

TERMOCONVERSIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA PARA INCREMENTAR LA SOSTENIBILIDAD DE LOS PROCESOS

THERMOCHEMICAL CONVERSION OF SOLID WASTES FROM SUGARCANE INDUSTRY TO INCREASE THE SUSTAINABILITY OF THE PROCESSES

Luis E. Arteaga Pérez^{1}, Jagni Cabrera Hernández², Lizet Rodríguez-Machín³ y
Yannay Casas-Ledón¹*

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½

² Filial Universitaria de Quemado de Güines. Villa Clara.

³ Departamento de Energía. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½

Recibido: Diciembre 16, 2013; Revisado: Febrero 27, 2014; Aceptado: Marzo 17, 2014

RESUMEN

En el último decenio ha existido un creciente interés por el valor añadido que tienen los residuos lignocelulósicos provenientes de las industrias agrícolas y forestales. La investigación enfocada a los productos extraíbles o sintetizables a partir de dichos materiales gana importancia. En este marco científico surge la idea de desarrollar instalaciones análogas a las refinerías convencionales, pero que utilizan la biomasa como materia prima, por lo que se denominan biorefinerías.

La producción de caña de azúcar asciende a aproximadamente a 25 MM de toneladas anuales, de las cuales casi el 50% es bagazo y residuos agrícolas (RAC) con elevado potencial para la producción de energía y compuestos químicos. Es posible utilizar los residuos mencionados para la producción de compuestos químicos y energía en esquemas novedosos con altos índices de eficiencia. La valorización del bagazo por medio de su refinación térmica o biológica permite obtener un amplio perfil de productos químicos, energía en ciclos combinados y favorece la sostenibilidad de la industria azucarera. El artículo identifica las necesidades de I+D que deben resolverse antes de establecer la biorefinería de la caña de azúcar en el contexto Cubano.

Palabras clave: Biorefinería, caña de azúcar, termoconversión.

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Luis E. Arteaga, E-mail: luisseap@gmail.com

ABSTRACT

In the last decade there has been a growing interest in the added value that have the lignocellulosic wastes which come from agricultural and forestry industries. The research focused on removable or synthesizable products from these materials becomes important. In this scientific context arises the idea of developing facilities similar to the conventional refining facilities, but using the biomass as feedstock, so they are called biorefineries.

In Cuba, the sugar industry is mired in a crisis of over 20 years, basically built on the reduced agricultural yields, low diversification of production and technical deplorable state of facilities. The sugarcane production amounts to approximately 25 MM tons per year, of which almost 50% is bagasse and agricultural residues (RAC) with high potential for the production of energy and chemicals. The aim of this study is to identify the potential for biorefining with bagasse and agricultural waste sugar cane for the production of chemicals and energy so that the competitiveness and sustainability of this sector increases. Conversion strategies are defined by thermochemical and biological pathway of sugar cane biomass. In addition, R & D needs to be resolved before establishing sugarcane biorefinery in the Cuban context.

Key words: Biorefinery, sugarcane, thermal conversion.

1. INTRODUCCIÓN

Ampliamente se ha discutido sobre el futuro de la economía energética y se han identificado varias plataformas potenciales las cuales incluyen el viento, agua, sol, energía nuclear por fisión o fusión así como la biomasa. De manera análoga, la producción de compuestos químicos está obligatoriamente ligada a la biomasa, particularmente a la fracción lignocelulósica de la misma. Nag A (2008) destacaron que el cambio de la sociedad desde el petróleo hacia la biomasa es la clave para el desarrollo de una sociedad sostenible, la independencia energética y la gerencia de las emisiones con efecto invernadero. Se identifican como barreras fundamentales la distribución geográfica discreta de la biomasa, el hecho de que quien define la política de consumo debe ser la disponibilidad y no la demanda y el relativo bajo contenido de energía por unidad de volumen. En este sentido debe destacarse que aunque los métodos para convertir la biomasa en productos químicos y energía son bastante comunes, la materia prima fundamental depende del lugar donde se pretende desarrollar el concepto.

En el caso específico de Cuba la industria de la caña de azúcar es la principal procesadora de biomasa. Se estima que anualmente esta industria maneja 25 MM ton de caña lo que genera aproximadamente 9,72 MM ton de bagazo, 10,25 MM ton de residuos sólidos (RAC) ambos con potencial energético. El bagazo tradicionalmente se convierte en calor y electricidad en turbinas de contrapresión cuya eficiencia está cercana al 20 % con un índice de generación de 22,8 kWh/ton, mientras que los residuos agrícolas se queman en los campos contribuyendo a la contaminación ambiental (Alonso Pippo et al, 2007).

Se ha demostrado por Moncada et al (2012) que utilizando esta gramínea como plataforma pueden generarse diferentes esquemas de refinación conllevando a la

obtención de un perfil amplio de productos en una facilidad análoga a una refinería convencional. Aunque los esquemas pueden variar está claramente definido que el procesamiento puede ser biológico, termoquímico o la integración de ambos.

En el contexto cubano ha sido ampliamente discutido el concepto de Complejo agroindustrial integrado, sin embargo muy poco se habla sobre la base de ver la industria azucarera como una refinería. Este concepto se ha reportado recientemente en las comunicaciones de Mesa, [4], Albernas, [5] y Morales [6]; siendo los exponentes más claros de que se ha abierto un interés marcado por su análisis en el contexto cubano.

Una biorefinería es una facilidad que utiliza la biomasa para producir combustibles, energía y compuestos químicos. Por su disponibilidad y renovabilidad la biomasa tiene el potencial de sustituir los combustibles fósiles y la petroquímica. La viabilidad e instalación a escala comercial de las biorefinerías depende de la explotación y uso completo de los componentes de la biomasa (Shang Tian et al 2013).

En la medida que el precio del petróleo se incrementa la generalización del uso de la biomasa sigue ganando terreno lo que se evidencia en el incremento de la producción de biodiesel y etanol en la última década. Aunque el potencial tecnológico de las biorefinerías ha sido claramente definido, la sostenibilidad de la aplicación queda en tela de juicio por la contradicción social de producir alimentos o energía de una misma fuente. Basado en este inminente riesgo Moncada et al. (2012) define tres tipos de materias primas para biorefinerías:

- ✓ El primer tipo son los cultivos que tradicionalmente se usan para producir alimentos (soya, caña de azúcar, maíz) y se denominan de primera generación, para el caso de la caña de azúcar se identifican en Cuba las variedades de caña energética (Stoeglehner y Narodslawsky, 2009).
- ✓ El segundo grupo o materiales de segunda generación, hacen referencia a los residuos agroindustriales obtenidos de la cosecha y procesamiento de las materias de primera generación, por ejemplo el bagazo, el cogollo y las hojas en la caña de azúcar. En este grupo se encuentran otros cultivos que no interfieren con los alimentos y que tienen potencial para producir combustibles como por ejemplo la *Jatropha Curcas*.
- ✓ El último grupo o tercera generación son las algas que se utilizan para producir determinados metabolitos.

En el presente artículo se discuten los elementos generales para el establecimiento de un biorefinería que utilice como plataforma la industria de la caña de azúcar y el bagazo. Este último es un material de segunda generación que no compite con la producción de alimentos y que, como se destacó con anterioridad, se utiliza solo en la generación de energía de baja eficiencia.

2. BIOREFINERÍA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Una biorefinería puede producir uno o varios compuestos de alto valor y poco volumen tales como alimentos, compuestos farmacéuticos y otros de bajo valor y alto volumen como es el caso de biodiesel para la transportación, calor y electricidad (Figura 1).

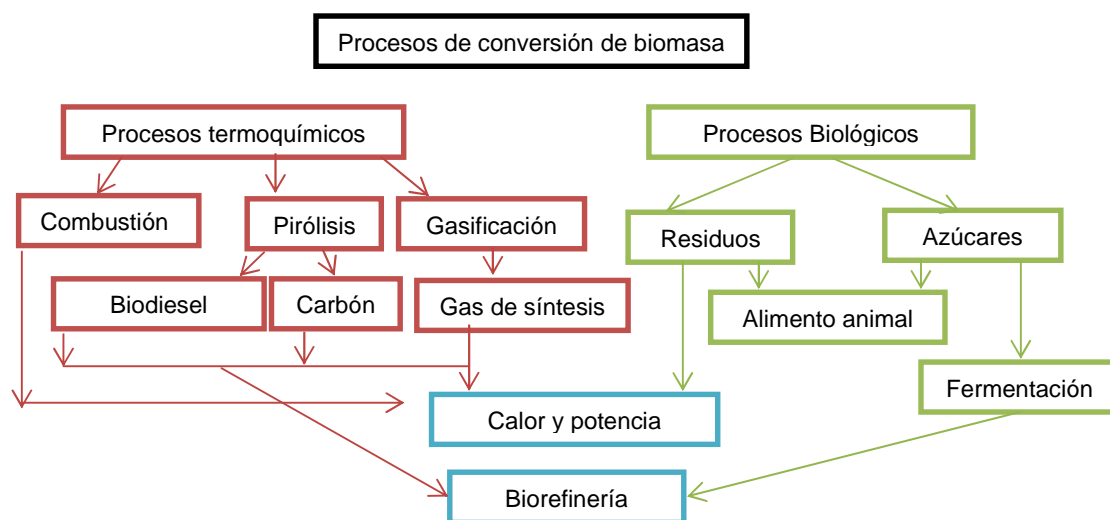


Figura 1. Esquema general de una biorefinería

2.1 Elementos básicos sobre la producción de azúcar

La caña de azúcar contiene aproximadamente 70-75% de agua, 11-16% sacarosa y 10-16% de fibra compuesta por 40% de celulosa, 24% de hemicelulosa, 25% de lignina y el resto de otros compuestos orgánicos e inorgánicos (cenizas). Además, contiene 10-16°Brix de sólidos solubles con un contenido de sacarosa entre 7 - 14% representando el 70 - 88% de estos sólidos disueltos. En la actualidad entre 55% y el 60% de la producción de azúcar se destina a la obtención de etanol con fines combustibles. La caña a diferencia de otras fuentes azucaradas como la remolacha no puede almacenarse sin producir un deterioro paulatino de la sacarosa; es por ello que desde el corte hasta la evaporación se trabaja de manera continua para evitar el deterioro de los azúcares por envejecimiento de la materia prima. El proceso convencional puede dividirse en cuatro etapas fundamentales a saber:

- ✓ Extracción
- ✓ Clarificación
- ✓ Evaporación
- ✓ Cristalización

Como productos principales se obtienen el azúcar, las mieles, el bagazo y otros residuos de origen celulósico con potencial energético. La industria azucarera cubana integra con la producción de azúcar la de etanol, furfural, tableros de bagazo, torula para alimento animal y biogás. Sin embargo, estas producciones no se integran en un mismo sitio sino que están distribuidas en la isla. Es notable destacar que de las fracciones lignocelulósicas de la caña, solo el bagazo se utiliza para generar electricidad y calor en los centrales cubanos. La composición química de este material (Tabla 1) le confiere un potencial energético capaz de balancear térmicamente la producción de azúcar y en muchos casos exportar energía en forma de electricidad y calor hacia otros procesos o al consumo doméstico.

Tabla 1. Análisis elemental e inmediato del bagazo

<i>Elementos</i>	<i>Análisis último</i>	<i>Análisis aproximado</i>	
	<i>Bagazo</i>	<i>Propiedad</i>	<i>Bagazo</i>
Carbón, %	48	Carbono fijo, %	14,7
Hidrógeno, %	6,2	Volátiles, %	47,8
Oxígeno, %	43,1	Humedad,%	35
Nitrógeno, %	0,4	Cenizas,%	2,5
Azufre, %	0	LHV, kJ/kg	17,5
Cenizas, %	2,3		

Con las nuevas prácticas de tiro directo se aprovecha de manera integrada el poder calórico del bagazo y los residuos cañeros otrora quemados en los mismos campos o en centros de acopio.

2.2 Integración de la agro-industria azucarera

Entre los estudios más recientes sobre el potencial de la industria cubana para conformar una plataforma de biorefinación destacan los trabajos desarrollados por el Centro de Análisis de Procesos de la Universidad Central de Las Villas. La Figura 2 resume las tecnologías tratadas por este grupo a través de los trabajos de Mesa, [4], Albernas, [5] y Morales [6]. Como carencia fundamental de esta investigación surge el abandono de la conversión termoquímica del bagazo (tratada por el antiguo CETA de la UCLV y el ICIDCA) y la lignina con el objetivo de producir compuestos químicos y no se trata tampoco el furfural como base sintética de bioplásticos. A través de la incorporación de la biorefinería se definieron cambios tecnológicos para la integración de la producción de furfural con la de etanol lignocelulósico sin alterar las producciones de tableros y proporcionando un valor incrementado al bagazo.

3. RECONVERSIÓN DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN UNA BIOREFINERÍA

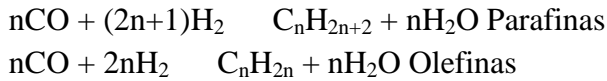
La biorefinación de biomasa lignocelulósica en general implica la separación de sus componentes primarios (celulosa, hemicelulosa y lignina) por diferentes rutas. A estos procesos de conversión se les conoce como fraccionamientos. Entre los productos químicos a obtener del fraccionamiento de biomasa se tienen el ácido levulínico, el xilitol y algunos alcoholes. Cuando se utiliza el bagazo y los residuos agrícolas de la industria azucarera el escenario es el mismo, cambiando únicamente la distribución de estos productos y las características de las instalaciones a diseñar.

En cuanto a las rutas a seguir para establecer la biorefinería de la caña de azúcar se pueden identificar tres conceptos:

Biorefinería de gas de síntesis: Donde se produce gas de síntesis y subsecuentemente por Fisher Trops se sintetizan hidrocarburos.

Biorefinería por pirólisis: Este caso implica mayoritariamente la producción de biodiesel con características combustibles y su subsecuente transformación a gas de síntesis por procesos catalíticos.

unidades en operación a escala comercial (Bridgwater, AV 2012). Entre los estudios más relevantes de la gasificación de bagazo en Cuba se encuentran los reportes de Pérez-Bermúdez (2005), quien demostró el potencial térmico de la gasificación de bagazo a escala piloto y determinó el balance termo económico del sistema en cuestión. Sin embargo, escapó al alcance de este trabajo las aplicaciones de síntesis derivadas del uso del gas. Dichas aplicaciones se basan en la más que conocida reacción de Fisher-Trops para sintetizar hidrocarburos líquidos de fracciones gaseosas según la siguiente reacción.

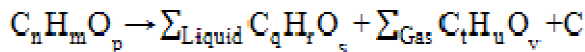


3.2. Biorefinería térmica. Pirólisis.

La pirólisis se define como la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno (Bridgwater, AV 2012). Durante este proceso los constituyentes poliméricos naturales de la biomasa (lignina, celulosa, azúcares, grasas) se rompen en cadenas cortas de numerosas sustancias y los productos se dividen en tres corrientes:

- ✓ Sólido (carbón): Conformar el 12% w/w de los productos.
- ✓ Gas (CO, CO₂, CH₄, H₂, C₂H₄, C₂H₆, etc): Significa el 13% w/w.
- ✓ Líquido (alquitranes, compuestos orgánicos y agua). Es el 75% del producto principalmente cuando el proceso transcurre de forma rápida.

La reacción puede representarse según la siguiente ecuación estequiométrica:



La distribución de productos varía básicamente en función de la temperatura y la velocidad de calentamiento. En la Figura 3 se resume las posibles aplicaciones de las fracciones obtenidas de la pirólisis rápida del bagazo utilizando una biorefinería, que según Alonso Pippo et al, (2007) puede representarse por la siguiente reacción estequiométrica.

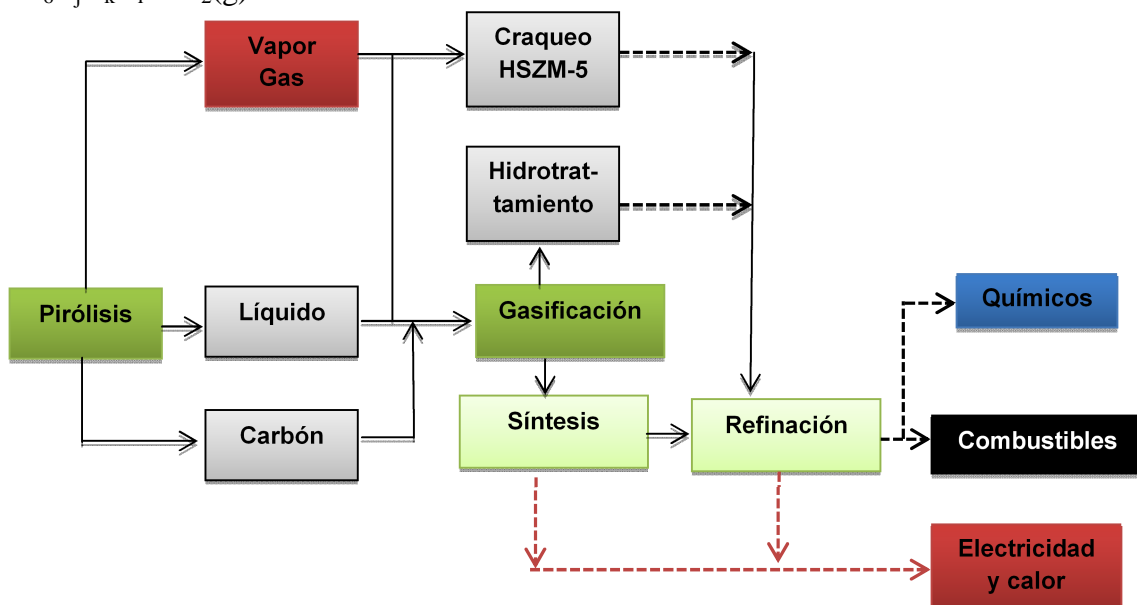
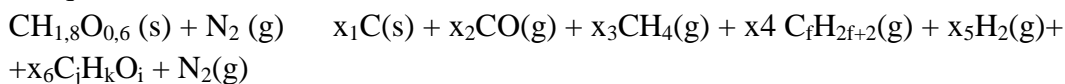


Figura 3. Biorefinería térmica por pirólisis de bagazo y RAC

Un concepto similar fue descrito por Bridgwater, AV (2012) donde destaca que la biorefinería con pirólisis debe integrarse a otros procesos de transformación termoquímica o biológica. Ade que este proceso tiene potencialidades aún existen varias interrogantes por resolver entre ellas:

1. Condiciones de pre-tratamiento del bagazo para reducir el contenido de metales.
2. Catalizadores para mejorar la calidad y composición del biodiesel producido.
3. La humedad contenida en el biodiesel.
4. Aspectos económicos.

El primero de los factores incide fundamentalmente en el fenómeno de envejecimiento del producto líquido de la pirólisis. Este efecto se define como la pérdida de propiedades combustibles en el tiempo y es catalizado por el contenido de metales en las cenizas de la biomasa. El uso de catalizadores para mejorar las propiedades de los productos de la pirólisis ya sea por su utilización insitu o exsitu en procesos de reformado o craqueo catalítico ha sido reportado por Putun et al, (2009). En este trabajo se determinó el potencial de las zeolitas ZSM5 y HZSM-5 para mejorar las propiedades del biodiesel producido por pirólisis rápida.

3.3 Biorefinería biológica.

En el caso de la biorefinería biológica la mayor cantidad de estudios están enfocados a la producción de etanol (Demirbas A, 2009). Cuando se pretende utilizar bagazo u otros residuos de la caña de azúcar se requiere primero un pretratamiento para reducir el tamaño de las partículas y hacer accesible la parte fermentable del material rompiendo la hemicelulosa en celulosa la cual a su vez es hidrolizada por ácidos o enzimas a glucosa y esta se fermenta por procesos tradicionales. La secuencia de etapas se representa en la Figura 4.

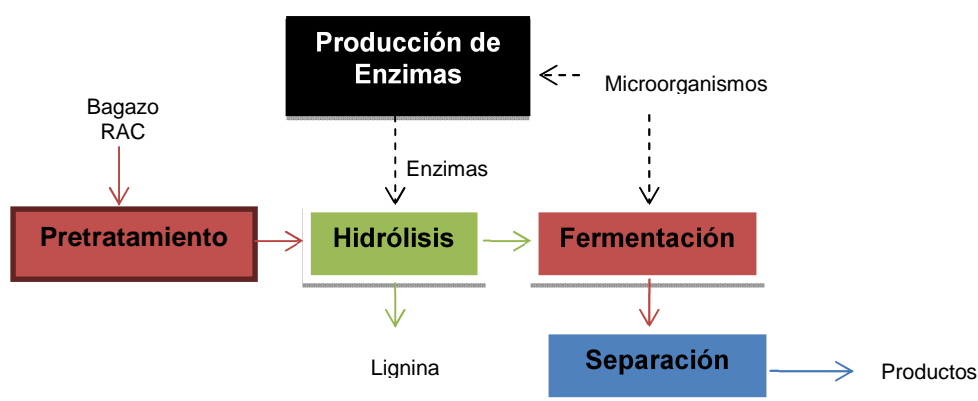


Figura 4. Biorefinería biológica para la conversión de bagazo y RAC

1. Costos de las enzimas
2. Diseño de microorganismos multifuncionales
3. Agotamiento de todas las fracciones no fermentables

Los estudios desarrollados en el bagazo demuestran que la factibilidad económica del proceso de producción de etanol se justifica por los coproductos o más bien por definir

un perfil de producción que garantice un balance neto positivo. Una vez obtenido el etanol Posada et al, (2012) han demostrado que pueden producirse alrededor de 12 compuestos químicos potenciales de los cuales los cinco de mejores indicadores son: El dietileter, 1,3-butadieno, el acetato de etilo, el propeno y etileno.

3.4 Integración de biorefinería térmica y biológica

La clave del éxito podría radicar en la integración de las diferentes rutas de refinación de los residuos lignocelulósicos de la caña de azucara. Esta estrategia, como se representa en la Figura 5 podría conllevar al aprovechamiento total de la biomasa enfocada a la producción de bienes y productos de alto valor, en lugar de optar por la combustión de la misma.

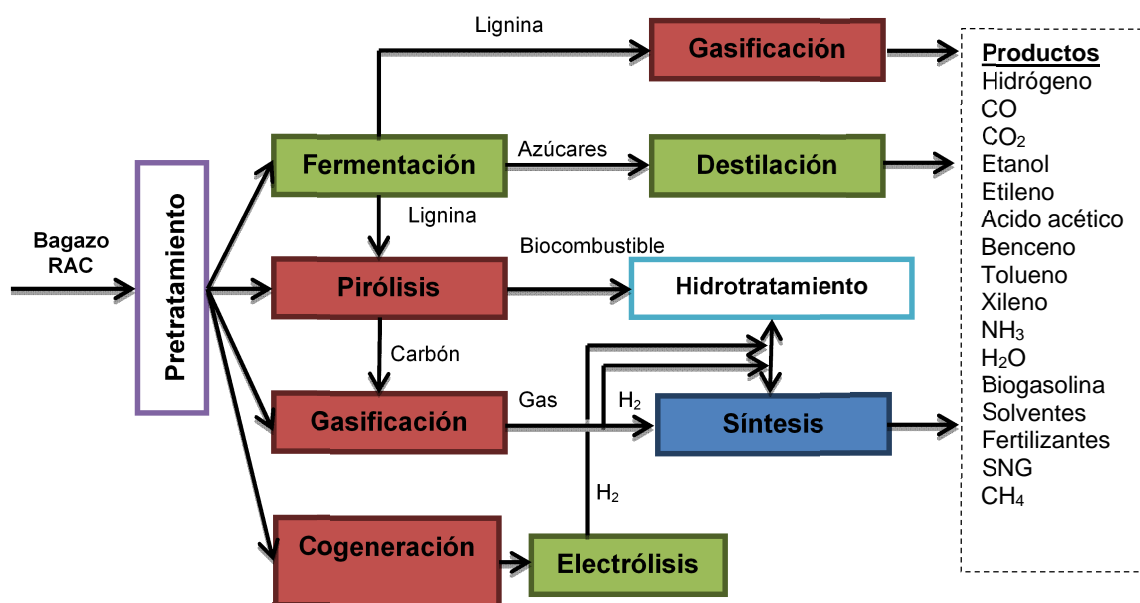


Figura 5. Integración de las biorefinerías térmica y biológicas para el bagazo y RAC

La definición de biorefinería integrada tal como se presenta en la figura anterior fue reportada por Bridgwater, AV (2012).

4. EJEMPLOS DE INGENIERÍA BÁSICA EN CUBA

En Cuba existen varios ejemplos de trabajos encaminados a la creación de la biorefinería de la caña de azúcar y aunque varios de estos trabajos muestran resultados alentadores, el enfoque tecnológico que reviste a los mismos no defiende claramente el concepto aquí descrito.

4.1. Etanol, hidrógeno y celdas combustibles

Arteaga et al. (2009-2013)^{a,b} desarrollaron el diseño de una planta química con el objetivo de obtener hidrógeno a partir del reformado de etanol, para la generación integrada de electricidad y calor utilizando celdas combustibles de óxido sólido. En dichas comunicaciones los autores lograron integrar el sistema a un Complejo agroindustrial y determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental del mismo. El

sistema exhibe una eficiencia exergética del 35%, es auto-sostenible desde el punto de vista energético para una relación molar H₂O/Etanol de 5.5 en el reformado. Además, se estima que el costo es un 30% menor cuando se incluyen los factores asociados a los daños a la salud humana. Como aspecto interesante se demuestra que el 15% de las materias primas implican el uso de recursos no renovables. De manera general quedó demostrado el potencial exergético de la alternativa y las limitaciones económicas de las celdas combustibles en este tipo de aplicaciones, siempre que no se incluyan los costos evitados por daños a la salud humana Casas et al, (2014).

4.2. Bagazo, hidrógeno y celdas combustibles

Recientemente Arteaga et al. (2013)^c desarrollaron un modelo conceptual para estudiar la gasificación del bagazo acoplada a celdas combustibles de alta temperatura. Dicho estudio evidenció el potencial energético del bagazo y la factibilidad del mismo para la producción de gas de síntesis.

5. CONCLUSIONES

La biorefinación térmica del bagazo y el RAC presenta un espectro de aplicaciones más claro y amplio que su conversión biológica. El uso de catalizadores de composición similar a los que actualmente se utilizan en la industria petroquímica es un elemento invariante para diseñar procesos eficientes y obtener productos de calidad por lo que debe trabajarse en la identificación de materiales con capacidad catalítica para biorefinerías.

Un elemento crucial para el establecimiento de la biorefinería de azúcar es la síntesis de los nuevos procesos asumiendo conceptos de integración material y energética y evaluando el agotamiento de los recursos en diferentes aplicaciones. Un problema al cual es imprescindible prestarle especial atención es el ajuste de la composición del biodiesel producido por pirólisis para reducir su acidez y contenido de oxígeno de forma tal que sus características combustibles mejoren su competitividad ante combustibles tradicionales.

REFERENCIAS

1. Nag A, (2008). Biofuels refining and performance. McGraw-Hill Companies, Inc. DOI: 10.1036/0071489703
2. Alonso Pippo W. et al. (2007). Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba. *Waste Management* 27 869–885
3. Jonathan Moncada et al. (2012) Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>
4. Mesa, L. Estrategia Investigativa para la obtención de etanol aprovechando integralmente el bagazo de la caña de Azúcar. Tesis de Doctorado. Dpto Ing Química. UCLV. 2011.

5. Albernas, Y. Consideración de la logística de los procesos discontinuos en el diseño de una planta para la obtención de Bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar Tesis de Doctorado. Dpto Ing Química. UCLV. 2013.
6. Morales, M. Estrategia para la reconversión de una industria integrada de azúcar y derivados para la producción de etanol y coproductos a partir del bagazo. Tesis de Doctorado. Dpto Ing Química. UCLV. 2012.
7. Shang-Tian Yang, Hesham A. El-Enshasy, Nuttha Thongchul (2013) Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals, and polymers. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
8. Stoeglehner, G., Narodoslowsky, M., 2009. How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising from an ecological footprint perspective. *Bioresour. Technol.* 100 (16), 3825–3830
9. John A. Posada, et al. (2012) Potential of bioethanol as a chemical building block for biorefineries: Preliminary sustainability assessment of 12 bioethanol-based products. *Bioresour. Technol.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.058>
10. Bridwater AV (2012), Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and bioenergy* 38 (2012) 68-94
11. R. Pérez-Bermúdez, Estudio termo-económico del beneficio del gas de gasificación de biomasa en lecho fluidizado con fines energéticos, Tesis de Doctorado, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Año, 2005.
12. Putun E, et al. Rapid pyrolysis of olive residue. Effect of catalytic upgrading of pyrolysis vapors in a two stage fixed-bed reactor. *Energy Fuels* 2009; 23:2248-58.
13. Ayhan Demirbas (2009) Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 2782–2801
14. L.E. Arteaga, et al. An auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol. Process simulation and heat exchanger network synthesis. *Chem. Eng. J.* 150 (2009) 242–251.
15. Casas Y, et al. Integration of solid oxide fuel cell in a sugar–ethanol factory: analysis of the efficiency and the environmental profile of the products. *J Cleaner Prod* 2011; 19: 1395–404.
16. Yannay Casas-Ledon, et al. (2014) Health external costs associated to the integration of solid oxide fuel cell in a sugar–ethanol factory. *Applied Energy* 113 1283–1292
17. Luis E. Arteaga-Perez, et al. (2013) Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach. *Chemical Engineering Journal* 228 1121–1132.