en el costo de desarrollo de los sistemas individuales.

Con el objetivo de desarrollar herramientas de apoyo al rediseño, la integración de varias herramientas centrada en la información es aplicable. Este enfoque garantiza ciclos de desarrollos cortos a la vez que se obtienen sistemas de calidad. Como parte del desarrollo se deben construir paquetes que gestión las tareas propias de rediseño como la generación de alternativas y la creación de la representación multiniveles de un diseño.

Tabla 1. Disponibilidad de materias primas en las fábricas de azúcar.

Fábrica de azúcar	Miel disponible (t/a)	Bagazo disponible (t/a)	Paja de caña disponible (t/a)
A	144 281	286 199	1 497 675
B	124 233	201 781	1 289 577
C	28 248	42 188	293 229
D	23 996	39 862	249 087
G	77 152	125 311	800 862

Tabla 2. Capacidades ociosas en las destilerías.

Destilería	A	B1	B2	C	D	E
Capacidad (L/a)	63 146	38 892	237 939	27 279	238 791	122 807

Tabla 3. Vinculación materias primas por tipo de producción. Los valores están dados en Miles de toneladas.

Instalación de Derivados	Fábrica de Azúcar A			Fábrica de Azúcar B			Fábrica de Azúcar C			Fábrica de Azúcar D			Fábrica de Azúcar G			
	M	B	P	M	B	P	M	B	P	M	B	P	M	B	P	
Destilería A			135.0													
Destilería B1						83.2										
Destilería B2						508.9										
Destilería C									58.3							
Destilería D									234.8	26.62	249.1					
Destilería E																262.7
Cítricos A			844.7													
Cítricos B						697.4										
Cítricos C								42.2								
Cítricos D											13.2					
Cítricos G																113.3
Furfural A		286.2														
Furfural B					201.8											

5 Aprovechamiento integral de la caña de azúcar para instalaciones industriales de productos químicos

Una de los problemas más apremiantes en el desarrollo de biorefinerías es decidir las tecnologías que se empleen en las inversiones que se ejecuten en una zona industrial determinada. En el problema está presente que normalmente las producciones que utilizan la biomasa como fuente de productos químicos y energía son de escala regional debido a los altos costos de transportación de las materias primas y las limitaciones en la demanda de los productos. Por otro lado, muchas veces las materias primas son las mismas para diversos productos y las tecnologías son emergentes para nuevos productos.

En el caso de estudio, se tiene una zona industrial donde existen varias fábricas de azúcar con disponibilidades materias primas (miel, bagazo y paja de caña), Tabla 1, producto de la utilización integral de la caña de azúcar.

En la zona industrial están instaladas varias destilerías que no aprovechan totalmente su capacidad por falta de materias primas. En la Tabla 2 se observan las capacidades de cada una de ellas.

Como resultado de la optimización de la Ec. (1) se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3. La utilización de la paja de caña demuestra que se puede recuperar la producción de etanol en las capacidades de etanol instaladas y la generación de nuevas capacidades para producir ácido cítrico y furfural. Con la utilización de las tres fuentes de materias primas y las cantidades que se muestran permiten lograr la diversificación de cada una de las fábricas de azúcar.

Conclusiones

Aunque son muchas las posibilidades de uso de la biomasa, como materia prima para la obtención de productos químicos y energía, la aplicación de la Estrategia de Procesos con apoyo de las modernas herramientas de computo permite evaluar con precisión las mejores alternativas de transformación de una fábrica de azúcar, incluso ya diversificada en biorefinerías.

Debido al gran número de factores que se requieren considerar en la aplicación de la Estrategia de Procesos es necesario intensificar los estudios de simulación de tecnologías ya consolidadas y emergentes de utilización de la biomasa como fuente de productos químicos y energía, así como en la utilización adecuada y combinada de las herramientas de computo modernas, asimilando los software existentes, elaborando otros complementarios y estructurando adecuadamente la arquitectura del software de un software con esta aplicación.

Nomenclatura

G	ganancia total, USD/ año
G_{etanol} , G_{furfural} , $G_{\text{ácido cítrico}}$	ganancia por la producción de etanol, furfural, ácido cítrico, USD/a
me, ma	miel utilizada para producir etanol y ácido cítrico, t/a
be, bf, baa	bagazo para etanol, furfural y ácido cítrico, t/a
pe, pf, pa	paja de caña total utilizada para producir para etanol, furfural y ácido cítrico, t/a
CPme, CPbe, CPpe	costo de producción de etanol de miel, bagazo y paja de caña, USD/a
CPfb, CPpf	costo de producción de furfural de bagazo y paja de caña, USD/a
CPma, CPba, CPpa	costo de producción de ácido cítrico de miel, bagazo y paja de caña, USD/a
tm, tb, tp (i,d)	costo de transportación de miel, bagazo y paja de caña desde i hasta d, USD/a
tm (i,d), tb (i,d), tp (i,d)	costo de transportación de miel, bagazo y paja de caña desde i hasta d, USD/a
Precio _e , Precio _f , Precio _a	precio del etanol, furfural y ácido cítrico en el mercado, USD/L

Ima, Iba, Ipa	cantidad de producción de ácido cítrico de miel, bagazo y paja de caña, t/a
Ibf, Ipf	cantidad de producción de furfural de bagazo y paja de caña, t/a
Ime, Ibe, Ipe	cantidad de producción de etanol de miel, bagazo y paja de caña, L/a
Mieli, Bagazoi, Pajai	miel, bagazo y paja total disponible, t/a
Fj, Aj	variable para la inclusión de instalaciones del furfural y ácido cítrico, unidades en números enteros
IEbm, IEpm	índice de equivalencia de bagazo y paja de caña como miel para etanol, fracción
CFj, CAj	capacidad de producción de furfural y ácido cítrico al año, t/a

Referencias

- Arévalo, I.L. (2006). *Redesign support framework for complex technical processes*. Universitat Politècnica de Catalunya,
- Arévalo, I.L., Martínez, A.R., Alcántara, R.B. y Aldea, A. (2004). Aplicación de ontologías en el *retrofit* de procesos químicos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 3, 35.
- Brandt, S.C., Morbach, J., Miatidis, M., Theißen, M., Jarke, M. y Marquardt, W. (2008). An ontology-based approach to knowledge management in design processes. *Computers and Chemical Engineering* 32, 320.
- Ding, L., Kolari, P., Ding, Z. y Avancha, S. (2007) Using ontologies in the semantic web: A survey. En: *Ontologies*, Pp. 79. Springer.
- Douglas, J.M. (1988). *Conceptual design of chemical processes* McGraw-Hill New York.
- García-Prado, R., Perez-Martínez, A., Dieguez Santana, K., Mesa-Garriga, L., González-Herrera, I., González-Cortés, M. y González-Suarez, E. (2015). Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia* 75, 130.
- Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U.W. y Ramarao, B.V. (2008). A review of separation

- technologies in current and future biorefineries. *Separation and Purification Technology* 62, 1.
- López-Arévalo, I., Banares-Alcántara, R. y Aldea, A. (2004). Multi-model knowledge representation in the retrofit of processes. *Computers & Chemical Engineering* 28, 781.
- López-Arévalo, I., Banares-Alcántara, R., Aldea, A. y Rodríguez-Martínez, A. (2007). A hierarchical approach for the redesign of chemical processes. *Knowledge and Information Systems* 12, 169.
- Marquardt, W. y Nagl, M. (2004). Workflow and information centered support of design processes-the improve perspective. *Computers & Chemical Engineering* 29, 65.
- Morbach, J., Wiesner, A. y Marquardt, W. (2009). Ontocape-a (re) usable ontology for computer-aided process engineering. *Computers & Chemical Engineering* 33, 1546.
- Nagl, M. y Marquardt, W. (2008). *Collaborative and Distributed Chemical Engineering. From Understanding to Substantial Design Process Support: Results of the Improve Project*. Springer Science & Business Media,
- Noy, N.F. y McGuinness, D.L. (2001) Ontology development 101: A guide to creating your first ontology. Stanford knowledge systems laboratory technical report KSL-01-05 and Stanford medical informatics technical report SMI-2001-0880.
- Wiesner, A., Morbach, J. y Marquardt, W. (2011). Information integration in chemical process engineering based on semantic technologies. *Computers & Chemical Engineering* 35, 692.
- Yang, A., Marquardt, W. y Morbach, J. (2004). *From conceptualization to model generation: The roles of ontologies in process modeling* LPT, RWTH,