

PROPUESTA DE ALTERNATIVA PARA LA TRANSFORMACIÓN DE UNA FÁBRICA DE AZÚCAR EN BIORREFINERÍA

ALTERNATIVE PROPOSAL FOR SUGAR CANE FACTORY TRANSFORMATION IN A BIOREFINERY

Yenisleidy Martínez Martínez^{1}, Ana Celia de Armas Martínez¹,
Erenio González Suárez¹ y Viatcheslav V. Kafarov²*

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Desarrollo Sostenible en Industrias y Energía. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Recibido: Febrero 20, 2014; Revisado: Marzo 16, 2014; Aceptado: Marzo 31, 2014

RESUMEN

En el trabajo se propone una alternativa para obtener etanol y productos químicos por vía fermentativa con la integración del proceso azucarero y de sus derivados con el objetivo de diversificar la industria azucarera. Dentro del proceso azucarero existen corrientes intermedias, como jugos secundarios y de los filtros, que son empleados como sustratos azucarados para la obtención de etanol con resultados económicos y ambientales superiores a los tradicionales. Con este fin también puede ser utilizado el hidrolizado resultante de la obtención de etanol a partir de bagazo y las vinazas de destilerías. El bagazo constituye un residuo del proceso azucarero que es tradicionalmente usado en los centrales para quema en las calderas y presenta gran potencial para la obtención de etanol de segunda generación y productos químicos de alto valor agregado al igual que la paja de caña, la cual constituye un residuo de después de la cosecha de la caña. A pesar de constituir los residuos más agresivos de la industria alcoholera, algunas de las características que posee la vinaza hacen de ella un medio para la producción de levadura torula, que es empleada para el consumo animal.

Palabras clave: biorrefinería, bagazo, proteína celular, sustratos, vinazas

ABSTRACT

In this work, we proposed an alternative to ethanol and chemicals by fermentation of the sugar with the integration process and its derivatives, in order to diversify the sugar industry. Inside this process, there are intermediate sugar process streams, such as juices and secondary filters, which are used as substrates for sugar ethanol production to exceed traditional economic and environmental outcomes. To this end, it can also be used hydrolyzate resulting from the production of ethanol from the bagasse and vinasse from distilleries. The bagasse is a residue of the sugar process that is traditionally used in the sugarcane factories for burning in boilers and has great potential for the production of second generation ethanol and chemicals with high added value like cane trash, which is residue obtained after the harvest of sugarcane. Despite being the most aggressive of the alcohol industry waste, some features of the vinasse make it a means for the production of torula yeast, which is used for animal consumption.

Key words: biorefinery, bagasse, cellular protein substrates, vinasses

1. INTRODUCCIÓN

Una biorrefinería se concibe como la industria de refino para la producción de energía, combustible, materiales y productos químicos a partir del empleo de biomasa y sus subproductos para su propio abastecimiento, sustituyendo en la medida de lo posible el uso de materias primas y combustibles fósiles y disminuyendo la generación de efluentes. Esta nueva visión nace a raíz de de la inestabilidad en el precio y suministro del petróleo y el aumento de su demanda, cuando la búsqueda de alternativas para el desarrollo de combustibles y energía así como para la elaboración de nuevos productos constituye una necesidad. La posibilidad de lograr una eficiente integración material y energética entre la industria azucarera y alcoholera permitirá el desarrollo de nuevas producciones bajo el concepto de biorrefinería (Fernández, 2013).

El empleo de materias primas menos costosas que ofrezcan resultados iguales o superiores a los tradicionales alcanzados por la industria alcoholera garantizará mejores resultados económicos. Los jugos secundarios y de los filtros constituyen corrientes intermedias ricas en azúcares del proceso azucarero y pueden ser empleados junto a melazas para la producción de etanol con buenos resultados económicos. El medio ambiente también se beneficia con esta alternativa dado que los residuos de las destilerías que emplean dichas mezclas de sustratos se caracterizan por ser menos agresivos.

Otros residuos de la industria azucarera como la paja de caña y bagazo encuentran nuevos usos en una biorrefinería al ser empleados para la obtención de etanol y coproductos.

El uso de vinazas de destilería como medio para la producción de proteína celular constituye una eficiente forma de garantizar la disminución de los grandes volúmenes vertidos de este residual a la vez que podría aportar soluciones a los problemas de escasez alimentaria al sustituir algunas de las fuentes tradicionales de proteínas (soya, harina de pescado, entre otras) en piensos para consumo animal, con la consiguiente disminución de los costos de producción (Chacón, 2004).

2. DESARROLLO

La integración material y energética de la industria azucarera y sus derivados constituye una vía para lograr resultados superiores a los existentes, no solo desde el punto de vista económico al fomentar la elaboración de nuevos productos con coproductos de una u otra empresa, sino también desde el punto de vista ambiental al emplear corrientes residuales para estas nuevas producciones. Un ejemplo de lo anteriormente expuesto se muestra en la figura 1.

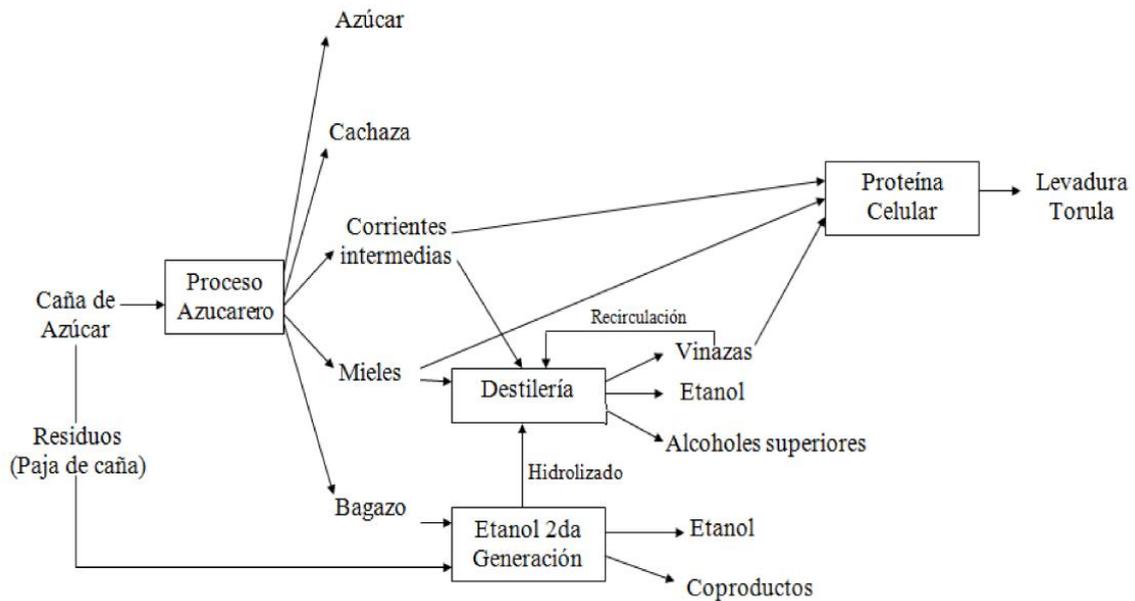


Figura 1. Alternativa para la integración de la industria azucarera y de derivados para la obtención de etanol y productos de alto valor agregado por la vía fermentativa

2.1. Combinación de sustratos en fermentación

Del proceso azucarero se obtiene, además del azúcar como producto principal una serie de corrientes intermedias ricas en azúcares que pueden ser utilizadas en mezclas de sustratos para la obtención de etanol (Mesa, 2006) y que pueden generar mejores resultados económicos al disminuir los costos de producción.

2.1.1. Jugos secundarios y de los filtros

Los jugos secundarios son aquellos obtenidos en el último molino junto al agua de imbibición. Estos han sido utilizados en combinación con jugos de los filtros y miel final y se ha estudiado el impacto que tiene en el rendimiento en fermentación la composición de dicha mezcla (Mesa, 2006). Los resultados reportados revelan que los mejores resultados se alcanzan en las combinaciones donde se utiliza jugo de los filtros y los menos satisfactorios donde el jugo secundario represente un elevado porcentaje del total de la mezcla, aunque pudiera ser utilizado como complemento junto al resto. Otros autores reportan similares estudios y a su vez paridad en los resultados alcanzados (Rivero, et al., 2012).

2.1.2. Jugos de otros molinos

El empleo de los jugos proveniente de los terceros, cuartos y quintos molinos junto a jugos de los filtros se lleva a cabo en países como Brasil, México. Para estas combinaciones se reportan buenos resultados en materia de rendimiento alcohólico y disminución de los consumos energéticos en los ingenios debido al no procesamiento de un 30% aproximadamente del agua que debe ser evaporada (Rivero et al., 2012).

2.1.3. Vinazas de destilería

Constituyen el residual más agresivo de la industria alcoholera. Sus grandes volúmenes generados causan enormes daños al medio ambiente. Dentro de sus principales aplicaciones tenemos el ser utilizadas para la obtención de gas metano mediante digestión anaerobia para la producción de vapor, también es empleada para fertilizar directamente suelos con permeabilidad razonable, como medio para el crecimiento de microalgas que pueden ser empleadas posteriormente para la obtención de alcohol de tercera generación y para su recirculación al proceso de obtención de etanol en sustitución de un porcentaje del agua para diluir la miel.

La recirculación de vinazas a la etapa de fermentación en el proceso de obtención de etanol tiene diversas ventajas siempre que la recirculación se realice de forma controlada para garantizar la no afectación de los parámetros operacionales del proceso. Algunas ventajas vienen dadas por un menor consumo de vapor y ácido sulfúrico en la esterilización, una reducción del volumen de efluentes de vinazas y un menor consumo de agua para dilución. Por otro lado, las principales desventajas de su empleo radican en las limitaciones con el porcentaje de formación alcohólica a lograr, aumento de la presión osmótica por el aumento de los sólidos no azúcares, un aumento del contenido de ácidos orgánicos y otros metabolitos tóxicos a las levaduras.

Algunos autores reportan estudios que muestran la influencia que tiene en el rendimiento en fermentación el empleo de una mezcla de agua-vinazas-flemazas en sustitución de un porcentaje del agua empleada para la dilución de la miel (Martínez et al., 2013). Los resultados de la optimización de los modelos obtenidos arrojan la posibilidad de sustituir hasta un 20% el agua empleada con este fin sin afectar el rendimiento alcohólico (De Armas, 2013).

2.1.4. Hidrolizado de bagazo.

Del proceso de obtención de etanol a partir de bagazo se obtiene un hidrolizado que puede ser utilizado junto a miel final y jugo de los filtros como fuente de azúcares. Estudios revelan que un 47,2% de miel, 17,8% de jugo de los filtros y 35% de hidrolizado conforman el mejor punto obtenido en la fermentación, la cual alcanzó un grado alcohólico ligeramente superior al 5%.

2.2. Obtención de etanol a partir de bagazo

El bagazo constituye en subproducto fibroso y de composición heterogénea que es obtenido en el último molino del tándem y está formado por celulosa (41-52%), hemicelulosa (25-30%), lignina (18-25%) y otros componentes (5%) aproximadamente (Diez y Garrido, 2012), aunque su composición varía de acuerdo a las condiciones de

procesamiento agrícola de la caña, el tipo de corte, la recolección y la tecnología azucarera.

Para lograr la transformación de los azúcares contenidos en este material es necesario primeramente transformar los polímeros azucarados en azúcares monoméricos. La viabilidad de la producción de etanol por esta vía vendrá dada en la posibilidad de lograr una disminución en los costos de esta primera etapa.

2.2.1. Etapa de pretratamiento de las materias primas

La resistencia de los materiales lignocelulósicos a los ataques químicos, físicos y biológicos se debe a la existencia de un complejo polimérico formado por una matriz de celulignina ligada por cadenas de hemicelulosa. Esta debe ser rota para poder favorecer el ataque enzimático al reducir el grado de cristalinidad de la celulosa y aumentar la celulosa amorfa (Machado, 2010).

Dentro de los diferentes pretratamientos, se han estudiado alternativas que evalúan el empleo del pretratamiento Organosolv en dos etapas para el fraccionamiento del material con buenos resultados. El pretratamiento con ácido sulfúrico tiene como objetivo la solubilización de los azúcares de hemicelulosa (más del 50%). Se realiza con vapor a altas temperaturas. Luego del lavado, se obtiene además, una corriente sólida rica en glucosa en forma de celulosa que pasa a hidrólisis básica que cuenta además con vapor, y se desarrolla con el objeto de obtener celulosa y elevar el grado de deslignificación usando mezclas de etanol e hidróxido de sodio (Albernas, 2014).

Otros autores reportan diversas variantes experimentadas con el objetivo de determinar la mejor combinación de pretratamiento. Una primera variante desarrollará la hidrólisis ácida seguida de una hidrólisis enzimática donde los resultados arrojan una concentración de glucosa de 13,68 g/L en el hidrolizado y un rendimiento de glucosa de 16,48 g glucosa/100g bagazo. La segunda variante estudia la hidrólisis ácida, seguida de la hidrólisis básica y enzimática para una concentración de glucosa en el hidrolizado de 54,92 g/L y un rendimiento de 22,30 g glucosa/100g bagazo (Morales et al., 2012).

Estos resultados muestran la ventaja del uso de la segunda variante sobre la primera pues es posible separar la fracción xilano y obtener pentosas para producir etanol y otros productos y posteriormente la separación de la lignina (corriente líquida) y material celulignítico más concentrado en celulosa (corriente sólida) con lo que se elevan los resultados de la hidrólisis enzimática.

2.2.2. Hidrólisis enzimática

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica que actúan como catalizadores de reacciones químicas. Debe poseer estabilidad térmica, baja adsorción a la lignina, resistente a altas concentraciones de etanol, baja inhibición por el sustrato además de bajo costo.

La hidrólisis enzimática se caracteriza por un sustrato insoluble (celulosa) y un catalizador soluble (enzima). El producto final de la hidrólisis son normalmente azúcares reductores incluido la glucosa. Transcurre a velocidades lentas y resulta caro debido al precio de las enzimas. Presenta al menos tres ventajas potenciales frente a los procesos catalizados por ácidos: mayores rendimientos de azúcares debido a que es un proceso muy específico, menores costes de equipamiento debido a que se realizan a

presión atmosférica y bajas temperaturas y no existe producción de sustancias tóxicas como consecuencia de la degradación de los azúcares que pudieran comprometer la fermentación posterior.

2.2.3. Fermentación

Una vez liberados los azúcares contenidos en el material lignocelulósico a través de los distintos pretratamientos se lleva a cabo su transformación en etanol con el empleo de levaduras (*Saccharomyces Cerevisiae*) junto a fosfatos y urea como nutrientes (Albernas, 2014).

La presencia de pentosas y glucosa a la hora de realizar la fermentación del hidrolizado de materiales lignocelulósicos constituye un problema debido al hecho de que la fermentación de pentosas no se encuentra al mismo nivel de dominio que la fermentación de glucosa. La viabilidad económica del proceso se compromete cuando se desecha esa fracción o se fermenta individualmente, por lo que se estudia la posibilidad de introducir variaciones al proceso para subsanar las anteriores deficiencias. Como ejemplo tenemos el explorar otros microorganismos, como la *Pichia stipitis*, que sean capaces de fermentar la xilosa en etanol aunque se demuestran sus bajos resultados respecto a la *S. Cerevisiae*, así como estudios para la obtención de linajes genéticamente modificados de *este* microorganismo para metabolizar las pentosas (Machado, 2010).

2.3. Obtención de otros productos químicos y energía a partir de bagazo

El bagazo ha sido tradicionalmente empleado en los centrales azucareros para su quema en calderas para la generación de energía a pesar de su bajo valor calórico (1850 kCal/kg). No obstante, sus principales constituyentes pueden ser empleados para la obtención de nuevos productos que permitan elevar los resultados económicos de la industria azucarera.

La hemicelulosa, al igual que la celulosa, también proporciona medios fermentables que pueden derivar una amplia gama de productos debido a la cantidad de monómeros y oligómeros constituyentes. Pueden ser obtenidos productos para alimentación humana y animal, para farmacia, productos como el xilitol, el ácido acético, el furfural y productos poliméricos de síntesis (resinas furánicas) de interesantes propiedades dado su carácter biodegradable en contraste con los plásticos derivados del petróleo (López, 2010). Por último, la lignina puede ser utilizada como combustible, fuente de adhesivos o plásticos y en el sector de materiales (Mesa et al., 2008).

2.4. Obtención de etanol a partir de paja de caña

La paja de la caña de azúcar está compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina, y pequeñas cantidades de sustancias extractivas y sales minerales. Se reportan estudios para la obtención de etanol a partir de paja de caña donde la etapa de pretratamiento comienza con una hidrólisis ácida diluida con el objetivo de separar la hemicelulosa y desordenar la estructura polimérica para luego efectuar la hidrólisis enzimática usando la enzima CellicCtec2. El análisis estadístico del diseño experimental desarrollado arrojó como variable de más influencia sobre el rendimiento de ART posteriormente a la hidrólisis enzimática a la carga de sólidos. Luego se realiza la pre-sacarificación y

posterior sacarificación y fermentación simultáneas (SSF), arrojando valores de concentración de etanol (14,47 g/l) (Barrio, 2014).

2.5. Obtención de biomasa proteica a partir de vinazas de destilería

La proteína unicelular ó bioproteína es aquella obtenida de la biomasa microbiana de algas, bacterias, levaduras y hongos filamentosos empleando sustratos baratos como fuente de carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros para su cultivo en condiciones fermentativas tales que garanticen una buena tasa de crecimiento. También podemos abarcar en esta denominación a los microorganismos muertos y desecados que se emplean directamente en alimentación animal (cerdos, aves, rumiantes) sin que medie ningún proceso de extracción o purificación de la proteína (Chacón, 2004).

La levadura torula (*Candida utiles*) puede ser obtenida a partir de la fermentación de miel final y es empleada para sustituir total o parcialmente a la harina de soya en dietas de animales monogástricos debido al alto nivel de proteína, lisina y vitaminas del complejo B que aporta. Su principal desventaja radica en los altos costos de producción y de materias primas (4,0-4,5 t de miel final/t de torula seca).

Dentro de la composición de las vinazas figuran principalmente compuestos nitrogenados y sales minerales, azúcares eventualmente no fermentables y levaduras muertas (Martínez, 2013). Son estas propiedades las que favorecen su mezclado con miel B, jugos de caña o melazas para la producción de levadura torula, dado que le permite al microorganismo alimentarse de estos nutrientes para su desarrollo. El empleo de vinazas para estas producciones constituye una alternativa de uso a los grandes volúmenes de este contaminante, unido al hecho que en forma de crema se puede emplear sin afectar el comportamiento animal y se reduce considerablemente el costo por concepto de secado.

3. CONCLUSIONES

1. La reconversión de la industria de la caña de azúcar bajo el concepto de biorrefinería garantiza el empleo de subproductos y residuos de la industria azucarera y alcoholera bajo una fuerte integración material y energética para la obtención de etanol y coproductos en busca de mejores resultados técnico-económicos y ambientales.
2. El empleo de corrientes intermedias del proceso azucarero favorece los resultados económicos y ambientales en el proceso productivo de etanol.
3. La posibilidad de obtener etanol y coproductos a partir de materiales lignocelulósicos permite lograr un mayor aprovechamiento de diversos subproductos de la industria azucarera, tales como bagazo y paja de caña.
4. La producción de levadura torula empleando como medio de cultivo vinazas de destilería contribuye a reducir los grandes volúmenes de este residual desechados, a la vez que garantiza menores costos de producción de la biomasa por concepto de materias primas.

REFERENCIAS

- Albernas, Y., Consideraciones de la logística de los procesos discontinuos en el diseño de una planta para la obtención de Bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2014, pp. 35-57.
- Barrio, E., Alternativas de obtención de etanol a partir de paja de caña., Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2014, pp. 1-33.
- Chacón, A., Perspectivas actuales de la proteína unicelular (scp) en la agricultura y la industria., *Agronomía mesoamericana*, Vol. 15, No. 1, 2004, pp. 93-106.
- De Armas, A. C., Martínez, Y., López, N., Gallardo, I., Estrategia de tecnología limpia para una fábrica de alcohol extrafino. MAS XXI, Villa Clara, Cuba, 2013.
- Diez, F., y Garrido, F., Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante? Dos casos de estudio., 2012, Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31/HTML/Articulo02N.htm>
- Fernández, K., Evaluación técnico-económica de alternativas de adaptación tecnológicas para biorrefinerías en una industria de la caña de azúcar., Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2013, pp. 1-29.
- López, F., García, J.C., Feria, M.J., Zamudio, M.A.M., Pérez, A., Biorrefinería de materiales lignocelulósicos. *Eucalyptus globulus*, Boletín del CIDEU 8-9, 2010, pp. 75-82.
- Machado, C. Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. OLADE/IICA, 2010, pp. 40-88.
- Martínez, Y., Penín, E., González, V., González, E., Estudio preliminar de la mezcla agua-vinazas-flemazas y su impacto en la etapa de fermentación en la producción de etanol., *Tecnología Química* Vol. XXXIII, No. 3, septiembre-diciembre, 2013, pp. 206-211.
- Mesa, L. et al. Estudio preliminar del mezclado de los sustratos: jugo de los filtros, jugos secundarios y miel en la producción de etanol., *Centro Azúcar*, Vol. 33, No. 4, 2006, pp. 32-36.
- Mesa, L., González, E., González, M., Lopretti, M., Castro, E. La producción de etanol a partir de residuos lignocelulósicos. Estado del arte, *Centro Azúcar*, 2008.
- Morales, M., Espino, I., Mesa, L., Acosta, D., González, E., Castro, E., Evaluación de residuales de la hidrólisis ácida del bagazo como productos de alto valor añadido, *Afinidad LXVIII*, 556, Noviembre – Diciembre, 2012, pp. 453-458.
- Rivero, R.P., Morales, M., Mesa, L. Evaluación económica de la utilización de mezclas de sustratos azucarados para la producción de etanol., *Centro Azúcar*, Vol. 39, No. 4, oct-dic, 2012, pp. 29-35.