

Proceso de producción de bioetanol de segunda generación (2G) en planta piloto, una oportunidad para mitigar la contaminación ambiental en México

RESUMEN: En la actualidad se enfrenta una problemática ambiental y energética por el uso desmedido de combustibles fósiles y su impacto negativo en el medioambiente, ya que son fuentes no renovables, y su consumo genera contaminantes. El bioetanol es un combustible renovable que ha demostrado reducir las emisiones de CO₂ al ambiente hasta un 90 %, según sea su fuente de producción. La ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México aprobada en el 2015, apoyó propuestas de investigación enfocadas al impulso tecnológico del bioetanol como biocombustible, a través de convocatorias del fondo sectorial SAGARPA-CONACYT. Es dentro de este marco que el grupo de investigación de Biocombustibles y Bioprocesos del Instituto Tecnológico de Veracruz desarrolló un proyecto enfocado a la generación de una tecnología para la producción de bioetanol de segunda generación (2G) a partir de residuos lignocelulósicos. La construcción de la primera planta piloto de bioetanol 2G, única en su tipo con tecnología mexicana, es un avance para trascender dicho proyecto, ya que representa una oportunidad relevante para el impulso tecnológico y educativo en México. En este trabajo se realizó un estudio preliminar sobre la descripción de la producción de bioetanol 2G en la planta piloto del ITVer, permitiendo establecer un proceso mediante el cual se obtiene un bioetanol a una pureza de 96.5 y 99.6%.

PALABRAS CLAVE: Biocombustibles, Impacto ambiental, Planta Piloto, Residuos Lignocelulósicos, Bioetanol.



Colaboración

Javier Gómez Aguilar; Gustavo Martínez Castellanos; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Mianzta; María Guadalupe Aguilar Us-canga, Tecnológico Nacional de México / I.T. de Veracruz-UNIDA

ABSTRACT: We currently face an environmental and energy problem due to the excessive use of fossil fuels which have generated a negative impact on the environment; they are non-renewable sources, and their consumption generates pollutants. An alternative to mitigate this problem is the implementation and use of biofuels. Bioethanol is a renewable fuel that has been shown to reduce CO₂ emissions in the environment to 90%, depending on its source of production. The Law on the Promotion and Development of Bioenergetics in Mexico, approved in 2015, supported research proposals through calls from the SAGARPA-CONACYT sector fund focused on the technological drive to produce bioethanol as a biofuel. Subsequently, the Biofuel and Bioprocess Research Group of the Veracruz Institute of Technology developed a project focused on the development of a technology for second generation (2G) bioethanol production from lignocellulosic waste. In that frame of reference, the first 2G bioethanol pilot plant was built, unique in its use of Mexican technology, representing a great historical opportunity for technological stimulus in this country. In this work a preliminary study of bioethanol 2G production in ITVer pilot plant was carried out, allowing to establish a process by which a bioethanol is obtained at a purity of 96.5 and 99.6%.

KEYWORDS: Biofuels, environment, pilot plant, lignocellulosic waste, bioethanol.

INTRODUCCIÓN

El uso desmedido de combustibles fósiles, ha generado un impacto negativo en el medioambiente, y su consumo genera contaminantes como: el metano y el CO₂. Una alternativa para

mitigar este problema es la implementación y el uso de energías limpias y renovables como lo son los biocombustibles. En la Convención de las Naciones Unidas enfocada al cambio climático, llevada a cabo en París, Francia se discutió sobre la situación actual que vive el planeta acerca del cambio climático [1], el objetivo central de esta reunión fue implementar “el Acuerdo de París”, el cual consiste en consolidar la amenaza global del cambio climático manteniendo un aumento de la temperatura global en este siglo XXI muy por debajo de 1.5 grados centígrados [2]. El Acuerdo de París entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, y 55 países en la Convención que representan en total al menos un 55% del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero estuvieron presentes, entre ellos México, el cual se comprometió que para el 2030 reduciría a la mitad sus emisiones contaminantes, y que para entonces el 43% de la energía utilizada provendría de fuentes renovables [3]. México emite 417 millones de toneladas de dióxido de carbono, de acuerdo con un reporte de la Agencia Internacional de Energía lo que representa el 1.4% de los gases derivados de la quema en la industria de los combustibles fósiles [4]. Por lo que una alternativa para solucionar esta problemática es la implementación de biocombustibles en el sector transporte ya que este es uno de los mayores consumidores de petróleo en el mundo [5]. Los biocombustibles son una fuente de combustible alterna, los países con mucha demanda de gasolina y petróleo enfrentan un problema por lo que han invertido en proyectos de investigación para fuentes alternas y renovables. El bioetanol se puede utilizar como aditivo para oxigenar la gasolina reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE) que es responsable de la contaminación del suelo y del agua subterránea, puede también utilizarse directo como combustible o mezclado con la gasolina a diferentes porciones (E6, E10, E20 y hasta E100) [6]. El proceso de primera generación es el proceso más sencillo y común para las industrias de producción de bioetanol. En México existen solo cinco industrias para el desarrollo de este producto. En la planta piloto del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer) a lo largo de 10 años un grupo de investigadores ha establecido las condiciones óptimas del proceso de bioetanol a partir de diversas materias primas, para su uso como energía de fuentes renovables. Una de las tecnologías más recientes y de alto impacto es la realizada a través del apoyo del fondo sectorial SAGARPA-CONACYT (proyecto # 291143), en donde se logró diseñar y construir la primer planta piloto de bioetanol de segunda generación (2G), única en su tipo hecha con tecnología mexicana, las investigaciones previas dieron lugar a que con el proceso de primera generación extrayendo el jugo del tallo de sorgo dulce o caña de azúcar, ahora también sean aprovechados los azúcares obtenidos del bagazo para producir en un solo proceso integral bioetanol de primera y segunda generación. Para México este tipo de proyectos son una oportunidad única e histórica ya que con ello se puede lograr consolidar el uso de este

biocombustible en las gasolinas en un 5.8-10%, y se podrán reducir las emisiones de CO₂ al medio ambiente, debido a que el bioetanol 2G reduce hasta en un 90% dichas emisiones [7]. Bajo este esquema México podrá lograr cumplir con su compromiso con la agenda del acuerdo de París [4]. La naturaleza misma de esta propuesta está inmersa en su totalidad en este tipo de objetivos y escenarios de compromisos hacia el desarrollo sostenible. El bioetanol ha demostrado ser una alternativa como combustible frente a fuentes fósiles y es usado principalmente como: carburante, ya sea para mezclar o reemplazar el petróleo y sus derivados, específicamente las gasolinas [8]. Sin embargo, en la medida en que el bioetanol provenga de materias primas que no sean cultivos básicos para la alimentación, o de monocultivos, y particularmente que su origen se encuentre en fuentes de residuos agrícolas lignocelulósicos, esto es, bioetanol de segunda generación, se estará en sintonía con compromisos de menor impacto ambiental [9]. Los residuos lignocelulósicos están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales deben ser transformados a hidratos de carbono simples (C6 y C5) para ser convertidos a etanol por la acción de levaduras. Es así como este trabajo incluye un estudio preliminar técnico sobre la producción de bioetanol de segunda generación a nivel planta piloto a partir de caña de azúcar, utilizando los resultados obtenidos de 10 años de investigación del grupo multidisciplinario del ITVer, con el fin de dar una propuesta alterna al uso de los combustibles fósiles y conocer la importancia del uso de los biocombustibles en el área energética y ambiental.

DESARROLLO

Para el desarrollo de este trabajo se tomó en cuenta la estructura actual de la planta piloto de bioetanol 1G + 2G establecida en el Instituto Tecnológico de Veracruz, la cual cuenta con una superficie de construcción de 890 m² y 41 equipos distribuidos para procesos de producción de Bioetanol e investigación que se hacen en la planta. Para evaluar el proceso de producción se tomaron en cuenta estudios previos realizados por diversos estudiantes de maestría y doctorado.

Materia prima: Para llevar a cabo este estudio, primero se evaluaron diversos residuos lignocelulósicos, en base a su composición en celulosa, hemicelulosa y lignina, y se seleccionó el bagazo y el rastrojo de la caña de azúcar como materia prima, ya que este es un residuo lignocelulósico que se genera principalmente en el sector industrial (durante el proceso de producción de azúcar de caña) y agrícola (durante la cosecha de la caña de azúcar). La selección fue hecha por su bajo contenido en lignina y su alto contenido en celulosa y hemicelulosa, así como también por la gran disponibilidad que se tiene en México, y principalmente en que el estado de Veracruz es el principal productor de caña y es donde se llevará a cabo este estudio ya que se tiene considerado establecer las plantas comerciales

en donde se ubique la mayor cantidad de materia prima, para evitar el costo de transporte.

Microorganismos: Para llevar a cabo la fermentación o el proceso de conversión de los azúcares a bioetanol 2G, se usaron microorganismos autóctonos, los cuales fueron aislados y seleccionados en el laboratorio de Bioingeniería del ITVer. Estos microorganismos fueron levaduras: *Saccharomyces cerevisiae* ITV-01 aislada de la melaza de caña de azúcar [10] y *Pichia kudriavzevii* ITV-S42 aislada y seleccionada de sorgo dulce [11].

Enzimas: Para llevar a cabo la hidrólisis enzimática, o conversión de la celulosa y hemicelulosa a azúcares fermentables, se utilizaron enzimas comerciales (Celli Ctec3 y Cellic Htec3, empresa Novozyme) y enzimas obtenidas de hongos autóctonos (*Aspergillus niger* ITV01 y ITV02), los cuales fueron aislados y seleccionados en el laboratorio de Bioingeniería aislado de bagazo de caña de azúcar [12].

Proceso de producción de bioetanol 2G: El proceso de producción de bioetanol 2G a partir de bagazo o rastrojo de caña ha sido el resultado de 10 años de investigación y esfuerzos para lograr la mejora del proceso de producción de etanol, evaluando diferentes estrategias tales como: el uso de diferentes sustratos como fuente de carbono y energía (jugo de caña, mieles intermedias, melazas e hidrolizados de bagazo de caña, jugo y bagazo de sorgo dulce, rastrojo de maíz, y de desechos de papa entre otros), el uso de microorganismos autóctonos (obtenidos desde la etapa de aislamiento y selección de cepas productoras de etanol y enzimas celulolíticas nativas de diferentes fuentes) y la modificación de éstos con el fin de lograr mejoras significativas en el mismo (levaduras y hongos con mayores rendimientos y velocidades de producción). Así también, el uso de los diferentes modos de operación de los fermentadores (cultivos por lote, lote alimentado y continuo) y la optimización del medio de cultivo y condiciones ambientales (temperatura, pH y oxígeno entre otras) [13,10, 11, 14,15,16].

Determinación de sustratos y productos: La concentración de sustrato y productos se realizó mediante el uso de un HPLC bajo las siguientes condiciones: cromatografía líquida de alta resolución (Waters 600, TSP Spectra System, Waters, Milford, MA, EE. UU.) Utilizando una columna Biorad Aminex HPX-87H (Bio-Rad Laboratories, Inc., Hercules, CA, EE. UU.). La temperatura fue de 40°C, ácido sulfúrico de fase móvil 5 mM, velocidad de flujo de 0,4 ml min⁻¹ y se utilizó un detector de refracción de índice (Waters 2414, TSP Refracto Monitor V, Waters).

Distribución de la Planta Piloto: La distribución e instalación de los equipos y tanques con los que cuenta la planta piloto del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer) se muestran en la Figura 1.

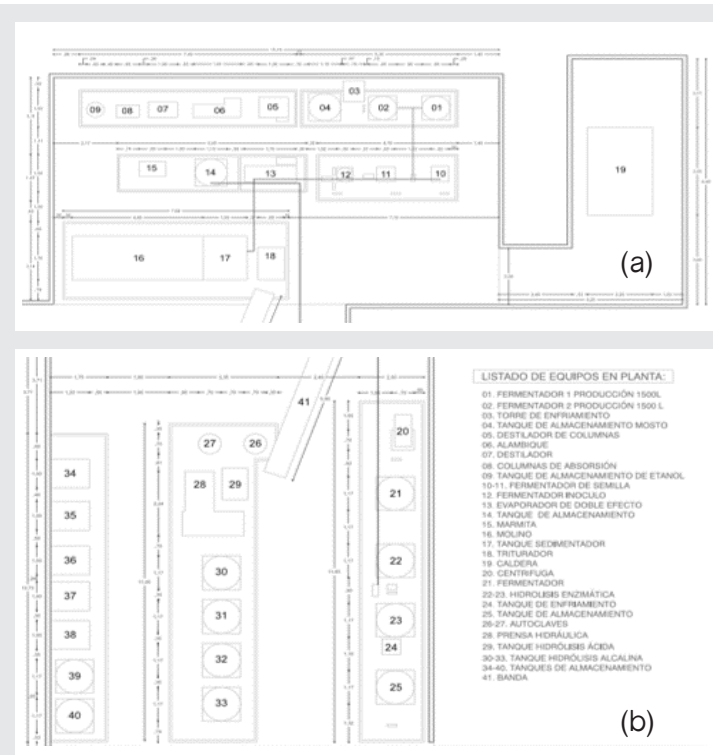


Figura 1. Diagrama de la distribución de la planta piloto 1G (a) y 2G (b), ubicada en el Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz. (Fuente: Elaboración propia)

La planta piloto de ITVer cuenta con 41 equipos los cuales están distribuidos de acuerdo a las etapas del proceso de producción de bioetanol, en esta planta trabajan tanto estudiantes como profesores de posgrado y licenciatura, en las diferentes áreas tales como; Maestría en Ingeniería industrial, Ing. electrónica, Ing. química, Maestría e Ingeniería en bioquímica, entre otras, así como residentes profesionales. En la Figura 3 podemos observar el número de cada equipo y la posición en la que se ubican. Este diagrama se divide en dos partes: 1) El proceso de producción de bioetanol de primera generación, obtenido a partir de azúcares fermentables y otros subproductos, la cual se encuentra en la parte superior que implica la numeración del 1 al 18, la cual consta de las etapas de molienda, evaporación, fermentación, destilación y deshidratación y; 2) el proceso de producción de bioetanol de segunda generación que utiliza residuos lignocelulósicos, que es la sección 19 (donde se encuentra la caldera) hasta la sección 40 que implica las áreas de: banda transportadora que está conectada al molino o picadora del bagazo de caña, para continuar con los tanques de pre-tratamiento ácido o alcalino, hidrólisis enzimática y de ahí se conecta de nuevo con la primera sección que es la planta de bioetanol 1G, con los equipos de evaporación, fermentación y destilación deshidratación los cuales son equipos que se utilizan en ambos procesos.

RESULTADOS

Determinación de la disponibilidad de la materia prima (caña de azúcar y bagazo de caña) en los cinco

primeros estados en México: Se realizó un estudio para conocer la disponibilidad de la materia prima, poder establecer la base para el cálculo del tamaño de plantas que se podrían instalar en México y en los cinco estados mas productores de caña. Los resultados obtenidos muestran que según una publicación del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [17], México tiene una producción de caña de azúcar que supera los 55 millones de toneladas en el 2018, para el año 2019, la producción de caña de azúcar aumentó a 6.25 millones de toneladas. Según la CONADESUCA [18] como principales productores tenemos los estados de: Veracruz y Jalisco que aportan un 50.6% de la producción nacional (Tabla 1):

Tabla 1. Principales estados productores de caña de azúcar en México y la varianza de crecimiento en los últimos años.

Numero	Estado	Volumen (Toneladas)		% bagazo disponible (30%) 2018	Variación (%) 2012-2018
		2012	2018		
1	Veracruz	18,111,886	20,912,561	6,273,768.3	15.46
2	Jalisco	6,254,590	7,215,209	2,164,562.7	15.36
3	San Luis Potosí	2,529,479	4,160,775	1,248,232.5	64.49
4	Oaxaca	3,482,394	3,696,183	1,108,854.9	6.14
5	Tamaulipas	3,571,398	3,100,000	930,000	-13.20
	Restos	16,996,736	16,752,559	5,025,767.7	-1.44
	Total	50,946,483	55,837,287	16,751,186.1	9.60

Fuente: SIAP, 2018; CONADESUCA 2012-2018.

Elaboración propia

En la Tabla 1, podemos observar que la producción de caña de azúcar en México ha ido aumentando a lo largo de 6 años y que para el 2019 se espera llegar a producir 62.5 millones de toneladas de caña de azúcar por lo que se espera un aumento del 11.93 por ciento de la varianza. El consumo nacional de azúcar para el 2016 es de 4.38 millones de toneladas y el país se importa un 0.16 millones de toneladas de azúcar. Por lo que la producción nacional es positiva [17,18,19]. Esto indica que para la producción de bioetanol de segunda generación se puede usar como materia prima el bagazo de caña de azúcar como una opción de biocombustible y fuente renovable. Se ha reportado que una tonelada de caña de azúcar genera entre 280 a 300 Kg de bagazo [20]. Por lo que la fermentación de este material podría incrementar la productividad de etanol en la industrial alcoholera, así como la sostenibilidad del proceso, el bagazo se desecha como residuo agrícola o es quemado para el suministro de energía en las calderas de las fábricas de azúcar y etanol [21].

El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico abundante y de bajo costo que se obtiene como residuo del proceso de extracción del jugo de la caña de azúcar [22]. Este corresponde generalmente al 25% del peso total y contiene entre 60-80% de carbohidratos [21].

Etapas del proceso de producción de Bioetanol 2G en la Planta piloto: A manera general, el proceso de

producción de bioetanol 2G en la planta piloto del ITV se puede visualizar en la Figura 2, este proceso es el resultado de varios años de investigación en donde se puede clasificar en tres etapas principales: 1) proceso de producción de azúcares fermentables a partir de residuos agroindustriales a partir de diversos pre-tratamiento y tratamiento enzimático 2) la transformación de estos azucares a etanol a partir de la acción de las levaduras en el proceso llamado fermentación, 3) la purificación del etanol a 96.5 o 99.6% (v/v).

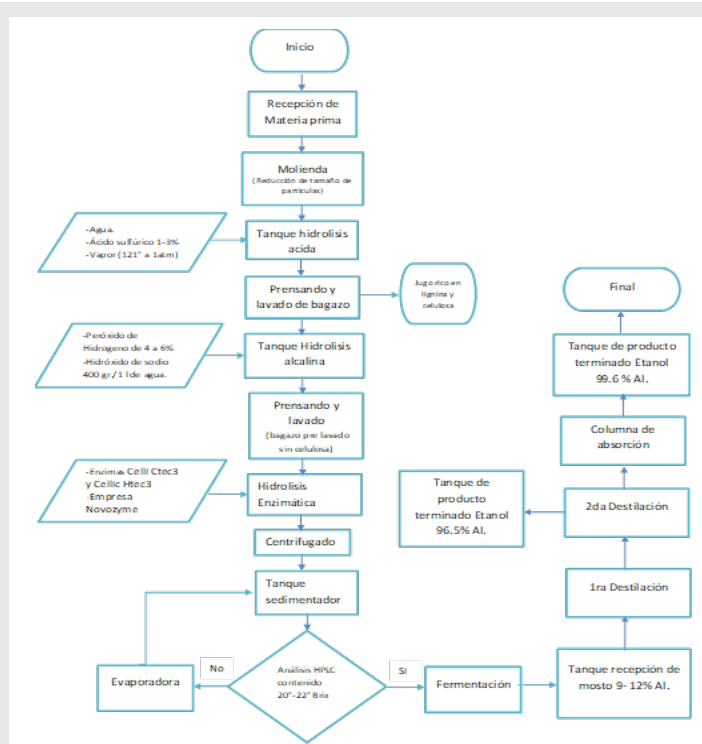


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de segunda generación (2G) para la producción de bioetanol en planta piloto. (Fuente: Elaboración propia)

Todas estas etapas del proceso se han ido mejorando a través del uso de diseños de experimentos de acuerdo a cada una de las variables que intervienen en el proceso de obtención de bioetanol. A continuación, se describirán cada una de las etapas del proceso iniciando desde la recepción de la materia prima y su primer tratamiento (físico) que consiste en la reducción del tamaño de partícula hasta el producto final (etanol al 96.5 o 99.6% v/v):

Molienda: La molienda es una etapa que tiene como finalidad la reducción de partículas del bagazo de caña mediante el uso de un molino de rodillos y cuchillas.

Pre-tratamientos: Las dos etapas críticas que impactan en el costo final de bioetanol son los pre-tratamientos y la hidrólisis enzimática. Por lo cual se han evaluado dos escenarios de proceso utilizando diferentes etapas de pre-tratamientos, para obtener un rendimiento mayor al 85% de conversión del material pre-tratado a glucosa y xilosa. En la Figura 3 se muestran los dos pro-

cesos para la obtención de azúcares fermentables que se han probado para producir bioetanol 2G. El proceso No. 1 inicia con un pre-tratamiento ácido, el cual degrada el polímero de hemicelulosa a monómeros (xilosa y glucosa), seguido de un pre-tratamiento alcalino y finalmente una hidrólisis enzimática utilizando la enzima celulasa (CellicCtec3).

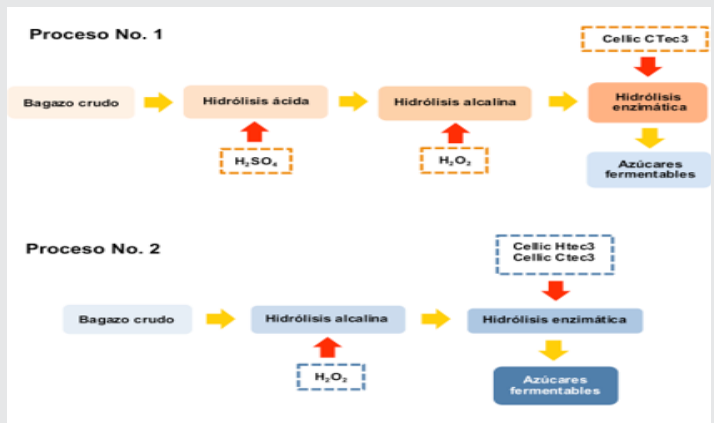


Figura 3. Proceso con pre-tratamiento ácido-alcalino y alcalino directo (Fuente: Moran Aguilar, 2018)

El proceso No. 2, implica una eliminación del pre-tratamiento ácido, pasando directamente al alcalino seguido de una hidrólisis enzimática con las enzimas CellicCtec3 (celulasa) y CellicHtec3 (xilanasas).

Pre-tratamiento ácido o hidrólisis ácida: esta etapa consiste en transformar la hemicelulosa a azúcares para poder realizar una fermentación. A los residuos lignocelulósicos se le aplica una solución de ácido sulfúrico entre 1-5 %, se añade vapor de la caldera a 175°C y 9 bares de presión con una relación sólido líquido de 1:4 a 1:12 kg/L, esta etapa tarda aproximadamente 40-50 minutos [21]. En el proceso de pre-tratamiento se toman muestras para analizar el contenido de glucosa y xilosa, así como se evalúa el contenido de hemicelulosa al final del pre-tratamiento para valorar la eficiencia de remoción de este polisacárido.

Prensado: posterior a la hidrólisis ácida se realiza un prensado para recuperar un licor rico en xilosa y separar el bagazo hidrolizado ácido. A partir del prensado se obtiene un material con un mayor contenido de celulosa y lignina el cual pasa al siguiente pre-tratamiento alcalino.

Pre-tratamiento alcalino o hidrólisis alcalina: La hidrólisis alcalina tiene como finalidad la remoción de la lignina presente en el material lignocelulósico, ya que esta constituye una barrera para que puedan ser aprovechados los polisacáridos de interés como celulosa y hemicelulosa, este proceso ocurre debido a que los grupos hidroxilo generan un hinchamiento en el material lignocelulósico. Este pre-tratamiento consiste en la adición de un compuesto alcalino, y se pueden dividir en

dos grupos: los que utilizan hidróxido de sodio (NaOH), potasio (KOH), y calcio (Ca (OH)²) y los que utilizan hidróxido de amonio (NH₄OH) [21].

Prensado: Posteriormente se realiza de nuevo un prensado, en la que se obtiene una segunda masa sólida con una cantidad pequeña de lignina y una corriente líquida con un gran contenido de lignina soluble. La materia lignocelulósica pasa al siguiente tratamiento que es la hidrólisis enzimática.

Hidrólisis enzimática: La hidrólisis enzimática tiene como finalidad convertir la celulosa en glucosa. Esta reacción es catalizada por las enzimas denominadas celulasas, cuyo propósito es la transformación de la celulosa a azúcares simples como la glucosa. Las celulasas son parte de un complejo enzimático compuesto por diferentes tipos de celulasas como las endocelulasas, exocelulasas y las β-glucosidasas. Las endoglucanasas atacan aleatoriamente el enlace interno O-glicosídico, produciendo cadenas de glucosa de diferentes tamaños. Las exoglucanasas actúan en los extremos de la cadena de celulosa y genera como producto final la β-celobiosa. La β-glucosidasa actúa específicamente en el disacárido β-celobiosa generando el monosacárido de glucosa [23,24]. En esta etapa se han usado diversas enzimas comerciales y enzimas autóctonas obtenidas de microorganismos aislados y seleccionados por el grupo de investigación del ITVer, en esta etapa de hidrólisis enzimática ya se tiene optimizado la concentración de enzima, la relación sólido-líquido y el tiempo de reacción o liberación de los azúcares o conversión de la celulosa.

Centrifugación: Una vez obtenido en la hidrólisis enzimática el mosto con los azúcares fermentables, se procede al proceso de centrifugación para separar compuestos el licor de glucosa y xilosa para pasar a la etapa de fermentación.

Fermentación: En este proceso el licor rico en azúcares fermentables es llevado a los diferentes tanques de fermentación (80L, 450L y 1500L), en donde se llevan a cabo tres etapas, la primera es una activación o adaptación de la levadura el medio conteniendo el hidrolizado enzimático y medio de cultivo sintético (esto se hace en el fermentador de 80 litros), posteriormente todo este mosto pasa a un fermentador de 450 litros en donde se airea para producir la levadura y finalmente se pasa a los tanques de producción (1500L) en donde se lleva a cabo el proceso bajo condiciones anaerobias no estrictas, durante 24 horas y con agitación moderada de 100 rpm.

Destilación: En este proceso el mosto fermentado que contiene entre un 9-12% de alcohol es pasado a través de dos columnas de destilación, en donde en la primera se obtiene un producto con 86% de pureza de etanol, el cual es pasado a la segunda columna rectificadora

para obtener un alcohol con una pureza del 96.5%. Este proceso se lleva a cabo utilizando vapor directo suministrado a través de una caldera de vapor.

Deshidratación: Consiste en concentrar el etanol obtenido en la destilación (96.5%) a través de unas columnas de absorción cargadas con zeolitas naturales, en donde estas tienen la finalidad de atrapar el agua contenido en el etanol para así producir un etanol al 99.6% de pureza, el cual puede ser utilizado como biocombustible directo o como aditivo en las gasolinas.

CONCLUSIONES

El presente estudio podemos concluir que tiene como finalidad el dar a conocer la importancia que tiene el implementar y desarrollar nuevas tecnologías en el país para sustituir aquellas que no son renovables y afectan al país, y la disponibilidad de materia prima que existe en nuestro país. El diseño de la distribución de la planta piloto y equipos que se utilizan para el proceso de obtención de bioetanol de segunda generación en el Instituto Tecnológico de Veracruz podemos concluir que con los resultados obtenidos se podrá implementar estudios a nivel planta piloto (escala del TRL 5-7). Una de las materias primas más importantes en México como lo es la caña de azúcar, y el estado de Veracruz se ubica en el primer productor a nivel nacional, siendo entonces un estado con una gran oportunidad para detonar la industria alcoholera. Es una planta piloto experimental la cual es la base para el paso de la transferencia de la tecnología a nivel comercial, con los estudios que se generen en esta planta estaremos en la posibilidad de competir con otros países en esta tecnología y así poder cumplir con los compromisos ambientales que México tiene en la agenda del tratado de París. Así también es una oportunidad para que la industria pueda crecer en la producción de biocombustibles, ya que México cuenta con mucha materia prima en la cual se pueden enfocar los estudios, procesos y determinar su factibilidad. En el desarrollo de este artículo se puede establecer que el proceso de segunda generación es una opción viable, ya que puede aprovecharse el 100 % de la materia prima alcanzando rendimientos finales del 0.46% (g/g) lo que puede generar etanol de calidad para usarse como combustible para motores de combustión interna o aditivos para las gasolinas. Por otra parte, en el país existe la producción suficiente de bagazo de caña que tiene un gran potencial de producción de miles de millones de litros de etanol, ya que teóricamente por una tonelada de bagazo de caña se pueden producir desde 200 hasta 300 litros de bioetanol a una pureza de 96.5 y 99.6%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo otorgado en la beca al Ing. Javier Gómez Aguilar para la realización de este trabajo que forma parte de su tesis de Maestría en Ingeniería Industrial. La Planta Piloto de Bioetanol de Segunda Generación (2G) del Instituto Tecnológico

de Veracruz fue inaugurada en noviembre del 2018. Su construcción fue financiada por el fondo de Bioenergéticos de la SAGARPA-CONACYT 2017 proyecto N° 291143.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robbins, A. (2016). *How to understand the results of the climate change summit: Conference of Parties 21 (COP21) Paris 2015*.
- [2] UNFCCC (United Nation Climate Change). 2015a. *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015*.
- [3] UNFCCC (United Nation Climate Change). 2015b. *Intended Nationally Determined Contribution México*.
- [4] SEMARNAT. 2015. *Emisión nacional de gases de efecto invernadero*.
- [5] SENER. 2013. *Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027*
- [6] Carrasco, M., & Guevara, E. (2001). *Efectos ambientales del uso del Metil Terc Butil Eter (MTBE) como oxigenante en la formulación de gasolinas*. *Revista INGENIERÍA UC*, 8(1), 1-11.
- [7] Serrano-Ruiz, J. C., & Luque, R. (2011). *Biocombustibles líquidos: procesos y tecnologías*. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 4, pp. 383-389). *Real Sociedad Española de Química*.
- [8] García Fonseca C. y García Ortiz B.G. 2018. *Estudio de mercado del etanol*. pp.1-140
- [9] Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L. & Williams, R. (2009). *Beneficial biofuels—the food, energy, and environment trilemma*. *Science*, 325(5938), 270-271
- [10] Ortiz-Zamora, O., Cortes-García, R., Ramirez-Lepe, M., Gomez-Rodriguez, J. y Aguilar-Uscanga, M.G. 2009. *Isolation and Selection of Ethanol-Resistant and Osmotolerant Yeasts from Regional Agricultural Sources in México*. *J Food Process Eng*. 32(5):775-786.
- [11] Díaz-Nava, L.E. 2014. *Aislamiento y selección de levaduras para la producción de etanol durante la fermentación espontánea de jugo de sorgo dulce*. *Tesis de maestría*. ITVer, Veracruz, México.
- [12] Reyes Rodríguez E. 2015. *Aislamiento y selección de hongos o bacterias productores de celulasas y hemicelulosas a partir de residuos lignocelulósicos para la obtención de azúcar reductores*. *Tesis de maestría en ciencias ingeniería química*. ITO, Veracruz, México.
- [13] Aguilar-Uscanga, M.G., Delia, M.L. y Strehaiano,

P. (2000). Nutritional requirements of *Brettanomyces bruxellensis*: Growth and physiology in batch and chemostat cultures. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 234: 334-361

[14] Castañón-Rodríguez, J. F., Portilla-Arias, J. A., Aguilar-Uscanga, B. R., AguilarUscanga, M. G. (2015). Effects of oxygen and nutrients on xylitol and ethanol production in sugar bagasse hydrolyzates. *Food Science Biotechnology*. 24 (4): 1381-1389

[15] Yñiguez-Balderas, B. S., Ortiz-Muñiz, B., Gómez-Rodríguez, J., Gutierrez-Rivera, B., & Aguilar-Uscanga, M. G. (2016). Ethanol production by *Pichia stipitis* immobilized on sugarcane bagasse. *Bioethanol*, 2(1).

[16] Partida-Sedas G. (2017). Production of ethanol from the juice and bagasse of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genetically improved. Doctor of Food Sciences. Technological Institute of Veracruz, Veracruz, Ver.

[17] SIAP-SADER. 2019. Expectativas agroalimentarias.

[18] CONADESUCA, 2018. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar.

[19] SIAP-GOB. 2018. La producción de caña de azúcar supera los 55 millones de toneladas en 2018.

[20] Sun, J.X., Sun, X.F., Zhao, H., Sun, R.C. (2004). Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*. 84: 331-339

[21] Moran Aguilar M.G. 2018. Estudio de la sacarificación del bagazo de caña de azúcar y *Agave angustifolia* para la producción de azúcares fermentables. Tesis de maestría en ciencias en ingeniería bioquímica. ITO, Veracruz, México.

[22] Takahashi, C.M., Lima, K.G.C., Takahashi, D.F. y Alterthum, F. (2000). Fermentation of sugar cane bagasse hemicellulosic hydrolysate and sugar mixtures to ethanol by recombinant *Escherichia coli* KO11. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 16, 829-834.

[23] Bayer, E.A., Morag, F., y Lamed, R. (1994). The cellulosome a treasure-trove for biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 12 (9): 379-386

[24] Singh, A. (1999). Engineering enzyme properties. *Indian Journal of Microbiology*. 39 (2): 65-77.