

OPTIMIZACIÓN DEL ESQUEMA DE BIOREFINERÍA PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS PRODUCCIONES DE AZÚCAR Y DERIVADOS.

OPTIMIZATION OF THE SCHEME OF BIOREFINERY FOR THE INTEGRATION OF THE PRODUCTIONS OF SUGAR AND DERIVED.

Dennis A. Clavelo Sierra¹, Meilyn González Cortés², Rubén Espinosa Pedraja².

¹Empresa de Ingeniería de Proyectos Azucareros. dennis.clavelo@iprojazvc.azcuba.cu

En el presente trabajo se realizó la síntesis y optimización de un esquema para la integración de los procesos de azúcar y otros productos derivados, con el propósito de lograr procesos eficientes con costos de operación e inversión mínimos considerando como insumo básico la caña de azúcar. Todo esto condujo al planteamiento de estos procesos en un esquema de biorefinería.

Se realizaron balances de masa y energía en todos los procesos involucrados en el esquema integrado. Se determinó el consumo mínimo de utilidades en cada una de las plantas a través del análisis Pinch.

Por último se modelaron todas las plantas que incluyen el esquema de biorefinería en el software GAMS planteándose como función objetivo la maximización de la ganancia, lo cual condujo a la obtención del esquema de integración óptima. A partir del mismo se evaluaron seis escenarios que incluyeron variaciones en los precios, plantas fuera de funcionamiento, escenarios para tiempo de no zafra, entre otros parámetros.

Como resultado se obtuvo la factibilidad económica en el escenario que considera los mayores precios para los productos, otros escenarios como el que no incluye la planta de hidrolizado de bagazo no resultó factible. Además se realiza un análisis de sensibilidad para los precios de la caña de azúcar y la capacidad de la planta de alcohol en tiempo de no zafra.

En la síntesis del esquema de biorefinería las potencialidades de intercambio de recursos identificadas fueron: las mieles, jugos primarios y secundarios, bagazo, hidrolizado de bagazo, vinazas, agua, así como los recursos energéticos de electricidad y vapor.

La aplicación de la tecnología Pinch resultó en elevados sobreconsumos de utilidades calientes siendo concentrados en los procesos de azúcar, seguido por el proceso de destilación obteniéndose las mayores potencialidades para el ahorro de energía en el proceso de producción de azúcar.

Palabras clave: optimización, biorefinería, integración, síntesis, azúcar.

Key words: optimization, biorefinery, integration, synthesis, sugar

Introducción

La industria de la caña de azúcar tiene potencialidades para trabajar de forma integrada a otros procesos y si esta integración se realiza de forma adecuada puede resultar en un complejo productivo con mayor eficiencia técnica, económica y ambiental.

Con la integración del proceso de fabricación de azúcar a otros como son: la producción papel, etanol, levadura torula, furfural, lignina, electricidad, entre otros; se puede lograr un mejor aprovechamiento de los recursos materiales y energéticos que los mismos intercambian, ya que entre ellos existen recursos comunes, como son el agua, la energía, la electricidad, así como productos o corrientes residuales de un proceso, constituyen materias primas de otros.

Independientemente de las potencialidades que esta integración ofrece a primera vista, no puede obviarse que la selección de los productos y las tecnologías para producirlos, se traduce en un problema combinatorio del cual pueden generarse múltiples escenarios. En los últimos años, a la posibilidad de que varios procesos tecnológicos se puedan integrar y que se utilice biomasa como materia prima, en la obtención de productos químicos y energía, se le ha llamado Bio-Refinería. En la literatura pueden encontrarse numerosos artículos que abordan esta cuestión.

Atendiendo a lo anterior y al hecho de que en la industria de la caña de azúcar se procesa caña y se pueden obtener además de azúcar, múltiples productos; se pueden extrapolar los estudios citados al caso de la industria azucarera. El método se basa en una representación estructural de especies químicas y operadores de conversión que los relacionan. Se desarrolla un enfoque de optimización para seleccionar e identificar la configuración óptima para varias rutas de tecnologías usando datos simples.

Un aspecto que distingue la síntesis de procesos en un esquema de Bio-Refinería, es que para suplir el consumo de vapor se optimiza el esquema integrado en cuanto al consumo de utilidades y en base a ello se diseña un esquema de cogeneración que satisfaga los requerimientos de vapor y electricidad. Este análisis además está en correspondencia con la nueva realidad, que prevé vender excedentes de electricidad por las fábricas así como lograr excedentes de bagazo para su empleo como materia prima en otros procesos, por lo que se requiere buscar un compromiso entre estos factores (bagazo para obtención de otros productos, (etanol, furfural, lignina) o bagazo para producción de electricidad).

Como se explicó anteriormente, 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. También en el análisis debe considerarse la incertidumbre en la flexibilidad del esquema integrado antes variaciones en la demanda, los precios de las materias primas y productos, entre otros. Por tanto, cualquier esquema integrado que se diseñe debe tener en cuenta estos aspectos.

Este trabajo tuvo como propósito principal optimizar en condiciones de incertidumbre un esquema de biorefinería para la integración del proceso de obtención de azúcar y otros productos derivados.

Materiales y métodos

Como primer paso se estudiaron tecnológicamente los procesos involucrados en el caso de estudio para la identificación de las potencialidades materiales y energéticas de intercambio de recursos entre los procesos El-Halwagi (1997). De este análisis se obtuvo que en la producción de azúcar y derivados existen oportunidades de integración entre procesos que se traducen en un problema combinatorio del que se derivan escenarios de funcionamiento bajo un esquema de Biorefinería con incertidumbre tecnológica y económica. (El-Halwagi, 2013), (Furlan, 2012), (Kamm, 2004).

Consideraciones para la síntesis del esquema de Biorefinería a partir de la caña de azúcar.

La industria de la caña de azúcar tiene potencialidades para trabajar de forma integrada a otros procesos favoreciendo la obtención de un complejo productivo con mayor eficiencia técnica, económica y ambiental. Dunn, R y H. Wenzel (2001), Bao, B y A. El-Halwagi (2010)

Un aspecto que distingue este estudio es que para suplir el consumo de vapor del complejo integrado, en primer lugar se optimiza el esquema en cuanto al consumo de utilidades calientes y en base a ello se

dan pautas sobre las características generales que debe tener el esquema de cogeneración para satisfacer los requerimientos de vapor y electricidad. Pham, V. y M. El-Halwagi, (2011)

Este análisis se realiza con el objetivo de tener en cuenta la nueva realidad, que prevé vender excedentes de electricidad por las fábricas así como el empleo del bagazo como materia prima para otros procesos, por lo que se requiere buscar un compromiso entre estos factores (bagazo para obtención de otros productos, (etanol, furfural, lignina) o bagazo para producción de electricidad).

Como se explicó anteriormente, 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.

El estudio debe incluir el análisis detallado de los procesos, así como un estudio de sensibilidad para las diferentes producciones atendiendo a los precios de los mismos en el mercado internacional. El análisis debe considerar los siguientes aspectos:

1. Estudiar tecnológicamente los procesos involucrados en el caso de estudio.
2. Identificar las potencialidades materiales y energéticas de intercambio de recursos en los procesos de estudio.
3. Plantear el modelo de optimización para la obtención de la alternativa de integración óptima que incluya la valoración económica.
4. Proponer el esquema óptimo de integración de agua y energía de los procesos individuales como un sitio total.

Como primer paso se realizó un análisis global de los procesos, materias primas y productos con potencialidades de incluirse en un estudio de este tipo, los que se resumen en la tabla que se muestra a continuación. Las E y las S en cada fábrica, significan si el producto entra o sale del proceso respectivamente, y se pueden obtener de los balances de masa y energía.

(*S): Depende de balance de energía en cada planta y se refiere a la necesidad de generación de vapor de la caldera instalada en la planta en cuestión.

Tabla 1: Potencialidades de procesos y productos para la integración en un sitio total.

Corrientes (i)	Procesos, (j)								
	Azúcar	Alcohol 1G	Alcohol 2G	Caldera	P. Eléctrica	Torula	Biogás	Papel	Refinería de azúcar
Caña	E	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	E, S	E	E	E	-	E	-	E, S	-
Bagazo	S	-	E	E	-	-	-	E	-
Azúcar	S	-	-	-	-	-	-	-	E
Miel	S	E	-	-	-	E	-	-	-
Jugo Diluido	S	E	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂	-	S	-	-	-	-	-	-	-
Alcohol	-	E, S	E, S	-	-	-	-	E, S	-
Vinaza	-	E, S	S	-	-	E	E	-	-
Papel	-	-	-	-	-	-	-	S	-
Papel Reciclad	-	-	-	-	-	-	-	E	-
Vapor	E, S	E, (*S)	E	S	E	E (*S)	-	E (*S)	E (*S)
Electricidad	E	E	-	-	-	E	E	E	E

Torula	-	-	-	-	-	S	-	-	-
Lignina	-	-	S	E	-	-	-	S	-
Furfural	-	-	S	-	-	-	-	-	-
Azúcar Refino	-	-	-	-	-	-	-	-	S

Como se puede apreciar, se identifican 8 procesos de los que salen o entran 18 corrientes con potencialidades de aprovechamiento y que pueden entrar o salir a más de un proceso tecnológico. Es por esto que pueden generarse un grupo considerable de esquemas para el intercambio de recursos ya sean materiales y/o energéticos, lo que da muestra de la complejidad del estudio.

En este trabajo se considerarán sólo algunos procesos y productos para ejemplificar el enfoque. No obstante, la formulación del problema será general y sistemática y por tanto se podrá extender hacia otras oportunidades. En este trabajo se toma como caso de estudio el esquema de Biorefinería que se presenta en la figura 9, donde se pueden apreciar las corrientes y procesos que se incluirán en el estudio.

En este esquema la caña de azúcar constituye el insumo básico o sea que es la materia prima principal en este complejo y a partir de su procesamiento se derivan varios productos.

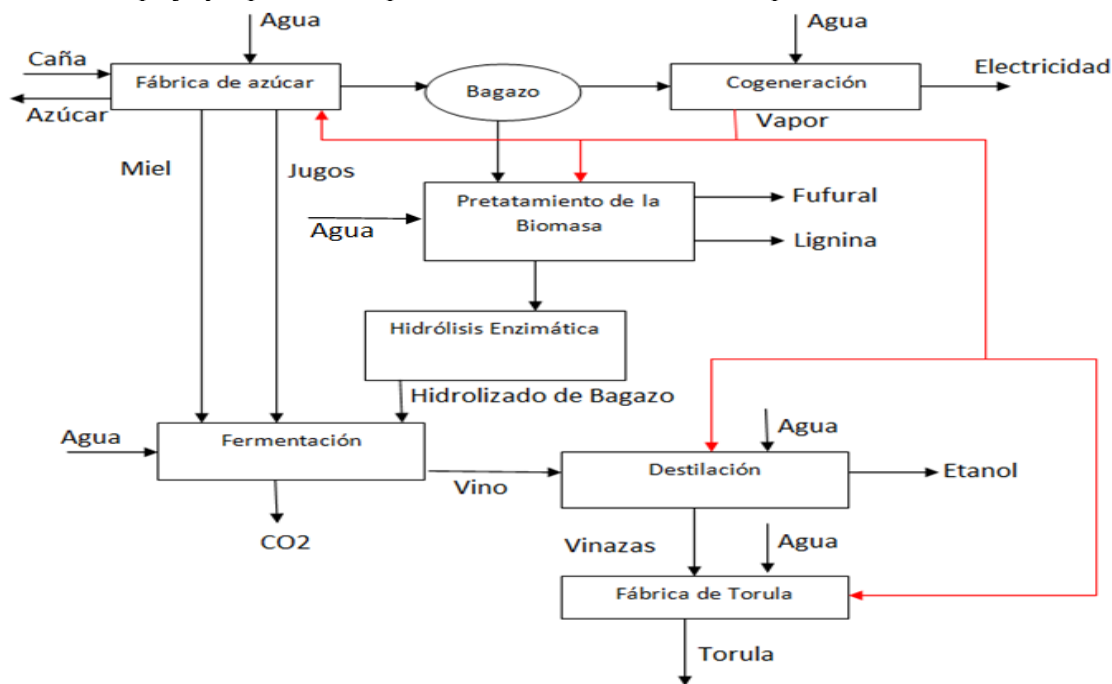


Figura 1. Esquema de Biorefinería a partir de caña de azúcar

En la fábrica de azúcar se produce como producto principal el azúcar, también se obtienen otros subproductos como la miel, jugo diluido y bagazo. Estos dos primeros son enviados directamente a la destilería y el último es utilizado en la cogeneración para la obtención de vapor y/o electricidad y así abastecer todas las producciones.

También el bagazo puede ser utilizado en la elaboración de alcohol, para ello es sometido a un pretratamiento en dos etapas en donde se generan la lignina y el furfural, productos de alto valor agregado, para los cuales en la literatura se reportan varios usos, (Albernas Y., 2012), (Albernas Y., 2013). Una vez que el bagazo ha sido pretratado se somete a la etapa de hidrólisis y fermentación para incorporarse a la destilación junto a los sustratos de jugos y miel con el objetivo de obtener etanol y otros compuestos como el CO₂ y las vinazas; estas últimas pueden utilizarse en los procesos de obtención de torula y/o biogás.

A continuación se expresan los elementos a considerar Para la obtención de un esquema de Biorefinería a partir de la caña de azúcar:

- Con la descripción tecnológica de los procesos involucrados que son: producción de azúcar, cogeneración, alcohol de primera y segunda generación, torula y biogás; es posible obtener una caracterización en cuanto al consumo de materiales y energía de los procesos mencionados, identificar las etapas críticas, entre otros aspectos.
- Al identificar las potencialidades materiales y energéticas de intercambio de recursos; se obtienen diferentes escenarios de productos y procesos, por ejemplo: en el primer caso las mieles y el jugo que produce el central son utilizados posteriormente en la producción de etanol (que en este caso sería el de primera generación), puede ser complementado con el de segunda generación logrando con esto un aumento en la disponibilidad del sustrato azucarado. Otra potencialidad material sería el empleo de las vinazas que se generan como residual en el proceso de alcohol para la fabricación de torula y/o biogás.

En relación a las potencialidades energéticas, la fábrica de azúcar con su sistema de cogeneración abastecería de vapor y electricidad a los demás procesos con miras a un ahorro con factibilidad económica y energética.

- En la identificación de los productos y coproductos con potencialidad de obtenerse en los procesos de estudio se tienen: azúcar, mieles, jugos diluidos, bagazo, furfural, lignina, alcohol, CO₂, vinazas, biogás y torula.
- Integración material y energética de los procesos individuales (agua y energía); con la aplicación de la misma se garantiza que los procesos tengan el consumo de utilidades mínimo. La extensión de este análisis al recurso agua, también condicionará un consumo mínimo de este recurso para las plantas por separado y para el esquema integrado.
- Planteamiento del modelo de optimización para la obtención de la alternativa de integración óptima; el modelo de optimización se planteará en función de la maximización de las ganancias del proceso, sujeto a restricciones de balances de masa y energía, restricciones para la consideración de los parámetros con incertidumbre que caracterizan el modelo.
- Planteamiento de alternativas de integración material y energética en el sitio total: se analizan los resultados del modelo e identifican los escenarios más probables para las condiciones evaluadas (incertidumbre en demandas y precios de materias primas y productos; períodos de trabajo (zafra o no zafra), entre otros.

Modelación y Optimización del complejo de Biorefinería a partir de la caña de azúcar

Una vez realizados los cálculos para determinar las corrientes de los procesos de fabricación de azúcar y procesos derivados incluidos en la Biorefinería, se procede a realizar la modelación y optimización del esquema seleccionado. Pham y El-Halwagi (2012), (Bao, 2011).

Para la modelación del esquema se utiliza el Software Profesional: General Algebraic Modeling System, (GAMS) versión 23.5, aplicando el Solver CONOPT, especializado en la programación no lineal, con un conjunto de restricciones del problema global de optimización. Este solver fue seleccionado por su eficiencia, rapidez en las respuestas y adecuación para el tipo de modelo que se formula en este trabajo.

Para la formulación del modelo de las plantas se utilizan ecuaciones que relacionan las variables de entrada al proceso con variables de salida, (Grossmann, 2010), esto se hace a través de índices obtenidos en los balances de masa y energía realizados en cada una de las plantas, lo que conduce a ecuaciones de tipo lineal y no lineal.

Como función objetivo se decidió maximizar la ganancia del esquema de Biorefinería, sujeto a restricciones de balance de masa y energía a través de los cuales se estiman las disponibilidades, las

demandas de recursos tanto materiales como energéticos y los niveles de producción de los productos con potencialidades de obtenerse en el esquema.

Una vez desarrollado el modelo se plantean otras correlaciones para el análisis de escenarios que permitan constatar la flexibilidad del complejo integrado.

El modelo formulado en GAMS está constituido por 38 ecuaciones, 49 variables, 113 restricciones que no son cero y 16 restricciones no lineales que no son cero. Se modelaron las siguientes plantas: azúcar, que en la modelación se dividió en planta de molienda y planta de fabricación de azúcar; cogeneración; fermentación de alcohol, hidrolizado de bagazo, destilación y torula.

Resultados y discusión

Una vez que se han estimado los costos de las inversiones requeridas en las plantas que constituyen el esquema de Biorefinería se procede a evaluar diferentes escenarios de operación. Los escenarios definidos se reflejan en la siguiente tabla, a continuación de la tabla se detallan algunas de las consideraciones planteadas en los mismos.

Tabla 2. Escenarios de Biorefinería evaluados

	Escenario 1 Sin incluir la planta de hidrolizado	Escenari o 2 Plantas integradas	Escenario 3 precio del azúcar 350\$/t y etanol 55\$/HL	Escenario 4 Precio del etanol 88 \$/HL y azúcar 720\$/t	Escenario 5 precio de la caña 112 \$/t	Escena rio 6 No záfra
Variables	Nivel Optimo 1 (Infactible)	Nivel Optimo 2(Factible)	Nivel Optimo 3(Infactible)	Nivel Optimo 4(Factible)	Nivel Optimo 5 (Factible)	Nivel Optimo 6 (Factible)
Ingreso por venta \$/a	50998000	54980000	18840000	57396000	54980000	93785000
Flujo de azúcar planta de azúcar t/d	113,76	106,08	40,56	106,32	105,6	0
Flujo electricidad planta eléctrica KW- h	64,51	52,23	11,86	52,23	52,23	42,33
Flujo de etanol planta de destilación hL/d	791,04	838,8	297,12	838,8	838,8	1992
Flujo de miel planta de azúcar t/d	72,24	65,28	24,96	65,28	65,28	0

Flujo de jugo mezcla planta de fermentación t/d	4163,76	3198,24	1091,52	3198,24	3198,24	0
Flujo de hidrolizado planta de fermentación t/d		72	72	72	72	72
Electricidad exportada KW-h	0	0	0	0	0	42,41
Flujo de torula planta torula t/d	439,68	442,8	156,7	442,8	442,8	597,6
Flujo de bagazo importado t/d	0	0	0	0	0	700,8
Flujo de miel importada t /d	0	0	0	0	0	240
G \$/a	-	3983400	-	6399500	285530	61614,52

Escenario 1: Es considerado un complejo de Biorefinería partiendo como proceso principal de la fábrica de azúcar integrada a una planta de etanol de primera generación y una fábrica de torula sin la inclusión del etanol de segunda generación. Esto implica que disminuya la producción de etanol porque no se ingresa el sustrato de hidrolizado a la planta de fermentación y a la vez la de torula ya que esto conlleva a minimizar estos productos y maximizar de producción de azúcar.

Escenario 2: Es considerado un complejo de Biorefinería que tiene como proceso principal la fábrica de azúcar integrada a la planta de etanol de primera generación y la fábrica de torula con la inclusión del etanol de segunda generación al ocurrir esto se maximiza la producción de etanol y torula con precios de venta de productos, el azúcar de 720 \$/t, etanol 72 \$/hl, furfural 1800 \$/t, torula 584,25 \$/t y electricidad 0,18 \$/KW.

Escenario 3: El mismo complejo que en el escenario 2, pero con la disminución en el precio del azúcar a 350 \$/t y etanol de 55 \$/hl manteniendo constante los demás productos.

Escenario 4: En este caso se tomó como valor máximo el precio del etanol manteniendo constante los demás precios.

Escenario 5: Considera la variación en los precios de la materia prima caña de azúcar como insumo básico.

Escenario 6: Tiempo de no zafra con funcionamientos de las plantas de etanol, torula y hidrolizado de bagazo.

Atendiendo a los resultados mostrados en la tabla anterior donde se reflejan los parámetros fundamentales de cada escenario se tiene que:

- En el primer escenario en donde no se incluye la planta de hidrolizado de bagazo solo las plantas de azúcar, etanol, torula, no se reportan resultados de factibilidad económica debido a la disminución de la producción de etanol al no tener la inclusión de un sustrato y a la no incorporación de un producto producido en esta planta como el furfural con un alto valor agregado y elevado precio de venta, dando por esas razones la no obtención de ganancia en el complejo integrado.
- El escenario dos con la incorporación de todas las plantas trabajando como complejo integrado de Biorefinería reportando un valor óptimo para una ganancia de 3983400 \$/a.
- En el escenario tres se evalúa el modelo con los valores mínimos de los precios de los productos de azúcar y etanol reportados en el mercado, resultando valores de infactibilidad, por lo que se comprueba la importancia de considerar la incertidumbre en el precios de los productos ya que para algunos de ellos puede ser no rentable este complejo.
- En el caso del escenario cuatro en donde los valores del precio del etanol está en su nivel máximo, de acuerdo a lo reportado en el mercado, se tienen resultados de factibilidad con un valor de 6399500 \$/a siendo esta la mayor ganancia de todos los escenarios evaluados.
- En el escenario cinco se consideró la incertidumbre en el costo del insumo básico para el caso de estudio la caña de azúcar, se evaluó hasta donde resultaba factible el complejo con el aumento del precio de este insumo reportando un valor límite de 112 \$/t para valores superiores, el complejo no es factible.
- El escenario seis para tiempo de no zafra en donde no incluye la planta de azúcar es decir la no incorporación de jugos a la etapa de fermentación y sin suministrarle bagazo a la planta eléctrica y de hidrolizado sin la inclusión del azúcar como producto en la ecuación de ingresos por venta. Para este caso la materia prima con que trabaja el complejo sería bagazo importado y de acuerdo a lo que determine el programa será demandado para la generación de vapor y electricidad y para la obtención de alcohol. También se importan mieles para las necesidades del complejo reportando una ganancia de 61614,52 \$/a.

Analizando estos seis escenarios se puede constatar que en el caso de estudio el proceso es operable sólo en algunos escenarios, por ende es parcialmente flexible.

En el siguiente diagrama se representan los valores óptimos de las variables en el complejo de Biorefinería correspondientes al escenario 2. Se puede apreciar que el esquema incluye las producciones de azúcar, etanol, hidrolizado de bagazo, torula, electricidad, vapor y la venta de los productos como azúcar, etanol, furfural y torula. Es importante hacer notar que en ese caso las materias que se emplean en las producciones derivadas del proceso de fabricación de azúcar son:

Producción de alcohol a partir de jugos mieles e hidrolizado de bagazo.

Producción de torula a partir de vinazas

Generación de electricidad con 84 % del bagazo generado

Suministro de vapor a todos los procesos

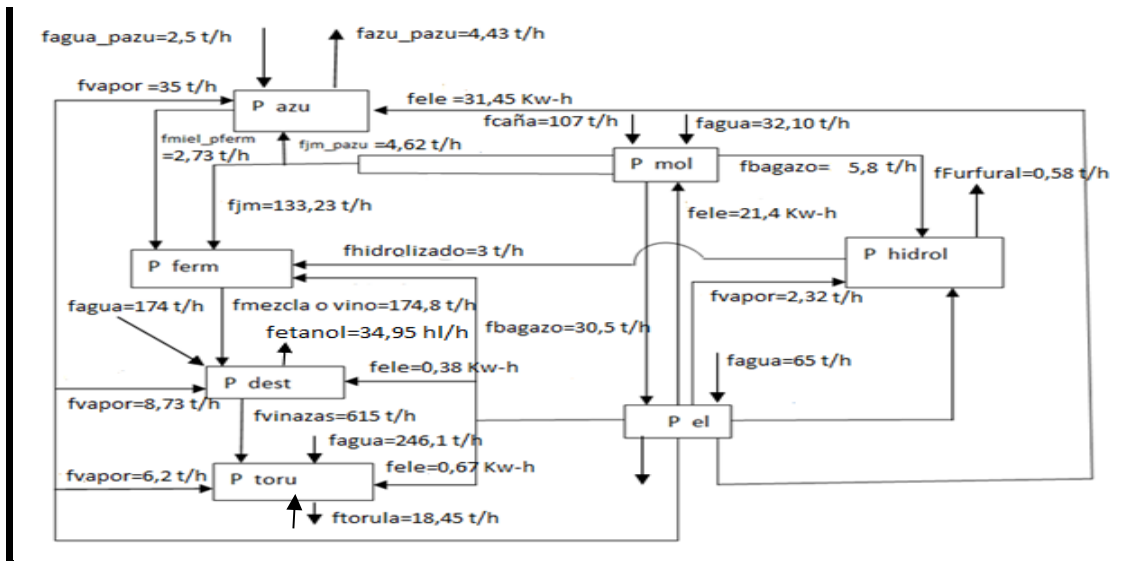


Figura 2: Distribución de corrientes de materiales y energía en el escenario 2.

Por último se realiza una estimación de los indicadores dinámicos de rentabilidad en el escenario dos y cuatro, (Peters, 2003).

Tabla 3: Indicadores de rentabilidad en el escenario cuatro.

VAN	25.102.169,13	12.913.830,89
TIR	79,35%	48,59%
PRD	2	3

Conclusiones

1. La evaluación de las potencialidades de integración de procesos en un esquema de Biorefinería permitió arribar a que la síntesis de este esquema debe incluir las plantas de azúcar, torula, hidrolizado de bagazo y etanol.
2. En la síntesis del esquema de Biorefinería las potencialidades de intercambio de recursos identificadas fueron: las mieles, jugos primarios y secundarios, bagazo, hidrolizado de bagazo, vinazas, agua, así como los recursos energéticos de electricidad y vapor.
3. La aplicación de la tecnología Pinch en los procesos evaluados resultó en elevados sobreconsumos de utilidades calientes siendo concentrados en los procesos de azúcar con un valor de 10,8 t/h, seguido por el proceso de destilación para un valor de 5,1 t/h; a su vez el resultado mínimo de consumo de vapor en los procesos en su totalidad de 74,94 t/h, obteniéndose las mayores potencialidades para el ahorro de energía en el proceso de producción de azúcar.
4. El modelo matemático desarrollado e implementado en el GAMS permite optimizar las condiciones de intercambio de recursos materiales y energéticos bajo condiciones de incertidumbre en los precios de materias primas y productos.
5. La evaluación de seis escenarios de operación del esquema de Biorefinería permitió concluir que el escenario de Biorefinería con mayores ganancias se obtiene cuando se integran todas las plantas y se considera la venta de los productos, azúcar, etanol, furfural y torula la ganancia obtenida en este caso es de 3983400 \$/a.

6. Si no se considera la planta de hidrolizado de bagazo el esquema resulta infactible, se tiene una disminución en los ingresos por venta, no se produce furfural, y se reducen los sustratos para la fermentación alcohólica.
7. El escenario que considera la operación en período de no zafra resultó factible para capacidades de producción de etanol de 2000 hl/d. Este escenario incluye las plantas de etanol, etanol de segunda generación, planta eléctrica y torula.
8. El escenario que considera la variación del costo de la caña es factible hasta valores en este precio de 112 \$/t, la factibilidad del esquema también se ve afectada si se tienen los precios de las materias primas en su límite inferior
9. Los valores obtenidos para los indicadores dinámicos en el escenario dos reportan un valor del VAN de 12913830,89, TIR de 48,59% para un tiempo de recuperación de la inversión (PRD) de tres años, lo que muestra la factibilidad del esquema de Biorefinería, resultados positivos también se tiene para el escenario cuatro para un valor de VAN de 25102169,13, TIR de 79,35% y PRD de dos años.

Referencias

1. Albernas, Y. et al (2012) “Evaluación Económica de las Alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo” en: *Centro Azúcar*, 39, 58-64.
2. Albernas, Y., (2013) *Procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar*. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, Santa Clara.
3. Bao, B y A. El-Halwagi (2010) *Elbashir NO. Simulation, integration, and economic analysis of gas-to-liquid processes. Fuel Process Technol.*
4. Bao, B et al (2011) *A shortcut method for the preliminary synthesis of process-technology pathways: An optimization approach and application for the conceptual design of integrated biorefineries*. En: “Computers & Chemical Engineering”, vol. 35, no. 8.
5. Dunn, R y H. Wenzel (2001) *Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry, Part 1: Design for single contaminants. Clean Products and Processes.*
6. El-Halwagi, A, (1997) *Pollution Prevention Through Process Integration: Systematic Design Tools*, Academic Press, San Diego
7. El-Halwagi, A. et al., (2013), “Multiobjective Optimization of Biorefineries with Economic and Safety Objectives” en *AIChE Journal* [En línea] Vol. 59, No. 7 Julio.
8. Furlan, F. et al (2012) *Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling*. En: “Computers & Chemical Engineering”, vol. 43, no. 10.
9. Grossmann, I.E y G. Guillén (2010) *Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes*. En: “Computers & Chemical Engineering”, vol. 34, no. 9.
10. Kamm, B. y M. Kamm, (2004) *Principles of biorefinery. Appl. Microbiol. Biotechnology.*
11. Peters, M. Y K. Timmerhaus, (2003) "Plant Design and economics for Chemical Engineers" En: Graw-Hill, M. (ed.) Fifth Edition ed Professors of Chemical Engineering University of Colorado.
12. Pham, V. y M. El-Halwagi, (2011) *Process synthesis and optimization of biorefinery configurations*. *AIChE Journal*, vol. 58, no. 4.