

Producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza mediante fermentación ABE en Colombia

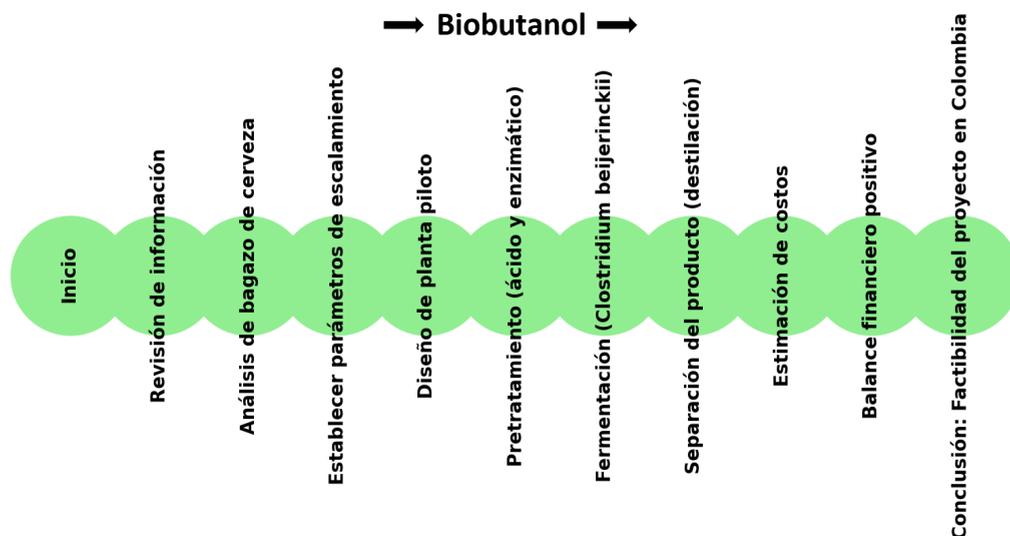
Orlando Castiblanco Urrego^a ; Dany José Cárdenas Romay 

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C. – Colombia.

^aorlando.castiblanco@profesores.uamerica.edu.co

Fecha recepción: 5 de marzo 2024
Fecha aceptación: 3 de noviembre de 2024

Resumen gráfico



Resumen

El artículo explora la viabilidad de producir biobutanol a partir de bagazo de cerveza en Colombia mediante fermentación ABE (Acetona-Butanol-Etanol), utilizando el microorganismo *Clostridium beijerinckii*. Para evaluar el proceso, se revisó la información de diferentes bases de datos, se analizó la disponibilidad de bagazo de cerveza, principalmente proveniente de la cervecera Bavaria, y se establecieron los parámetros de escalamiento, con un diseño de planta piloto que produciría 100 kg de biobutanol mensuales. La producción involucra el pretratamiento ácido y enzimático del bagazo, seguido de fermentación y separación del producto a través de destilación. Los costos se estimaron en términos de infraestructura, operación y mano de obra, alcanzando un balance financiero positivo. El estudio sugiere que una planta piloto de biobutanol sería factible en Colombia, dadas las condiciones locales de materia prima, tecnología y mercado de biocombustibles, ofreciendo beneficios ambientales y económicos al reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la gestión de residuos industriales.

Palabras clave: Bagazo de cerveza; Biocombustible; Biobutanol; *Clostridium beijerinckii*; Fermentación ABE; Hidrólisis ácida; Hidrólisis enzimática.

Cita: Castiblanco Urrego O; Cárdenas Romay DJ. Producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza mediante fermentación ABE en Colombia. rev. ion. 2024;37(3):27-41. doi:10.18273/revion.v37n3-2024003

Biobutanol production from beer bagasse through ABE fermentation in Colombia

Abstract

The article explores the feasibility of producing biobutanol from beer bagasse in Colombia through ABE (Acetone-Butanol-Ethanol) fermentation, using the microorganism *Clostridium beijerinckii*. To evaluate the process, information from various databases was reviewed, the availability of beer bagasse—mainly from Bavaria brewery—was analyzed, and scaling parameters were established, with a pilot plant design capable of producing 100 kg of biobutanol per month. Production involves the acid and enzymatic pretreatment of the bagasse, followed by fermentation and product separation through distillation. Costs were estimated in terms of infrastructure, operation, and labor, achieving a positive financial balance. The study suggests that a biobutanol pilot plant would be feasible in Colombia, given the local conditions of raw materials, technology, and biofuel market, offering environmental and economic benefits by reducing dependence on fossil fuels and improving industrial waste management.

Keywords: Beer bagasse biofuel; Biobutanol; *Clostridium beijerinckii*; ABE fermentation; Acid hydrolysis; Enzymatic hydrolysis.

A produção de biobutanol a partir de bagaço de cerveja por meio de fermentação ABE na Colômbia

Resumo

O artigo explora a viabilidade de produzir biobutanol a partir do bagaço de cerveja na Colômbia através da fermentação ABE (Acetona-Butanol-Etanol), utilizando o microrganismo *Clostridium beijerinckii*. Para avaliar o processo, foram revisadas informações de várias bases de dados, analisada a disponibilidade de bagaço de cerveja—principalmente proveniente da cervejaria Bavaria—e estabelecidos os parâmetros de escala, com um projeto de planta piloto capaz de produzir 100 kg de biobutanol por mês. A produção envolve o pré-tratamento ácido e enzimático do bagaço, seguido de fermentação e separação do produto através de destilação. Os custos foram estimados em termos de infraestrutura, operação e mão de obra, alcançando um balanço financeiro positivo. O estudo sugere que uma planta piloto de biobutanol seria viável na Colômbia, dadas as condições locais de matéria-prima, tecnologia e mercado de biocombustíveis, oferecendo benefícios ambientais e econômicos ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis e melhorar a gestão de resíduos industriais.

Palavras-chave: Bagaço de cerveja; Biocombustível; Biobutanol; *Clostridium beijerinckii*; Fermentação ABE; Hidrólise ácida; Hidrólise enzimática.

Introducción

La creciente necesidad de recursos energéticos sostenibles impulsa el desarrollo de biocombustibles que incrementen la eficiencia y rentabilidad de los procesos energéticos. Los biocombustibles, derivados de biomasa con alto contenido de carbono en forma de carbohidratos, ofrecen la ventaja de reducir el impacto ambiental al disminuir las emisiones de CO₂ y contribuir a un ciclo de vida cerrado del producto. Dentro de estos combustibles destaca el biobutanol, un alcohol superior que, debido a su alto octanaje y rendimiento, se considera una alternativa directa a otros combustibles líquidos. A diferencia del bioetanol, el biobutanol genera más energía y puede utilizarse en motores de gasolina convencionales sin necesidad de adaptaciones adicionales [1].

Además, el biobutanol es químicamente idéntico al n-butanol derivado del petróleo, lo que le permite sustituirlo en múltiples aplicaciones industriales: como aditivo de gasolina, líquido para frenos, materia prima en procesos de síntesis, solvente en pinturas y recubrimientos, y en la industria cosmética y farmacéutica [2]. En este contexto, el bagazo de cerveza se presenta como una materia prima lignocelulósica adecuada para la producción de biobutanol, ya que contiene celulosa (12 - 25 %), hemicelulosa (20 - 25 %), lignina (12 - 28 %), proteína (19 - 30 %) y lípidos (10 %) [3]. Este subproducto de la industria cervecera, que representa el 85 % de sus residuos y se genera a razón de 20 kg por cada 100 L de cerveza producida, resulta accesible y económico, factores que lo posicionan como un recurso estratégico para su aprovechamiento en biocombustibles [4].

El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad técnica y económica de producir biobutanol a partir de bagazo de cerveza mediante el proceso de fermentación ABE (Acetona-Butanol-Etanol) en Colombia. Con esta finalidad, se plantea un diseño preliminar de una planta piloto para la producción de biobutanol, considerando la selección de equipos adecuados, el escalamiento del proceso y la estimación de costos asociados.

Metodología

La metodología del estudio aborda la viabilidad técnica y económica para la producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza mediante fermentación ABE en Colombia. Inicialmente, se realizó la búsqueda de información bibliográfica

con las ecuaciones ("biobutanol production" OR "ABE fermentation") AND ("beer bagasse" OR "brewery waste") AND AND ("acid hydrolysis" OR "enzymatic hydrolysis") AND ("pilot plant" OR "economic feasibility"), a través de bases de datos académicas como Scopus, SciELO y Lumieres, además de repositorios universitarios y páginas de Internet, recopilando referencias clave sobre la síntesis de biobutanol a partir del bagazo de cerveza en los últimos 10 años. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de factibilidad enfocado en el diseño y desarrollo de una planta piloto de producción. Este análisis incluyó la identificación de los procesos productivos específicos, una cuidadosa selección de equipos necesarios, el escalamiento del proceso y una estimación detallada de los costos asociados. Asimismo, se desarrollaron diagramas de bloques de proceso (PBD), de flujo de proceso (PFD) y un diagrama isométrico que representan visualmente las etapas y flujo de materiales en la planta.

Los aspectos clave de la metodología se estructuran en los siguientes enfoques:

Evaluación del potencial de la materia prima

Se analizó la disponibilidad, accesibilidad, costo y distribución del bagazo de cerveza en Colombia, principalmente enfocado en la producción de Bavaria, principal cervecera del país.

Análisis FODA

Se identificaron las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto. Esto facilitó el desarrollo de estrategias para mitigar riesgos y maximizar las oportunidades de éxito y sostenibilidad en el mercado.

Estado del arte y selección de ruta de síntesis

Se revisaron las rutas de síntesis del biocombustible, seleccionando la opción más adecuada en función de la eficiencia y viabilidad del proceso de fermentación ABE para el bagazo de cerveza.

Proceso de producción

Se detallaron las etapas de producción del biobutanol desde el pretratamiento, hidrólisis enzimática, detoxificación y fermentación, hasta la destilación y purificación del producto final. En esta fase, se proyectó una planta con capacidad de producción de 100 kg de biobutanol mensuales, considerando cada etapa del proceso para maximizar la rentabilidad.

Resultados y discusión

Los resultados provenientes de la revisión bibliográfica y de la propuesta de la planta se presentan a continuación.

Evaluación del potencial de la materia prima

En Colombia, el 70% del mercado cervecero está cubierto por la empresa Bavaria S.A. [4]; por lo tanto, es la que genera más bagazo de cerveza en el país, y su posición geográfica depende de la ubicación de sus diferentes plantas de producción de cerveza. Para el 2019 la empresa produjo 255,952 toneladas de bagazo de cerveza, distribuidas en las seis plantas de producción: Cervecería Tocancipá (37,1 %), Cervecería Valle (19,2 %), Cervecería Barranquilla (16,6 %), Cervecería Unión (11,3 %), Cervecería Boyacá (8,3%) y Cervecería Bucaramanga (7,5 %) [5].

Como puede observarse, la materia prima se encuentra altamente disponible, no sólo por las altas cantidades que se producen al año, sino por su amplia distribución y ubicación en puntos estratégicos. Por otra parte, la problemática del bagazo de cerveza incluye su alta humedad, costos de transporte, variabilidad en la composición, generación de residuos secundarios en el proceso y competencia en su uso. Estos desafíos exigen soluciones eficientes para maximizar su aprovechamiento en la producción de biocombustibles.

Actualmente, el bagazo de cerveza se gestiona de diversas maneras. Entre las opciones comunes se incluyen su uso como alimento para animales, su conversión en abono orgánico a través del compostaje, su incorporación en productos alimentarios para consumo humano, su aprovechamiento en la generación de energía mediante biomasa, su aplicación en la producción de productos químicos en investigaciones avanzadas, su reciclaje y reutilización interna en la fabricación de nuevas cervezas, así como su venta a terceros para diversas aplicaciones. Estas elecciones de gestión dependen de factores como el tamaño de la cervecería, la infraestructura disponible y las regulaciones locales, reflejando una creciente conciencia ambiental y la búsqueda de prácticas más sostenibles en la industria cervecera [6].

Una ventaja que supone el uso de esta materia prima es su bajo costo. En promedio se tiene un precio de 220 COP por kilogramo de bagazo cuando se encuentra húmedo, y 850 COP cuando se presenta como materia seca [7]. Por otra parte,

dada la amplia distribución de la materia prima en el país, se tendrán bajos costos de transporte, ya que dependiendo de la ubicación de la planta de producción de biobutanol se tendrá en cuenta la planta de producción de cerveza (bagazo) más cercana.

Por último, es necesario verificar los recursos que deben estar disponibles para la obtención de la materia prima. Para este caso, como el bagazo es un residuo, los recursos necesarios para asegurar esta materia prima son los que se utilizan para el proceso de elaboración de la cerveza, principalmente en las etapas de maceración y filtración. Todos estos materiales y equipos van a estar garantizados en la cantidad requerida, ya que son los esenciales para la fabricación de la cerveza.

Análisis FODA

A continuación, se exponen las estrategias determinadas para el desarrollo de la propuesta, a partir de la valoración de los aspectos internos (fortalezas, debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) encontrados durante su desarrollo [8].

Revisión del estado del arte

El proceso de producción de biobutanol a partir del bagazo de cerveza consta de una serie de etapas: pretratamiento, hidrólisis enzimática, detoxificación, fermentación y, finalmente, una destilación convencional. El pretratamiento consiste en agregar ácido sulfúrico para que aumente la accesibilidad de los azúcares fermentables a las enzimas, un precalentamiento y una hidrólisis. Para la hidrólisis enzimática se agrega NaOH (hidróxido de sodio) y agua para llegar a las condiciones deseadas de pH y concentración, y luego se enfría para agregar las enzimas correspondientes, como celulasas, hemicelulasas y glucanasas. Posteriormente, se separan los sólidos y el hidrolizado. En la etapa de detoxificación se debe hacer un pretratamiento a la corriente, añadiendo CaO (*óxido de calcio*) hasta conseguir el pH requerido, después se adiciona ácido sulfúrico para neutralizar y eliminar el sulfato de calcio que haya precipitado. La fermentación se da gracias al microorganismo *Clostridium beijerinckii* que utiliza los azúcares fermentables como fuente de carbono. Finalmente, en la destilación convencional se separa y se purifican los productos para obtener biobutanol con una pureza del 99,9 % [2].

La etapa de fermentación puede llevarse a cabo mediante diferentes vías, las cuales se presentan a continuación.

Tabla 1. Estrategias generadas del análisis FODA.

<p>Producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza</p>	<p>Fortalezas (F) Reducción en la emisión de CO₂. Producción de mayor energía y puede ser quemado directamente en motores de gasolina sin modificaciones previas. Sustituto directo del n-butanol derivado del petróleo.</p>	<p>Debilidades (D) El suministro del bagazo de cerveza seco es más costoso respecto al húmedo. La producción de butanol por la vía fermentativa ABE no puede competir económicamente con la síntesis petroquímica de los solventes [8]. Las concentraciones de azúcares son muy pequeñas, lo que supone una limitación de cara a su uso industrial [9].</p>
<p>Oportunidades (O) Aumento de ventas de biocombustible por alta contaminación de combustibles fósiles. Alto aprovechamiento por bajo costo de producción. Creciente importancia de la conciencia favorable al uso de energías renovables.</p>	<p>Estrategia FO: Ampliar la oferta de biobutanol en respuesta a la creciente demanda de energías renovables, reemplazando el butanol derivado del petróleo en los motores de gasolina sin modificación alguna.</p>	<p>Estrategia DO: Trabajar con la mayor cantidad de sólidos en el proceso para tener concentraciones de azúcar más altas y poder llegar a buenos rendimientos a nivel industrial.</p>
<p>Amenazas (A) -Reducción considerable del poder adquisitivo a nivel mundial. Creencia asociada con que los biocombustibles tienen como materia prima los alimentos. Nuevos descubrimientos de yacimientos petrolíferos por parte de las empresas petroleras.</p>	<p>Estrategia FA: Promover la masificación de la información respecto a las ventajas de usar biobutanol producido a partir de bagazo de caña respecto al petroquímico.</p>	<p>Estrategia DA: Determinar los equipos técnicos necesarios para realizar el secado del bagazo y su procesamiento a nivel industrial.</p>

Síntesis por vía metabólica

La vía metabólica utiliza glucosa derivada de la hidrólisis de carbohidratos que es degradada por la enzima amilasa para formar ácidos grasos y solventes por *C. Acetobutylicum* a través de fermentación anaeróbica. En la fermentación ABE, el carbono de los carbohidratos en forma de azúcares pentosa y hexosa (mono-, di-, tri- y polisacáridos) se metaboliza a través de la vía Embden-Meyerhof a piruvato. La degradación de 1 mol de azúcar conduce a 2 moles de piruvato con una formación neta de 2 moles de adenosín trifosfato (ATP) y 2 moles de nicotinamida adenina dinucleótido (NADH) [10].

El piruvato se convierte además en acetil-CoA y CO₂. A continuación, el acetil-CoA se convierte en otros intermedios (acetaldehído, butiraldehído) que finalmente conducen a productos oxidados (acetona y acetato) y reducidos como butanol y etanol. La primera aparición de intermediarios y formación de ácidos se conoce como acidogénesis,

esto ocurre en condiciones de crecimiento específicas, como valores de pH > 5 y limitación de hierro, es por este motivo que el ATP se genera continuamente durante este proceso [11].

Durante la acumulación de ácidos orgánicos (acidogénesis), el pH del cultivo se reduce, debido al cambio metabólico del *C. Acetobutylicum* de acidogénesis a solventogénesis. Los ácidos orgánicos se utilizan para la formación de disolventes (solventogénesis). La segunda fase de la fermentación ABE es la solventogénesis, una etapa en la que los ácidos se vuelven a asimilar para producir acetona, butanol, etanol, ácido acético y butírico, hidrógeno y CO₂ como productos principales [9]. Esta etapa de fermentación ocurre con frecuencia en varias cepas bacterianas de especies de *Clostridium* que utilizan una amplia gama de fuentes de carbono, como el almidón. Una materia prima, abundante y económica, investigada e identificada como sustratos alternativos para la producción de butanol mediante la fermentación

ABE es la biomasa lignocelulósica, como el bagazo de cerveza, entre otros [12].

El acetato y el butirato se adaptan a sus correspondientes derivados de CoA catalizados por la acetoacetil-CoA: acil-CoA transferasa, con acetoacetil-CoA como donante de CoA. El uso de acetato y butirato ocurre a través de acetoacetil-CoA: acetato / butirato: CoA vía transferasa (CoAT) con la formación de acetona [10]. El butiril-CoA se convierte en butiraldehído y finalmente en etanol y butanol. Mientras tanto, la acetoacetil-CoA se convierte en acetona y los acetaldehídos en etanol [12].

El biobutanol de primera generación requiere un proceso relativamente simple para producirse principalmente mediante la fermentación de azúcares, principalmente la hexosa. Estos azúcares se obtienen mediante la hidrólisis de cultivos ricos en almidón como el maíz, trigo, arroz y la yuca. Antes de su uso, las materias primas (granos) generalmente se hidrolizan en dextrosa, que posteriormente se puede bioconvertir en glucosa usando la enzima glucoamilasa [11].

Los biocombustibles de diferentes residuos agrícolas y que parten de la biomasa vegetal se denominan a menudo de segunda generación, porque los combustibles se derivan de materias primas que son residuos no comestibles de la producción de cultivos alimentarios o biomasa vegetal no comestible (por ejemplo, pastos, árboles y cultivos energéticos) [10]. La principal ventaja de la producción de biocombustibles de segunda generación es que no hay competencia con la cadena de alimentos y su disponibilidad es diversa. Los materiales lignocelulósicos se asocian con bajo costo, abundancia suficiente y generalmente generan bajas emisiones netas de gases de efecto invernadero, por lo que deben ser precursores ideales para producir biocombustibles. Los biocombustibles líquidos de segunda generación generalmente se producen mediante dos enfoques fundamentalmente diferentes, es decir, el procesamiento biológico o termoquímico, debido a su complejidad estructural [12].

Por otro lado, las algas se han convertido en una de las materias primas más prometedoras, debido

a su amplia disponibilidad; catalogadas como materia prima de tercera generación. Esto se debe a que la mayoría de las especies tienen un alto contenido de aceite, de aproximadamente 50 %, lo que las hace adecuadas para la producción de biodiésel. Los residuos verdes restantes que quedaron después de la extracción del aceite se pueden utilizar para la producción de biobutanol [10,11]. Los tipos de algas son las microalgas y las macroalgas; las microalgas están formadas por organismos unicelulares que se clasifican como microscópicos. Los organismos microscópicos contienen múltiples células con una estructura como una planta con raíces, tallos y hojas; se clasifican en rojo, verde y marrón, dependiendo de su pigmentación. Las características específicas de las macroalgas son: menor contenido de proteínas y lípidos, pero mayor contenido de carbohidratos en comparación con las microalgas [12].

Síntesis química de n-butanol a partir de etanol

A medida que el interés en el biobutanol aumenta, se presenta un incremento en la intención de uso de rutas químicas para producir n-butanol. Dado que el uso de la fermentación aún enfrenta importantes desafíos técnicos y económicos, como encontrar microorganismos eficientes para convertir los azúcares fermentables en biobutanol, sigue siendo obligatorio encontrar otras rutas alternativas. Por otro lado, la ruta química suele implicar un paso simple en presencia de catalizadores, que se emplean para lograr la conversión de etanol en n-butanol con un rendimiento y conversiones relativamente más altos. La principal ventaja de la ruta química es que esta sólo requiere un paso para producir n-butanol a partir de etanol, mientras que la ruta bioquímica puede implicar varios pasos [10].

Según las descripciones anteriores, es evidente que la ruta de síntesis más apropiada es la metabólica, pues en esta la materia prima de lignocelulosa es una de las biomásas más económicas que se encuentran actualmente. La comparación de ventajas y desventajas entre la ruta metabólica y química, se muestra en la siguiente matriz de selección.

Tabla 2. Matriz de selección.

Ruta de síntesis	Ventajas	Desventajas
Metabólica	La materia prima de lignocelulosa es una de las biomásas más económicas que se encuentran actualmente.	Enfrenta importantes desafíos técnicos y económicos, como encontrar microorganismos eficientes para convertir los azúcares en biobutanol.
Química	La principal ventaja de la ruta química es que sólo se requiere un paso para producir n-butanol a partir de etanol.	Está limitada al uso obligatorio de catalizadores para lograr la conversión de etanol a n-butanol en un simple paso.

El n-butanol es un biocombustible avanzado de próxima generación, y aunque hay muchos avances para mejorar continuamente la competitividad de su producción biológica frente a la producción petroquímica, se tienen una serie de barreras técnicas que todavía limitan su comercialización. Por esto, en los últimos años se han realizado grandes esfuerzos investigativos para buscar una técnica rentable y que ahorre energía para la separación del producto del caldo de fermentación. Estos incluyen el desarrollo de cepas clostridiales y no clostridiales, así como métodos innovadores de recuperación in situ integrados con el proceso de fermentación ABE [13,14]. Por ejemplo, a partir de paja de caña de azúcar los resultados mostraron que con la carga de biomasa ideal elegida (10 %p/v) es posible estimar un rendimiento de 169 L de producto por tonelada de paja de caña de azúcar pretratada (o 84,5 L de producto por tonelada de paja de caña de azúcar cruda), que contenga 65 L de acetona, 95 L de butanol y 9 L de etanol. Este resultado representa una eficiencia del proceso del 28 %, basado en el contenido de carbohidratos en la materia prima, lo cual proporciona una ruta sostenible para una fermentación ABE exitosa [15]. Por otro lado, a partir de los residuos industriales del té, la producción de biobutanol por *Clostridium beijerinckii* produjo un ABE total y biobutanol de 9,73 g/L y 6,21 g/L. Además, en condiciones optimizadas, la productividad y el rendimiento del biobutanol mejoraron aproximadamente 2 y 2,4 veces al final [16].

Proceso de producción

El proceso de producción de biobutanol consta de cuatro etapas globales: acondicionamiento de la materia prima, formación de azúcares simples, fermentación y, por último, separación y purificación; lo anterior se muestra en la Figura 1 (diagrama PBD). A continuación, se explicará el

proceso de síntesis a través de la descripción del diagrama PFD del mismo (Figura 2).

Se inicia con la alimentación del bagazo de cerveza húmedo por la corriente 1 al proceso (su composición se presenta en la Tabla 3) que es mezclado con agua pura en la unidad MIX-101 con el fin de alcanzar una concentración de sólidos del 15 % en peso. La línea de salida se mezcla con ácido sulfúrico en la unidad MIX-102 hasta alcanzar un pH de 1; esta mezcla entra en la unidad E-101 para ser calentada hasta 100 °C, finalmente la mezcla entra al reactor de pretratamiento (unidad R-101) donde se realiza una hidrólisis térmica de los azúcares complejos y otros componentes del bagazo a 120 °C por 30 min. La línea de salida entra a una unidad flash (unidad F-101) con el fin de reducir su presión hasta 1 bar. La fase vapor estará compuesta principalmente de agua y ácido acético, mientras que la corriente de fondos (fase líquida y sólida) entra a la etapa 2.

Tabla 3. Composición en base seca del bagazo de cerveza.

Componente	Composición (%)
Glucano	25,5
Xilano	13,5
Arabinano	8,4
Lignina insoluble en ácido	14,1
Lignina soluble en ácido	4,9
Proteína	15,1
Ceniza	3,5
Extractivos	15,0

Fuente: adaptado de Del Olmo Carrasco [3].

La segunda etapa comienza con un proceso de separación de la fase líquida y sólida de la corriente 9, la cual se realiza en la unidad C-101, la línea de sólidos (corriente 10) continúa hacia una hidrólisis enzimática, mientras que la fase líquida (corriente

11) hacia un proceso de detoxificación, ambas rutas se realizan para formar azúcares simples a partir de los azúcares complejos presentes. La ruta de la hidrólisis enzimática comienza con la mezcla de agua pura con los sólidos en la unidad MIX-103 hasta alcanzar una concentración de sólidos del 10 % en peso, además de agregar NaOH hasta un pH de 5,3. Después, en la unidad E-102, se enfría la mezcla hasta 50 °C (temperatura óptima de las enzimas), una vez alcanzada esta temperatura entra a la unidad R-102.

En el reactor de hidrólisis enzimática (unidad R-102) se agregan las enzimas Celluclast (0,27 g/kg MS) y Novozyme (0,04 g/kg MS) y se opera durante 48 horas. La salida de este reactor pasa por una centrifugadora (unidad C-102), donde la fracción sólida entra a un horno (unidad H-101), para ser incinerada, mientras que la fracción líquida pasa a la unidad MIX-106 para entrar a la tercera etapa.

En la ruta de detoxificación la corriente líquida (corriente 11) se mezcla con CaO en la unidad MIX-104 durante 15 minutos con el fin de alcanzar un pH de 10. Posteriormente, en la unidad MIX-105 se agrega ácido sulfúrico para regular el pH hasta 6; esta mezcla entra en una centrifugadora (unidad C-103) con el fin de remover el sulfato de calcio formado. La corriente de salida (corriente 25) pasa al MIX-106 para entrar a la tercera etapa.

La tercera etapa, fermentación ABE, inicia con la mezcla (unidad MIX-106) de las corrientes que contienen los azúcares simples (corrientes 19 y 25), el inóculo del microorganismo (bacterias *C. beijerinckii*) y la corriente de nutrientes (su composición se presenta en la [Tabla 4](#)). Esta mezcla conocida como el caldo de fermentación es dividida (unidad S-101) en 3 corrientes, donde cada una entrará a un reactor de fermentación (unidades R-103, R-104 y R-105), donde operan a una temperatura de 36 °C (temperatura óptima de los microorganismos), 1 bar, y con agitación de 175 rpm durante 96 horas. Las corrientes de salida que contienen el producto de interés son mezcladas (unidad MIX-107), la corriente de salida (corriente 35) entra a la etapa de separación y purificación.

La etapa de separación y purificación contempla un tren de torres de destilación donde en cada una se recupera un componente de la línea de productos. En la primera torre (unidad T-101) se retira por los fondos gran parte del agua y compuestos sólidos,

por la cima se recupera el butanol, la acetona y el etanol, esta corriente entra a la segunda torre (unidad T-102), que opera a una temperatura de 110 °C y presión de 1 bar, y tiene por fin recuperar la acetona de la mezcla por la corriente de la cima, los fondos entran a la tercera columna (unidad T-103), que opera a 1 bar y temperatura mayor a 90 °C, donde el etanol es recuperado por la cima. Los fondos entran a un decantador para recuperar el etanol por la cima y, los fondos de esta torre entran al MIX-108 para mezclarse con el recirculado de las torres T-104 y T-105, esto se hace debido a que el agua forma un azeótropo heterogéneo, por lo que para separarlos la mezcla entra a un decantador (unidad D-101), por la parte superior se remueve el butanol y por la parte inferior el agua que alimenta a las torres mencionadas. Por los fondos de la unidad T-104 se obtiene agua y por la cima el butanol como producto principal con un 99,8% de pureza.

Escalamiento y costos asociados

Se hizo el escalamiento de una planta con capacidad de producción de 100 kg de butanol/mes (0,1388 kg butanol/h) con un 99,8 % de pureza. Para esto se toma en cuenta que es necesario alimentar 8,12 kg de bagazo húmedo (70 % humedad), pues el rendimiento reportado es aproximadamente 56,98 g butanol/kg MS alimentada [5]. Se presenta en la [Tabla 5](#) un balance de los principales componentes del proceso.

Tabla 4. Composición del sustrato del microorganismo *C. acetobutylicum* (macro y micro nutrientes).

Nutriente	Concentración (g/L)
Acetato de amonio	2,2
Sulfato de magnesio	0,4
Sulfato de manganeso	0,015
Cloruro sódico	0,01
Cloruro de potasio	0,06
Sulfato de hierro	0,05
Fosfato ácido dipotásico	0,5
Fosfato ácido monopotásico	0,5
Ácido para amino benzoico	0,00001

Fuente: adaptado de Del Olmo Carrasco [3].

Tabla 5. Balance para compuestos clave.

Compuesto	Entrada (kg/h)	Salida (kg/h)
Materia seca	83,33	17,43
Agua	768,02	700,30
Ácido acético	0	5,64
Acetona	0	1,67
Etanol	0	1,34
Butanol	0	4,99

Para estimar la viabilidad económica del proyecto se tomó en cuenta parámetros tales como ingresos, costos de producción y depreciación de los equipos, y una producción de 100 kg/mes de biobutanol. Para los ingresos se tomó un precio base de 61,73 USD por kilogramo con una tasa TRM dada por el Banco de la República de Colombia de COP 4461,66 (30 mayo de 2023) lo que genera un total de ingresos de COP 27 541 827 al mes.

En los costos de producción se tiene en cuenta que la materia prima posee un valor de COP 220 por kilogramo de bagazo húmedo, la alimentación a la planta es de 8,12 kg/hora, cuyo tiempo de operación son 24 horas al día por 30 días al mes, obteniendo un valor de COP 1'286.208 para la materia prima. El tiempo de operación de la planta es de 720 horas con los requerimientos de energía eléctrica y agua correspondientes para cada equipo; las tarifas industriales para el consumo pueden aproximarse a COP 273,88/kW y COP 3601,86/m³ según la cámara de consumidores de energía y la red nacional de acueducto respectivamente, lo que genera un costo mensual de funcionamiento de COP 2'000.000.

Durante el proceso de producción se requieren dos turnos, cada uno con un tiempo de duración de 12 horas, se contaría con un ingeniero de producción y cinco operadores con un sueldo fijo de COP 2 500 000 y COP 1 160 000 respectivamente por cada uno (Se incluyen aportes parafiscales y demás obligaciones por parte del empleador), generando un costo de nómina al mes de COP 13 016 223. El costo mensual de arrendamiento del terreno donde se ubicará la planta puede oscilar alrededor de COP 4 000 000. Los costos de inversión en equipos pueden estimarse en aproximadamente COP 500 000 000. El monto de inversión para la puesta en marcha del proyecto debe relacionarse con las posibles fuentes de financiación.

El proyecto presenta un flujo de caja positivo de COP 50 000 000 anuales, el periodo de recuperación de la inversión inicial de COP 500 000 000 se estima en aproximadamente 10 años, sin incluir financiamientos adicionales ni impuestos. La proyección indica que el proyecto es viable en el largo plazo, dado que los ingresos superan los costos operativos anuales. Sin embargo, para mejorar la rentabilidad y reducir el periodo de recuperación, se podrían explorar estrategias como optimizar el consumo de recursos, asegurar acuerdos de suministro de bagazo de cerveza a bajo costo o mejorar la eficiencia de los equipos para reducir el gasto energético.

Asimismo, el escalamiento es acompañado del dimensionamiento y definición de las especificaciones de los equipos utilizados para la planta piloto, dicha información se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6. Especificaciones de los equipos necesarios para el escalamiento de la planta.

Equipo y condiciones de operación	Selección
R-101 ASTM 516-70 Temperatura: T ₁ : 100 °C - T ₂ : 120 °C Presión: P ₁ : 1 bar - P ₂ : 2 bar Dimensiones: largo: 0,5 m; ancho: 0,5 m; alto: 1,2 m	Reactor Batch de acero inoxidable de cama fija con chaqueta resistente a altas presiones para la realización de la hidrólisis térmica ácida.
R-102 Temperatura: 50 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 0,9 m; ancho: 0,8 m; alto: 1,3 m	Reactor semi-batch de acero inoxidable isobárico para la hidrólisis enzimática, donde la ruptura de las moléculas se da por medio de las enzimas Celluclast y Novozyme, en un tiempo aproximado de 40 h, posee un agitador de paletas con una agitación de 150 rpm.
H-101 Temperatura: 10 – 200 °C Presión: 0 – 101 Kpa Dimensiones: largo: 0,8 m; ancho: 0,9 m; alto: 1,07 m	Horno de secado al vacío, eléctrico, de acero inoxidable diseñado para secar el polvo, esterilizar y otras aplicaciones que son sensibles al calor y a la presión.
R-103, R-104, R-105 Temperatura: 36 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 1 m; ancho: 0,7 m; alto: 1,5 m	Reactor de cuerpo cilíndrico vertical, construido con chapas de acero soldadas, con cubierta superior e inferior torisféricas, posee chaqueta integral de calentamiento y/o enfriamiento, presente en el costado y cubierta inferior. Sistema de agitación inferior centralizado con impulsores del tipo "Smith" e incluye dos discos de ruptura en acero.

Equipo y condiciones de operación	Selección
F-101 Temperatura: T_1 : 120 °C; T _{2gas} : 112 °C - T _{2liq} : 100 °C Presión: 1 bar Dimensiones: alto: 1,5 m; diámetro: 0,8 m	Separador flash de dos fases, operación ininterrumpida de principio a fin, alta automatización, posee doble seguridad: disco de ruptura y válvula de seguridad de resorte. Dependiendo de la estrategia del operador, puede ser horizontal o vertical.
T-101, T-102, T-103, T- 104, T-105 Temperatura: T: 35 °C; T_1 : 61 °C - T_2 : 120 °C Presión: 1 bar T-101: 39 platos; T-102: 25 platos; T-103: 33 platos; T-104 y T-105: 9 platos Dimensiones: T-101: diámetro: 0,8 m; alto: 1,4 m T-102: diámetro: 0,3 m; alto: 1 m T-103: diámetro: 0,5 m; alto: 1,2 m T-104 y T-105: diámetro: 0,3 m; alto: 1 m	Columnas de destilación simple de acero inoxidable multicomponente por etapas, estas etapas corresponden a cada plato perforado.
Mix-101, Mix-103, Mix- 104, Mix-105, Mix-107, Mix-108 Temperatura: 20 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 1 m; ancho: 0,85 m; alto: 1,2 m	Un mezclador industrial tipo remo con capacidad de 20 kg/h de acero inoxidable para resistir el efecto oxidante del agua. Apto para los flujos maneados en la línea del proceso.
Mix-102 Temperatura: 20 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 1 m; ancho: 0,85 m; alto: 1,2 m	Mezclador industrial de polipropileno con capacidad de 20 kg, especial para ácidos fuertes.
C-101, C-102, C-103 Temperatura: 50 – 100 °C Presión: 1 bar Dimensiones: diámetro: 1,3 m; alto: 0,5 m	Cesta centrifugadora de acero inoxidable AISI 316 I, 25 HP motor Voith Turbo 274DT dinámica, enganche, descarga material a través de la bolsa sobre filtro.
Mix-106 Temperatura: 20 – 56 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 1m; ancho: 0,85 m; alto: 1,5 m	Tanque mezclador con camisa de agua en acero inoxidable y motor girado externamente con capacidad para 30 kg/h.
S-101 Temperatura: 54 – 58 °C Presión: 1 bar	Divisor de caudal en acero que soporta hasta 60 °C y 250 bar de presión.
D-101 Temperatura: 39 °C Presión: 1 bar Dimensiones: largo: 1m; ancho: 0,8 m; alto: 1,5 m	Decantador de silo vertical, se basa en el principio de decantación estática y la precipitación natural de las partículas sólidas en suspensión.
E-101 Temperatura: T_1 : 20 °C - T_2 : 100 °C Dimensiones: largo: 3,28 m; diámetro: 0,44 m NTUBOS= 4 NPASOS= 1 E-102 Temperatura: T_1 : 53 °C - T_2 : 50 °C Dimensiones: largo: 9,84 m; diámetro: 0,44 m NTUBOS= 4 NPASOS= 2	Intercambiadores de calor de acero al carbón. Se escogió el de tubocoraza debido a que pueden ser operados a alta temperatura/presión, son capaces de trabajar los diferentes estados de los fluidos, son fáciles de desmantelar para una reparación/limpieza y el diseño se puede adoptar para cualquier condición de operación.

Fuente: elaboración propia basado en [7-27].

Por otro lado, en la [Figura 3](#) se representa, por medio de un diagrama isométrico, el proceso de producción de biobutanol donde las distintas etapas están diferenciadas por colores, las líneas de color amarillo muestran el acondicionamiento de la materia prima, las líneas de color violeta y naranja la formación de azúcares, las líneas de color verde la fermentación ABE y finalmente las líneas de color azul la separación y purificación. Los diagramas PBD, PFD e isométrico son herramientas esenciales para la visualización y comprensión del flujo de materiales, la secuencia de las operaciones y la disposición de equipos,

aspectos fundamentales en el diseño de plantas industriales. Estos diagramas muestran similitudes en cuanto a la representación de etapas comunes en comparación con otros estudios centrados en el uso de diferentes fuentes de biomasa, como el pretratamiento ácido, la hidrólisis enzimática, la fermentación y la destilación, que son típicas en procesos de producción de biobutanol a partir de biomasa lignocelulósica. La inclusión de un Diagrama Isométrico facilita una visión tridimensional de la planta piloto, proporcionando claridad en la disposición física de los equipos y los flujos de materiales.

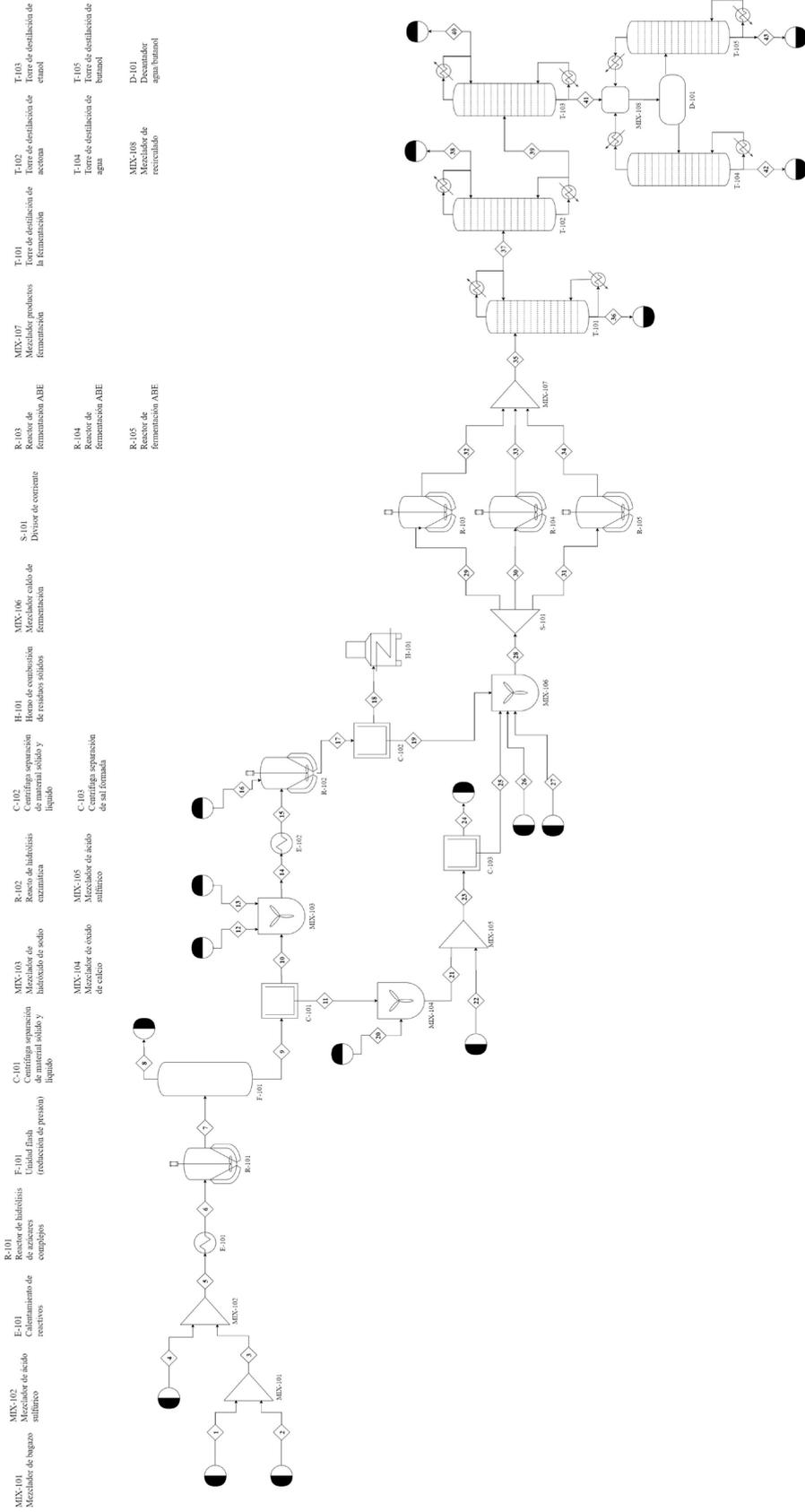


Figura 2. Diagrama de flujo (PFD) para el proceso de producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza.

Conclusiones

La ruta de síntesis de biobutanol más apropiada es la metabólica, ya que la materia prima de lignocelulosa es una de las biomásas más económicas que se encuentran actualmente. Por lo tanto, desarrollar una planta piloto para la producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza es viable, ya que con una producción de 100 kg de butanol/mes se obtienen ingresos superiores a los costos.

Con una restricción de producción de 100 kg/mes, el escalamiento se ve afectado debido a que los equipos no operarían a su máxima capacidad por tener limitaciones en la oferta industrial. Al tener una selección de equipos adecuados para una mayor producción de biocombustible, se afectan los gastos implicados en su funcionamiento, incluyendo un mayor consumo de energía.

Referencias

- [1] García Rodríguez A. Recuperación de biobutanol para la producción de combustibles mediante ciclos de adsorción-desorción (Tesis de doctorado). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid; 2017. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/45604/1/T39416.pdf>
- [2] Lúcia García E. Diseño de un reactor biológico para la producción de biobutanol (Tesis de grado). Cádiz, España: Universidad de Cádiz; 2017.
- [3] Del Olmo Carrasco R. Análisis del ciclo de vida de la producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza (Tesis de maestría). Valladolid, España: Universidad de Valladolid; 2017. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/26079/TFM-I-751.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Bavaria. Informe de sostenibilidad 2022. Bogotá, Colombia; 2022. Disponible en: <https://www.bavaria.co/desarrollo-sostenible/informes-de-desarrollo-sostenible-bavaria>
- [5] Bavaria. Informe de gestión 2022. Bogotá, Colombia; 2022. Disponible en: <https://www.bavaria.co/ejercicios-antiores>
- [6] Serviagroc. La búsqueda de nuevos usos del bagazo cervecero. Tenerife, España; 2017. Disponible en: <https://www.bavaria.co/ejercicios-antiores>
- [7] Contexto ganadero. Beneficios y cuidados a la hora de suministrar afrecho de cerveza (sitio en Internet). Disponible en: <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/beneficios-y-cuidados-la-hora-de-suministrar-afrecho-de-cerveza>. Acceso el 30 de mayo 2023.
- [8] Betancourt Quintero DF. Cómo hacer el análisis FODA (matriz FADO) paso a paso + ejemplo práctico (sitio en Internet). Ingenio Empresa. Disponible en: www.ingenioempresa.com/matriz-foda. Acceso el 28 de mayo 2023.
- [9] Durán Padilla V. R. Producción de biobutanol a partir de suero de quesería usando una cepa mutante de *Clostridium acetobutylicum* (Tesis doctoral). Aguascalientes, México: Departamento de Ingeniería Bioquímica, Universidad Autónoma de Aguascalientes; 2015. Disponible en: <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/349/401134.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] Plaza Lazaro PE. Valorización de bagazo de la industria cervecera mediante su transformación en biocombustibles avanzados: biobutanol (Tesis de maestría). Valladolid, España: Universidad de Valladolid; 2017. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24612/TFM-I-646.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] Fraile Ramos HJ. Evaluación técnica de alternativas de pretratamiento y sacarificación de bagazo de cerveza (Tesis de grado). industria cervecera mediante su transformación en biocombustibles avanzados: biobutanol (tesis de maestría). Valladolid, España: Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid; 2017. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25419/TFG-I-673.pdf?sequence=1>
- [12] Ndaba B, Chiyanzu I, Marx S. n-Butanol derived from biochemical and chemical routes: A review. *Biotechnology Report*. 2015;8:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2015.08.001>
- [13] Cai D, Wen J, Zhuang Y, Huang T, Si Z, Qin P, Chen H. Review of alternative technologies for acetone-butanol-ethanol separation: Principles, state-of-the-art, and development trends. *Separation and Purification Technology*. 2022;298:121244. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121244>.
- [14] Veza I, Said MFM, Latiff ZA. Recent advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Biomass and Bioenergy*. 2021;144:105919. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105919>.

- [15] Pratto B, Chandgude V, de Sousa Junior R, Cruz AJG, Bankar S. Biobutanol production from sugarcane straw: Defining optimal biomass loading for improved ABE fermentation. *Industrial crops and products*. 2020;148:112265. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112265>.
- [16] Tekin N, Karatay SE, Dönmez G. Optimization studies about efficient biobutanol production from industrial tea waste by *Clostridium beijerinckii*. *Fuel*. 2023;331:125763. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125763>.
- [17] Fraile Ramos HJ. Evaluación técnica de alternativas de pretratamiento y sacarificación de bagazo de cerveza (Tesis de grado). Valladolid, España: Universidad de Valladolid; 2017. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25419/TFG-I-673.pdf?sequence=1>
- [18] Alibaba. 20000L irirconio Industrial Chemhemixed Ed ydrolisis eeacto (sitio en Internet). Disponible en: https://spanish.alibaba.com/p-detail/20000L-1600837674236.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.65344859BK88yx. Acceso el 24 de mayo 2023.
- [19] Directindustry. BE-ZK Series - Horno de vacío BE-ZK series (sitio en Internet). Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/guangdong-bell-experiment-equipment-co-ltd/product-216241-2247324.html>. Acceso el 27 de febrero 2023.
- [20] Alibaba. Nuevo diseño inoxidable separador machine/separador de gas líquido/flash buque (sitio en Internet). Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/Nuevo-dise%C3%B1o-inoxidable-separador-machine-separador-300017767698.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.76f23db5nWcFAY. Acceso el 25 de febrero 2023.
- [21] TECNAL. BIORREACTOR PILOTO BIOTEC-PRO-II-PILOTO (sitio en Internet). Disponible en: https://tecnal.com.br/es/produtos/detalhes/13327_biorreator_piloto. Acceso el 22 de febrero 2023.
- [22] Alibaba. JH 95% de alcohol etanol destilador distillateur columna (sitio en Internet). Disponible en: https://spanish.alibaba.com/p-detail/JH-1562220948.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.b30d1eae8kixL0. Acceso el 22 de febrero 2023.
- [23] Alibaba. Máquina mezcladora vertical de capacidad de 500 kg/h (sitio en Internet). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/500kg-capacity-vertical-plastic-raw-material-mixer-machine-60800145362.html?spm=a2700.8699010.normalList.5.26353e092tFS1a&s=p>. Acceso el 24 de mayo 2023.
- [24] Alibaba. Industrial chemical liquid mixing polypropylene pp anti corrosive mixer tank for strong Acid and Alkaliand products (sitio en Internet). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-chemical-liquid-mixing-polypropylene-pp-anti-corrosive-mixer-tank-for-strong-acid-and-alkaliand-products-62006193861.html>. Acceso el 24 de mayo 2023.
- [25] Camargo. Centrifugadora industrial cesta PANA marca acero inoxidable AISI 316 (sitio en Internet). Disponible en: https://es.camargoindustrial.com/maquina-usada/?e=Centrifugadora+industrial+cesta+PANA+marca+acero+inoxidable+AISI+316+I_033-045. Acceso el 29 de marzo 2023.
- [26] Directindustry. Decantador para aguas residuales (sitio en Internet). Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/matec/product-39799-400062.html>. Acceso el 26 de febrero 2023.
- [27] Vivolo. Flow dividers (sitio en Internet). Disponible en: <https://www.vivoil.com/?s=flow+dividers>. Acceso el 25 de febrero 2023.