

Artículo Original

**VALORIZACIÓN DE LA LIGNINA EN EL CONCEPTO DE
BIORREFINERÍA (II)**

LIGNIN VALORIZATION IN BIOREFINERY CONCEPT (II)

Aixa R. Gutiérrez Villanueva ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-5696-6179>

Claudia Guirola Céspedes ² <https://orcid.org/0000-0002-7455-9590>

Ana Celia de Armas Martínez ² <https://orcid.org/0000-0002-0147-0704>

Yaillet Albornas Carvajal ² <http://orcid.org/0000-0003-4363-4401>

Gretel Villanueva Ramos ² <https://orcid.org/0000-0001-6713-6277>

¹ Departamento de Licenciatura en Comunicación Social. Facultad de Humanidades. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Cuba. Carretera a Camajuani. Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Cuba. Carretera a Camajuani. Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Marzo 4, 2020; Revisado: Marzo 17, 2020; Aceptado: Mayo 12, 2020

RESUMEN

Introducción:

Existen varios tipos de lignina y, entre ellas, la que deriva de los procesos que usan solventes orgánicos en presencia de catalizador, ácido o básico posee menor impacto ambiental con respecto a los convencionales, ya que los solventes orgánicos se recuperan fácilmente por destilación, también este tipo de ligninas, posee dada su estructura, usos específicos. La hidrólisis del bagazo de caña de azúcar produce corrientes ricas en lignina que pueden ser integradas en el concepto de biorrefinería.

Objetivo:

Demostrar la factibilidad económica de la integración del proceso de producción de lignina en el concepto de biorrefinería partiendo de las características de la misma y del conocimiento de sus productores a nivel internacional.

Materiales y Métodos:

Se realiza una búsqueda (*briefing*) que brinda datos de utilidad para el desarrollo del proceso de obtención de la lignina, partiendo de esto se integra este proceso en el concepto de biorrefinería y se determinan sus indicadores económicos.

Resultados y Discusión:

Las aplicaciones de la lignina producto de la hidrólisis del bagazo pueden ser: la elaboración de fibras de carbono, vainillina, y en la producción de derivados del fenol.



Copyright © 2020. 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: Aixa Gutiérrez, Email: agvillanueva@uclv.cu



Al valorar la factibilidad de inversión del esquema de biorrefinería con la integración de la lignina, se obtienen indicadores dinámicos de rentabilidad que demuestran la factibilidad de la propuesta, manteniendo la recuperación de la inversión en 5,2 años como de Armas, (2019).

Conclusiones:

El proceso propuesto se justifica con las aplicaciones de la lignina y puede ser integrado a la biorrefinería manteniendo su rentabilidad.

Palabras clave: hidrólisis; biorrefinería; lignina.

ABSTRACT

Introduction:

There are several types of lignin and, among them, which derives from processes that use organic solvents in the presence of catalyst, acid or basic has less environmental impact with respect to conventional ones since organic solvents are easily recovered by distillation, also this type of lignins, has specific uses because its structure. Hydrolysis of sugarcane bagasse produces lignin-rich currents that can be integrated into the biorefinery concept.

Objective:

Demonstrate the economic feasibility of integrating the lignin production process into the biorefinery concept based on its characteristics and the knowledge of its producers at the international level.

Materials and methods:

A search (briefing) that provides useful data for the development of the lignin obtaining process is carried out, based on this process is integrated into the concept of biorefinery and its economic indicators are determined.

Results and Discussion:

The applications of lignin as a result of bagasse hydrolysis can be: the elaboration of carbon fibers, vanillin, and in the production of phenol derivatives. By assessing the feasibility of investment in the biorefinery scheme with the integration of lignin, dynamic profitability indicators are obtained that demonstrate the feasibility of the proposal, maintaining the recovery of investment in 5.2 years as de Armas, (2019).

Conclusions:

The proposed process is justified with the applications of lignin and can be integrated into the biorefinery while maintaining its profitability.

Keywords: hydrolysis; biorefinery; lignin.

1. INTRODUCCIÓN

El término biorrefinería es uno de los conceptos más importantes de integración productiva, el mismo se encuentra referido en la literatura científica desde el año 2001, al ser planteado por Wyman (2001), por su parte Kafarov y González (2011) y Castilla et al., (2019) refieren que desde el año 2007 se comienza a apreciar de manera significativa en publicaciones y memorias de eventos científicos. El mismo engloba la

integración de procesos y tecnologías para un uso eficaz de la biomasa como principal fuente de materia prima, logrando que las instalaciones operen de una manera sostenible con el objetivo principal de obtener un aprovechamiento integral de la biomasa generando un amplio espectro de productos y energía. El concepto de biorrefinería sigue el mismo principio de una refinería de petróleo, pero en la misma se producen, a partir de biomasa, energía y productos químicos mediante diferentes procesos (Temmes y Peck, 2020); (Hassan et al., 2018).

La variedad de biomasa existente y sus múltiples procesos de transformación permiten una diversidad en cuanto a los esquemas que puede presentar una biorrefinería como lo manifiesta la Agencia Internacional de Energía (IEA) (Martín y Martín, 2017); (Castilla et al., 2019) y el (Manual sobre Biorrefinerías en España, 2017). Ello hace posible que al clasificar los modelos de biorrefinería se consideren cuatro aspectos fundamentales: materia prima utilizada, productos de plataforma obtenidos, proceso utilizado y grado de integración. El grado de integración es uno de los más empleados y las identifica como biorrefinerías de primera, segunda o tercera generación.

Países como Bélgica, Holanda, Francia, Austria y Alemania producen, a escala comercial, bioetanol, almidón o piensos, en biorrefinerías de primera generación, teniendo como materias primas esencialmente el trigo y el maíz. Los modelos de segunda generación comprenden el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica como residuos forestales, siendo el mayor exponente la biorrefinería de etanol celulósico. En los últimos años se han puesto en marcha las primeras instalaciones a escala comercial de este tipo en Italia, Brasil y Estados Unidos. Por último, se encuentran las biorrefinerías de tercera generación; los principales esquemas desarrollados en la actualidad son para la obtención de fertilizantes, omega tres y seis, y biocombustibles como biodiesel y biogás. Las mismas se basan principalmente en el procesamiento de las microalgas y se han desarrollado como demostración y a escala de planta piloto en Estados Unidos, Austria, Australia y Argentina, por citar algunos ejemplos.

Cuba no se encuentra ajena a esta situación y, dentro de su potencial tecnológico, la industria azucarera abre una perspectiva extraordinaria para transformarse en una biorrefinería que emplee integralmente la caña de azúcar como fuente de energía, de productos químicos y de biocombustibles como el biodiesel y el bioetanol. Sin embargo, en la actualidad no se aprovechan de forma eficiente todas las facilidades que brinda esta industria, lo que permitiría la integración de otros procesos no considerados hasta el momento, como la utilización de biomasa lignocelulósica y la proveniente de microalgas para la obtención de biocombustibles. En esas condiciones se lograría un mayor desarrollo tecnológico de este sector, unido a una mejor explotación de las potencialidades que brinda la caña de azúcar como fuente de biomasa.

Para lograr el desarrollo de la industria de la caña de azúcar en el concepto de biorrefinería, una de las principales direcciones de trabajo científico planteadas en González (2012) y de Armas (2017), es desarrollar y optimizar los esquemas tecnológicos de producciones integradas de azúcar, etanol, electricidad y coproductos químicos derivados, considerando la incertidumbre en los balances de materiales y energía, la disponibilidad de las instalaciones y la incertidumbre operacional vinculada a los fenómenos de espera.

En el trabajo presentado por de Armas, (2019), se proponen alternativas que tienen como objetivo lograr una explotación integral de corrientes derivadas del proceso azucarero en una entidad que tiene las facilidades de infraestructura para la adaptación de la industria azucarera a una biorrefinería de tercera generación. Esta consideración en el citado polo productivo implica utilizar en mejor medida la biomasa lignocelulósica, no solamente para producir energía, sino para aprovechar el contenido en glucosa y xilosa que contiene el bagazo. Por ello se propone no emplear agua en la etapa de fermentación y usar la mezcla de sustratos azucarados formada por hidrolizado de bagazo, jugo de los filtros y miel, así como separar la xilosa contenida en la fibra de bagazo. A su vez de la producción de etanol se generan las vinazas como corriente residual que es usada como medio de cultivo para el crecimiento de microalgas, las que constituyen la materia prima principal para la obtención de biocombustibles de tercera generación como el biodiesel y también para la producción de levadura torula, a su vez la vinaza tratada resultante de este proceso se destina a la producción de biogás.

En este trabajo no se da utilización a corrientes ricas en lignina derivadas del proceso de producción de bioetanol (LPBE). Gutiérrez y col., (2020) estudian las posibilidades de uso de las ligninas y proponen un proceso de producción de la misma a partir de estas corrientes, que por sí solo no resulta factible desde el punto de vista económico, sin embargo plantean que es necesario determinar si la inclusión de la producción de lignina en el concepto de biorrefinería demuestra serlo, lo que sería muy interesante pues la lignina está en el punto de mira de especialistas que trabajan en diferentes campos de la ciencia y la tecnología buscando aplicaciones prácticas novedosas. Existen varios tipos de lignina y en el caso de la propuesta de de Armas, (2019), esta deriva de los procesos que usan solventes orgánicos en presencia de catalizador, ácido o básico. La sencillez del sistema de recuperación es la razón del menor impacto ambiental de estos procesos respecto a los convencionales ya que los solventes orgánicos se recuperan fácilmente por destilación, también este tipo de ligninas, posee dada su estructura, usos específicos que se encuentran detallados en Gutiérrez y col., (2020).

Es por esto que el objetivo de este trabajo es la demostración de la factibilidad económica de la integración del proceso de producción de lignina en el concepto de biorrefinería partiendo de las características de la misma y del conocimiento de sus productores a nivel internacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para comenzar el desarrollo de un proceso es necesario conocer las características del producto obtenido, Para ello se elaboró un documento informativo (*briefing*) a la lignina (Gutiérrez, 2020), este instrumento brinda datos de utilidad para el desarrollo de un producto, acción o campaña. Se detallan las ligninas que hoy se producen por diferentes procesos a nivel mundial con las características brindadas por los fabricantes para a partir de esto revisar y analizar las oportunidades que ofrece la lignina producida en una biorrefinería que elabora bioetanol, como materia prima.

Posteriormente se introduce el proceso de producción de lignina en el concepto de biorrefinería propuesto por de Armas, (2019), donde, durante el proceso propuesto de producción de hidrolizado de bagazo mediante tres etapas de pretratamiento (hidrólisis ácida, básica y enzimática) se obtienen corrientes residuales de gran interés económico

que sirven de punto de partida para la producción de lignina (Gutiérrez y col., 2020), y se calculan los indicadores de factibilidad económica para la propuesta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Tipos de lignina y principales producciones.

El pretratamiento que ha sufrido, condiciona la tipología de la lignina obtenida y sus características. La lignina se extrae utilizando diferentes técnicas de pulpeo en la producción de papel y en el proceso de producción de bioetanol, como un subproducto de bajo precio en grandes cantidades. Las ligninas técnicas se distinguen en dos grupos (Gosselink y col., 2004). Las ligninas comerciales con contenido de azufre como los lignosulfonatos y la lignina Kraft cuya producción es la mayor. Estas ligninas convencionales mayoritariamente usadas en la industria se obtienen de coníferas. La segunda categoría incluye ligninas sin azufre en su composición, obtenidas a través de diferentes procesos y la mayoría de ellas aún están poco comercializadas: lignina del proceso sosa, ligninas organosolv, ligninas del proceso de explosión de vapor y lignina de hidrólisis de la biomasa, principalmente en la producción de bioetanol (Dessbesell y col., 2020) (Tabla 1).

Tabla 1. Producción comercial de lignina técnica, año base 2018

Fuente: (Dessbesell y col., 2020)

<i>Tipo de lignina</i>	<i>Capacidad (miles de toneladas por año)</i>	<i>% del total</i>
Lignosulfonatos	1 315	39
Kraft	265	16
Hidrólisis y soda	75	5

Hasta el momento las ligninas más importantes desde el punto de vista de cantidad comercializada son las que poseen azufre.

El potencial de utilización de las ligninas es alto, actualmente la mayoría de ellas se incineran para generar energía y reciclar agentes químicos para el propio proceso. Solo una cantidad limitada ha sido utilizada para diferentes aplicaciones tal como los biomateriales, bioestabilizantes, alimentos de animales, productos sanitarios y cultivos de cosechas (Gutiérrez y col., 2020). Además de la disponibilidad, en el momento de determinar los posibles usos de la lignina se deben tener en cuenta sus características estructurales. La producción de bioetanol para reemplazar los combustibles fósiles, en un futuro próximo, hace de esta lignina un material potencialmente importante para diferentes usos. Estas ligninas proceden de madera y plantas anuales, entre ellas la caña de azúcar. La producción de ligninas organosolv y de hidrólisis es aún pequeña. Los informes indican que la lignina de soda es producida por GreenValue en la India y la de hidrólisis por Ibicon en Dinamarca (Miller y col., 2016). Las ligninas procedentes de las biorrefinerías de biocombustibles podría mejorar potencialmente la rentabilidad general de la producción de los mismos, si se valoriza en productos químicos, como los fenoles (Martinez-Hernandez y col., 2019); sin embargo, los requisitos del proceso para mantener la producción primaria y las necesidades de energía son factores limitantes (Obydenkova et al., 2019). Dirigiéndose específicamente a la valorización de estas ligninas, Rolute Forest Products en Canadá posee una unidad de producción a escala

piloto (100 T/ año) utilizando la tecnología FPInnovations TMP-Bio (Mao, 2018). Dessbesell y col., (2020) identificaron 22 empresas que producen lignina comercialmente (cantidades superiores a 5000 T / año). Borregaard LignoTech es el principal productor de lignina técnica, seguido de Tembec, que recientemente se convirtió en parte de Rayonier Advanced Materials. Dos compañías en Rusia (OAO Kondopoga y Vyborgskaya Cellulose) están en tercer lugar, aunque no se revelan las cantidades específicas de lignosulfonatos producidos en estas dos compañías. En la tabla 2 se resumen las principales características de los distintos tipos de ligninas disponibles.

Tabla 2. Características de los distintos tipos de ligninas
Adaptada de (Vishtal y Kraslawski, 2011) y (Nour-Edinne, 2007)

Tipo de Lignina Parámetros	Lignina Sulfito	Lignina Kraft	Lignina Soda	Lignina Organosolv	Lignina Bioetanol
Cenizas (%)	4,0 – 8,0	0,5 – 3,0	0,7 – 2,3	1,7	0,21
Humedad (%)	5,8	3,0 – 6,0	2,5 – 5,0	7,5	4,14
Carbohidratos (%)	–	1,0 – 2,3	1,5 – 3,0	1,0 – 3,0	3,3
Soluble en ácido (%)	–	1,0 – 4,9	1,0 – 11	1,9	1,4
Nitrógeno (%)	0,02	0,05	0,2 – 1,0	0,0 – 0,3	1,26
Azufre (%)	3,5 – 8,0	1,0 – 3,0	0,0	0,0	0,0
Masa molecular	No reportado	1098,7	1300,6	2800,8	2106,7

Estos resultados indican que la lignina del proceso bioetanol presenta un alto contenido de nitrógeno, lo cual refleja su contaminación con compuestos producto de la fermentación alcohólica (proteínas). También posee un alto contenido de grupos carbonilo, debidos a la glucosa y xilosa que posee en 2,70 y 0,6 % peso respectivamente de acuerdo a los resultados presentados por Nour-Edinne, (2007). Por este motivo es necesario un análisis de las posibles aplicaciones de la misma pues algunos procesos pueden requerir una purificación más completa. En la tabla 3 se resumen los potenciales productos que se pueden obtener a partir de los diferentes tipos de lignina.

Tabla 3. Pureza y posibles aplicaciones de diversas ligninas técnicas
Fuentes: (Smolarski, 2012), (Behling y col., 2016) y (Tarabanko y Tarabanko, 2017)

Lignina técnica	Pureza	Productos potenciales
Lignosulfonatos	Media	Aditivos en betún, vainillina, materia prima para refinería
Lignina Kraft	media-alta	Aditivos, biocombustible, BTX, carbón activado, resinas fenólicas, fibras de carbono, fenol
Organosolv	alta	Carbón activado, resinas fenólicas, fibras de carbono, vainillina, derivados de fenol
Lignina de hidrólisis	muy alta	Fibras de carbono, vainillina, derivados de fenol

3.2 Integración de la producción de lignina en el concepto de biorrefinería

Una vez conocidas las características del producto que se pretende obtener y además sus posibles aplicaciones (Gutiérrez y col., 2020) se procede a analizar su posible integración a la biorrefinería propuesta por de Armas, (2019). La propuesta de esquema de biorrefinería de tercera generación, queda integrada como se muestra en la figura 1.

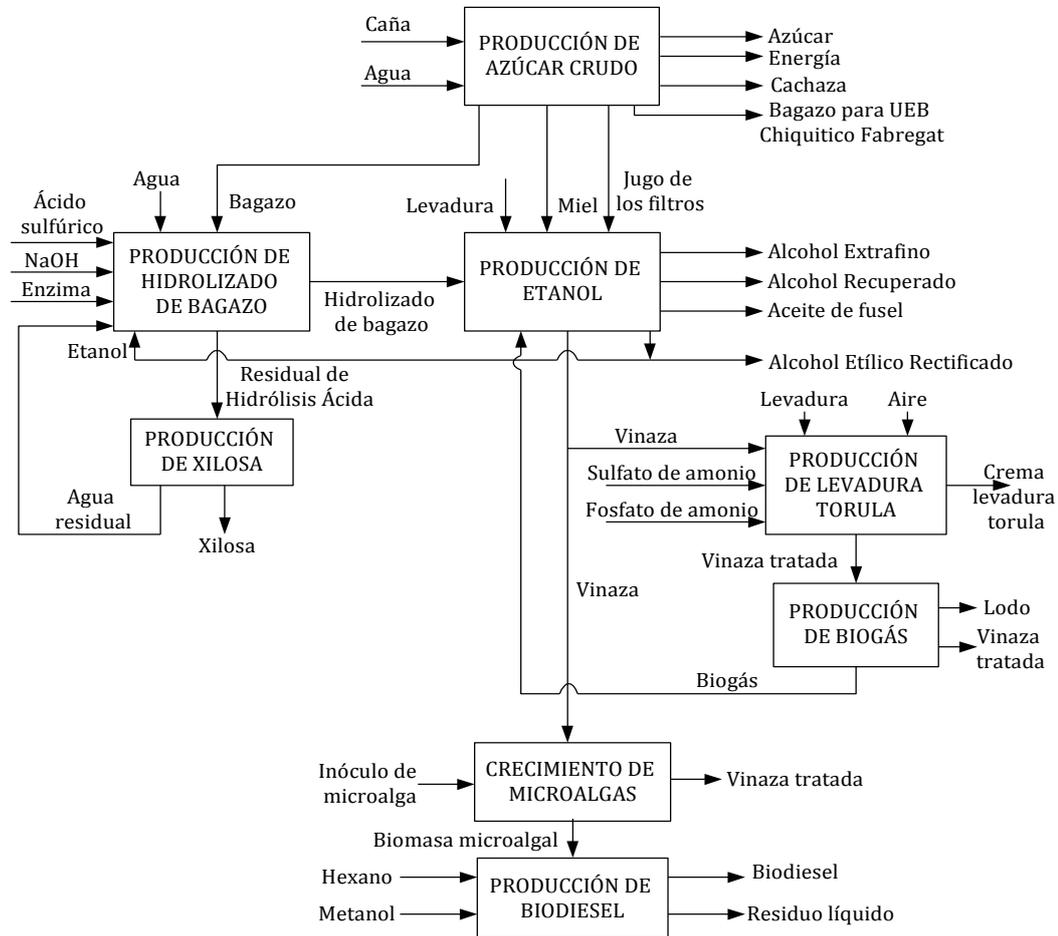


Figura 1. Esquema de biorrefinería integrada de tercera generación (de Armas, 2019)

El proceso planteado para la obtención de la lignina a partir de 5952 kg/d del sólido residual obtenido de la filtración del producto de la hidrólisis enzimática y de una corriente líquida (4003,2 kg/d) proveniente de la hidrólisis básica (HB), ambos ricos en lignina, se detalla en Gutiérrez y col., (2020), estos constituyen la materia prima del proceso a implementar. En la figura 2 se representa al detalle la etapa de hidrólisis del bagazo de donde provienen estas corrientes.

La figura 3 muestra el esquema del proceso que se detalla en Gutiérrez y col., (2020), donde también aparece el equipamiento utilizado, las materias primas necesarias, y el producto obtenido.

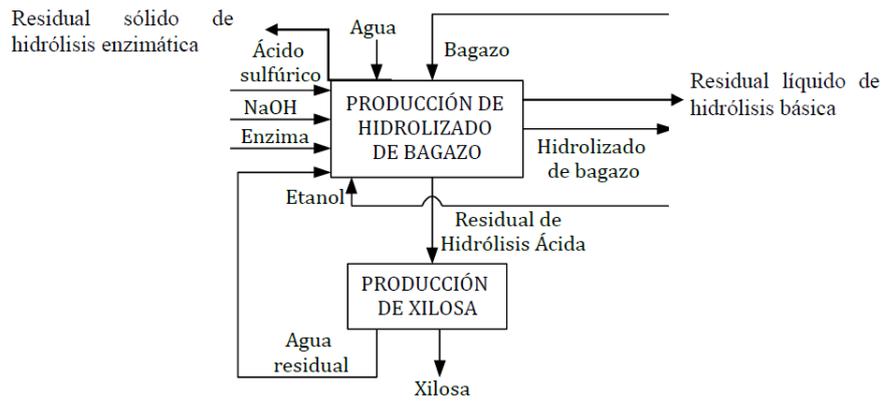


Figura 2. Proceso propuesto para hidrólisis del bagazo (de Armas, 2019)

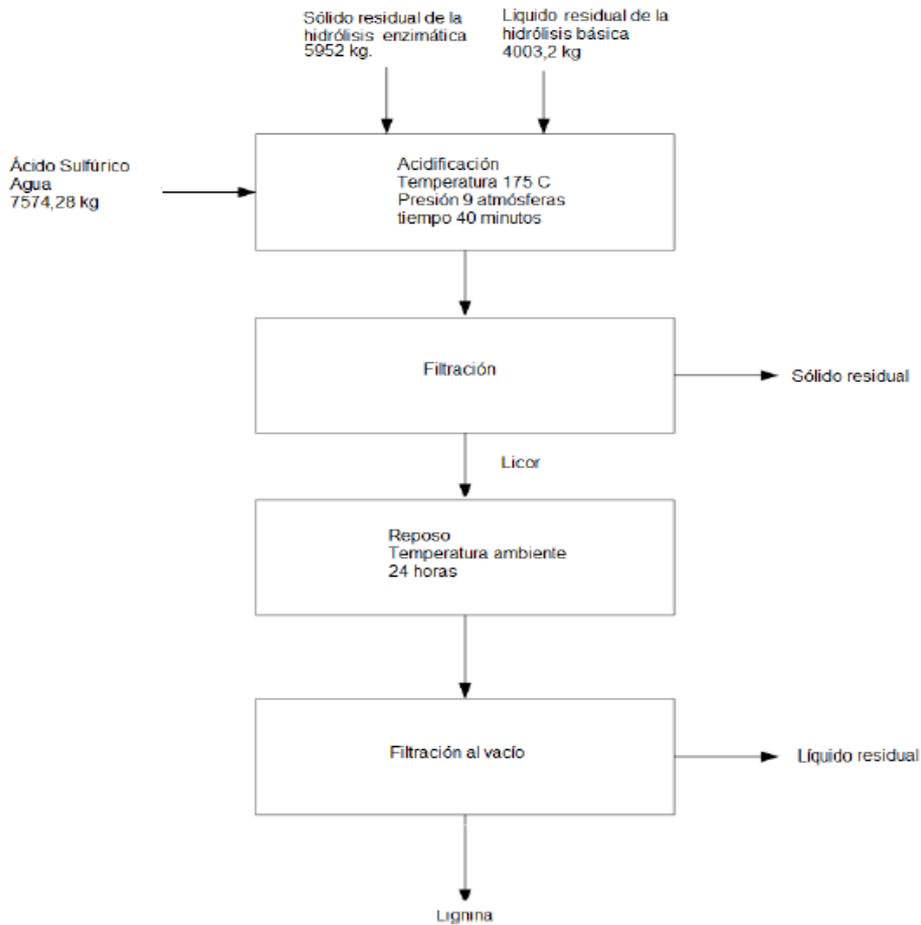


Figura 3. Esquema del proceso (Guirola y Villanueva, 2020)

Al calcular la rentabilidad de este proceso en particular resulta ser no rentable, (Gutiérrez y col., 2020), sin embargo como se ha expresado con anterioridad, de Armas, (2019) propone un proceso que integra varias producciones a partir de la caña de azúcar en el concepto de biorrefinería, que resulta factible económicamente, se trata en este momento de introducir la elaboración de la lignina en este esquema de producción y comprobar si continúa manteniendo la rentabilidad del mismo. El esquema final con la biorrefinería integrada se muestra en la figura 4.

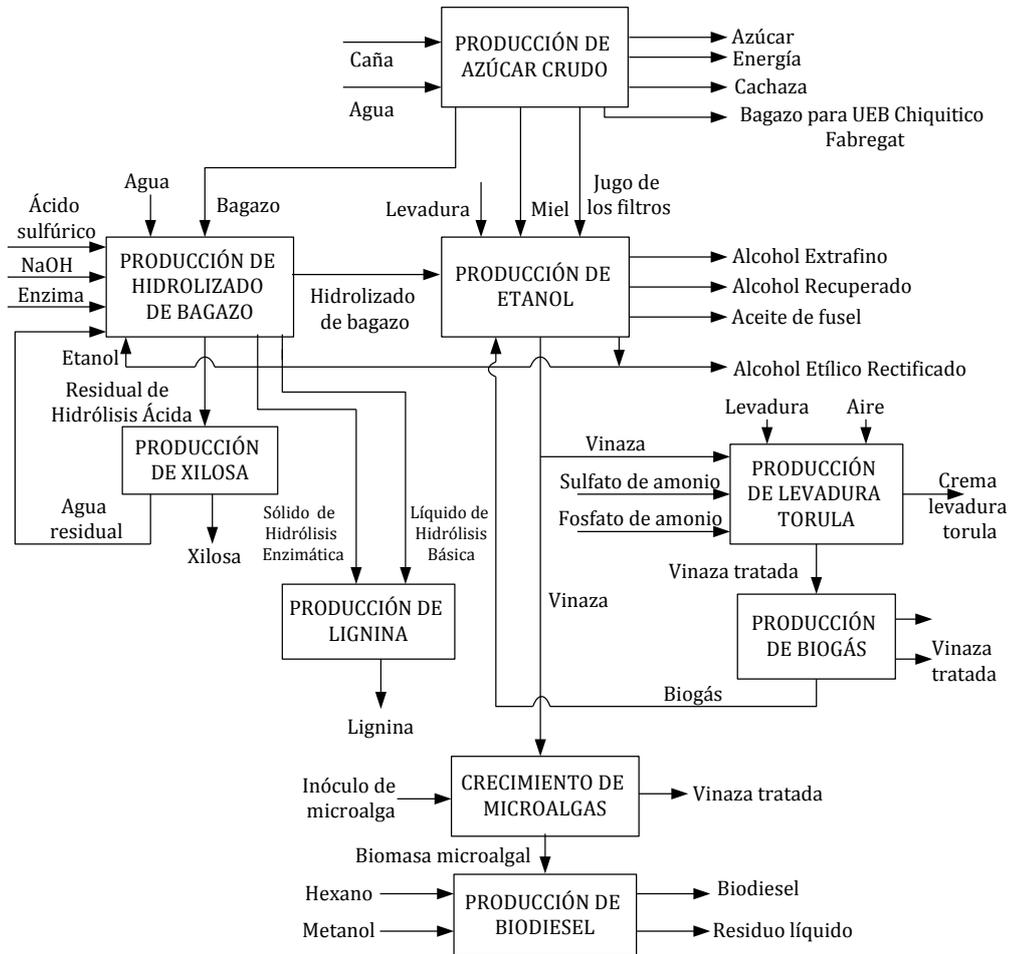


Figura 4. Esquema de integración de la lignina en la biorrefinería

Con el objetivo de valorar la factibilidad de inversión del esquema de biorrefinería con la integración de la lignina, se determinan los indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN, TIR y PRD, tomando una tasa de interés del 15%, y se obtienen los siguientes indicadores:

VAN = \$ 69 927 897,71, TIR = 38,7% y PRD = 5 años

Como se observa se obtienen valores que demuestran la factibilidad de la inclusión de la producción de lignina en el concepto de biorrefinería, manteniendo la recuperación de la inversión en el período determinado por de Armas, (2019) que fue de 5,2 años (figura 5), aun cuando el precio de la lignina se toma en su valor inferior (5 USD/kg), esto brinda flexibilidad a la inversión en cuanto al precio del producto.



a) b)
Figura 5. Perfil del VAN para el esquema de biorrefinería
a) Incluida lignina y b) sin incluir lignina

4. CONCLUSIONES

1. La lignina producida por hidrólisis del bagazo en el proceso de obtención de bioetanol, de acuerdo a sus propiedades, ofrece posibilidades para ser utilizada en la elaboración de fibras de carbono, vainillina, y en la producción de derivados del fenol.
2. El proceso propuesto puede ser integrado en el concepto de biorrefinería propuesto por de Armas, (2019).
3. La inclusión de la producción de lignina en el concepto de biorrefinería resulta factible desde el punto de vista económico con los siguientes indicadores económicos: VAN \$ 69 927 897,71; TIR 38,7%; PRD 5 años, manteniendo la rentabilidad alcanzada en trabajos anteriores (de Armas, 2019).

REFERENCIAS

- Behling, R., Valange, S., & Chatel, G., Heterogeneous catalytic oxidation for lignin valorization into valuable chemicals: what results? What limitations? What trends? *Green Chemistry*, Vol. 18, No. 7, 2016, pp. 1839–1854.
- Castilla, J., O’Flaherty, V., & Lens, P., Biorefineries: Industrial innovation and tendencias. *Biorefinery.*, Springer, Cham, 2019, pp. 3-35.
- de Armas, A.C., Evaluación de alternativas de biorrefinería en el central “5 de Septiembre.”, Tesis presentada para la obtención del grado científico de Máster en Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2017.
- de Armas, A.C., Evaluación de esquemas de biorrefinería de segunda y tercera generación en una industria azucarera cubana., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2019.
- Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R., & Xu, C., Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 123, May 2020, pp. 109768-109774.
- González, E., Aspectos técnicos-económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de azúcar., Universidad de Jaén, España, 2012.
- Gosselink, R.J.A., De Jong, E., Guran, B., & Abächerli, A., Coordination network for lignin standardization, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN)., *Industrial Crops and Products*, Vol. 20, No. 2, 2004, pp. 121-129.
- Guirola, C., & Villanueva, G., Informe de práctica de producción., Carrera de Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2020.
- Gutiérrez, A., Oportunidades que ofrece la lignina como materia prima., Informe de investigación, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2020, pp. 1-20.
- Gutiérrez, A., Guirola, C., de Armas, A.C., Albernas, Y., Villanueva, G., & González, E., Valorización de la lignina en el concepto de biorrefinería (I)., *Centro Azúcar*, Vol. 47, No. 3, 2020, (*in press*).
- Hassan, S.S., Williams, G.A., & Jaiswal A.K., Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass., *Bioresource Technology*, Vol. 262, 2018,

pp. 310-318.

- Kafarov, V., y González, A.D., Biorrefinería basada en microalgas: temas a considerar., CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 4, No. 4, 2011, pp. 5-22.
- Manual sobre biorrefinerías en España., BioPlat, SUSCHEM. 2017. Disponible en: http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_cont_URI_4020.pdf
- Mao, C., H-lignin from FPInnovations' TMP-bio process., 2018. Disponible en: [http://www. TMP-bio process.org](http://www.TMP-bio process.org).
- Martín, P., y Martín, J., Biorrefinerías basadas en explotaciones agropecuarias y forestales., Materiales elaborados como parte del Proyecto de Innovación Docente de la Universidad de Zaragoza PIIDUZ_16_276., España, 2017. Disponible en: https://ocw.unizar.es/ocw/pluginfile.php/915/mod_resource/content/1/Manual%20del%20curso.pdf
- Martinez-Hernandez, E., Cui, X., Scown, C.D., Amezcua-Allieri, M.A., Aburto, J., & Simmons, B.A., Techno-economic and greenhouse gas analyses of lignin valorization to eugenol and phenolic products in integrated ethanol biorefineries., *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Vol. 13, No. 4, 2019, pp. 978-993.
- Miller, J., Faleiros, M., Pilla, L., & Bodar,t A-C., The lignin: technology, applications and markets., *Multibiorefinery. Special Market Analysis Study.*, RISI, Inc. 2016, pp. 1-138.
- Nour-Edinne, E.M., Despolimerización de lignina para su aprovechamiento en adhesivos para producir tableros de partículas., *Universitat Rovira i Virgili. Tarragona, España*, 2007, pp. 1-140.
- Obydenkova, SV., Kouris, P.D., Hensen, E.J.M., Smeulders, D.M.J., van der Meer, Y., & Boot, M.D., Industrial lignin from 2G biorefineries – Assessment of availability and pricing strategies., *Bioresources Technology*, Vol. 291, 2019, pp. 121805-121815.
- Smolarski, N., High-value opportunities for lignin: unlocking its potential., *Frost Sullivan Paris*, 2012, pp. 1-15.
- Tarabanko, V.E., & Tarabanko, N., Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: General process trends and development prospects., *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 18, No. 11, 2017, pp. 2421-2471.
- Temmes, A., & Peck, P., Do forest biorefineries fit with working principles of a circular bioeconomy? A case of Finnish and Swedish initiatives., *Forest Policy and Economics*, Vol. 110, 2020, pp. 101896-101907.
- Vishtal, A., & Kraslawski, A., Challenges in industrial applications of technical lignins., *BioResources*, Vol. 6, No. 3, 2011, pp. 3547-3568.
- Wyman, C.E., Economics of a biorefinery for coproduction of succinic acid, ethanol, and electricity., *Abstracts of Papers of the American Chemical Society, Part 1*, 2001, pp. U119-U119.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Aixa R. Gutiérrez Villanueva. Realizó el estudio de las aplicaciones y productores de la lignina y participó en la escritura del artículo.
- Estudiante Ing. Claudia Guirola Céspedes. Realizó los cálculos de factibilidad económica y participó en la escritura del artículo.
- Dra.C. Ana Celia de Armas Martínez. Participó en la integración en el concepto de biorrefinería del proceso de obtención de lignina y en la evaluación económica.
- Dra.C. Yaillet Albernas Carvajal. Participó en la concepción del proceso y en la evaluación económica.
- Dra.C. Gretel Villanueva Ramos. Dirigió la investigación y participó en la escritura del artículo.