

**Artículo Original**

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

**LIGNIN VALORIZATION IN BIOREFINERY CONCEPT (I)**

Aixa R. Gutiérrez Villanueva<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5696-6179>

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

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

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

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

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

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

Recibido: Febrero 20, 2020; Revisado: Febrero 26, 2020; Aceptado: Marzo 30, 2020

**RESUMEN**

**Introducción:**

El uso de la lignina como fuente de biocombustibles, químicos y alimentos en las biorrefinerías del futuro es un tópico de interés científico creciente. La lignina es un polímero natural heterogéneo, de carácter aromático, constituyente de las plantas, usualmente asociado a la celulosa y la hemicelulosa. La multifuncionalidad química de la misma le imparte propiedades muy variadas que permiten un apreciable número de transformaciones químicas. La hidrólisis del bagazo de caña de azúcar en el concepto de biorrefinería produce corrientes ricas en lignina que aún no han sido valorizadas.

**Objetivo:**

Proponer un esquema de producción de lignina que podría ser integrado en el concepto de biorrefinería, a partir de la determinación de las posibles aplicaciones de la misma.

**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 propone un esquema de producción y se determinan las características principales del mismo.

**Resultados y Discusión:**

Las aplicaciones de la lignina residual del proceso organosolv que se están desarrollando son muy variadas: formulación de espumas de poliuretano, relleno en películas de ácido poliláctico, producción de fibras de carbono, como agentes



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](mailto:agvillanueva@uclv.cu)



antioxidantes y antimicrobianos y en alimentos. Las etapas del proceso de producción incluyen operaciones con reacción química y operaciones de separación.

**Conclusiones:**

El proceso propuesto se justifica con las aplicaciones de la lignina y puede ser integrado a la biorrefinería propuesta en trabajos anteriores.

**Palabras clave:** bagazo; biorrefinería; lignina.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

The use of lignin as biofuels, chemicals and food source in future biorefineries is a growing topic in scientific interest. Lignin is an aromatic heterogeneous natural polymer, present in plants, usually associated with cellulose and hemicellulose. Its chemical multifunctionality imparts very varied properties that allow an appreciable number of chemical transformations. Hydrolysis of sugarcane bagasse in the biorefinery concept produces lignin-rich currents that have not yet been recovered.

**Objective:**

To propose a lignin production scheme that could be integrated into the biorefinery concept, based on its possible applications determination.

**Materials and Methods:**

A search (briefing) that provides useful data for the development lignin obtaining process is carried out, based on this, a production scheme is proposed and its main characteristics are determined.

**Results and Discussion:**

The applications of residual lignin from organosolv process that are being developed are very varied: formulation of polyurethane foams, filler in polylactic acid films, carbon fibers production, as antioxidant and antimicrobial agents and in food. Production process stages include chemical reaction and separation operations.

**Conclusions:**

The proposed process is justified with lignin applications and can be integrated into the biorefinery proposed in previous works.

**Keywords:** bagasse; biorefinery; lignin.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La lignina es uno de los biopolímeros más abundantes en las plantas junto con la celulosa y la hemicelulosa. Al igual que muchos otros componentes de la biomasa, la lignina se forma mediante la reacción de fotosíntesis y su función estructural es la aglomeración de las fibras de celulosa dotando de rigidez a la planta (Chávez y Domine, 2013). La composición o distribución de los tres componentes en esas redes varía dependiendo del tipo de planta, pero la lignina puede representar entre un 15% y hasta un 40% del peso seco del material lignocelulósico (Sustainable Forestry for Bioenergy & Bio-based Products, 2007).

El término "lignina" (del latín lignum, madera) fue usado por primera vez por el botánico suizo A.P. Candolle. En 1865, Schulze utilizó el término para describir la parte

que se disuelve de la madera cuando se trata con ácido nítrico. En la década de 1960 con el desarrollo de la bioquímica y la química orgánica, aumentó la cantidad de información de interés con respecto a este producto, lo que ha provocado que la investigación sobre lignina ha crecido a un ritmo acelerado, llamando así la atención predominantemente de las industrias papeleras (Chávez y Domine, 2013). En la actualidad está considerada como un recurso renovable asequible y de potencial uso industrial (Yoo y col., 2020), (Dessbesell y col., 2020) cuya producción anual se ha estimado en el intervalo de  $5\text{-}36 \times 10^8$  toneladas (Gellerstedt y Henrinksson, 2008). Los métodos de obtención de la lignina según Noguero (2017), son:

- Lignina soda: emplea NaOH como reactivo químico.
- Lignina organosolv: Se lleva a cabo deslignificación de biomasa con mezcla de agua y solventes orgánicos.
- Lignina Klason: Producto de la hidrólisis con ácido sulfúrico de los polisacáridos de la biomasa.
- Lignina de proceso de ácido diluido: Se usan ácidos a alta temperatura.

La lignina presenta una serie de ventajas que permitirían su aplicación en diversos sectores de interés económico e industrial. Al ser procedente de la biomasa, es de origen renovable y representa entre el 0,25 y el 0,33 de todo el carbono orgánico renovable en la tierra. Por otra parte, tiene gran potencial como materia prima pues es el único polímero natural abundante de origen aromático además de poseer alta reactividad brindada por su estructura con alto número de grupos hidroxilo. Todo esto hace que pueda ser base de una economía sostenible al integrar su producción en el concepto de biorrefinería (Guirola, 2020).

El bagazo, como todos los materiales lignocelulósicos tiene como componentes fundamentales, celulosa, lignina y hemicelulosa. Al diversificarse la industria azucarera, el bagazo ha dejado de ser un residual, y hoy se considera una materia prima fundamental en la producción de energía y como fuente de productos de alto valor agregado, de ahí que su inserción en el concepto de biorrefinería abre una serie de posibilidades por su carácter renovable (de Armas y col., 2018), (de Armas y col., 2019). Un esquema de biorrefinería de los materiales lignocelulósicos parte del fraccionamiento de la biomasa en sus tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina (Baudel y col., 2005). A partir de estas fracciones pueden obtenerse múltiples productos que incluyen vapor y/o electricidad, biocombustibles (mediante la fermentación de la glucosa principalmente) y líneas de productos químicos basados en la celulosa, la xilosa y la lignina. De acuerdo con Morales y col., (2011), la obtención de productos de alto valor agregado a partir del bagazo, así como su utilización para la cogeneración implican varios factores que deben conformar una estrategia adecuada para la correcta diversificación de esta materia prima como son:

- Disponer de tecnologías técnica y económicamente viables para la separación de los polímeros naturales que lo componen, es decir, disponer de las fuentes de celulosa, lignina y xilosa.
- Integrar el proceso de producción para el producto en cuestión con las restantes corrientes que se generan que no pueden ser consideradas residuos por su magnitud y valor.
- Disponer de un mercado seguro para todos los productos integrados que

garanticen la efectividad empresarial del proceso. Estos son procesos que requieren mucho capital e inversiones intensivas por lo que la garantía del mercado y la explotación a máxima capacidad son condicionantes de gran peso para emprender estos proyectos.

Sobre la base de estas premisas se ha propuesto por de Armas (2019) un esquema que integra la producción de una empresa azucarera en el concepto de biorrefinería. En ese trabajo se integra la producción de hidrolizados de bagazo para la posterior producción de etanol y la fabricación de la xilosa, sin embargo no se da utilización a corrientes ricas en lignina del tipo organosolv, resultantes de los procesos.

El objetivo del presente trabajo es proponer un esquema de producción de lignina que podría ser integrado en el concepto de biorrefinería, a partir de la determinación de las posibles aplicaciones de la misma.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para comenzar el desarrollo de un proceso es necesario conocer las aplicaciones 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. Partiendo de las necesidades del proceso el *briefing* se realizó a través de una búsqueda bibliográfica en internet, con el objetivo de brindar información sobre los usos del producto, en el entorno del mercado de las materias primas, describiendo sus rasgos y datos técnicos más notables, de esa forma se revisan y analizan las oportunidades que ofrece la lignina como materia prima.

Según se plantea en de Armas (2019), 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 servirían de punto de partida para la producción de lignina. Se trata de 5 952 kg/d de un sólido residual obtenido de la filtración del producto de la hidrólisis enzimática y de una corriente líquida (4 003,2 kg/d) proveniente de la hidrólisis básica, ambos ricos en lignina, que constituyen la materia prima del proceso a implementar. Una vez establecido el esquema de producción se calculan los balances de materiales y son propuestos los equipos necesarios, determinando el costo de los mismos.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Actualmente solo un 2% de la lignina generada, fundamentalmente en procesos de fabricación de pasta de papel se destina a otras aplicaciones de mayor valor añadido, principalmente del tipo lignosulfonatos, el resto se somete a procesos de combustión para la generación de energía.

La lignina posee propiedades energéticas similares a las de combustibles sólidos como el carbón mineral. Sus características fisicoquímicas pueden ser aprovechadas para la producción de energía térmica y/o eléctrica (Cotana et al., 2014). Así, la lignina se puede convertir en un biocombustible de tercera generación que disminuye los costos de operación que implica el abastecimiento energético a partir de biomasa, lo cual mejora la competitividad de esta fuente de energía renovable (Buranov y Mazza, 2008).

Torres y col., (2015), demuestran que debido a las características fisicoquímicas de la lignina, indicadas por los resultados del análisis próximo y su alto poder calórico, su

comportamiento es semejante al de los carbones sub-bituminosos. Por tanto, es posible la conversión energética de la lignina a través de sistemas más eficientes, tales como gasificación o co-combustión con dichos carbones (Suramaythangkoor & Gheewala, 2010), además la lignina puede ser peletizada y densificada, para hacer más fácil y económico su transporte. Este biocombustible ampliaría el uso de los recursos renovables con todas las ventajas que ello ofrece a la sociedad, sin embargo, la competitividad económica de los mismos y sus respectivos procesos industriales dependen del precio del petróleo y de que este se mantenga por encima de ciertos niveles. Contrariamente a lo esperado hace unos años para esta década, el precio del petróleo no ha subido como se preveía, lo que disminuye la competitividad de los biocombustibles y hace peligrar su futuro mercado (Noguerol, 2017).

Sin embargo, el mercado de los productos químicos y sobre todo aquellos de alto valor añadido (especialidades y productos de química fina), no ofrece esas complicaciones para los productos derivados de la biomasa, y particularmente de la biomasa lignocelulósica, sino todo lo contrario. Además, utilizando tratamientos apropiados se pueden preservar las funcionalidades que poseen las biomoléculas, obteniéndose compuestos de gran interés industrial a bajo coste económico, energético y químico (Holladay y col., 2007).

Las ligninas organosolv, a diferencia de las ligninas Kraft que contienen impurezas como cenizas y sales, tienen una alta pureza, y poseen bajo contenido en carbohidratos y cenizas (Oroumei y col., 2015). Por este motivo, ofrecen la posibilidad de ser convertidas en productos de valor añadido, resultando esta cuestión esencial dentro del concepto de biorrefinería integrada (Gordobil y col., 2016).

Las aplicaciones de la lignina residual del proceso organosolv que se están desarrollando son muy variadas. A continuación se detallan algunas de ellas (Gutiérrez, 2020).

### ***3.1. Aplicaciones de la lignina residual del proceso organosolv***

Las ligninas se han introducido en la formulación de espumas de poliuretano como refuerzo para sustituir a los polioles derivados del petróleo, dada la reactividad que le confieren la gran cantidad de grupos hidroxilo (fenoles y alifáticos) y grupos carboxilo que presenta en su estructura (Li y Ragauskas, 2012). Pan y Saddler (2013) reemplazaron los polioles en la formación de espuma rígida de poliuretano por lignina organosolv de madera dura y por lignina del proceso Kraft. Al analizar las propiedades de la espuma, estos autores concluyeron que la lignina organosolv ofrecía mejores resultados, ya que tenía mejor miscibilidad con los polioles.

La lignina procedente de un tratamiento organosolv con ácidos orgánicos, se ha probado como sustituto del fenol en la formulación de las resinas fenol-formaldehído tipo resol (Tachon y col., 2016). También se ha estudiado con la lignina resultante del proceso organosolv que emplea la mezcla etanol/agua como disolvente (Cheng y col., 2013). Tachon y col., (2016) consiguieron sintetizar una resina lignina-fenol-formaldehído, en la cual el 70% del fenol fue reemplazado por la lignina organosolv, sin modificación previa. Estas resinas alcanzaron propiedades físico-químicas similares a las resinas estándar y los requerimientos para ser usadas como adhesivos en la fabricación de

paneles de contrachapado, confirmando que los paneles que usaban este tipo de resinas alcanzaban las especificaciones para paneles industriales.

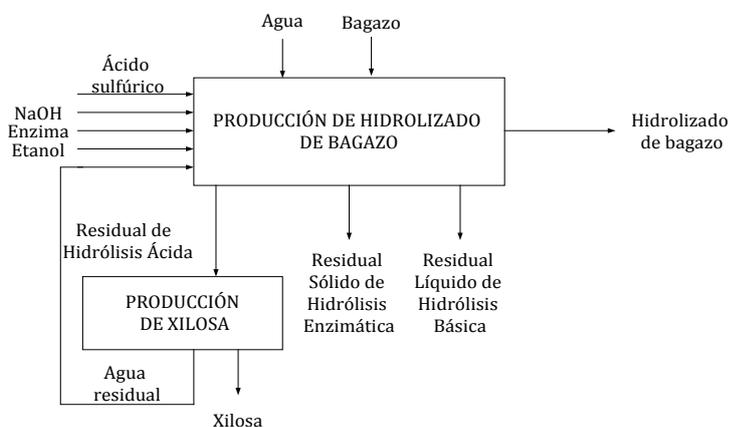
Otra posible aplicación de las ligninas procedentes del proceso organosolv, es su uso como relleno en películas de ácido poliláctico (PLA). Este material por sí solo es rígido y quebradizo y presenta una baja capacidad de deformación. Mediante la esterificación de las ligninas organosolv con ácidos grasos, se consigue modificar sus propiedades térmicas como la reducción de su temperatura de transición vítrea, por lo que al incorporarse al PLA le proporcionan plasticidad, reduciendo la rigidez y mejorando la ductilidad de los materiales así obtenidos (Gordobil y col., 2016).

Una salida viable para las ligninas organosolv es su aplicación como precursores para la producción de fibras de carbono (Baker y Rials, 2013). Para facilitar el proceso de producción, las ligninas se mezclan con otros polímeros, como el óxido de polietileno (PEO) o el poliacrilonitrilo (PAN). Oroumei y col., (2015) estudiaron la mezcla de la lignina organosolv de una madera dura, en diferentes proporciones, con el (PAN). Estas fibras presentaban una temperatura de degradación mayor que la de sus componentes de forma individual y una menor energía de activación en la pirólisis que las fibras de PAN puras.

Varias ligninas obtenidas mediante procesos organosolv han sido sometidas a ensayos de actividad antioxidante y los resultados han sido satisfactorios, demostrando así su potencial para ser aplicado en la industria cosmética (Espinoza-Acosta y col., 2016). Se ha demostrado su capacidad antimicrobiana ante levaduras y microorganismos como *E.coli* y *S.cerevisiae*, que pueden ser inhibidos por fragmentos de lignina. El mecanismo de actuación se basa en la rotura de la membrana celular y, por tanto, de la bacteria por parte de los compuestos fenólicos (Espinoza-Acosta y col., 2016).

Dopico y Cordero, (2012), obtuvieron lignina a partir del bagazo de caña de azúcar mediante hidrólisis ácida en fase heterogénea. El producto obtenido presentó un contenido de lignina insoluble en ácido mayor que 65 % y cenizas menores que 2 %. Los ensayos con este producto en alimentos funcionales (gelatina de fresa) demostraron la posibilidad de usar la lignina como fibra dietética, con ayuda de sustancias como la goma arábiga para mantener las partículas en suspensión.

Una vez determinados los posibles destinos de la lignina, se procede a elaborar una propuesta de proceso de producción que posteriormente pueda ser integrado en el concepto de biorrefinería propuesto por de Armas (2019) (figura 1) (Guirola y Villanueva, 2020).



**Figura 1.** Proceso propuesto para hidrólisis del bagazo (de Armas, 2019)

### 3.2. Condiciones de operación del proceso de obtención de lignina

Se propone tratar 5952 kg/d del sólido residual obtenido de la filtración del producto de la hidrólisis enzimática y de una corriente líquida (4 003,2 kg/d) proveniente de la hidrólisis básica (HB), ambos ricos en lignina, estos constituyen la materia prima del proceso a implementar. Ambas corrientes son añadidas a un reactor que opera a 9 atm y a una temperatura de 175°C para lograr una acidificación a un pH aproximado a 2,0, de la mezcla obtenida (Fraguela y col., 2013). En esta etapa se agrega una solución de ácido sulfúrico y la reacción ocurre durante 40 minutos. Posteriormente, la mezcla resultante es filtrada donde se obtiene un sólido residual y un licor rico en lignina, el cual se deja en reposo durante 24 h a temperatura ambiente. Luego, este líquido se somete a una filtración a vacío donde se logra separar la lignina del mismo obteniéndose un líquido residual. En la figura 2 se muestra el esquema de las operaciones necesarias en el proceso combinando las propuestas de Fraguela y col., (2013) y Santos (2017).

Teniendo en cuenta la alimentación a la primera etapa (tabla 1), se observa que el volumen total de la misma es de 92 m<sup>3</sup>, por tanto, se decide establecer 10 templas por día para el tratamiento de 9,2 m<sup>3</sup> de mezcla en cada templa, lo cual se puede llevar a cabo en 2 reactores de 4,6 m<sup>3</sup>, puesto que la reacción ocurre en un tiempo de 40 minutos.

**Tabla 1.** Alimentación a la primera etapa

<i>Sustancia</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Volumen (m<sup>3</sup>)</i>
Bagazo	5 952	80	74,4
Líquido residual de Hidrólisis Básica	4 003,2	1 000	4,003
Mezcla ácida	7 574,28	579	13,08
Volumen total			92

Posteriormente esta mezcla es filtrada, dados los volúmenes de trabajo se escogen dos filtros rotatorios al vacío que suplen la capacidad requerida. Para el almacenamiento y reposo del líquido rico en lignina se proponen 10 tanques donde el producto se mantendrá durante 24 h. Este licor se alimenta a dos filtros que trabajan al vacío para separar la lignina de un licor residual. En la figura 2 se muestra un esquema general del proceso que se propone.

Para el almacenamiento y reposo del líquido rico en lignina se proponen 10 tanques de 9,5 m<sup>3</sup> de volumen, donde el producto se mantendrá durante 24 h. Este licor se alimenta a dos filtros que trabajan al vacío para separar la lignina de un licor residual. Con estos datos se elaboran los balances de materiales y energía, determinándose que a partir de las corrientes procedentes del proceso propuesto por de Armas (2019) se pueden producir 2 450,84 kg de lignina por día, se escoge el equipamiento necesario para la producción, cuyos costos se muestran en la tabla 2.

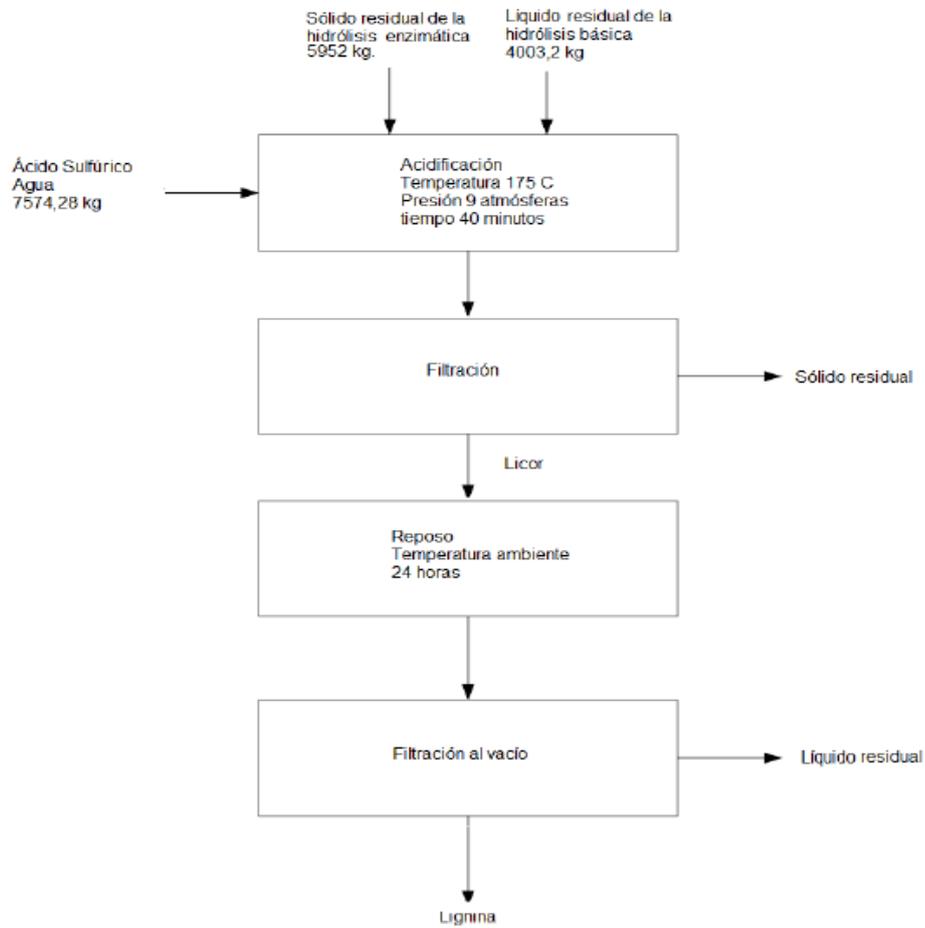


Figura 2. Esquema del proceso

Tabla 2. Costos del equipamiento

<i>Equipo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo (USD)</i>
Filtro entrada	2	13 315,73
Filtro salida	2	15 207,48
Reactores	2	33 787,58
Bombas	10	32 119,95
Tanques de almacenamiento	7	12 619,82

En la tabla 3 aparecen los costos de las materias primas y el precio de venta del producto.

Tabla 3. Costos de materias primas y producto final para la producción de lignina

<i>Materia prima</i>	<i>Precio (USD/u)</i>	<i>Cantidad (u/año)</i>	<i>Costo (USD)</i>
Ácido sulfúrico (kg)	0,2	166 215	33 243
Agua (m <sup>3</sup> )	0,25	60 528,30	15 132,075
<i>Producto final</i>	<i>Precio (USD/u)</i>	<i>Cantidad (u/año)</i>	<i>Costo (USD)</i>
Lignina (kg)	5	835 874,58	4 179 372,91

Al calcular la rentabilidad de este proceso en particular resulta ser no rentable, con un VAN negativo, 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.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. La lignina ofrece posibilidades para ser utilizada como materia prima o recurso renovable para la producción de productos químicos y biocombustibles tanto desde el punto de vista estructural como de la facilidad de su obtención y aislamiento.
2. Utilizando las corrientes residuales del proceso de hidrólisis del bagazo de caña de azúcar propuesto por de Armas (2019), es posible obtener 2 450,84 kg de lignina por día.
3. El proceso propuesto por sí solo no resulta factible desde el punto de vista económico, sin embargo es necesario determinar si la inclusión de la producción de lignina en el concepto de biorrefinería demuestra serlo.

#### **REFERENCIAS**

- Baker, D.A., & Rials, T.G., Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin., *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 130, No. 2, 2013, pp. 713-728.
- Baudel, E.M., Zaror, C & de Abreu, C.A.M., Improving the value of sugarcane bagasse wastes via integrated chemical production systems: an environmentally friendly approach., *Industrial Crops and Products*, Vol. 21, No.3, 2005, pp. 309-315.
- Buranov, A. U., & Mazza, G., Lignin in straw of herbaceous crops., *Industrial Crops and Products*, Vol. 28, No. 3, 2008, pp. 237-259.
- Chávez, M., & Domine, M., Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial., *Avances en Ciencias e Ingeniería*, Vol. 4, No. 4, 2013. pp. 15-46.
- Cheng, S., Yuan, Z., Leitch, M., Anderson, M., & Xu, C.C., Highly efficient depolymerization of organosolv lignin using a catalytic hydrothermal process and production of phenolic resins/adhesives with the depolymerized lignin as a substitute for phenol at a high substitution ratio., *Industrial Crops and Products*, Vol. 2013, pp. 315-322.
- Cotana, F., Cavalaglio, G., Nicolini, A., Gelosia, M., Coccia, V., Petrozzi, A., & Brinchi, L., Lignin as co-product of second generation bioethanol production from ligno-cellulosic biomass., *Energy Procedia*, Vol. 45, 2014, pp. 52-60.
- 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.
- de Armas, A.C., Morales, M., Albernas, Y., & González, E., Alternativas para convertir una fábrica azucarera cubana en una industria biorefinera., *Centro Azúcar*, Vol. 45, No. 3, 2018, pp. 65-77.
- de Armas, A.C., Morales, M., Albernas, Y., & González, E., Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación., *Tecnología Química*, Vol. 39,

No. 3, 2019, pp. 489-507.

- 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, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>.
- Dopico, L., & Cordero, D., Lignina de bagazo como fibra dietética., *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, Vol. 46, No. 1, 2012, pp. 46-50.
- Espinoza-Acosta, J.L., Torres-Chávez, P.I., Ramírez-Wong, B., López-Saiz, C.M., & Montañón-Leyva, B., Antioxidant, antimicrobial, and antimutagenic properties of technical lignins and their applications., *BioResources*, Vol. 11, No. 2, 2016, pp. 5452-5481.
- Fraguela, H, Laucerica J., de Moraes G, Barbosa I, & Martín, C., Fraccionamiento de bagazo de caña de azúcar por prehidrólisis ácida y tratamiento con glicerol., *Centro Azúcar*, Vol. 40, No. 2, 2013, pp. 61- 71.
- Gellerstedt, G. & Henriksson, G., Lignins: Major sources, structure and properties., En M. Naceur Belgacem, & A. Gandini (Edits.), *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, Amsterdam: Elsevier B.V., 2008, pp. 201-224.
- Gordobil, O., Egués, I., & Labidi, J., Modification of Eucalyptus and Spruce organosolv lignins with fatty acids to use as filler in PLA., *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 104, 2016, pp. 45-52.
- 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.
- Holladay, J.E., Bozell, J.J., White, J.F. & Johnson, D.J., Top Value-Added Chemicals from Biomass., Volumen II: Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin., United States of America: U.S. Department of Energy, 2007, pp. 50-85.
- Li, Y., & Ragauskas, A.J., Ethanol organosolv lignin-based rigid polyurethane foam reinforced with cellulose nanowhiskers., *RSC Advances*, Vol. 2, No. 8, 2012, pp. 3347-3351.
- Morales, M., Mesa, L., González, E., & Castro, E., Evaluación de residuales de la hidrólisis ácida del bagazo como productos de alto valor añadido., *Afinidad*, Vol. LXVIII, No. 556, 2011, pp. 453-458.
- Noguerol, R., Valorización de la lignina., CETIM, 2017. Disponible en: [www.fundacioncetim.com](http://www.fundacioncetim.com), fecha de acceso: Enero, 2020.
- Oroumei, A., Fox, B., & Naebe, M., Thermal and rheological characteristics of biobased carbon fiber precursor derived from low molecular weight organosolv lignin., *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2015, pp. 758-769.
- Santos, T., Autohidrólisis y deslignificación organosolv de madera de *Pinus radiata* para la recuperación de hemicelulosas y lignina con aprovechamiento de la fracción celulósica por vía enzimática., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid, España, 2017.

- Suramaythangkoor, T., & Gheewala, S.H., Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand., *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, 2010, pp. 128-133.
- Sustainable Forestry for Bioenergy & Bio-based Products, 2007. Disponible en: <http://learn.forestbioenergy.net/>, fecha de acceso: Enero, 2020.
- Tachon, N., Benjelloun-Mlayah, B., & Delmas, M., Organosolv wheat straw lignin as a phenol substitute for green phenolic resins., *BioResources*, Vol. 11, No. 3, 2016, pp. 5797-5815.
- Torres, R., Montero, G., Beleño, M., Toscano, L., & Pérez, L., Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación., *Ciencia y Tecnología*, Vol. 15, 2015, pp. 151-164.
- Yoo, C.G., Meng, X., Pu, Y., Ragauskas, A.J., The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review., *Bioresource Technology*, Vol. 301, April 2020, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122784>.

## **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 de la lignina organosolv y participó en la escritura del artículo.
- Estudiante Ing. Claudia Guirola Céspedes. Realizó los balances de masa y energía del proceso de obtención de lignina organosolv y participó en la escritura del artículo.
- Dra.C. Ana Celia de Armas Martínez. Participó en los balances de masa y energía del proceso de obtención de lignina organosolv y 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.