

Instrumentación de un Destilador para la trata de residuos de bagazo de mezcal para generar biocombustibles como manera de combatir la contaminación de suelos.

Omar Fabián Rivera Cenicerros
Universidad Politécnica de Durango
omar.rivera@unipolidgo.edu.mx
Juan Manuel Hidalgo Martínez
Universidad Politécnica de Durango
juan.hidalgo@unipolidgo.edu.mx
Luis Alberto Ordaz Díaz
Universidad Politécnica de Durango
luis.ordaz@unipolidgo.edu.mx

RESUMEN

Con la aceptación del mezcal por parte de los consumidores de bebidas con alcohol y la difusión del mismo, se ha incrementado su producción trayendo consigo el incremento de subproductos de la destilación como vinaza y bagazo que contienen altas cargas de sólidos disueltos y materia orgánica. Aproximadamente el 80% de las vinazas son descargadas directamente en los cuerpos de agua, suelos o al sistema de alcantarillado sin recibir el tratamiento adecuado para su disposición.

Por otra parte, la demanda de combustibles automotrices, la inminente reducción de las reservas de combustibles fósiles y el grave impacto ambiental producido por su uso, han derivado en el desarrollo de tecnologías para obtener bio-combustibles que en su mayoría proviene de productos de consumo humano como el maíz y la caña. Como beneficio, estos biocombustibles presentan un elevado octanaje y una reducida emisión de gases de efecto invernadero.

Considerando lo anterior este proyecto propone resolver estas problemáticas haciendo uso de los residuos del mezcal como materia prima, buscando una alternativa para generar biocombustible, sin emplear alimentos como materia prima, proponiendo el uso de destiladores y fermentadores monitoreados y controlados mediante un sistema de instrumentación electrónica, ya que se reportan estudios sobre la producción de bioetanol por distintas técnicas, donde todos concuerdan considerar una instrumentación adecuada para optimizar la producción.

Palabras clave: Mezcal, biocombustibles, Bioetanol, residuos, vinaza, bagazo instrumentación.

ABSTRACT

With the acceptance of mezcal by consumers of alcoholic beverages and its diffusion, its production has increased, bringing with it an increase in distillation byproducts such as vinasse and bagasse that contain high loads of dissolved solids and organic matter. Approximately 80% of vinasses are discharged directly into bodies of water, soils or the sewer system without receiving adequate treatment for disposal.

On the other hand, the demand for motor fuels, the imminent reduction of fossil fuel reserves and the serious environmental impact caused by their use, have led to the development of technologies to obtain biofuels that mostly come from human consumer products such as corn and sugar cane. As a benefit, these biofuels have a high octane rating and a reduced emission of greenhouse gases.

Considering the above, this project proposes to solve these problems by using mezcal waste as raw material, seeking an alternative to generate biofuel, without using food as raw material, proposing the use of distillers and fermenters monitored and controlled by an electronic instrumentation system, since studies report the production of bioethanol by various techniques, where all agree to consider adequate instrumentation to optimize production

Keywords: Mezcal, Biofuels, Bio-ethanol, waste, vinasse, bagasse, instrumentation.

INTRODUCCIÓN

El bioetanol es un combustible renovable fabricado a partir de materias primas vegetales como el maíz, la caña de azúcar y los residuos de cultivos. Se produce a través de un proceso de fermentación en el que las enzimas y las levaduras convierten el almidón y la celulosa de las materias primas en etanol. El etanol bio se mezcla con gasolina para crear un combustible híbrido conocido como E85 que se puede usar en muchos vehículos diseñados para funcionar con combustibles mezclados con etanol.

El bioetanol es atractivo porque es una fuente de energía renovable que produce menos emisiones que la gasolina pura. Ayuda a reducir la dependencia de los combustibles

fósiles no renovables y proporciona oportunidades a los agricultores. Sin embargo, también se han planteado preocupaciones sobre el impacto ambiental del bioetanol, incluidos los cambios en el uso de la tierra y las emisiones de carbono relacionadas con el cultivo de materias primas, los insumos requeridos y el proceso de producción. También se necesita más investigación para aumentar los rendimientos de las materias primas y hacer que la conversión del bioetanol sea más eficiente, contribuyendo en mejoras en la sostenibilidad y la eficiencia de la producción, esperando que el bioetanol juegue un papel cada vez más importante en el suministro de energía y la seguridad energética

CONTENIDO, MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente proyecto se abordó como objetivo la obtención de bioetanol a partir del material lignocelulósico presente en el bagazo de *Agave Durangensis* a través de un proceso de hidrólisis enzimática donde se pueda obtener un hidrolizado para ser llevado a una posterior etapa de fermentación y finalmente la obtención de bioetanol.

Lo anterior se justificará por la razón del hecho de tratar de resolver una problemática del Estado con un paquete tecnológico que pueda ser replicado a nivel Nacional. Aportando ayuda a nivel económico para aquellos que se dediquen a la trata de los residuos del Mezcal, y aquellos que usan vehículos automotores al poder reducir costos en gasto de combustible y protegiendo su motor con un aditivo de biocombustible, como para protección del Medio Ambiente, ya que la bibliografía muestra que el uso de bioetanol como aditivo de gasolina en vehículos a motor de gasolina puede ofrecer varios beneficios para el consumidor y el medio ambiente. No obstante, para sustentar la justificación del proyecto se debe adentrar primeramente en los antecedentes de la producción de la industria mezcalera que proyectarán la problemática presente en la industria y permitirán visualizar el alcance de la solución planteada para la obtención de un producto con valor agregado a partir de materia prima considerada como desecho. La producción de mezcal, aguardiente mexicano, ha aumentado considerablemente para satisfacer la demanda mundial. Este crecimiento ha acarreado problemas medioambientales, entre ellos un tratamiento inadecuado de los residuos.

En el estado de Durango, la cadena productiva del mezcal se encuentra en un nivel bajo de desarrollo tecnológico ya que se pretende que la producción sea lo más artesanal posible, pero representando una fuente muy importante de ingresos económicos y en ocasiones la única (Barraza *et al.*, 2014).

Sin embargo, la producción de bebidas alcohólicas a partir del maguey ha tenido problemas desde sus inicios con el uso de subproductos al generar vinaza y bagazo. El bagazo se genera después de la extracción de las mieles (cocción y molienda) y estos residuos contienen un alto contenido de materia orgánica, por lo que es necesario el tratamiento de estos antes de ser vertidos, sumándose al problema que mensualmente se estima que se pueden alcanzar más de 100 toneladas mensuales de este subproducto que a menudo se retiran de las instalaciones de producción y se vierten en los suelos y las fuentes de aguas subterráneas cercanas (García & Peralta, 2022).

Este vertido de residuos de la industria del mezcal al medio ambiente puede contaminar los suelos y las aguas subterráneas como se ha mencionado, con sustancias nocivas como pesticidas, metales pesados y otros contaminantes químicos utilizados en la producción. También pueden agotar los nutrientes del suelo, provocar un crecimiento excesivo de hongos y patógenos y hacer que la materia orgánica en descomposición libere metano, un potente gas de efecto invernadero. Aunque los residuos del agave pueden utilizarse como fertilizante o biocombustible como el Bioetanol, cuando se tratan y reciclan adecuadamente, la forma más habitual de deshacerse de ellos es el vertido, lo que crea un grave problema para las comunidades locales y el medio ambiente.

Para solucionar este problema, las fábricas de mezcal deben establecer y aplicar programas de gestión de residuos sólidos para reciclar y reutilizar los residuos, así como formar a los trabajadores en prácticas sostenibles.

Y es precisamente lo que atañe a este proyecto, la generación de biocombustibles como el Metano y el Bioetanol para poder llevar a cabo estas prácticas sostenibles donde se aproveche al máximo la producción considerando los residuos que una vez tratados podrían utilizarse para otros fines provechosos (Estrada Maya, 2022).

Considerando que en la actualidad, el desarrollo científico y tecnológico para la producción de biocombustibles alternativos se ha convertido en una prioridad en un contexto nacional con aumentos en el costo de combustibles fósiles y la necesidad de energías sustentables para beneficio del medio ambiente. Por el contrario, el uso de etanol como fuente de energía se ha convertido en un tema amplio de investigación mundial, y su producción ha aumentado notablemente en los últimos años (Arellano Perales, 2015).

Por otro lado, entre los cultivos utilizados habitualmente para la producción de biocombustibles se encuentran el maíz, la caña de azúcar, la papa y la soya, que proporcionan

una fracción considerable de la energía obtenida a partir de fuentes renovables. Sin embargo, para producir estos cultivos se utilizan tierras fértiles, lo que plantea un grave problema, ya que la producción de estos cultivos para consumo humano puede disminuir peligrosamente, generando escasez de alimentos.

Al utilizar el bagazo obtenido como residuos de la industria mezcalera, se obtiene una materia prima para generar biocombustible dentro de la industria del mezcal, y de esta forma los productores podrían crear otra actividad que genere ingresos considerables para el sustento de las comunidades y sobre todo no estarían utilizando cultivos para consumo humano como fuente de materia prima para la generación de biocombustibles como el bioetanol. Debido a la naturaleza del proceso donde están en contacto permanente con los productos de fermentación, lo que significa que permanecerán impregnados de alcoholes que pueden aumentar la eficiencia al ser utilizados como biocombustible.

Asimismo, los estudios muestran la importancia de mantener los niveles de temperatura y monitorear los gases producidos durante la evaporación a diferentes temperaturas, manteniendo los niveles adecuados del proceso para producir únicamente Etanol ya que el bagazo aún permanece impregnado de compuestos volátiles como Metanol, Acetato de Etilo, n-Propanol, etc. Se espera obtener alcohol etanol puro para su uso como biocombustible. El etanol en sí tiene un octanaje de 113 en comparación con la gasolina que tiene un octanaje de 93 (Premium) y a diferencia de la gasolina, su composición química ya incluye oxígeno, lo que ayuda a tener una mejor combustión. El etanol o bioetanol se utiliza a menudo como oxigenante de la gasolina, lo que reduce las emisiones de hidrocarburos sin quemar y de monóxido de carbono y de igual manera en la mayoría de los casos se mezcla con la gasolina del tanque como un aditivo.

Para convertir el bagazo de agave en etanol se pueden seguir los siguientes pasos (Abascal Fernández, 2017):

- Hidrólisis: Las enzimas celulasa y hemicelulasa se utilizan para descomponer la celulosa y la hemicelulosa del bagazo de agave y formar una solución azucarada. Estas enzimas catalizan la ruptura de los enlaces que unen moléculas de azúcar más grandes para liberar unidades de azúcar individuales.
- Fermentación: Las levaduras productoras de etanol, como *Saccharomyces cerevisiae*, se añaden a la solución azucarada. Las levaduras consumen los azúcares y los convierten en etanol y dióxido de carbono.

- Destilación: El líquido fermentado se hierve y se recoge el vapor que se condensa. El condensado será en su mayor parte etanol y agua. La destilación se repite para aumentar la concentración de etanol.
- Secado: Se utiliza un agente desecante como la zeolita para absorber el agua del etanol y producir etanol muy concentrado.

Metodología y Proceso

A continuación se describen los materiales y métodos empleados para llevar a cabo el proceso de obtención de bioetanol empleando bagazo como materia prima, tomando en consideración los pasos recomendados por Abascal Fernández para la obtención del producto final.

Para dar inicio se realizó la caracterización de la materia prima y posteriormente se establecieron cinco fases: la primera fase concierne a la obtención de un residuo agroindustrial de tipo lignocelulósico, en este caso se recolectó una muestra representativa de bagazo de *Agave Durangensis*, procedente del municipio de Nombre de dios del Estado de Durango, en la segunda fase fue la caracterización fisicoquímica de dicho material, es decir la medición de los principales parámetros en la materia prima los cuales son de importancia para la fermentación del bagazo (humedad y cenizas). La tercera fase fue la aplicación de unos varios tratamientos de tipo físico (trituration, molienda, secado y tamizado) al bagazo de Agave, cuya finalidad fue obtener diferentes tamaños de partícula y analizar su efecto en la fermentación. En la cuarta fase se realizó la hidrólisis enzimática mediante el uso del Hongo *Trichoderma* con la finalidad de medir azúcares reductores y obtener una fuente de celulosa para ser fermentada. Y posteriormente la obtención del bioetanol como aditivo.

Obtención de la materia prima

El Bagazo de *Agave Durangensis*, es una especie de importancia económica que se distribuye particularmente en los municipios de Durango, El Mezquital, Nombre de Dios y SÚchil, en el estado de Durango, la materia prima fue colectada de una vinata ubicada en el municipio de Nombre de Dios (Figura 1). En esta vinata se realiza la producción de mezcal utilizando la técnica tradicional para su elaboración, donde se obtiene bagazo como residuo el cual es acumulado después del lote de producción de una “quema”.

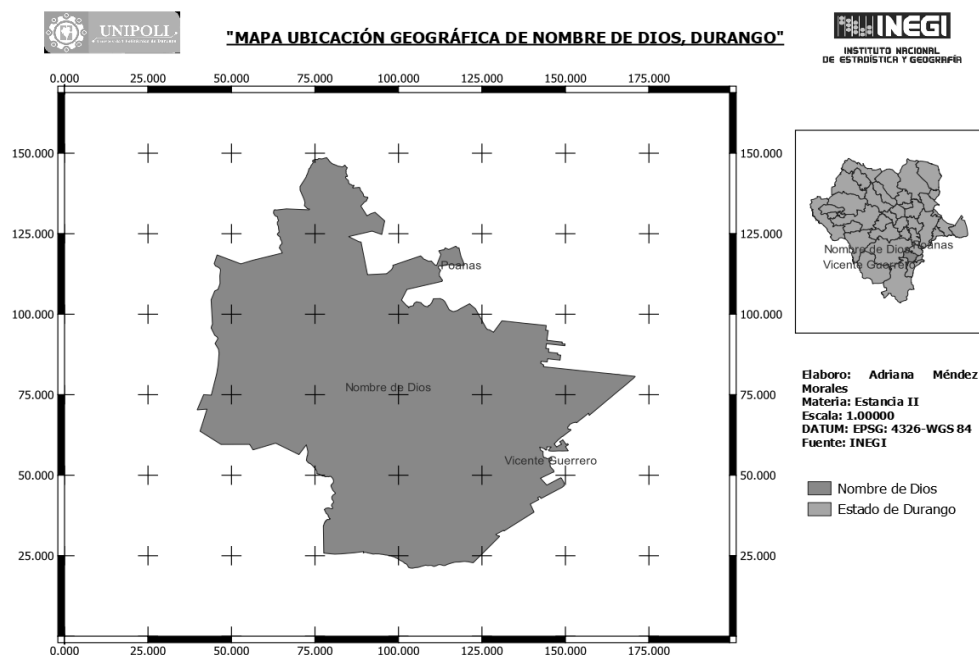


Figura 1. Ubicación geográfica de Nombre de Dios, Dgo.

Caracterización de la materia prima

El residuo de bagazo como materia prima(Figura 2) fue transportado hasta los laboratorios de la Universidad Politécnica de Durango.



Figura 2. Bagazo recolectado como materia prima.

Se determinaron las siguientes características bromatológicas del bagazo de acuerdo a las referencias bibliográficas: Humedad, materia orgánica, ceniza, ph y proteína cruda descritas por Tejada (1983), fibra cruda, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) según Van Soest (1987) y lignina ácido detergente. Posteriormente el bagazo es tratado en molienda y tamizado para obtener los granos molidos con diferentes grados para facilitar el proceso de hidrólisis con las partículas.

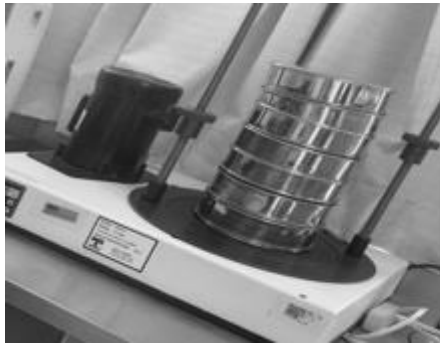
Durante el proyecto se busca obtener bioetanol mediante una hidrólisis enzimática debido a la reducción del impacto ambiental al emplear enzimas para llevar a cabo la hidrólisis, sin embargo, también se realizó una hidrólisis ácida para tener un punto de comparación entre los resultados obtenidos con uno u otro proceso.

Etapas de tratamiento del bagazo

Al bagazo de *Agave Durangensis* se le dio un tratamiento de tipo físico el cual consistió en moler el material lignocelulósico a un tamaño de partícula específico, es decir se buscó disminuir el área superficial del bagazo con la intención de generar mayor disponibilidad a la celulosa por parte de las enzimas celulolíticas de las levaduras. Por lo que se obtuvo el bagazo en base seca y se molió hasta obtener un polvo fino en un procesador de alimentos.

Tratamiento físico

El primer pre-tratamiento físico del bagazo de *Agave durangensis* fue realizado mediante este puesto en sequedad total, pasado a triturar en un molino para después ser tamizado por medio de un equipo de tamizado de la marca TYLER MOD. RX812 (Figura 3) en tamiz con malla #40 con tamaño de poro de 0.4191 mm como se muestra en la figura 10 hasta obtener un polvo fino. Posteriormente se pesó la cantidad obtenida de este pretratamiento el cual se pasó a guardar en una bolsa de celofán a temperatura ambiente en un lugar seco. Tal y como se realizó la primer molienda, se continuo aumentando el número de tamiz para llevar a cabo el tratamiento físico mediante el mismo procedimiento que el primer tratamiento solo puesto a ser tamizado a través de un tamiz con malla #100 (Figura 4) con tamaño de poro de 0.149860 mm donde se obtuvo gabazo fino el cual se guardó en un vaso desechable cubierto a temperatura ambiente.



a) b)
Figura 3. a) Equipo de Tamizado. b) Malla de tamizado No. 40



Figura 4. Tamiz de malla No. 100.

Consecuentemente se molió y puesto a secar a una temperatura de 90 °C para después ser tamizado a través de un tamiz en malla #60 como se muestra en la figura 5 con abertura de 0.24892 mm llegando a obtener una determinada cantidad de bagazo fino el cual se pasó a almacenar en distintos tamaños de muestra.



Figura 5. Tamiz y muestras de bagazo cernido con malla No. 60 y 100.

Lo anterior con la finalidad de determinar la influencia del tamaño de la molienda en la producción de Bioetanol.

Tratamiento físico-químico

El ultimo tratamiento se realizó mediante el método hidrótermico de agua caliente (MHAC) realizado en el laboratorio químico con ayuda de un matraz de 500 ml donde se pasó a agregar 200 ml de H₂O, 10 g de bagazo en sequedad total y tamizado a través de un tamiz en malla #80 (figura 13) con abertura de 0.17780 mm y esto puesto a calentar a una temperatura de 80°C durante 1 hora.

Fase de Hidrolisis Ácida

La hidrólisis ácida es un proceso en el que un ácido prótico se utiliza para catalizar la escisión de un enlace químico a través de una reacción de sustitución nucleófila, con la adición de agua. A continuación se presentan los puntos de cada experimento.

- Primera Hidrolisis (Solución Cloro 6%, por 12 hrs) (2 g de bagazo)
- Segunda Hidrolisis (Ácido Sulfúrico H₂SO₄ concentrado a 75% por 15 min)
- Solución H₂SO₄, al 70%, 2 g de bagazo a temperaturas de 30°C, 50°C Y 70°C
- por 10, 20, 40, 60 y 90 minutos.
- Solución de H₂SO₄, al 70%, 2 g de bagazo a temperatura de 80°C por 1 hora.

Fase de Hidrolisis Enzimática

Se entiende por hidrólisis enzimática la hidrólisis que se produce mediante un grupo de enzimas llamadas hidrolasas. Estas enzimas ejercen un efecto catalítico hidrolizante:

- Hongo Trichoderma
- En solución ph=°5, T=37°C
- Tubosfalcon 0.2 (2g de bagazo) y 1ml
- Baño maría 37°C
- Levadura Sacharomyces Cerevisies

Caracterización de la Biomasa

Las características químicas de importancia para el bagazo se relacionan con el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina presente el material lignocelulósico.

Se realizaron diversos procesos para determinar sus características con otros parámetros fisicoquímicos con la finalidad de obtener una caracterización completa del bagazo: porcentaje de humedad, pH, porcentaje de cenizas, fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD), lignina ácido detergente (LAD) y posteriormente el tratamiento, ver figura 6a, 6b y 6c.



a)



b)

c)

Figura 6. a) Secado del bagazo, b) Extracción de la vinaza del bagazo húmedo, c) Muestra de bagazo seco.

Destilación

Se empezó a trabajar con la biomasa obtenida en las etapas anteriores, pasándola primeramente al destilador de 20 litros para empezar a obtener el destilado del bagazo del *agave Durangensis* a diferentes grados de alcohol manteniendo los niveles de temperatura tanto de calentamiento como de enfriamiento para garantizar solamente la producción de bioetanol por medio de destilación extractiva aproximadamente a los 78.6 grados Celsius y tener un enfriamiento adecuado por medio de flujo de agua fría en la etapa de condensación.

Se optó por trabajar con el destilador de 20 litros ya que la materia prima obtenida después de la limpieza y el tamizado, esta se redujo considerablemente de volumen. Para poder separar el alcohol etílico (etanol) por evaporación como consecuencia de la aplicación de calor, y a consecuencia de la aplicación de calor, se le aplica y monitorea una temperatura de ebullición es de 78.°C, para que se evapore más rápido que el resto de los componentes de la mezcla líquida del bagazo, para luego condensarlo a través del enfriamiento del vapor de alcohol etílico, haciendo circular agua fría a través del tubo de enfriamiento mediante una bomba de agua. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas inestabilidades, o sea separar los materiales inestables de los estables. Para obtener los mejores resultados se destiló varias veces los distintos alcoholes obtenidos. Cada destilación tuvo diferentes grados de alcohol, como a continuación se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Grados de Alcohol obtenidos en las distintas vinazas.

Primer Destilación	Segunda Destilación	Tercer Destilación
22.3 °	48.2 °	71.3 °

Cabe mencionar que para poder medir los grados de alcohol se usó un densímetro, el cual se sumerge en la solución destilada dentro de una columna de 100ml, donde previamente se tomó la temperatura para poder determinar con exactitud el grado de alcohol, recurriendo a Tabla de Corrección de la Temperatura del alcohol propia del instrumento.

En la figura 7 se muestra la destilación del bagazo posteriormente a su tratamiento enzimático y ácido, en la figura 8 se observan las muestras obtenidas después de la destilación, de acuerdo a la tabla de menor a mayor grado de alcohol, donde incluso a simple vista se puede observar la diferencia del color entre la primera y tercera destilación, siendo más puro el Etanol obtenido en la tercera destilación con un grado de alcohol de 71.3°



Figura 7. Destilación del bagazo preparado.



Figura 8. Muestras de los 3 destilados obtenidos.

La figura 9 muestra cómo se determinó el grado de alcohol de cada resultado mediante un densímetro, tal y como se escribió anteriormente.

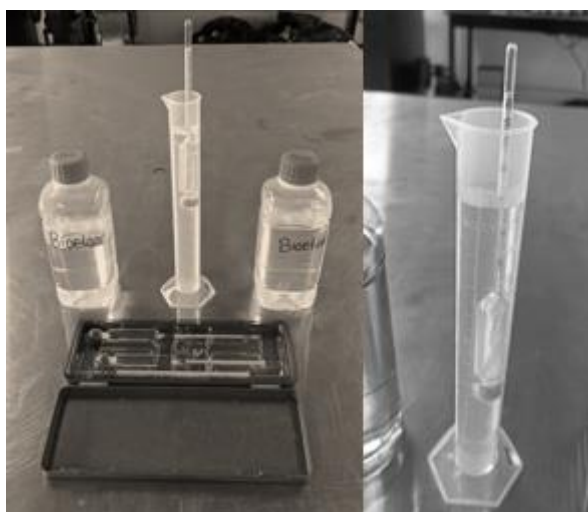


Figura 9. Medición de grados de alcohol por medio de un densímetro y termómetro.

Instrumentación

La instrumentación inicial del proyecto consiste en medir la temperatura del destilador y la temperatura del serpentín de enfriamiento, al monitorear estas variables se puede controlar la parrilla de calefacción por medio de una etapa de control a través de TRIAC, en un inicio se pensó en un controlador PID para mantener la temperatura regulada de una manera estable, sin embargo al realizar las pruebas se reemplazó el controlador ya que la temperatura varía lentamente de acuerdo a la siguiente aproximación con el destilador lleno a 20 litros de biomasa.

La razón de cambio de la temperatura en un destilador de 20 litros lleno de vinaza y bagazo molido, usando una parrilla eléctrica de 1000 watts a su máxima potencia, y considerando que la temperatura inicial del agua es de aproximadamente 23 grados y se desea alcanzar una temperatura máxima de 80 grados Celsius, dependerá de varios factores como la eficiencia del sistema de calentamiento y la temperatura ambiente, se puede utilizar la ley de calentamiento de Joule para calcular la tasa de cambio de la temperatura. Asumiendo que la eficiencia del sistema de calentamiento es del 100%, la tasa de cambio de la temperatura se calculó y se obtuvo que la temperatura aumentará a una tasa constante de 0.0239 grados Celsius por segundo hasta alcanzar la temperatura deseada de 80 grados Celsius. Debido a esta tasa de cambio tan pequeña, se optó por llevar a cabo un monitoreo de temperatura complementado con un simple control ON/OFF conmutado por una configuración muy conocida por medio de un optoacoplador y un TRIAC BTA20 controlado por una señal proveniente de la interfaz de monitoreo y control.

Para llevar a cabo la etapa electrónica para la implementación de la instrumentación y control del sistema se determinó que se debería usar una tarjeta de desarrollo ESP32 (figura 10a), debido a que esta tarjeta de desarrollo ofrece varias ventajas para el desarrollo de tarjetas de instrumentación y control en sistemas embebidos. A continuación, se mencionan algunas de estas ventajas:

- **Conectividad:** La tarjeta de desarrollo ESP32 cuenta con una amplia variedad de opciones de conectividad, como Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet, y protocolos estándar de comunicación como I2C, SPI, y UART.

La conectividad de la tarjeta permite la integración con otros dispositivos y sistemas, para este proyecto contar con comunicación UART y Wi-Fi es de gran ventaja, ya que permite el monitoreo remoto a través de una Red LAN o incluso internet.

Todo lo anterior es especialmente útil para proyectos de instrumentación y control en donde se pueden pensar en mejoras y escalamiento del proyecto a futuro y agregar telemonitoreo de sensores para determinar los distintos tipos de gases que produce el proceso.

Para la medición de temperatura dentro del destilador se usó una sonda termopar de acero inoxidable que soporta hasta 800°C y aislamiento térmico en el conductor (figura 10b). La temperatura se puede monitorear a través de la computadora por medio de la comunicación UART o bien, cuenta con una pantalla LCD que muestra las mediciones en grados Celcius, y Kelvin.

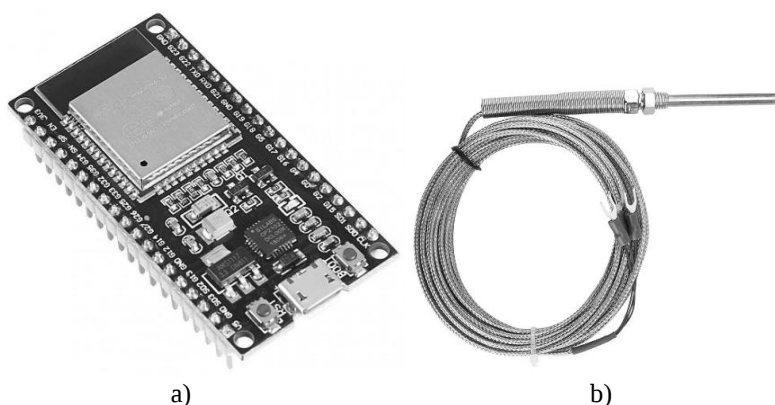


Figura 10. a) Tarjeta de desarrollo ESP32, b) Sensor termopar de acero inoxidable.

RESULTADOS

Se logró la caracterización, procesado y obtención de una cantidad de biomasa capaz de producir biocombustible a partir de residuos de la industria mezcalera, a diferencia de la materia prima que se emplea actualmente para generar biocombustibles, como lo es el maíz y la caña de azúcar que son alimentos y por lo cual es una materia prima fundamental para la alimentación, con este trabajo se está presentando una propuesta para no emplear alimentos, si no, residuos de una industria altamente rentable que deja muchos desechos y contaminantes en suelos y mantos friáticos los cuales no están siendo tratados por los productores de mezcal y simplemente se desechan.

Se ha obtenido Bioetanol de 71° y de 82° de alcohol, sin embargo, se busca producir un bioetanol al 99° a partir del bagazo del mezcal sin aumentar considerablemente los costos, tiempo de preparación y rentabilidad para emplear este combustible ecológico como parte de la logística de la producción y distribución de los diferentes tipos de Mezcal, mediante un sistema de destilado económico con cierta autonomía y poco intervención de mano de obra, que permita generar el biocombustible de manera sencilla para los productores mezcaleros. Con el tratamiento adecuado de la materia prima (bagazo) se espera obtener las mejores condiciones para la obtención del bioetanol y de esta manera llevar a cabo telemetría y telecontrol de gran parte del proceso mediante un sistema embebido. Esto con la finalidad de permitir a los productores operar este proceso con un reducido uso de mano de obra para que su principal prioridad siga siendo la producción de mezcal y esta actividad no se vea descuidada en lo más mínimo, y todo con solo una pequeña inversión.

A continuación se muestran algunas imágenes de los resultados obtenidos



Figura 12. Destilador con monitoreo electrónico y parrilla con control ON/OFF



Figura 13. Bagazo, Destiladores y Densímetro de Alcohol

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La temperatura adecuada de calentamiento en un destilador para obtener etanol a partir de bagazo de agave puede variar dependiendo del proceso de destilación utilizado y las condiciones específicas de la operación. Sin embargo, generalmente se recomienda que la temperatura de calentamiento se mantenga en el rango de 78-82 grados Celsius para producir etanol a partir de bagazo de agave. Además, es importante señalar que el proceso de destilación para obtener etanol a partir de bagazo de agave generalmente se lleva a cabo en dos etapas: la primera etapa, conocida como la fermentación, en la que se convierte el azúcar del bagazo de agave en alcohol, y la segunda etapa, la destilación, en la que se separa el alcohol del agua y otros componentes. Se ha generado Bioetanol a partir de desechos de la industria mezcalera y no del uso de alimentos como materia prima a manera que sea venido haciendo desde hace tiempo y hasta la actualidad para la producción de biocombustible. Sin embargo aún requiere mejorar el proceso en la etapa de destilación para producir un alcohol más puro, así como el secado para eliminar todo rastro de agua, aunque esto llevara a la reducción de la cantidad del destilado. A la salida del destilado se requiere que los grados del bioetanol sean del 99 para poder ser considerado como biocombustible. Por lo tanto el etanol obtenido por el momento se aconseja solo usar el producto como material de curación. Se recomienda mezclar vinaza al bagazo para mejorar la producción de etanol, ya que como se ha mencionado, los azúcares ayudarán a mejorar el proceso enzimático durante la fermentación.

Por otra parte, se puede llegar a concluir que la generación de etanol a partir del bagazo de agave, que es un subproducto de desecho de la industria del mezcal, puede ofrecer varios beneficios, como los siguientes:

- **Uso de recursos renovables:** El bagazo de agave es una materia prima renovable que puede utilizarse como fuente de energía para producir etanol. Esto puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.
- **Reducción de residuos:** La generación de etanol a partir del bagazo de agave puede reducir la cantidad de residuos producidos por la industria del mezcal y el tequila. Esto puede ayudar a minimizar el impacto ambiental y mejorar la gestión de residuos.
- **Mejora de la rentabilidad:** La generación de etanol a partir del bagazo de agave puede generar una fuente adicional de ingresos para la industria del mezcal y el tequila, al proporcionar un valor agregado al subproducto de desecho.
- **Contribución a la economía local:** La producción de etanol a partir del bagazo de agave puede fomentar la creación de empleos y el desarrollo económico en las regiones productoras de mezcal y tequila.
- **Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero:** La producción de etanol a partir del bagazo de agave puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles. Esto puede ayudar a mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire.

En resumen, la generación de etanol a partir del bagazo de agave puede ofrecer beneficios ambientales, económicos y sociales, al utilizar un recurso renovable y reducir la cantidad de residuos producidos por la industria del mezcal, que incluso una vez destilado el etanol, los subproductos o los residuos del proceso se pudiesen emplear como fertilizante de cultivos, sin embargo validar su efectividad no atañe a este trabajo y solo se hace mención de su posible aplicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abascal Fernández, R. (2017, septiembre). Estudio de la obtención de bioetanol a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica, matriz de reacciones y optimización. Tesis Archivo PDF. Recuperado 7 de septiembre de 2022, de <https://bit.ly/3KbAUvi>
2. Aburto-Medina, A., Pérez-Camargo, M., & Miranda, C. R. (2019). Producción de bioetanol a partir de bagazo de agave utilizando un proceso de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(2), 455-466.
3. Aguilar-Uscanga, M., Ramírez, J., Contreras, D., & Vázquez, J. (2018). Bioetanol a partir de bagazo de agave: Optimización de la hidrólisis enzimática combinada con cinética de fermentación alcohólica. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(3), 535-544.
4. Almaraz AN, Hernández VV, Torres MI, Delgado AA, Orea LG, Cifuentes DA, Ávila RJA, Herrera CJ, Uribe SN., Muñiz MR, Naranjo JN. (2007). Agave duranguensis. Primera edición. Talleres gráficos del IPN. México.
5. Arellano Perales, C. (2015). Lignocelulósicos: Obtención de bioetanol a partir de materiales sometidos a hidrólisis enzimática”. Tesis Archivo PDF. Recuperado 10 de septiembre de 2022, de <https://bit.ly/3FXym1A>
6. Barraza-Soto, S., Domínguez-Calleros, P. A., Montiel-Antuna, E., Návar-Chaidez, J. J., y Díaz-Vásquez, M. A. (2014). La producción de mezcal en el municipio de Durango, México. *Ra Ximhai*, 10(6).
7. Bothast, R. J., & Schlicher, M. A. (2005). Biotecnología de producción de etanol a partir de granos y residuos agrícolas. *Química Nova*, 28(4), 584-590.
8. Cardona, C. A., & Sánchez, O. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98(12), 2288-2304.
9. Chen, R. F., Li, Y. Y., & Yang, R. D. (2011). Bioconversion of agricultural wastes to bioethanol: Substrate characteristic, technology, and economics. *Biotechnology Advances*, 29(5), 781-793.
10. COMERCAM, (2018). Consejo Mexicano Regulador del Mezcal. Informe estadístico
11. 2018. consultado el 29 de septiembre del 2022: <https://bit.ly/3KbDL7s>

12. Domínguez-Robles, J., Escalona-Buendía, H. B., & Pérez-Camargo, M. (2017). Optimización de la producción de etanol a partir de bagazo de agave utilizando un proceso SHF. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 601-611.
13. Estrada Maya, A. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. Archivo PDF. Recuperado 9 de septiembre de 2022, de: <https://bit.ly/3nnzTrk>
14. Feliz-Rodríguez, J. O., Jaramillo-Flores, M. E., & Rodríguez-Vázquez, R. (2017). Producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales, bagazo de agave y pulpa de papaya, mediante fermentación con levaduras recombinantes. *Revista Bio Ciencias*, 5(2), 237-243.
15. Galbe, M., & Zacchi, G. (2002). A method for producing ethanol from softwood at high yield. *Biotechnology and Bioengineering*, 80(6), 646-655.
16. García, E. & Peralta, D. (Eds.). (2022). Vista de Hidrólisis enzimática de bagazo de caña (*Saccharum sp* híbrido) para la producción de azúcares simples. Archivo PDF. Recuperado 25 de septiembre de 2022, de: <http://bit.ly/3M0HOoN>
17. Morales-Carrillo, N., Escobar-Moreno, D. A., y Paredes-Hernández, E. (2007). Estudio sobre el impacto que a las modificaciones a la NOM-070 traeran a la industria del mezcal. Universidad Autónoma Chapingo-CRUCEN, Zacatecas.
18. Palma, F., Pérez, P., y Meza, V. (2016). Diagnóstico de la Cadena de Valor Mezcal en las Regiones de Oaxaca. Recuperado de: <https://bit.ly/3lLwCS1>
19. Sanchez, O. J., & Cardona, C. A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99(13), 5270-5295.
20. Secretaría de Economía (2015). Se amplía zona de denominación de origen del mezcal. Consultado de: <http://bit.ly/3JMDbvO>
21. Valenzuela, J.F., Velasco, O.H., y Márquez, M.A. (2003). Desarrollo Sustentable del Agave Mezcalero en Durango. Primera Edición. SEP-SEIT-DGETA-CBTA171-ITAN°1-SAGDR-Gobierno de Estado de Dgo.
22. Van Soest P. 1987. Practical aspects of forage quality. Arizona dairy newsletter University of Arizona, Cooperative Extension Service (USA). Recuperado de: <https://bit.ly/3TL7Huz>