

# Diversificación de la industria azucarera y bioeconomía circular: las rutas de la energía

Raúl Sabadí-Díaz\*

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).

Vía Banca, No. 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

\* [raul.sabadi@icidca.azcuba.cu](mailto:raul.sabadi@icidca.azcuba.cu)

## RESUMEN

La diversificación, a partir de la caña de azúcar, con esquemas flexibles de producción, es una alternativa económica inevitable si se busca competitividad; en ella deben estar presentes las opciones para generar energía, a partir de fuentes renovables. Esta responde también al concepto de bioeconomía circular, al hacerse un uso útil de todos los subproductos y residuos que producen, al mismo tiempo, insumos o utilidades de diversos tipos, que regresan al proceso, como la electricidad y el agua para reducir impactos negativos sobre el medio ambiente. Entre las nuevas alternativas energéticas el etanol 2G y el biogás parecen ser las mejores opciones. Aunque aún no es un resultado económicamente factible, se continúa trabajando con fuerza en los aspectos que limitan el desarrollo del biohidrógeno a partir del bagazo y las coproducciones pueden ser también una alternativa. Definitivamente existe un compromiso entre la factibilidad económica y el impacto ambiental que puede hacer difícil la toma de decisiones. La integración de procesos bajo denominaciones de biorrefinería, planta híbrida o parque bioenergético es la mejor solución aunque no es única y responderá al mercado, con el uso de otros recursos no derivados de la caña de azúcar y otras fuentes renovables de energía.

**Palabras clave:** agroindustria azucarera, diversificación, bioeconomía circular, energía, biorrefinería.

## ABSTRACT

Diversification from sugarcane with flexible production schemes is an unavoidable economic alternative if we are looking for competitiveness, and options to generate energy from renewable sources must be present. This also responds to the concept of circular bio-economy by making useful use of all by-products and waste, which simultaneously produce inputs or utilities of various types that return to the process, such as electricity and water, reducing negative impacts on the environment. Among the new energy alternatives, 2G ethanol and biogas seem to be the best options. Although it is not yet an economically feasible result, work continues on the aspects that limit the development of bio-hydrogen from bagasse and co-productions may be an alternative. There is definitely a trade-off between economic feasibility and environmental impact, which can make decision making difficult. The integration of processes, under the names of bio-refinery, hybrid plant or bioenergy park, is the best solution, which is not unique and will respond to the market, integrating the use of other resources not derived from sugar cane and other renewable sources of energy.

**Key words:** sugarcane agroindustry, diversification, circular bio-economy, energy, bio-refinery.

## INTRODUCCIÓN

La economía circular es una forma de producción y consumo, que va más allá de las tradicionales “tres R” (reducir, reutilizar y reciclar) y añade a su modelo conceptos como: compartir, alquilar, reparar y renovar los productos y sus materiales, tantas veces como sea necesario, en un intento por hacer frente a una economía lineal que ha arrasado con los ecosistemas y el medio ambiente hasta el límite (1). Se añade el prefijo bio para indicar el carácter renovable deseado en su concepción.

La diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar ha sido motivo de atención de investigadores y productores, en el afán de buscar mayores niveles de eficiencia en la economía de la agricultura y las industrias, debido a la gran cantidad de productos y subproductos que el procesamiento de esta gramínea genera y sus potencialidades. De hecho, en muchos casos, ya el concepto de bioeconomía circular ha estado presente en la diversificación desde sus inicios.

La transición energética a fuentes renovables se está acelerando, ante el incremento de la demanda, la necesidad de reducir emisiones de gases y el imperativo de lograr producciones sostenibles. Y, en esencia, es un alejamiento de la quema de combustibles fósiles a un sistema que utiliza una gama mucho más amplia de materias primas y fuentes alternativas, para satisfacer nuestras necesidades energéticas. La economía circular debe integrarse a la transición energética por diseño (2), para garantizar que el mundo tenga un suministro sostenible de energía. Esto requerirá una acción concertada de las entidades de investigación, las empresas y los reguladores (3). En este trabajo se exponen rutas energéticas que deben tenerse en cuenta, para que la diversificación en la agroindustria de la caña de azúcar sea considerada como un caso típico e imprescindible de bioeconomía circular, en particular para la generación de energía de fuentes renovables.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realiza un análisis de la literatura más reciente sobre las alternativas energéticas que se pueden implementar, a partir del uso de los derivados de la caña. También se realiza un estudio semejante para la economía circular, en particular lo asociado al tema energético, para establecer el vínculo con la diversificación en la industria de la caña de azúcar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra una representación de las alternativas de diversificación de la caña de azúcar, orientadas a la energía, a partir del uso de los subproductos de la cosecha agrícola y el procesamiento industrial. En este esquema solo se han considerado las fuentes propias de esta agroindustria; pero otras fuentes de materias primas para producción de energía que existan en la zona objeto de estudio podrían ser consideradas como complemento, siempre que la economía global del sistema sea factible. Nótese que la electricidad retorna al proceso industrial y cierra un ciclo típico de economía circular.

A continuación se describen los destinos energéticos de los subproductos agroindustriales. En estas rutas se han incluido los usos más extendidos y otros que son más novedosos; incluso, aún no totalmente logrados; pero ya reportados (4). También se hace una valoración de los esquemas integrados de producción a partir de la caña, que pueden denominarse según conceptos que se abordan actualmente.

### Residuos de la cosecha (paja)

Mezclar la paja con bagazo para generar vapor y después electricidad es lo más común. En esta mezcla, por la presencia de sílice y lignina, hay límites en cuanto a la inclusión de la paja, que pueden variar en función del tipo de caldera de vapor que se utilice. Se ha explorado también la producción de etanol de segunda generación (2G); es decir, el que se obtiene a partir de residuos lignocelulósicos, con mezclas de bagazo y paja (5, 6), para maximizar la paja para combustible en las calderas y destinar mayor cantidad de bagazo a la producción del etanol 2G (7).

En la India existe una experiencia en la elaboración de carbón, a partir de la paja en forma de briquetas y su uso como combustible en cocinas desarrolladas con ese propósito, lo que contribuye

a reducir la deforestación y resultan factibles económicamente para resolver demandas locales (8, 9, 10).

### Bagazo

El uso más directo y extendido es ya energético de por sí, por su quema directa en calderas para la generación de vapor y, a partir de este, la generación de electricidad en turbinas. Pero hay otras alternativas energéticas menos utilizadas o, en estudio, en diferentes momentos de desarrollo. A continuación se describen las más relevantes:

1. Bioetanol “de segunda generación” (2G): de este tipo, a partir de diferentes residuos ya existen, al menos, cuatro plantas de producción que operan comercialmente; dos en Brasil, a partir de bagazo (11), una en Noruega y otra en Estados Unidos. En construcción hay dos instalaciones en Rumania y Estados Unidos. En fase de diseño hay otras cuatro en Estados Unidos, China, Finlandia y Eslovaquia (12). Con relación al bagazo se sigue trabajando en el estudio de cuatro rutas de producción de etanol, a partir de bagazo tratado (13). Para el tratamiento se ha trabajado en métodos físicos, químicos, físico-químicos y biológicos, con mayor presencia del uso de ácidos diluidos, álcalis y vapor (14). El rendimiento teórico es alrededor de 300 litros de etanol por tonelada de bagazo (5) y se informan valores entre 157 y 225 reportados (15); es decir, de 0.48 g/g, 94 % del rendimiento teórico (16).

Instalar una planta de producción de etanol 2G, en un sitio industrial donde existe un central azucarero y una destilería de etanol tradicional significa incrementar en un 50 % la producción de etanol, con la misma cantidad de caña molida.

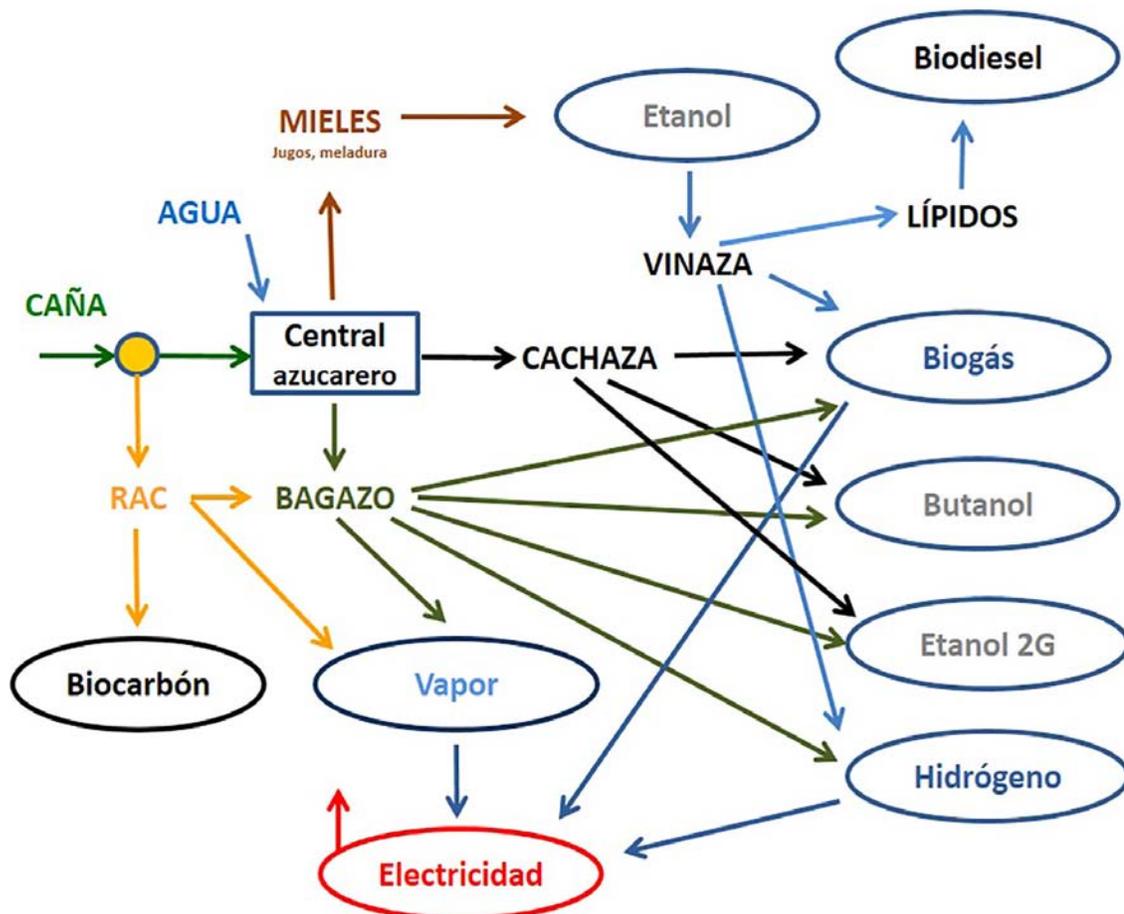


Figura 1. Las rutas de la energía en la diversificación de la caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia.

2. Biobutanol: a pesar de su atractivo como biocombustible líquido, el bajo rendimiento en su producción, a partir del bagazo, es una preocupación no resuelta, con el método de fermentación ABE (acetona-butanol-etanol). Se informan rendimientos de 0.08 a 0.29 g/g, en dependencia del método de pretratamiento, de la fracción usada de celulosa o hemicelulosa y de la cepa utilizada (17, 18). Trabajos recientes utilizan la introducción de hidrolizados de hemicelulosa del bagazo en fermentaciones con mieles de caña, en modo fed-batch (19), se informa que es una estrategia eficiente sin necesidad de tratamiento previo y suplementación de nutrientes, que puede mejorar la economía de una biorrefinería de caña de azúcar que produce butanol, a partir de hemicelulosa de bagazo, también confirmado en otra publicación por (20), aunque aún con rendimiento de 0.28 g/g.
3. Biohidrógeno: las bajas eficiencias de conversión, la falta de buenos diseños de biorreactores y lo caro de los sistemas de purificación y almacenamiento son factores en contra de la producción de hidrógeno, a partir del bagazo (21 - 23). Se continúan estudios en este sentido que abordan diferentes aspectos como: los pretratamientos (24), estrategias de fermentación (25) y optimización de parámetros para lograr eficiencias, en el rango de 55 a 93 mL/g de sólidos volátiles (26). En cuanto al proceso, se usa mayormente la fermentación oscura, que tiene inconvenientes por los efluentes que genera. Se prefiere, entonces, un sistema híbrido que añada una segunda etapa de tratamiento de ese efluente, por ejemplo una fotofermentación (27), para incrementar el rendimiento y la eficiencia. Trabajos recientes abordan el uso de enzimas tratadas con nanopartículas de magnetita para incrementar su actividad que reportan mejoras en la hidrólisis del bagazo e incremento en la producción de hidrógeno (28). Por otra parte, es importante la aplicación de enfoques integradores, como el concepto de biorrefinería, para lograr la viabilidad económica de estos procesos. Por ejemplo, la integración de la producción de hidrógeno con la de biogás y la utilización de los residuos de la producción para otros biocombustibles (29).
4. Biogás: los estudios para la producción de biogás, a partir del bagazo, se han centrado en los pretratamientos y procesos de recuperación, se han informado incrementos de rendimientos entre 122.3 y 480 mL/g de sólidos volátiles (26, 30). Se han reportado estudios sobre la producción de biogás junto con la producción de etanol o hidrógeno (26, 31, 32). En Cuba se trabaja en un proyecto de innovación (33) con el propósito de producir biogás, a partir de mezcla de diferentes sustratos originados por un central azucarero y su destilería anexa.
5. Coproducciones: se han desarrollado procesos, aún no establecidos industrialmente, para la producción de más de un biocombustible de conjunto. En este trabajo se mencionan sólo tres; pero hay otros. Se reportan estudios para la obtención de mezcla (IBE) de isopropanol, butanol y etanol 2G, como combustible líquido automotor en un proceso (figura 2), que utiliza fermentación continua y especies de *Clostridium* modificadas genéticamente. Aunque la producción de etanol 2G, es ligeramente más ventajosa en una biorrefinería, a partir de caña de azúcar, que IBE en términos de eficiencia energética e ingresos, esta mezcla tiene mayor densidad energética que el etanol solo, por lo que puede ser preferida por los choferes y alcanzar mayores ventas (34).  
Otro caso de coproducción de biocombustibles es la producción de hidrógeno y ABE (acetona, butanol, etanol), a partir de hidrolizados de bagazo y paja de arroz (35), en el mismo proceso de fermentación oscura, que usa al mismo tiempo *Enterobacter aerogenes* y *Clostridium acetobutylicum* (figura 3). Se obtiene un resultado 3.4 veces mayor en el rendimiento de hidrógeno, a partir de bagazo y 1.5 veces mayor en el caso de la producción de ABE, a partir de la paja de arroz, que cuando se realizan los procesos por separado.

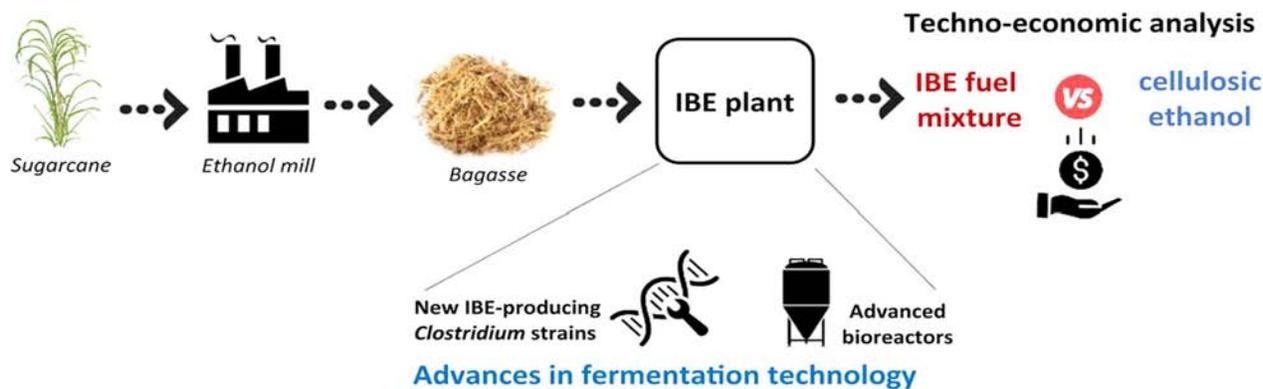


Figura 2. Producción de IBE. Dantas *et al.* (34).

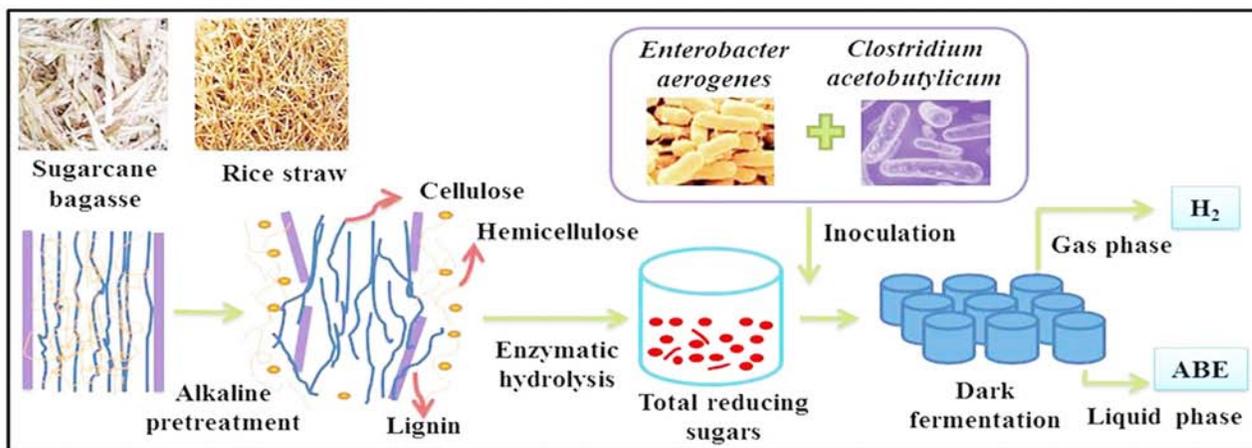


Figura 3. Producción de biohidrógeno y ABE. Tondro *et al.* 2020 (35).

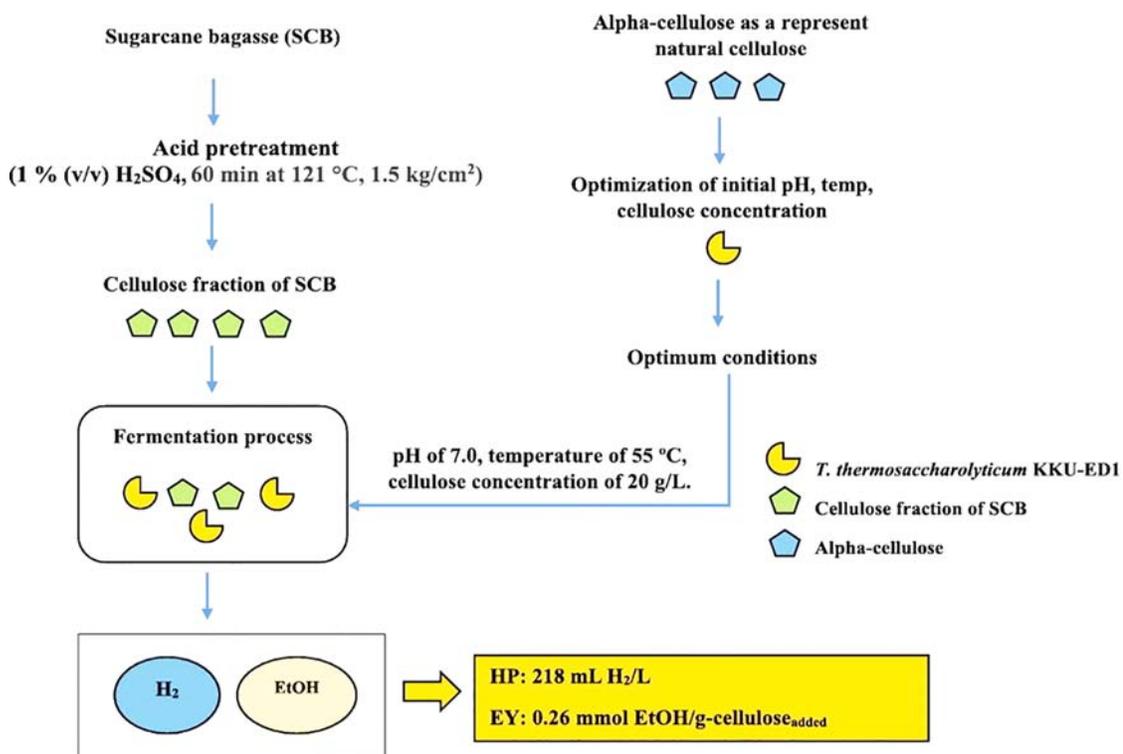


Figura 4. Producción de biohidrógeno y etanol. Saripan *et al.* 2021 (36).

Saripan *et al.* (36) evalúan la coproducción de hidrógeno y etanol a partir de fracciones de celulosa del bagazo con *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* KCU-ED1 en fermentación por lotes (figura 4). Concluyen que esta bacteria celulolítica termofílica es capaz de realizar esta producción combinada.

### Mieles

Las mieles de caña, como los jugos o la meladura, son la materia prima para la producción de etanol, llamado de primera generación; es decir, producido a partir de corrientes líquidas de materiales azucarados. Sobre este producto, las tecnologías son conocidas y probadas y se han ido mejorando en busca de mejores eficiencias. La literatura es muy amplia, así como la experiencia de producción y, por ello, no se aborda en este trabajo. En Cuba, a partir de la existencia de caña no apropiada para producir azúcar con buen rendimiento, en algunos centrales azucareros se ha decidido molerla para producir meladura con destino a las destilerías. Esta es una opción que puede también usarse como estrategia al inicio y final de la zafra, cuando la madurez de la caña y su contenido de azúcares son bajos.

### Cachaza

Se reporta su uso para producir biocombustibles como etanol (37), butanol (38) y biogás (39). Srivastava *et al.* (28) reportan incrementos en la producción de biogás por digestión anaerobia de cachaza, con la utilización de un nanocatalizador de óxidos de cobre, preparado con un extracto acuoso de cachaza y bagazo.

Se trabaja la codigestión anaerobia de cachaza y bagazo pretratados térmicamente, para producir biogás con mejores rendimientos que por separado y con otros tratamientos, en los que prevalece el camino de la metanogénesis (40).

### Vinazas

Las vinazas son el residuo de la producción de etanol. Se han publicado trabajos de fermentación anaeróbica de la vinaza para producir biogás (41) y su análisis de factibilidad económica, existe una experiencia industrial de producción en Cuba, desde hace varios años, en la empresa azucarera Heriberto Duquesne, donde se produce biogás a partir de las vinazas de la destilería anexa al central azucarero, con uso de reactores de tipo UASB. El proyecto mencionado (33) prevé su uso.

También se informa sobre la producción de lípidos para biodiesel, con el uso de microalgas y levaduras (42) e hidrógeno (43).

### Biorrefinerías

La conjunción de varias de las rutas de la energía mencionadas, en un mismo sitio industrial, constituye una biorrefinería, que puede incluir, además, productos químicos, a partir de la caña de azúcar como materia prima inicial y son ejemplos típicos de bioeconomía circular.

Se han reportado recientemente resultados de análisis de este tipo de instalaciones industriales, entre ellos Chatterjee y Venkata (44) estudian la producción simultánea de hidrógeno y etanol, en una biorrefinería con un diseño de economía circular, con máxima recuperación y sin descarga de efluentes.

De Freitas *et al.* (45) estudian biorrefinerías a partir de caña de azúcar y su transformación en sistemas que integren la industria y las plantaciones, como generadores de bioenergía, que incluya captura y almacenamiento de carbono.

Katakojwala y Venkata (46) proponen una biorefinería que produzca nanocelulosa, lignina e hidrógeno a partir del bagazo, que realice su análisis de ciclo de vida, que estime un impacto sobre

el medio ambiente 30 % menor, sin descargas de líquidos, que al realizar las producciones por separado.

### ¿Plantas híbridas o parques bioenergéticos?

El concepto de planta híbrida se refiere usualmente a la integración de dos fuentes renovables, para generación de energía eléctrica, la solar fotovoltaica y la eólica, en una instalación productiva. En las industrias de la caña de azúcar este concepto se puede extender con la inclusión de la biomasa como fuente renovable principal con la utilización de las alternativas energéticas mencionadas. En la figura 1 se podría, entonces, incluir un parque fotovoltaico que aporte electricidad al sitio industrial. De hecho, ya existen experiencias en Brasil que han denominado como parques bioenergéticos.

El Grupo Raizen, de Sao Paulo, ha apostado por un desarrollo basado en recursos renovables y economía circular (11, 47). Es el mayor productor mundial de etanol 1G y 2G (hidratado, anhidro y neutro), a partir de la caña. Producen etanol 2G desde 2019 en la planta de la fábrica Costa Pinto en Piracicaba, con más de 80 millones de litros exportados. Cerca de esta planta han instalado, en un área de 40 mil m<sup>2</sup>, un parque fotovoltaico con capacidad para generar 1.3 MWp. Tienen otros seis parques de este tipo en operación; poseen 23 parques bioenergéticos que son autosuficientes en el consumo de electricidad y, 13 de ellos, exportan a la red pública.

Junto al central azucarero, que muele cinco millones de toneladas de caña al año y la destilería de Bonfim, tienen una planta de biogás en operación en Guariba, a partir de cachaza y vinaza, que utilizan para generar electricidad (capacidad instalada de 21 MW) y producir biometano, gas derivado del biogás, que se usa como sustituto de combustible para vehículos pesados. Su intención es llegar a producir dos millones de Nm<sup>3</sup> por día. De conjunto con la empresa japonesa Sumitomo, producen y comercializan pellets de paja y bagazo, con una capacidad de producción anual de 100 mil toneladas en la planta Diamante, con destino a la sustitución de carbón, en generadores europeos de electricidad.

En resumen, operan en un sistema de economía circular, que aprovecha todos los residuos e insumos utilizados en los procesos para la generación de nuevas formas de energía, para contribuir directamente con el medio ambiente y generar menos residuos industriales y con productos sostenibles que ayudan a limpiar la matriz energética.

## CONCLUSIONES

La diversificación, a través de la utilización integral de la caña de azúcar con esquemas flexibles de producción, ya sea biorrefinería, planta híbrida o parque bioenergético, es una alternativa económica inevitable que busca competitividad y en ella deben estar presentes las rutas de la energía en algunas de las variantes mencionadas.

Sin dudas, este concepto de diversificación responde también al concepto de bioeconomía circular, al hacerse un uso útil de todos los subproductos y residuos que se generan y retornan al proceso, a su vez, como insumos o utilidades de diversos tipos, como la electricidad y el agua, con reducción del impacto negativo sobre el medio ambiente.

Entre las nuevas alternativas, el etanol 2G y el biogás parecen ser las mejores opciones con varias plantas en funcionamiento o construcción.

Aunque aún no es un resultado económicamente factible, se continúa trabajando con fuerza en varios enfoques, para el desarrollo del biohidrógeno, a partir del bagazo.

No existe una solución única para el diseño de estos parques bioenergéticos, que responda a demandas locales y pueda integrar el uso de otros recursos no derivados de la caña de azúcar y

otras fuentes renovables de energía. Definitivamente existe un compromiso entre la factibilidad económica y el impacto ambiental, lo que hace difícil la toma de decisiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. García Gil, K. (2021). Advantages and disadvantages of the circular economy. <https://www.bbva.ch/en/news/advantages-and-disadvantages-of-the-circular-economy/>. Consultado 25/5/2022.
2. Ollagnier, J. (2020). View From Davos: What's The Role of Electricity In The 'Circular' Economy? Consultado 30/3/2022. <https://www.forbes.com/sites/jeanmarcollagnier/2020/01/21/whats-the-role-of-electricity-in-the-circular-economy/?sh=66a4b0f220d7>
3. Pennington, J. (2022). 3 ways the circular economy is vital for the energy transition. <https://www.greenbiz.com/article/3-ways-circular-economy-vital-energy-transition/>. Consultado 30/3/2022.
4. Meghana, M. and Shastri, Y. (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: status, opportunities, and challenges. *Bioresource Technology* 303. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122929>. Consultado 2/6/2022.
5. Chandel, A.K. et al. (2012). Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 87, 11–20.
6. Krishnan, C. et al. (2010). Alkali based AFEX pretreatment for the conversion of sugarcane bagasse and cane leaf residues to ethanol. *Biotechnol. Bioeng.* 107, 441–450.
7. Vikash, P.V., Mandade, P.V., Shastri, Y. (2018). Assessment of bagasse and trash utilization for ethanol production: a case study in India. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 37, 2165–2174.
8. ARTI (2010). Briquetted Charcoal from Sugarcane Trash 51–53. <http://www.arti-india.org/>. Consultado 25/5/2022.
9. Balakrishnan, M., Batra, V.S. (2011). Valorization of solid waste in sugar factories with possible applications in India: a review. *J. Environ. Manag.* 92, 2886–2891.
10. Bhatnagar, A., Kesari, K.K., Shurpali, N. (2016). Multidisciplinary approaches to handling wastes in sugar industries. *Water Air. Soil Pollut.* 227, 11.
11. Reuters (2021). <https://www.reuters.com/business/energy/brazils-razen-build-second-cellulosic-ethanol-plant-filing-2021-06-25/> Consultado 30/3/2022.
12. Padella, M., O'Connell, A., Prussi, M. (2019). What is still limiting the deployment of cellulosic ethanol? Analysis of the current status of the sector. *Appl. Sci.* 9.
13. Govind, M., Shastri, Y.S. (2019). Biofuels Life Cycle Assessment Based Comparison of Different Lignocellulosic Ethanol Production Routes Production Routes. *Biofuels* in Press.
14. Sarker, T.C., Azam, S.M.G.G., Bonanomi, G. (2017). Recent advances in sugarcane industry solid by-products valorization. *Waste Biomass Valorization* 8, 241–266.
15. Nakanishi, S.C. et al. (2017). Fermentation strategy for second generation ethanol production from sugarcane bagasse hydrolyzate by *Spathaspora passalidarum* and *Scheffersomyces stipitis*. *Biotechnol. Bioeng.* 114, 2211–2221.
16. Terán Hilaes, R. et al. (2017). Ethanol production in a simultaneous saccharification and fermentation process with interconnected reactors employing hydrodynamic cavitation-pretreated sugarcane bagasse as raw material. *Bioresour. Technol.* 243, 652–659.
17. Magalhães, B.L. et al. (2018). Improved n-butanol production from lignocellulosic hydrolysate by *Clostridium* strain screening and culture-medium optimization. *Biomass Bioenergy* 108, 157–166.

18. Zetty-Arenas, A. M. et al. (2019). Towards enhanced n-butanol production from sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate: strain screening, and the effects of sugar concentration and butanol tolerance. *Biomass Bioenergy* 126, 190–198.
19. Chacón, S. et al. (2021). Three-stage repeated-batch immobilized cell fermentation to produce butanol from non-detoxified sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates. *Bioresource Technology*, 321, 124504. doi:10.1016/j.biortech.2020.124504
20. Zetty-Arenas, A. M. et al. (2021). Co-fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate and molasses by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum*: effect on sugar consumption and butanol production. *Industrial Crops and Products*, 167, 113512. doi:10.1016/j.indcrop.2021.113512.
21. Pandu, K., Joseph, S. (2012). Comparisons and limitations of biohydrogen production processes: a review. *Int. J. Adv. Eng. Technol.* 2, 2231–11963.
22. Sekoai, P.T., Daramola, M.O. (2015). Biohydrogen production as a potential energy fuel in South Africa. *Biofuel Res. J.* 2, 223–226.
23. Michelena, G.; Sabadí, R. (2022). Estado del arte de la producción de hidrógeno a partir de biomasa cañera. Informe de etapa 2 del resultado 7 del proyecto PN3602LH002-005, PNC-TI02. ICIDCA, La Habana.
24. Bin Hu, B., Zhu, M.J. (2017). Direct hydrogen production from dilute-acid pretreated sugarcane bagasse hydrolysate using the newly isolated *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* MJ1. *Microb. Cell Fact.* 16, 1–11.
25. Reddy, K. et al. (2017). Biohydrogen production from sugarcane bagasse hydrolysate: effects of pH, S/X, Fe<sup>2+</sup>, and magnetite nanoparticles. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 8790–8804.
26. Kumari, S., Das, D. (2015). Improvement of gaseous energy recovery from sugarcane bagasse by dark fermentation followed by biomethanation process. *Bioresour. Technol.* 194, 354–363.
27. Ramprakash, B. et al. (2022). Current strategies and future perspectives in biological hydrogen production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 168, 112773, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112773> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122006578>
28. Srivastava, N. et al. (2022). Biohydrogen production via integrated sequential fermentation using magnetite nanoparticles treated crude enzyme to hydrolyze sugarcane bagasse. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47, 72, 30861-30871. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.198>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921034455>
29. Chandrasekhar, K. et al. (2020). Waste based hydrogen production for circular bioeconomy: Current status and future directions. *Bioresource Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122920>.
30. Janke, L. et al. (2015). Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing. *Int. J. Mol. Sci.* 16, 20685–20703.
31. Liu, Y. et al. (2015). Sequential bioethanol and biogas production from sugarcane bagasse based on high solids fedbatch SSF. *Energy* 90, 1199–1205.
32. Bolado-Rodríguez et al. (2016). Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 201, 182–190.
33. Oliva, D. et al. (2022). Generación de energía eléctrica a partir del biogás producido desde los residuos de los procesos de producción de azúcar y etanol (ELECTROBIOL). Proyecto del PNCI 02. CITMA. La Habana, Cuba.
34. Dantas, E. R. S. et al. (2020). Biochemical conversion of sugarcane bagasse into the alcohol fuel mixture of isopropanol-butanol-ethanol (IBE): is it economically competitive with cellulosic ethanol? *Bioresource Technology*, 123712. doi:10.1016/j.biortech.2020.123712 . Consultado 29/10/2022.

35. Tondro, H. et al. (2020). Biological production of hydrogen and acetone- butanol-ethanol from sugarcane bagasse and rice straw using co-culture of *Enterobacter aerogenes* and *Clostridium acetobutylicum*. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105818. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105818.
36. Saripan, A.; Reungsang, A.; Sittijundae, S. (2021). Co-production of hydrogen and ethanol by *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* KKU-ED1 from alpha-cellulose and cellulose fraction of sugarcane bagasse. *Bioresource Technology Reports*. Volume 15, September 2021, 100759. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100759> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21001377>
37. Kuruti, K. et al. (2015). Generation of bioethanol and VFA through anaerobic acidogenic fermentation route with press mud obtained from sugar mill as a feedstock. *Bioresour. Technol.* 192, 646–653.
38. Nimbalkar, P.R. et al. (2017). New Insight into sugarcane industry waste utilization (Press Mud) for cleaner biobutanol production by using *C. acetobutylicum* NRRL B-527. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 183, 1008–1025.
39. Rouf, M. et al. (2013). Techno-economic assessment of biogas production from press mud in Bangladesh. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 48, 51–58.
40. lakshmi, V. et al. (2022). Press mud and bagasse from sugar mill: Cumulative effect of anaerobic co-digestion integrated with pre-treatment on overall performance. *Biomass and Bioenergy*, Volume 166, November 2022, 106625. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106625> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953422002872>
41. Fuess, L.T., Zaiat, M. (2018). Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications. *Process Saf. Environ. Prot.* 115, 27–37.
42. Ling, J. et al. (2014). Lipid production by a mixed culture of oleaginous yeast and microalga from distillery and domestic mixed wastewater. *Bioresour. Technol.* 173, 132–139.
43. Santos, S.C. et al. (2014). Hydrogen production from diluted and raw sugarcane vinasse under thermophilic anaerobic conditions. *Int. J. Hydrogen Energy* 39, 9599–9610.
44. Chatterjee, S.; Venkata, S. (2021). Simultaneous production of green hydrogen and bioethanol from segregated sugarcane bagasse hydrolysate streams with circular biorefinery design. *Chemical Engineering Journal*. Volume 425, 1 December, 130386. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130386>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721019720>
45. De Freitas, R. et al. (2021). Chapter 5 - Sugarcane-based ethanol biorefineries with bioenergy production from bagasse: thermodynamic, economic, and emissions assessments. *Waste Biorefinery. Value Addition through Resource Utilization*. Páginas 125-158 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-2.00005-3>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128218792000053>
46. Katakojwala, R.; Venkata, S. (2022). Multi-product biorefinery with sugarcane bagasse: Process development for nanocellulose, lignin and biohydrogen production and lifecycle analysis. *Chemical Engineering Journal*. Volume 446, Part 4, 15 October 2022, 137233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137233>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589472202722X>
47. Raizen (2022). Informe anual de sostenibilidad 2020/2021. <https://www.raizen.com.br/relatorioanual/2021/es/renovables.html>. Consultado 30/5/2022.