

POSIBILIDADES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COMO BIORREFINERÍA MEDIANTE EL FRACCIONAMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA DE ETANOL

Leyanis Mesa Garriga y Erenio González Suárez,
Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química-Farmacía. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

Nancy López Bello,
Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química-Farmacía, Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Cristóbal Cara Corpas y Eulogio Castro Galiano,
Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, Universidad de Jaén, España.

Juan Carlos Villar Gutiérrez,
INIA. Centro de Estudios de Celulosa y Papel, Madrid, España.

Recibido:

Aceptado:

El trabajo está dirigido a fundamentar la reconversión de la industria del azúcar de caña en una biorrefinería. Se fundamenta en el fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar en varios productos teniendo al etanol como el producto principal y considerando la concepción de tecnologías limpias. Finalmente se elaboran recomendaciones para el trabajo futuro.

Palabras clave: Bagazo, biorrefinería, biotecnología, fraccionamiento.

BIORREFINERY POSSIBILITIES INTO SUGAR INDUSTRY USING THE FRACTIONATION OF SUGAR CANE IN CLEAN TECHNOLOGIES OF ETHANOL

This work is focussed towards the etanol and sugar facilities from sugar cane conversion into biorrefinery. It is based on fractionation of sugar cane bagasse in several product focused in etanol like main product considering clean technologies conception. Finally recommendation for the future work are elaborated.

Key words: Biorrefinery, biotechnology fractionation, sugar cane bagasse.

I. INTRODUCCIÓN

La crisis energética que se vislumbra con el agotamiento paulatino de los combustibles fósiles y

el efecto negativo que se ha tenido en el medio ambiente ha demandado la atención de los científicos y empresarios hacia el uso de las fuentes renovables de energía, sin embargo las carencias de productos

químicos estarán también presentes con esta situación. La plataforma industrial de productos químicos tales como ácido acético, láctico, levulínico, combustibles líquidos como bioetanol y plásticos biodegradables pueden fabricarse a partir de fuentes maderables y otras biomásas lignocelulósicas.¹

En este concepto, el enfoque de aprovechar integralmente la biomasa disponible, como fuente de productos químicos y energía, con apoyo del concepto de biorrefinería, mediante “la conversión de los azúcares que están en los materiales lignocelulósicos a etanol” en primer término, “es un camino para optimizar la ganancia de la energía solar incorporada en el crecimiento de las plantaciones agrícolas”² y permite a partir de un producto líder como el etanol, mediante el fraccionamiento inicial de la biomasa, una diversidad de productos químicos de alto interés.

II. Aspectos claves de las biorrefinerías

La importancia de la biomasa como fuente de productos químicos y energía está dada por su carácter renovable y su amplia distribución, por ello si es aceptada la definición de biorrefinería, dada por la Agencia Internacional de Energía (IEA¹) en la que se define la “biorrefinería como la instalación donde se generan un amplio espectro de productos de interés comercial a partir de la biomasa”, se observa que el objetivo de estas instalaciones es multipropósito con el fin de lograr de forma sostenible varios productos de interés comercial. Además, considerando la definición dada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, (NREL) que la define como: instalaciones con el equipamiento necesario para integrar los procesos de conversión de biomasa en combustibles, energía y coproductos de valor añadido” que es análoga a la definición de las refinerías de petróleo.²

Con la aparición del concepto de biorrefinería integrada, la biomasa además de utilizarse en el sector energético, agrícola y forestal, amplía su utilización hasta el sector químico, por lo que la industria química juega un papel esencial en la obtención de gran variedad de bioproductos de valor añadido.

Partiendo de estas definiciones y su similitud desde el punto de vista de los procesos unitarios, un

aspecto clave en el desarrollo de las biorrefinerías es la etapa de fraccionamiento de la materia prima, para aprovechar, como en las refinerías tradicionales de petróleo, no solo una parte de las materias primas, sino todas sus fracciones como fuente de productos químicos y energía. Teniendo en cuenta lo anterior se comprende la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas viables para el fraccionamiento de los distintos tipos de biomasa, siendo entonces, el fraccionamiento de la biomasa un paso previo a la conceptualización de la biorrefinería.

Para reducir los costos sensiblemente y acelerar la aplicación comercial de la producción de etanol de residuos lignocelulósicos, ya que “es el paso clave en la conversión biológica de la celulosa a etanol y otros productos”, por lo que, dado su significativo impacto sobre la economía del proceso,^{2,3} se ha recomendado considerar los siguientes requerimientos en el pretratamiento visto como fraccionamiento de la biomasa:²

- Los productos químicos formados durante las condiciones de hidrolizado en preparación de los subsiguientes pasos biológicos no deben originar cambios de procesamiento o depósitos.
- La celulosa obtenida del pretratamiento debe ser altamente digestible y con rendimientos superiores al 90 % en menos de 5 días, y preferentemente de 3 días, con una baja carga de celulosa de 10 UPF/gramo de celulosa en el proceso de hidrólisis enzimática.
- La lignina y otros constituyentes deben ser recuperados para su conversión a valiosos coproductos y simplificar el proceso “downstream”.
- La distribución de azúcares recuperados entre el pretratamiento e hidrólisis enzimática debe ser compatible con la selección de organismos para fermentar los azúcares de 5 átomos.
- El vapor y la potencia demandados para el pretratamiento deben ser bajos y compatibles para la integración térmica con el resto del proceso.

Como se comprende, como biomasa se considera un amplio grupo de materiales de origen diverso y con características muy diferentes, que tendrán que utilizar un abanico de tecnologías de transformación en la obtención de una gama de productos, ya sean biocombustibles u otros coproductos, también por ello en las biorrefinerías utilizan una variedad de

métodos de separación para producir coproductos de alto valor de diferentes fuentes o corrientes de alimentación, de manera que las biorrefinerías estarán presentes las etapas esenciales de:

1. Procesos de fraccionamiento y extracción.
2. Tecnologías de conversión, sean termoquímicas o bioquímicas:
3. Los procesos de separación y purificación de los productos.

III. Posibilidades de la industria azucarera como base para el desarrollo de las biorrefinerías

La elección de una biomasa determinada como materia prima para ser utilizada en una biorrefinería como fuente de energía y coproductos químicos (biocombustibles y otros coproductos) estará determinada por las características y actividades de la región en la que se produzca. Por otro lado, como se conoce uno de los factores limitantes para utilizar la biomasa como fuente de energía y también de productos químicos, es lo referente al aseguramiento de su recolección y transporte hacia el lugar de destino, por ello, la logística existente para la transportación de la caña de azúcar y desde luego, el bagazo con ella, hasta un complejo fabril productor de azúcar susceptible de estar integrado material y energéticamente con otras instalaciones industriales, abre una perspectiva extraordinaria de transformar las fábricas de azúcar en verdaderas biorrefinerías que emplean integralmente la caña de azúcar como fuente de productos químicos y energía.

Estas instalaciones cuentan con facilidades de producción de la energía en forma de electricidad y vapor que se requieren para los procesos de obtención de azúcar y con ello con la cultura tecnológica de explotación y mantenimiento de estos procesos auxiliares, lo que les facilita la capacidad de aprendizaje tecnológico para la asimilación de nuevas producciones.

En este sentido, se ha avanzado mucho en la producción de etanol de los sustratos azucarados derivados de la industria de la caña de azúcar, tanto de las tradicionales tecnologías que emplean las mieles finales como principal fuente de azúcares fermentables, como las que emplean jugo de los

filtros, jugos secundarios o mezclas de los mismos.⁴ En paralelo a ello, la disponibilidad del bagazo como producto sobrante, después de garantizada la energía necesaria en el proceso, ha dado origen a instalaciones de productos derivados tales como tableros, papel y furfural en el proceso de diversificación de la industria de la caña de azúcar.

Los avances en los procesos biotecnológicos y la demanda creciente del etanol como biocombustible líquido han convertido la producción de etanol de residuos lignocelulósicos en un problema cardinal de la ciencia y la técnica, haciendo que el bagazo sea un material lignocelulósico con gran potencial para la producción de etanol y otros productos de interés dentro del concepto de biorrefinerías.

No obstante, aunque el etanol representa al producto líder para el desarrollo de una biorrefinería, no podemos perder de vista que en esta industria se dan o pueden darse todos los procesos tecnológicos de conversión de biomasa en productos de alto valor agregado, a saber:

- Licuefacción hidrotérmica (HTU) que consiste en la hidrogenación indirecta de la biomasa mediante un gas reductor (CO , H_2 ó una mezcla de ambos), en presencia de catalizadores en solución acuosa, a alta presión (100-200 Atmósferas) y temperaturas de 300 a 500 °C.
- Fermentación, que incluye entre otros: la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la fermentación de azúcares de seis y cinco átomos de carbono, y otros procesos de fermentación. Entre los procesos de fermentación se destacan:
 - a) La fermentación láctica para la obtención de ácido láctico de la glucosa.
 - b) La fermentación ABE para la obtención de solventes (acetona-butanol-etanol).
 - c) La obtención de hidrógeno vía fermentativa.
 - d) La obtención de moléculas base por fermentación como es el caso del *Xilitol, de la fermentación de las xilosas del bagazo de caña de azúcar.*
 - e) Fermentación del glicerol.
- Otros procesos: Reformado de los azúcares en fase acuosa, producción de fibras y materiales cerámicos y conversión a otros monómeros.

La producción comercial de etanol combustible

desde residuos agrícolas y otros materiales lignocelulósicos no está lejos y permitirá disminuir las necesidades de tierra entre el 29 % y el 38 %⁵ por lo que se estudia su producción a costos competitivos mediante varios esquemas tecnológicos de pretratamiento. Pero es obvio que solamente una combinación de tecnologías hará factible alcanzar esta meta. Por consiguiente, la cooperación de expertos en estas áreas del conocimiento parece ser la forma más eficiente para superar las dificultades en este campo”.

Como resultado de esta cooperación se ha venido desarrollando un esquema tecnológico que incluye la combinación de dos etapas de pretratamiento (ácida y básica) con apoyo del tratamiento hidroalcohólico en la etapa básica para proteger la glucosa.⁶ El esquema de fraccionamiento se sintetiza en la figura 1.

La composición química de los residuos sólidos que se alcanzan en varias alternativas de conducción de

la etapa de fraccionamiento se estudió mediante un diseño factorial parcial saturado,⁴ de acuerdo con el rango de las variables de mayor impacto de operación del proceso, lo que permitió estudiar el efecto de los cambios de estas variables en los parámetros económicos del proceso global, así como la sensibilidad de los mismos a factores tan importantes como los gastos en enzimas y los costos de los residuos lignocelulósicos, las variables independientes y sus rangos de variación considerados fueron las siguientes:

- X1: Tiempo en la primera etapa: 20-40 min.
- X2: Por ciento de etanol: 0-45 %
- X3: Relación sólido-líquido en la primera etapa: 1/7-1/5
- X4: falsa variable;
- X5: Tiempo en la segunda etapa: 60-90 min
- X6: Por ciento de etanol en la segunda etapa: 10-45 %
- X7: Por ciento de NaOH en la segunda etapa: 1,5-3 %.

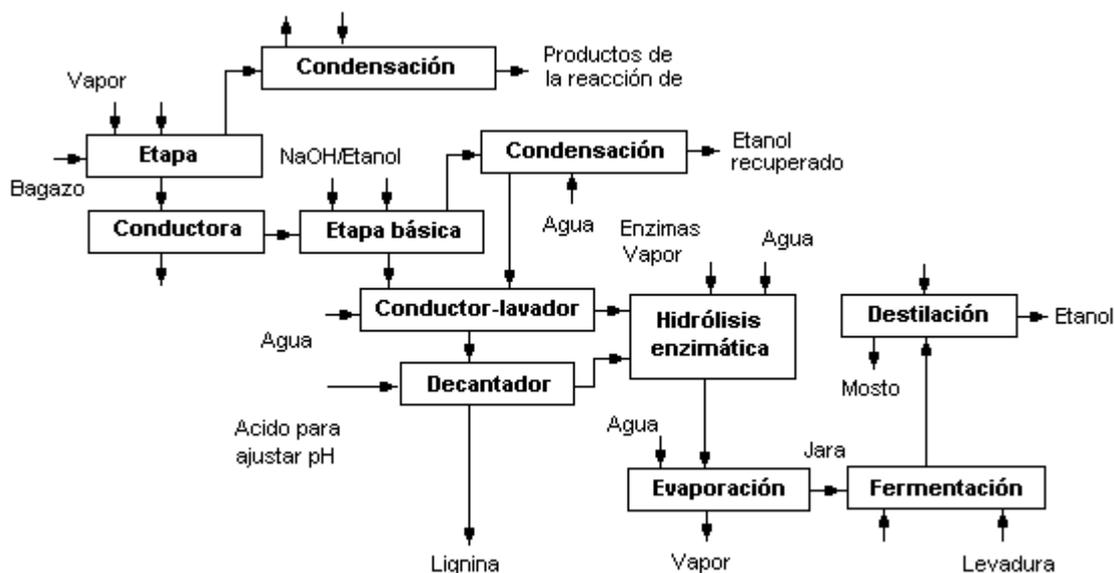


Figura 1. Esquema general desarrollado para el fraccionamiento del bagazo en el concepto de biorrefinería

En la Tabla 1 se muestra la matriz experimental de Plackett-Burmann utilizada.

Considerando la composición inicial del bagazo en 50,36 % de glucosa, 22,24 % de xilosa y 22,15 % de lignina de acuerdo con la matriz de

diseño y un procesamiento diario de 192 000 kg de bagazo, cantidad necesaria para la producción diaria de aproximadamente 500 HL de etanol, los resultados del balance de materiales para la etapa de hidrólisis ácida se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Matriz experimental de Plackett-Burman

N	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1	+	+	+	-	+	-	-
2	+	+	-	+	-	-	+
3	+	-	+	-	-	+	+
4	-	+	-	-	+	+	+
5	+	-	-	+	+	+	-
6	-	-	+	+	+	-	+
7	-	+	+	+	-	+	-
8	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2. Resultados del balance de materiales en la etapa ácida de fraccionamiento del bagazo

N	Masa de los componentes del bagazo pretratado			Hidrolizado etapa ácida			
	Masa de glucosa (kg)	Masa de xilosa (kg)	Masa de lignina (kg)	Masa de glucosa (kg)	Masa de xilosa (kg)	Masa de Lignina (kg)	Masa de agua (kg)
1	78260,99	9976,24	28387,87	8691,97	27600,46	14140,13	690080,00
2	79092,31	10082,21	28689,42	7860,65	27494,49	13838,58	1071212,8
3	74039,44	9438,11	26856,58	12913,52	28138,60	15671,42	704640,0
4	67310,95	8580,40	24415,93	19642,01	28996,31	18112,07	727846,4
5	80780,93	10297,47	29301,94	6172,03	27279,23	13226,06	1065388,8
6	88470,64	11277,71	32091,25	8220,56	31423,09	10436,75	654867,2
7	86236,47	10992,91	31280,84	7164,99	26583,79	11247,16	662572,8
8	83885,39	10693,21	30428,03	12805,80	32007,59	12099,97	1054681,6

Las fracciones, aquí obtenidas, en el proceso “down-stream” tendrán los diferentes destinos en las etapas de proceso siguientes:

- El licor hidrolizado, después de separar la lignina por adición de agua que se destinará como materia prima para otros productos de alto valor agregado y en algunos casos podrá quemarse por su poder calórico, debido a su alto contenido de derivados de la xilosa tendrá cuatro alternativas de uso que deben ser evaluadas en cada caso, a saber:

a) Aprovechar los azúcares de 5 átomos de carbono presentes para ser fermentados en presencia de microorganismos capaces de fermentar estos azúcares, con destino a la obtención de etanol, con lo cual se evitará cualquier efecto contaminante y se podrá incrementar la producción de etanol en valores entre 3,2 y 5 kg de bagazo para obtener 1 L de etanol con la consiguiente ventaja económica⁶

b) Aprovechar los azúcares presentes para ser fermentados en presencia de microorganismos capaces de fermentar azúcares de 5 átomos de

carbono, con destino a otros productos de interés comercial diferentes del etanol como son, por ejemplo, el xilitol, lo que permite un potencial de incremento de los valores de producción ya que se integra otro producto de alto interés comercial.

c) Recuperado por arrastre con vapor, con baja relación líquido/sólido para su conversión a furfural, lo que permite un potencial de incremento de los valores de producción en un 50 %.

d) Como diluyente en la etapa de hidrólisis enzimática con vistas a ahorrar agua y aprovechar la glucosa y xilosa en la etapa de fermentación posterior a la sacarificación por vía enzimática, lo que permite un potencial de incremento de los valores de producción de etanol entre 3,2 y 5 kg de bagazo para obtener 1 L de etanol y un ahorro de agua aproximado del 50 %.⁷

- La celulignina se somete a una segunda etapa de fraccionamiento básico en condiciones de tratamiento hidroalcohólico, según las condiciones previstas en el Plan Experimental para prepararlo para la sacarificación de la celulosa mediante la hidrólisis enzimática.

Los resultados del balance de materiales obtenidos en la segunda etapa de fraccionamiento, es decir el fraccionamiento hidroalcohólico básico se ofrecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del balance de materiales en la etapa básica de fraccionamiento hidroalcohólico del bagazo para su posterior sacarificación

Composición de la celulignina después de la segunda etapa de pretratamiento.				Licor hidrolizado etapa usando NaOH y Etanol.			
N	Masa de Glucosa, (kg)	Masa de Xilosa, (kg)	Masa de Lignina; (kg)	Masa de glucosa; (kg)	Masa de Xilosa, (kg)	Masa de Lignina; (kg)	Masa de Agua, (kg)
1	57247,91	7297,62	20765,73	21013,08	2678,62	7622,14	639246,24
2	66833,00	8519,47	24242,56	12259,31	1562,74	4446,86	659449,14
3	52753,10	6724,65	19135,31	21286,34	2713,46	7721,27	602699,93
4	46888,81	5977,10	17008,13	20422,14	2603,29	7407,79	370795,88
5	68017,54	8670,47	24672,23	12763,39	1627,00	4629,71	462500,90
6	53790,15	6856,85	19511,48	34680,49	4420,86	12579,77	706396,74
7	53294,14	6793,62	19331,56	32942,33	4199,29	11949,28	469949,72
8	72133,05	9195,09	26165,06	11752,34	1498,12	4262,97	701275,03

Las fracciones, aquí obtenidas, en el proceso “aguas abajo” tendrán los diferentes destinos en las etapas de proceso siguientes:

- El licor hidrolizado se someterá a decantación ácida de la lignina que se destinará como materia prima para otros productos de alto valor agregado y en algunos casos podrá quemarse por su poder calórico, el licor sobrenadante tendrá como alternativas de uso:

a) Podrá utilizarse como medio de hidrólisis enzimática lo que podrá disminuir el consumo

de agua en aproximadamente el 50 % del total, teniendo en cuenta que este proceso de obtención de etanol a partir de bagazo es altamente consumidor de agua.⁷

b) Se pueden separar los oligómeros contenidos en el licor para la obtención de antioxidantes.⁸

Este proceso incluye varias etapas en las cuales aparecen corrientes intermedias que pueden ser aprovechadas como fuentes de productos químicos de alto valor agregado, y utilizarlas como mezcla para la producción de aglomerados de partículas.

Tabla 4. Resultados del balance de materiales en la etapa de hidrólisis enzimática después de la sacarificación

Residuo de la hidrólisis enzimática				
N	Masa de glucosa (kg)	Masa de xilosa (kg)	Masa de lignina (kg)	Masa de agua (kg)
1	32782,45	7297,62	20765,73	162 634,89
2	38271,25	8519,47	24242,56	168 563,67
3	30208,54	6724,65	19135,31	123 456,98
4	24044,58	5977,10	17008,13	118976,45
5	40531,65	8670,47	24672,23	197685,34
6	29649,13	6856,85	19511,48	173456,87
7	28054,03	6793,62	19331,56	169677,89
8	41801,10	9195,09	26165,06	175 334,76

CONCLUSIONES

1. Como consecuencia de lo expuesto aquí se puede concluir que son muchas las posibilidades de reconvertir la industria de la caña de azúcar a biorrefinería, que indudablemente, es un concepto más amplio que el de diversificación azucarera y que tiene su aspecto clave en el fraccionamiento de la biomasa cañera en toda su integralidad, pero para ello serán necesarias variadas tareas de investigación en el campo de los fenómenos de transporte de la bioingeniería, la biotecnología aplicada y el análisis y síntesis de procesos de la industria química y fermentativa.
2. Como se observó en el trabajo, se obtiene un gran volumen de “residuales” que pueden ser aprovechados en otros procesos para su conversión en productos de alto valor agregado.

European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets 29-3 de julio, Hamburg, Germany, 2009.

6. MESA, L.: Análisis de alternativas técnicoeconómicas del bagazo de la caña de azúcar para la obtención de etanol. Diversificación 2008, ICIDCA. Cuba
7. WYMAN C.E.; B.E. DALE; R.T. ELANDER; M. HOLTZAPPLE; M.R. LADISCH AND LEE Y.Y: “Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover.” *Biores Technol* 96: 2026-2032, 2005.
8. YANG, BIN AND C.E WYMAN: Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. 2007 Society of chemical Industry and John Wiley & Sons, LTD/Biofuels, bioproduct. Bioref.2:26-40(2008); DOI:10.1002/bbb, 2007.

BIBLIOGRAFÍA

1. CARA, C. Y OTROS: Antioxidant activity of olive tree pruning. Bioresource Technology.
2. DE CERQUEIRA LEITE, R. C.; M. R. LIMA VERDE LEAL; L.A. BARBOSA CORTEZ,; W. M. GRIFFIN Y M. I. GAYA SCANDIFFIO: “Can Brazil replace 5 % of the 2025 gasoline world demand with ethanol?” *Energy* 34655-661, 2009.
3. HUA-JIANG HUANG; SHRI RAMASWAMYA; U.W. TSCHIRNER AND B.V. RAMARAO: “A review of separation technologies in current and future biorefineries. “*Separation and Purification Technology* 62: 1-21, 2008.
4. MESA, L.; ENCARNACIÓN RUIZ, CRISTÓBAL CARA, INMACULADA ROMERO, MANUEL DÍAZ, EULOGIO CASTRO Y ERENIO GONZÁLEZ: Organosolv pretreatment of sugar cane bagasse to produce ethanol. 16 th European Biomass Conference & Exhibition From Research Industry and Markets. Valencia, España, 2008.
5. MESA, L.; E. GONZÁLEZ; M. GONZÁLEZ; Y. ALBERNAS; M. DÍAZ Y E. CASTRO: Economic Evaluation of pretreatment alternatives for ethanol production from sugar cane bagasse, 17 th