



Diseño de un proceso industrial para la elaboración de una bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (agave americano)

Design of an industrial process for the elaboration of an alcoholic beverage from cabuya sweet (american agave)

Desenho de processo industrial para elaboração de bebida alcoólica a partir do doce de cabuya (agave americano)

Andrea Belén Villacís-Tello ^I
abvillacis2013@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8482-9427>

Cristian German Santiana-Espín ^{II}
cristian.santiana@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3445-1347>

Linda Mariuxi Flores-Fiallos ^{III}
linda.flores@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2782-6470>

Darío Fernando Guamán-Lozada ^{IV}
dariof.guaman@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9499-5237>

Correspondencia: abvillacis2013@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 01 de octubre de 2021 ***Aceptado:** 20 Noviembre de 2021 *** Publicado:** 27 de Diciembre de 2021

- I. Investigador Independiente, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

Resumen

El objetivo principal del siguiente trabajo es diseñar un proceso industrial para la elaboración de una bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (Agave americano). Se procedió a la recepción de la materia prima, física, química, microbiológica y bromatológica, para evitar que el producto final tenga alteraciones. Posterior a ello se filtró el líquido, para eliminar las impurezas, y así alimentar al evaporador, el objetivo principal de esta operación es concentrar al dulce, es decir, eliminar parcialmente su contenido de agua, ya que esto beneficia al proceso de fermentación. Se seleccionó la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) Fermentis Safteq Blue Aagave Yeast, misma que trabaja específicamente con néctar de agave. Los grados brix iniciales varían la composición, madurez y forma de recolección del dulce, por lo tanto, se trabajó con 13,3brix, hasta obtener una concentración de 16,3, la misma que fue alimentada al fermentador junto con la levadura en sus condiciones óptimas de temperatura y pH. Transcurrido el tiempo de fermentación se procedió a filtrar el mosto, que se alimentó 22,70lt a la torre de destilación con 10°Gl, operando a un rango de temperatura 78-80°C se obtuvo 4,47lt de etanol al 47%, este alcohol, fue diluido al 37% y añadido especias, para así determinar el grado de aceptabilidad al público. El diseño del proceso se determinó a partir de las variables a controlar en cada operación, siendo estas; la de temperatura, pH, flujos, tiempo y °brix, teniendo así un balance de masa y energía, el mismo que determinara si el proceso es óptimo.

Palabras clave: caracterización; evaporador; fermentador; destilador.

Abstract

The objective of this study is to design an industrial process for the elaboration of an alcoholic beverage from cabuya sweet (American agave). The raw material was obtained, the same that was characterized, physical, chemical, microbiological and bromatological, to avoid that the final product has alterations. The liquid was filtered to eliminate the impurities present in the raw material to put it in the evaporator. The main objective of this operation is to concentrate the sweet, that is, to partially eliminate its water content since this benefits the fermentation process. The yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) Fermentis Safteq Blue Agave Yeast was selected, which works specifically with agave nectar. The initial Brix degrees vary according to the composition, maturity, and way of harvesting the sweet, therefore, it was worked with 13.3°brix, until obtaining a concentration of 16.3°brix, the same one that was put in the fermenter together with

the yeast, in its optimal conditions of temperature and pH. After the fermentation time, the must be filtered, 22.70lt was put into the distillation tower with 10°Gl, operating at a temperature range of 78-80°C. 4.47lt of 47% ethanol was obtained, this alcohol was diluted to 37%. Spices were added to determine the degree of acceptability to the public. The design of the process was determined from the variables to control in each operation, these are temperature, pH flows, time and °brix, thus having a mass and energy balance, the same that will determine if the process is optimal.

Keywords: Characterization; evaporator; fermented; destilador.

Resumo

O objetivo principal do trabalho a seguir é projetar um processo industrial para a elaboração de uma bebida alcoólica a partir do doce de cabuya (Agave Americana). Foi recebida a matéria-prima, física, química, microbiológica e bromatológica, para evitar que o produto final sofresse alterações. Em seguida, o líquido foi filtrado, para eliminar as impurezas, e assim alimentar o evaporador, o principal objetivo desta operação é concentrar o doce, ou seja, eliminar parcialmente o seu teor de água, pois isso beneficia o processo de fermentação. Foi selecionada a levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) Fermentis Safteq Blue Aagave Levedura, que atua especificamente com néctar de agave. Os graus brix iniciais variam a composição, maturidade e forma de colheita do doce, portanto, foi trabalhado com 13,3 brix, até se obter a concentração de 16,3, a mesma que alimentava o fermentador junto com a levedura em suas condições de temperatura ótima. e pH. Decorrido o tempo de fermentação, o mosto foi filtrado, o qual foi alimentado com 22,70 lt para a torre de destilação com 10°Gl, operando na faixa de temperatura de 78-80°C, obteve-se 4,47 lt de etanol 47%, este álcool foi diluído a 37% e temperos adicionados para determinar o grau de aceitação pelo público. O desenho do processo foi determinado a partir das variáveis a controlar em cada operação, sendo estas; o de temperatura, pH, vazões, tempo e °brix, tendo assim um balanço de massa e energia, o mesmo que determinará se o processo é ótimo.

Palavras-chave: caracterização; evaporador; fermentador; destilador.

Introducción

Hace millones de años surgió la historia del alcohol y su relación con el ser humano la cual aún se mantiene vigente en la actualidad, la misma que ha sido utilizada como analgésico, desinfectante y sustancia psicotrópica. Es allí donde nace la teoría de la fermentación, la cual es una práctica ancestral incluso universal con el objetivo de obtener alcohol a partir de las fuentes de azúcar disponibles en la naturaleza. En el mundo existe una amplia variedad de bebidas alcohólicas, gracias a las distintas culturas que se basaron en la diversidad biológica de cada lugar y aprovecharon de la misma, soportados en un mismo proceso de fermentación y destilación. Como establece (Carrillo, 2007, pp.41-49) *“las características de cada bebida, así como su calidad, son producto de la fuerte unión entre el entorno natural esto es, suelo, geografía, topografía, clima, etcétera y el hombre y sus especificidades históricas y culturales cultivos, métodos de producción y transformación”*.

Hace miles de años sobre el territorio mexicano nace el uso de un género de planta conocidas como agave o maguey, su aprovechamiento fue muy variable, entre estos; *“alimentación, forraje, fines medicinales, producción de bebidas fermentadas y destiladas, extracción de fibra como materia prima, construcción, empleo ornamental y en agricultura, para elaborar terrazas y cercas vivas”*(Williams, 2015, pp.60-65). Dentro de las bebidas alcohólicas las cuales es utilizado el agave o maguey como materia prima (Bowen, 2015, p.35) menciona a dos tipos: *“el pulque, que es elaborado mediante la fermentación de la savia o aguamiel y, los mezcales o destilados de agave, que son producidos mediante la cocción del tallo de la planta (denominado piña, corazón o cabeza), su fermentación y posterior destilación.”*

Para poder comprender la historia del agave revisemos como los autores lo identificaron:

“La familia Agavaceae es endémica de América, se distribuye desde el sur de Estados Unidos de América a Colombia y Venezuela, y está conformada por 9 géneros y 340 especies. El centro de mayor riqueza y diversidad biológica se encuentra en México, donde se encuentran 261 especies. Según la historia, los usos y beneficios de la planta, se remontan a unos 300 años” AC (Gracia & Chávez, 2013, pp.2-6).

Es aquí donde parte la importancia de esta planta, dentro de la agricultura ya que ellos proceden a elaborar un tipo de cerveza el cual fue objeto de comercio, además, el uso de la planta se relacionaba con la cura de enfermedades específicamente en las articulaciones, hasta en la actualidad se sigue con esta práctica. Finalmente, en la ciudad de México en las primeras décadas

del siglo XIX se dio inicio a la producción de tequila (producto derivado del Agave) lo que hoy se le destaca como una de las industrias más importantes dentro del país.

El Ecuador es rico en recursos naturales, y uno de ellos es la cabuya (Agave americano), siendo esta una planta de la región Sierra, la cual no es aprovechada a nivel industrial, es por ello que al indagar las propiedades que posee este dulce que se extrae de dicha planta y por su gran contenido de carbohidratos se desea elaborar una bebida alcohólica la cual nace con el fin de tener un producto que identifique a una población, operando bajo condiciones adecuadas de extracción, cocción, fermentación y destilación. La fermentación alcohólica conocida desde la antigüedad consiste en la descomposición de las hexosas, las cuales componen el dulce de cabuya, originada por las células de las levaduras en ausencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono y alcohol (Klages, 1968, p.790). Una vez culminada la fase de fermentación se traslada el mosto al destilador, en la operación de destilación se van a separar los componentes del mosto. Este proceso se basa en un cambio físico, en el cual el alcohol etílico se va a evaporizar a una menor temperatura que el punto de ebullición del agua, seguidamente los vapores serán condensados y transformados a un estado líquido el mismo que contendrá un alto porcentaje alcohólico. Finalmente, a este alcohol se le puede agregar especias las cuales le darán un olor y color deseable.

Según la descripción botánica, la cabuya es una planta “en roseta” la cual puede medir hasta 3 metros de diámetro, sus hojas suculentas son de color gris azulado, alargadas, duras y con espinos en el borde que miden hasta 5cm de color café, finalmente en la punta de su hoja tiene un solo espino. Con respecto al tronco se presenta de color café corto y leñoso. Las hojas se distribuyen en espiral en torno su tronco y tienden a doblarse bajo su propio peso. Por último, en la etapa de reproducción crece del centro de la planta un tallo alto y leñoso, este puede alcanzar hasta los diez metros de altura. Las flores crecen en racimos al tope de este tallo, donde maduran hasta dar semillas negras y aplanadas (Lopez, 2008).

La cabuya (*Agave americano*) crece de preferencia en zonas residenciales de periferia, en laderas inutilizables, bordes de caminos y quebradas, muros, etc., esto quiere decir que no es común sembrar esta planta como cultivo comercial. Se menciona que la cabuya producirá mejor calidad de aguamiel siempre y cuando las condiciones del suelo sean más deteriorables, y durante la época seca. Se debe tomar en cuenta que, debido a su largo periodo de crecimiento, la planta

ocupará su espacio por mucho tiempo. Esta es una buena práctica, ya que permite dar un uso a suelos secos en donde no se pueden trabajar para otros cultivos.



Figura 1. Cabuya (*Agave americano*)

Fuente: Elaboración propia

La reproducción de esta planta se puede dar por semilla o por rizomas, regularmente se trasplanta los hijuelos, los mismos que aparecen a partir de lo que brota la raíz de la planta, la edad óptima para poder reproducirse es entre los 3 y 5 años, y puede facilitar con uno y dos hijuelos cada año. Una vez que se separa los hijuelos de la madre, se procede plantar siempre y cuando sea antes de la época de lluvias, la nueva planta debe estar asentada y enterrada en un 75% de su volumen (Bonifáz, 2018).



Figura 2: Hijuelos

Fuente: Elaboración propia

El dulce de cabuya o agua miel es un exudado que se obtiene de la planta, es un producto de aspecto líquido, de sabor dulce agradable, de olor característico, con colores que varían de blanco a amarillo claro. Los nombres con los que se conocen varía; upi de cabuya, caldo de cabuya, dulce de cabuya y aguamiel de maguey, en los lugares donde se explota este producto, el conocimiento aún no está bien difundido, solamente lo aprovechan los pobladores conocedores. La población lo explota tan solamente por sus características organolépticas, más no existen estudios de su valor nutricional, que ayudaran a darle la debida importancia a éste producto, ya que mayoritariamente es utilizado por las comunidades que carecen económicamente y nutricionalmente. Con la producción de la bebida alcohólica se incentivará al cultivo del agave ya que en la mayoría de los casos no tienen los fines de explotación de esta planta (Gonzáles, 2014). El dulce de cabuya o chaguarmisqui es tradicional en zonas rurales de la Sierra. La cabuya tiene una producción de 40 días, luego la planta muere. Este dulce es nutritivo y se consume en la zona rural de la provincia de Imbabura, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, y Loja. Después de permanecer plantada 12 años la cabuya sale un cogollo que es una señal de que está lista para sacar el zumo. La extracción del dulce de cabuya (*agave americano*), es toda una tradición que fue introducida en lo que hoy es Ecuador durante la Colonia, traída desde México, a partir de entonces se recolecta este dulce que nace de una planta donde su uso principal era el de delimitar los linderos, el cual sigue siéndolo en la actualidad. El primer paso para la producción del dulce es identificar la planta que cumpla con las características adecuadas de madurez, es decir, debe tener; de 5 a 8 años de vida, el engrosamiento de meristemo conocido como el corazón de la Agavácea donde nacen las hojas, las mismas que se tornan de un color gris-verdoso, anchas en su base y empiezan a desagruparse de su centro. Después de identificar el agave óptimo se debe localizar la hoja adecuada que conecte directamente con el corazón del agave, para posterior a ello elaborar un orificio el mismo que permitirá la extracción del jugo, generalmente está en la quinta o sexta corona desde el centro considerando que tenga en una posición adecuada para la acumulación del jugo evitando su derrame. Después del tiempo de reposo, se procede a raspar las paredes internas del orificio con una especie de anillo de acero de bordes afilados llamado arco que permitirá la exudación del jugo, se podrá recolectar al día siguiente en la mañana y otro turno al medio día y en la tarde, con una cantidad total de 4 a 10 litros diarios de cada planta durante siete meses, sin olvidar raspar las paredes internas después de cada recolección para que continúe

la exudación y se lo cubre con una objeto del tamaño adecuado para evitar cualquier tipo de contaminación (Rapido, 2016).



Figura 3: Elaboración del orificio en el *agave americano*
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Productos que se obtiene a partir de los derivados de la cabuya (*Agave americano*)

Partes de la cabuya	Usos
Hojas	La fibra hace las veces de jabón, leña, alimento para ganado
	La hoja cortada como canales de agua, se la usa en vez de tejas; para cercas, divisiones de potreros.
	Con la punta de la hoja hacen de aguja e hilo.
	La fibra sirve para elaborar sogas (chilpe)
Tallo	La construcción de las viviendas.
	Instrumento musical.
Dulce o agua miel	El jugo sin fermentar o “dulce”, se lo toma en las comidas y sirve para hacer postres.
	Fermentado toma el nombre de pulque el cuál toman los indígenas.
	Tequila, cerveza y cocteles.
	El dulce hervido por varias horas da como resultado una exquisita miel.
Capullos	Su nombre comercial; alcaparras las cuales sirve para el consumo humano

Fuente: (López, 2013).

El Agave presentó un alto contenido de sólidos (33%). Los fructanos representaron aproximadamente el 70% de los sólidos solubles, es decir carbohidratos, polisacáridos y oligosacáridos que están formados por unidades de fructosa (Inkanatural, 2014, p.42-52).

Tabla 2: Composición química y bromatológica del dulce de cabuya (*Agave americano*) en un promedio de 12°Brix.

Composición	Cantidad (%)
Agua	80%
Fructosa	6,9%
Sacarosa	0.19%

Carbohidratos	3%
Proteína	0,34%
Ceniza	0,65%
Sodio	1%

Fuente: (Jurado y Sarzosa, 2009)

Según (López, 2013) manifiesta que la planta de cabuya tarda aproximadamente cinco años en crecer y estar apta para recoger su dulce, este tiempo parte desde la siembra de la planta, el mismo que producirá durante siete meses. Cuando llega el ciclo final vegetativo de la planta, ya no se podrá recoger el dulce, y este se podrá identificar debido a que se va formando un tronco denominado chaguarquero y del mismo nace la flor llamada alcaparra.

La cabuya se ha explotado en el Ecuador desde tiempos remotos en diversas partes de la Sierra; mayoritariamente la cabuya que se corta en el país viene de linderos y cercas ya que éste suelo árido es donde se puede encontrar al penco azul o cabuya en grandes cantidades. A continuación, se muestran algunos de los usos que se da a la cabuya:

Tabla 3: Productos que se obtiene a partir de los derivados de la cabuya (*Agave americano*)

Partes de la cabuya	Usos
Hojas	La fibra hace las veces de jabón, leña, alimento para ganado
	la hoja cortada como canales de agua, se la usa en vez de tejas; para cercas, divisiones de potreros.
	Con la punta de la hoja hacen de aguja e hilo. La fibra sirve para elaborar sogas (chilpe)
Tallo	La construcción de las viviendas. Instrumento musical.
Dulce o agua miel	El jugo sin fermentar o “dulce”, se lo toma en las comidas y sirve para hacer postres.
	Fermentado toma el nombre de pulque el cuál toman los indígenas.
	Tequila, cerveza y cocteles.
	El dulce hervido por varias horas da como resultado una exquisita miel.
Capullos	Su nombre comercial; alcaparras las cuales sirve para el consumo humano

Fuente: (López, 2013).

Para realizar la concentración de azúcares se procede a la fase de la hidrólisis la misma que se puede efectuar en hornos de mampostería o autoclaves y en ambos se emplea vapor entre 100 y 110°C, el objetivo de realizar esta operación principalmente en los carbohidratos, es que permite obtener azúcares simples, por lo que se considera importante realizar este proceso, ya que el

carbohidrato principal que posee el agave es la inulina, siendo este un polímero compuesto por fructosa y glucosa, y al no ser susceptible en el proceso de fermentación realizado por las levaduras, se aplica la hidrólisis con el fin de descomponer este carbohidrato y obtener azúcares simples como la fructosa.(CRT 2019)

Hidrólisis de la inulina, en esta etapa también se forman muchos compuestos los cuales son determinantes en el perfil organoléptico del producto final. De acuerdo a (CRT, 2019) el agave no tiene un solo carbohidrato, es decir presenta un grupo de ellos que en conjunto algunos autores han llamado fructooligosacaridos (FOS) que no solo tienen distinto tamaño de cadena, sino que algunos están más ramificados que otros. Lo mencionado anteriormente es de mucha importancia debido a que estos carbohidratos se hidrolizan bajo diferentes condiciones de tal forma que las condiciones para hidrolizar las cadenas más complejas, son muy drásticas para las cadenas más sencillas. Lo anterior ocasiona que los azúcares obtenidos de estas cadenas sencillas puedan caramelizarse durante la hidrólisis de las cadenas complejas. La caramelización del azúcar de por sí, representa mermas al proceso porque el caramelo no se fermenta, además de que se generan compuestos secundarios como el furfural y el hidroximetil furfural, que perjudican a la salud en grandes cantidades.

La evaporación es una operación unitaria en la cual ocurre una transferencia de masa y de energía, el objetivo principal es eliminar una cantidad de solvente de la solución para concentrarla. La condición dentro de este proceso industrial es que el soluto debe ser no volátil, es decir, a la solución se le proporcionara calor con el fin de eliminar una proporción de solvente, según la cantidad que se requiera y sobre todo que el soluto no volátil sea concentrado. En esta operación ocurre una transferencia de calor, la cual parte de la cámara de calefacción a la cámara de ebullición por medio del mecanismo de conducción, por lo tanto, la solución diluida es la que va a captar el calor latente que le será suministrado el medio de calentamiento, para finalmente alcanzar la temperatura de ebullición de la solución que se desea concentrar, tomando en cuenta que no necesariamente el solvente debe llegar a la temperatura de ebullición para que suceda la evaporación. En todos los evaporadores industriales se produce una condensación en la cámara de calefacción y evaporación en la cámara de ebullición, el vapor es inyectado a la cámara de calefacción de donde se transfiere el calor a la cámara de ebullición al ceder su calor latente (Brito, 2017, pp.39-50)

La biotecnología ofrece diversas opciones para la generación de energías renovables. Una de ellas es la producción de bioetanol, el cual se obtiene mediante fermentación.

La fermentación alcohólica es una bioreacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono, las principales responsables de esta transformación son las levaduras la *Saccharomyces cerevisiae*, siendo esta la más usada frecuentemente. El rendimiento teórico estequiométrico para la transformación de glucosa en etanol es de 0.511 g de etanol y 0.489 g de CO₂ por 1 g de glucosa. Este valor fue cuantificado por Gay Lussac. En la realidad es difícil lograr este rendimiento, porque la levadura utiliza la glucosa para la producción de otros metabolitos (Vázquez y Dacosta, 2007, pp.2-4).

Las fermentaciones se llevan a cabo en un reactor que se conoce como fermentador, de forma cilíndrica cerrado por arriba y por abajo, en el que se han adaptado varios tubos y válvulas, se construyen con acero inoxidable. En el fermentador en tanda (Batch): una cantidad fija de materia prima se introduce en el fermentador, donde se inocula con el microorganismo seleccionado y el proceso de fermentación ocurre durante un período de tiempo específico. Los factores que influyen en el proceso de fermentación; el oxígeno, que es el encargado de controlar la velocidad de transferencia y es la resistencia en la interface entre la burbuja de gas y el líquido. En la producción del alcohol no requiere de oxígeno, pero en los primeros momentos de la fermentación es necesaria la agitación y la aireación para procurar una dispersión homogénea en el tanque y para la reproducción de las células de levadura en condiciones óptimas. Las fermentaciones deben ser llevadas a cabo en un margen estrecho de temperatura y debe ser constante, necesita encontrarse a temperaturas desde 15 a 25°C para la adaptación de las levaduras al medio. Finalmente es necesario el pH óptimo para el crecimiento de las levaduras en la fermentación alcohólica oscila en el rango de 5 y 6. En la industria de licores generalmente se utiliza el ácido sulfúrico para ajustar el pH del mosto, aunque el ácido láctico es también satisfactorio por favorecer el desarrollo de las levaduras o ácido cítrico para su nivelación.(Diaz, 2016)

Una vez concluida la fase de fermentación es necesario llevar el mosto a destilación, en esta etapa su principal objetivo es separar los constituyentes del mismo, cualquier destilador por más complejo que sea funciona con el mismo principio; en la caldera se lleva a ebullición el líquido a destilar, el vapor asciende y condensa en la cuba refrigerante. El punto de ebullición del etanol al 95% es de 78.15 grados centígrados al nivel del mar, temperatura a la que se obtiene mayor

cantidad del producto, siendo el componente principal el alcohol etílico, además de otros componentes que se encargaran de proporcionarle aroma y sabor (Ambuludi, 2014, p.34). En la práctica, la destilación puede operar bajo dos métodos principales; el primer método parte de la producción de vapor mediante ebullición de la mezcla líquida que se desea separar, para finalmente condensar los vapores evitando que el líquido retorne al calderín, por lo tanto, no existe reflujo. El segundo se basa en el retorno de una parte del condensado a la columna, en unas condiciones tales que el líquido que retorna se pone en íntimo contacto con los vapores que ascienden hacia el condensador. Cualquiera de los dos métodos puede realizarse de forma continua o por cargas. La destilación por cargas es un proceso de destilación en estado no estacionario que sólo se trata brevemente, debido a que no se utiliza tan ampliamente como la destilación continua además que los cálculos son más complicados (Wkren et al., 1991, pp.400-506).

Materiales y Métodos

Caracterización de la materia prima

Las variables de calidad a analizar en la caracterización del dulce son físicas, químicas, bromatológicas, microbiológicas y organolépticas.

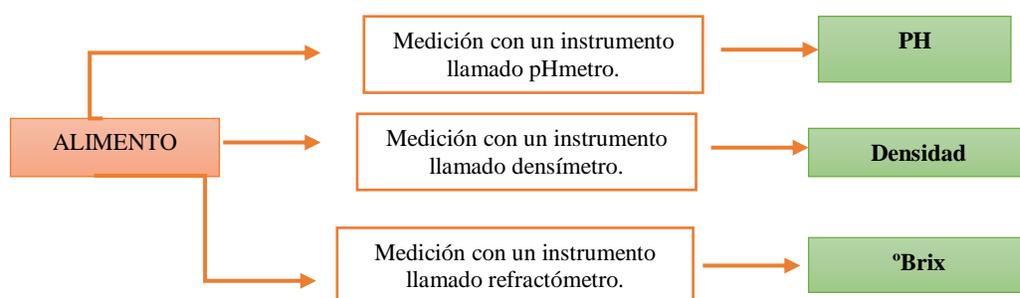


Figura 4: Metodología para la determinación del análisis fisicoquímico del dulce de cabuya.

Fuente: Elaboración propia.

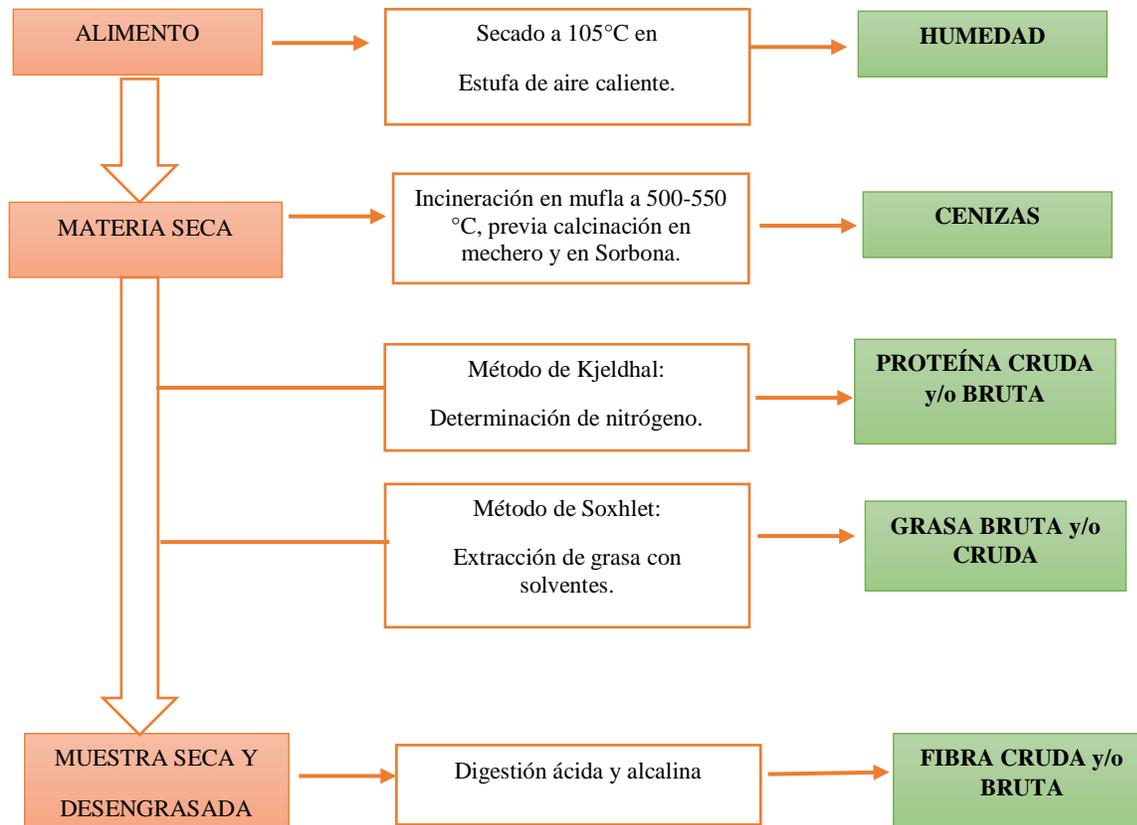


Figura 5: Metodología para la determinación del análisis bromatológico del dulce de cabuya.
Fuente: Elaboración propia.

Físicas. - Son aquellas características que están correlacionadas directamente con la materia prima, es decir en ella se determinan: Densidad, viscosidad y pH

- Densidad aparente. – Se calcula por medio de la diferencia de masa y volumen.

Con la balanza se determina la diferencia de masa de la probeta más la muestra, posterior a ello se observa el volumen que ocupa la muestra en la probeta. Finalmente se opera para determinar la densidad del líquido (Torrelavega, 2015, pp.39-43).

- Viscosidad. - Se determina mediante la utilización de un viscosímetro, utilizando el manual del mismo, para identificar el husillo estándar y los rpm adecuadas para la lectura.
- pH.- Es un coeficiente el cual indicara si una solución acuosa, se encuentra en grado de acidez

o de basicidad, en este caso se utilizó unas sustancias llamadas indicadores, que varían reversiblemente de color en función del pH del medio en que están disueltas. Se puede añadir directamente a la disolución o utilizarlas en forma de tiras de papel indicador.

Químicas. - Son aquellos análisis, que se internan en el estudio de los componentes de la materia prima, estableciendo básicamente los sólidos solubles totales (°Brix)

- Sólidos solubles totales (°Brix). – Es un sistema de medición específica, en el cual el grado Brix representa el porcentaje en peso de sacarosa químicamente pura en solución de agua a 293K(20°C), para ello se utiliza un refractómetro donde se coloca en el prisma una pequeña muestra del zumo, para posterior a ello realizar su lectura. Según (Gokel 2011) el principio de medición se basa en la refracción de la luz (roto del latín: fractus) creada por la naturaleza y la concentración de los solutos (por ejemplo, el azúcar), es por esto que un refractómetro mide indirectamente la densidad de los líquidos.

Bromatológicas. - Es un estudio de las propiedades o características que posee un alimento que comprende; humedad, ceniza, grasa, fibra, proteína y ELN.

- Prueba de determinación de ceniza: método de incineración en mufla.

Las cenizas de un alimento son un término analítico equivalente al residuo inorgánico que queda después de calcinar e incinerar u oxidar completamente la materia orgánica de un alimento. El material inorgánico que no se destruye a esta temperatura se le llama ceniza.

Tabla 4: Método de determinación de determinación de ceniza.

MÉTODO DE INCINERACIÓN EN LA MUFLA PARA LA DETERMINACIÓN DE DE CENIZA	
Procedimiento	
Reactivos	Materiales
➤ 4 gramos de almidón	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cápsulas de porcelana ➤ mufla ➤ Rebervero ➤ Sorbona
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Colocar la cápsula con la muestra seca resultado de la determinación del contenido de humedad en un mechero y en Sorbona, para calcinar hasta ausencia de humos o colocar 2g de muestra en un crisol previamente tarado a peso constante, y realizar su calcinación en un reverbero y en la Sorbona hasta que no salga humo. • Transferir la capsula a la mufla e incinerar a 500°C-550°C, hasta obtener cenizas libres de residuo carbonoso (esto se obtiene al cabo de 2 a 3 horas) y peso constante. • Sacar la cápsula y colocar en desecador, enfriar y pesar. • La determinación debe hacerse por duplicado. 	

Cálculos
$\%C = \{(m_1 - m) / (m_2 - m)\} \times 100$ <p>En donde: %C= contenido de ceniza en porcentaje de masa. m= masa de la cápsula vacía en g. m_1= masa de la cápsula con la muestra después de la incineración en g. m_2= masa de la cápsula con la muestra antes de la incineración en g.</p>

Fuente: Facultad de Ciencias Espoch.

- Método de desecación en estufa de aire caliente.

El método se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra desecada hasta masa constante en la estufa de aire caliente a la temperatura normalizada. La materia seca que pertenece en el alimento posterior a la remoción del agua se conoce como sólidos totales, materia seca, extracto o residuo secos.

Tabla 5: Método de determinación de determinación de humedad.

MÉTODO DE DESECACIÓN EN ESTUFA DE AIRE CALIENTE	
Reactivos	Materiales
➤ 4 gramos de almidón	➤ Cápsulas de porcelana ➤ Vidrio de reloj ➤ Papel filtro ➤ Estufa ➤ Desecador
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Pesar 1-10g de muestra (previamente realizado el demuestre) en vidrio de reloj, pesa filtro o en papel aluminio o chocolatín; o directamente en cápsula de porcelana previamente tarada, repartir uniformemente en su base. • Colocar en la estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un lapso de 2 a 3 horas, hasta peso constante. • Enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y pesar. • La determinación debe realizarse por duplicado. 	
Cálculos	
$SS(\%) = \{(m_2 - m) / (m_1 - m)\} \times 100$ <p>En donde: SS= sustancia seca en porcentaje en masa. m= masa de la cápsula en g. m_1= masa de la cápsula con la muestra en g. m_2= masa de la cápsula con la muestra después del calentamiento en g. $\%HUMEDAD = 100 - SS(\%)$</p>	

Fuente: Facultad de Ciencias Espoch.

- Prueba de contenido de fibra cruda

Se basa en la sucesiva separación de la ceniza, proteína, grasa y sustancia extraída libre de nitrógeno; la separación de estas se logran mediante el tratamiento con una solución débil de ácido sulfúrico y álcali, agua caliente y acetona. El ácido sulfúrico hidroliza a los carbohidratos insolubles (almidón y parte de hemicelulosa), los álcalis transforman en estado soluble a las sustancias albuminosas, separan la grasa, disuelven parte de la hemicelulosa y la lignina, el éter o acetona extraen las resinas, colorantes, residuos de grasa y eliminan el agua. Después de este tratamiento el residuo es la fibra bruta. El método simula el ataque gástrico e intestinal que se produce en un ser vivo, es una fracción que se encuentra solo en alimentos de origen vegetal.

Tabla 6: Método de determinación del contenido de fibra cruda.

MÉTODO DE WEENDE DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE FIBRA CRUDA	
Procedimiento	
Reactivos	Materiales
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Solución de ácido sulfúrico 1.25% ➤ Solución de hidróxido de sodio 1.25% ➤ Agua caliente ➤ Acetona ➤ Núcleos de ebullición ➤ Hexano ➤ Etanol 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Matraz de bola fondo plano, 600 mL ➤ Unidad de condensación para el matraz ➤ Papel filtro ➤ Embudo Buchner ➤ Crisol Gooch ➤ Vaso de Berzellius ➤ Condensador ➤ Mufla ➤ Desecador
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pesar 2 gramos de la muestra desengrasada y seca y colocar en el vaso de Berzellius con núcleos de ebullición y 250 mL de ácido sulfúrico 1.25%. ➤ Colocar el vaso en el equipo y ajustar al condensador, subir la parrilla y calentar hasta ebullición. ➤ Mantener la ebullición por media hora exacta, contados a partir de que empieza a hervir. ➤ Desconectar el vaso del condensador, enfriar y filtrar al vacío. ➤ Lavar el vaso y el residuo del papel con 250 mL de agua destilada caliente. ➤ El residuo trasvasar cuantitativamente al vaso de Berzellius y añadir 250 mL de NaOH 1.25%. ➤ Colocar el vaso en el equipo y ajustar al condensador, subir la parrilla y calentar hasta ebullición. ➤ Mantener la ebullición por media hora exacta, contados a partir de que empieza a hervir. ➤ Desconectar el vaso del condensador, enfriar y filtrar por crisol de Gooch conteniendo una capa de lana de vidrio y previamente tarado. ➤ Lavar el vaso y el residuo del papel con 250 mL de agua destilada caliente. ➤ Lavar por último con 15 mL de hexano o etanol. ➤ Colocar el crisol de Gooch en la estufa a 105° durante toda la noche, luego enfriar en el desecador y pesar. ➤ Colocar el crisol de Gooch en la mufla a 600 °C por media hora, enfriar y el desecador y pesar. 	

Cálculos

$$\%F = \frac{(P1 - P)}{m} \times 100$$

En donde:

%F= fibra cruda o bruta en muestra seca y desengrasada expresada en porcentaje en masa.

P1= masa del crisol más el residuo desecado en la estufa en gramos

P= masa del crisol más las cenizas después de la incineración en la mufla en g.

m= masa de la muestra seca y desengrasada tomada para la determinación en g.

Fuente: Facultad de Ciencias Espoch.

- Prueba de determinación de contenido de proteína cruda.

Sometiendo a digestión una muestra problema con ácido sulfúrico concentrado, los hidratos de carbono y las grasas se destruyen hasta formar CO₂ y agua, la proteína se descompone con la formación de amoníaco, el cual es retenido por el ácido sulfúrico en forma de sulfato de amonio, este sulfato en medio ácido es resistente y su destrucción con desprendimiento de amoníaco sucede solamente en medio básico; luego de la formación de la sal de amonio previa la destilación actúa una base fuerte NaOH al 50% y se desprende el nitrógeno en forma de amoníaco, este amoníaco es retenido en una solución de ácido bórico al 2,5% que contiene el indicador mixto rojo de metilo y verde de bromocresol y titulado con HCl al 0,1 N.

Tabla 7: Método de determinación de contenido de proteína.

MÉTODO DE MICROKJELDHAL PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE PROTEÍNA	
Reactivos	Materiales
<ul style="list-style-type: none"> ➤ K₂SO₄ o Na₂SO₄ ➤ HgO ➤ Ácido sulfúrico concentrado ➤ NaOH al 40% ➤ Na₂S₂O₃ al 5% ➤ H₃BO₃ al 4% ➤ HCl 0,1 N ➤ Indicador mixto rojo de metilo y verde de bromocresol; 450 mg de rojo de metilo más 250 mg de verde de cresol, disueltos en 250 mL de etanol al 95% 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Unidad de digestión y destilación Kjendahl. ➤ Pipetass de 5mL y 10 mL ➤ Vaso de precipitación de 50mL ➤ Bureta de 25 mL ➤ Erlenmeyer de 250 mL ➤ Soporte y pinza de bureta ➤ Balanza ➤ Balón de digestión de Kjeldhal ➤ Sorbona
Procedimiento:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pesar exactamente 40 mg muestra seca e introducirla en el balón de digestión Kjeldhal ➤ Añadir 1.5g de K₂SO₄ o Na₂SO₄; 40 mg de HgO, 2mL de ácido sulfúrico concentrado p.a. procurando no manchar las paredes del mismo. ➤ Colocar el balón en el digestor y calentar hasta obtener un líquido transparente ➤ Endriar el balón y su contenido, adicionar 4 mL de agua destilada para disolver el contenido que al enfriarse se solidifica. 	

- Verter lo anterior en el balón de destilación del equipo, adicionando otros 4mL de agua destilada para enjuagar el balón.
- Cerrar la llave y en un vaso de precipitación de 50 mL preparar de 8 mL de NaOH al 40% y 2 mL de Na₂SO₄ al 5%, abrir la llave y verter dejando pasar lentamente al balón de destilación.
- Recibir el destilado en un vaso conteniendo 12 mL de H₃B₀₃ al 4% y 8% mL de agua destilada al que se le añade 3 o 4 gotas del indicador mixto rojo de metilo y verde de bromocresol. El tubo de salida del destilador debe estar sumergido en el vaso que contiene los reactivos
- Destilar hasta obtener 30 mL de destilado.
- Titular el destilado con HCl
- La determinación debe hacerse por duplicado.

Cálculos

$$\%P = 1.4 \times f \times V \times N/m$$

En donde:

%P= Contenido de proteínas en porcentaje de masa

F= factor para transformar el %N₂ en proteína, y que es específico para cada alimento.

V= volumen de HCl o H₂SO₄ empleado para titular la muestra en mL

Ni= normalidad de HCl

m= masa en gramos.

Fuente: Facultad de Ciencias Espoch.

- Prueba de determinación de contenido de grasa.

Es una extracción semicontinua con un disolvente orgánico. Este se calienta, volatiliza para posteriormente condensarse sobre la muestra. El disolvente gotea constantemente a través de la muestra para extraer la grasa. El contenido de grasa se cuantifica por diferencia de peso entre la muestra y la grasa removida.

Tabla 8: Método de determinación de contenido de grasa.

MÉTODO DE SOXHLET PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE GRASA	
Reactivos	Materiales
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Éter etílico ➤ Éter de petróleo ➤ Hexano 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Extractor Soxhlet ➤ Vaso de precipitación de 50mL ➤ Bureta de 25 mL ➤ Soporte y pinza de bureta ➤ Balanza ➤ Sorbona
Procedimiento:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pesar 2g de muestra seca y colocar en el dedal de celulosa previamente tarado y se registra su peso, se coloca sobre el dedal algodón para evitar que se produzca evaporación, se pierda la muestra o se separe del dedal, luego introducirlo en la cámara de sifonación. ➤ En el balón previamente tarado (se debe registrar su peso), adicionar 250ml de éter etílico o éter de petróleo (punto de ebullición 40°C) (se puede usar también hexano) o la cantidad adecuada dependiendo del tamaño del equipo. 	

- Colocar el condensador con las mangueras sobre la cámara de sifonación.
- Encender la parrilla, controlar la entrada y salida de agua y extraer por 2 a 4h.
- Al terminar el tiempo, retirar el balón con el solvente más el extracto grasoso y destilar al solvente (rota vapor).
- El balón con la grasa bruta o cruda colocar en la estufa por emdía hora, enfriar en desecador y pesar

Cálculos

$$\text{\%G (\%Ex.E)} = \{(P1-P)/m\} \times 100$$

En donde:

%G= grasa cruda o bruta en muestra seca expresado en porcentaje en masa.

P1= masa del balón más la garsa cruda o bruta extraída en g.

P= masa del balón de extracción vacío en g.

m= masa de la muestra seca tomada para la determinación en g.

Fuente: Facultad de Ciencias Epoch.

Microbiológicos. – Se realiza con el fin de detectar los agentes patógenos que afectan la calidad del producto, para ello se determinarán distintos grupos de bacterias como; mohos, levaduras, coliformes totales y eschericha coli.

Proceso para la elaboración de la bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (Agave americano)

El proceso de elaboración de la bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (*Agave americano*) se basa en el proceso de producción de “Sauza Tequila Import Company”, con la diferencia de que la extracción del dulce se obtendrá cuando se realice un orificio en el centro del agave y este mismo permitirá la exudación del jugo.

Ecuaciones de diseño para el evaporador de simple efecto

Determinación de la densidad, viscosidad, fracción molar y capacidad calorífica de la materia prima

- Determinación de densidad.

El método aplicado para la determinación de la densidad es por el método de la probeta, la cual consiste en identificar el volumen de la probeta y la masa de la misma, posterior a ello realizar los cálculos.

$$d = \frac{m_1 - m_2}{v} \quad (1)$$
$$d = \frac{236,470g - 136,447g}{100ml}$$

$$d = \frac{1.00023g}{ml} = \frac{1000,23kg}{m^3}$$

Donde:

d = Densidad del dulce de cabuya (kg/m^3)

m_1 = masa de la probeta mas el dulce de cabuya (g)

m_2 = masa de la probeta vacía (g)

- Determinación de viscosidad.

El método aplicado para la determinación de la viscosidad es utilizando un viscosímetro, según el manual que tenga el equipo. En este caso se observó una viscosidad a las condiciones de 100rpm y L1 como el husillo estándar.

$$\mu = 2,2 \text{ cp} = 2,2 \times 10^{-3} \text{ Pa. s}$$

- Cálculo del número de moles para cada componente.

Se parte de los grados brix que ingresan y salen del evaporador. Los gramos de azúcar que tiene un kilogramo de agua, partiendo de la cantidad de grados brix que posee la muestra.

$$n_c = \frac{m_c}{M_c} \tag{2}$$

Donde:

n_c = moles del componente (mol/kg)

m_c = masa del componente (g)

M_c = Peso molecular del componente (g)

Número de moles de la glucosa a:

13,3°Brix

$$n_{F(C_6H_{12}O_6)} = \frac{111,7g/kg}{180,154g/mol}$$

$$n_{F(C_6H_{12}O_6)} = 0,620 \text{ mol/kg}$$

16,3°Brix

$$n_{L(C_6H_{12}O_6)} = \frac{141,1g/kg}{180,154g/mol}$$

$$n_{L(C_6H_{12}O_6)} = 0,783 \text{ mol/kg}$$

Número de moles del agua a:

13,3°Brix

$$111,7\text{g azúcar} - 1000\text{g agua} = 888,3\text{g agua}$$

$$n_{F(H_2O)} = \frac{888,3\text{g/kg}}{18,015\text{g/mol}}$$

$$n_{F(H_2O)} = 49,308 \text{ mol/kg}$$

16,3°Brix

$$141,1\text{g azúcar} - 1000\text{g agua} = 858,9\text{g agua}$$

$$n_{L(H_2O)} = \frac{858,9\text{g/kg}}{18,015\text{g/mol}}$$

$$n_{L(H_2O)} = 47,677 \text{ mol/kg}$$

- Cálculo de la fracción molar para cada componente.

$$X_i = \frac{n_i}{n_i + n_j} \quad (3)$$

Donde:

X_i = Fracción molar de cada componente

n_i = moles del componente i

n_j = moles del componente j

$$X_{F(C_6H_{12}O_6)} = \frac{n_{F(C_6H_{12}O_6)}}{n_{F(C_6H_{12}O_6)} + n_{F(H_2O)}}$$

$$X_{F(C_6H_{12}O_6)} = \frac{0,620}{0,620 + 49,308}$$

$$X_{F(C_6H_{12}O_6)} = 0,0124$$

$$X_{F(C_6H_{12}O_6)} = \frac{n_{F(C_6H_{12}O_6)}}{n_{F(C_6H_{12}O_6)} + n_{F(H_2O)}}$$

$$X_{F(H_2O)} = \frac{n_{F(H_2O)}}{n_{F(C_6H_{12}O_6)} + n_{F(H_2O)}}$$

$$X_{F(H_2O)} = 0,987$$

$$X_{L(C_6H_{12}O_6)} = \frac{n_{L(C_6H_{12}O_6)}}{n_{L(C_6H_{12}O_6)} + n_{L(H_2O)}}$$

$$X_{L(C_6H_{12}O_6)} = \frac{0,783}{0,783 + 47,677}$$

$$X_{L(C_6H_{12}O_6)} = 0,016$$

$$X_{L(H_2O)} = \frac{n_{L(H_2O)}}{n_{L(C_6H_{12}O_6)} + n_{L(H_2O)}}$$

$$X_{L(H_2O)} = \frac{47,677}{0,783 + 47,677}$$

$$X_{L(H_2O)} = 0,983$$

- Cálculo de la capacidad calorífica

$$Cp_c = (X_F Cp)_{C_6H_{12}O_6} + (X_F Cp)_{H_2O} \quad (4)$$

Donde:

Cp_c = Capacidad calorífica de la mezcla (Kj/kgK)

X_F = Fracción Molar de la glucosa o del agua (mol/kg)

Cp = Capacidad calorífica de la glucosa o del agua (J/molK)

Capacidad calorífica de la mezcla en la alimentación

$$Cp_F = (0,0124) \left(3,785 \frac{kJ}{kgK} \right) + (0,987) \left(\frac{4,22kJ}{kgK} \right)$$

$$Cp_F = \frac{4,212kJ}{kgK}$$

Capacidad calorífica de la mezcla en el concentrado

$$Cp_L = (0,016) \left(3,785 \frac{kJ}{kgK} \right) + (0,983) \left(\frac{4,22kJ}{kgK} \right)$$

$$Cp_L = \frac{4,208kJ}{kgK}$$

1. Balance de masa en el evaporador

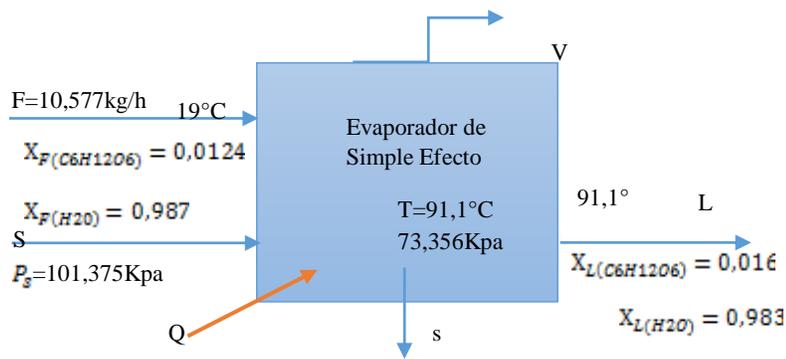


Figura 6: Flujos de materia y parámetros involucrados en los balances.

Fuente: Elaboración propia.

Balance Global

$$E = S \quad (5)$$

$$F = V + L \quad (6)$$

$$V = \frac{10,577kg}{h} - \frac{8,197kg}{h}$$

$$V = 2,380kg/h$$

Balance de Sólidos

$$FX_F = VX_V + LX_L \quad (7)$$

$$L = \frac{FX_F}{X_L}$$

$$L = \frac{\left(\frac{10,577kg}{h}\right)(0,0124)}{0,016}$$

$$L = 8,197kg/h$$

2. Balance de energía en el evaporador

$$E = S \quad (8)$$

$$E_F + E_S = E_V + E_L + E_R \quad (9)$$

$$E_S - E_s = E_V + E_L - E_F \quad (10)$$

$$\dot{m}_S H_S - \dot{m}_s h_s = \dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F$$

$$\dot{m}_S (H_S - h_s) = \dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F$$

$$\dot{m}_S \lambda = \dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F \quad (11)$$

$$Q = \dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F$$

Cálculo de las entalpías:

Entalpía de evaporización:

$$H_V = 2661,2 \text{ kJ/kg}$$

Donde:

H_V = Entalpía de evaporización (kJ/kg); valor extraído de las tablas de propiedades termodinámicas, a partir de la temperatura de 91,1°C

Entalpía de la mezcla:

$$h_L = C_{pL}(T_L - T_R) \quad (12)$$

Donde:

h_L = Entalpía de la mezcla en el concentrado (kJ/kg).

Cp_L = Capacidad calorífica de la mezcla en el concentrado (Kj/kgK)

T_L = Temperatura de la mezcla en el concentrado (°C)

T_R = Temperatura de referencia (°C)

$$h_L = \frac{4,208kj}{kgK} (91,1 - 25)K$$

$$h_L = 278,148kj/kg$$

Entalpía de alimentación:

$$h_F = Cp_F(T_F - T_R) \quad (13)$$

Donde:

h_F = Entalpía de la mezcla en la alimentación al evaporador(kJ/kg).

Cp_F = Capacidad calorífica de la mezcla en la alimetación (Kj/kgK)

T_F = Temperatura de la alimentación (°C)

T_R = Temperatura de referencia (°C)

$$h_F = \frac{4,212kj}{kgK} (19 - 25)K$$

$$h_F = -25,272kj/kg$$

Cálculo del flujo másico del vapor saturado:

$$\dot{m}_S \lambda = \dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F \quad (14)$$

$$\dot{m}_S = \frac{\dot{m}_V H_V + \dot{m}_L h_L - \dot{m}_F h_F}{\lambda}$$

$$\dot{m}_S = ((2,380kg/h)(2661,2 kJ/kg) + (8,197 kg/h)(278,148kJ/kg) - (10,577kg/h)(-25,272kJ/kg))/2256,54kJ/kg$$

$$\dot{m}_S = 3,935 kg \text{ de vapor/h}$$

Donde:

λ = Calor latente de vaporización (h_{fg}) (Kj/kg) valor extraído de las tablas de propiedades termodinámicas, a partir de la presión de saturación del agua.

Cálculo del flujo de calor necesario en el evaporador:

$$Q = \dot{m}_S \lambda \quad (15)$$

$$Q = \left(3,935 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{2256,54kJ}{kg}\right)$$

$$Q = \frac{8879,484kJ}{h} = \frac{2,466kJ}{s}$$

Cálculo de la eficiencia:

$$\varepsilon = \frac{\text{Masa de agua evaporada}}{\text{Masa de vapor condensado} * 0,85} * 100 \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{2,380kg/h}{8,197 kg/h * 0,85} * 100$$

$$\varepsilon = 34,158\%$$

Dimensiones para el diseño del evaporador de simple efecto

Para realizar el diseño es necesario determinar ciertos parámetros: Número de Reynolds, diámetro del rodete, potencia del motor, altura del fluido en el tanque, longitud del brazo del agitador, distancia entre el fondo del tanque y la paleta de agitación.

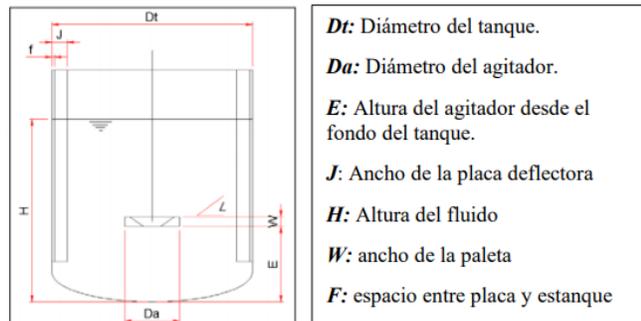


Figura 7: Dimensiones para el sistema de mezclado.

Fuente:(Uribe, 2013).

Tabla 8: Dimensiones para el sistema de mezclado.

$\frac{D_a}{D_T} = \frac{1}{2}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{9}$
$\frac{C}{D_T} = \frac{1}{3}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{J}{D_T} = \frac{1}{12}$

Fuente:(Wkren et al. 1991).

Considerando que se desea procesar un volumen de operación igual a 50 litros o 0,05m³, por cada carga de materia prima al equipo y utilizando la relación descrita por (Wkren et al. 1991) para dimensionamiento de reactores mezclados

$$V = \frac{(\pi)(d^2)(h)}{4} \quad (17)$$

$$d = h \quad (18)$$

$$V = \frac{(\pi)(d^3)}{4}$$

$$d = D_T \quad (19)$$

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}}$$

Donde:

d= Diámetro(m)

V= Volumen (m³)

h= Altura(m)

D_T= Diámetro total(m)

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{4(0,05m^3)}{\pi}} = 0,399m \quad (20)$$

$$D_a = 0,5(D_T)$$

$$D_a = 0,5(0,399m) = 0,199m \quad (21)$$

$$C = \frac{1}{3}(D_T)$$

$$C = \frac{1}{3}(0,399m) = 0,133m$$

$$W = \frac{1}{5}(D_a)$$

$$W = \frac{1}{5}(0,199m) = 0,039m \quad \text{Ec. 22-3}$$

$$D_d = \frac{2}{3}(D_a)$$

$$D_d = \frac{2}{3}(0,199m) = 0,132m \quad (23)$$

$$L = \frac{1}{9}(D_a) \quad (24)$$

$$L = \frac{1}{9}(0,199m) = 0,022m$$

$$J = \frac{1}{12}(D_T) \quad (25)$$

$$J = \frac{1}{12}(0,399m) = 0,033m$$

Según la norma API 650 tiene un estándar cubre los requisitos mínimos para diseño, donde menciona que el tanque no debe estar completamente lleno es por eso que se debe sobredimensionar con un 30%, evitando así pérdidas de materia prima.

$$H = 1,3(D_T) \quad (26)$$

$$H = 1,3(0,399m) = 0,518m$$

Cálculo del sistema de agitación

El sistema de agitación es utilizado para forzar de forma mecánica el movimiento constante de un fluido en el interior del tanque formando así una mezcla homogénea, evitando que el producto deseado se quemara o se adhiriera a las paredes del tanque. Se utilizan 3 tipos de agitadores en líquidos de poca a moderada viscosidad; entre ellas tenemos: Paletas, Turbinas y Hélices (Gavilánez y Hernández, 2018).

Cálculo del sistema de agitación

Para poder seleccionar la constante del tanque se debe determinar si el flujo es laminar, turbulento o de transición.

- Flujo laminar: $Re < 10$
- Flujo transición: $300 < Re < 10000$
- Flujo turbulento: $Re > 10000$ (Alejandra y Neri 2004).

Determinación del régimen de flujo

$$N_{Re} = \frac{(N)(D_a^2)(\rho)}{\mu} \quad (27)$$

Donde:

N= Velocidad de rotación (rps)

Da= Diámetro del agitador (m)

μ = Viscosidad del fluido(Pa.s)

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

$$N_{Re} = \frac{(2rps)(0,199m)^2 \left(\frac{1000,23kg}{m^3}\right)}{2,2 \times 10^{-3} \text{Pa.s}}$$

$$N_{Re} = \frac{(2rps)(0,199m)^2 \left(\frac{1000,23kg}{m^3}\right)}{2,2 \times 10^{-3} \text{Pa.s}}$$

$$N_{Re} = 36009,189$$

Para el cálculo de la Potencia se emplea la siguiente ecuación:

(28)

$$P = (KT)(N^3)(Da^5)(\rho)$$

Donde:

P= Potencia del agitador (kJ/s)

KT= Constante según el tipo de impulsor

N= Velocidad de rotación (rps)

Da= Diámetro de agitador (m)

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

Para considerar el diseño de acuerdo a diversas especificaciones. En el presente trabajo, se tomará el valor de KT igual a 5,75 dado a que es un flujo turbulento y se diseña en base a un disco de seis palas por el tipo de fluido manejado.

$$P = (5,75)(2rps)^3(0,199m)^5 \left(\frac{1000,23kg}{m^3}\right)$$

$$P = 14,358 \text{ Watt}$$

$$P = 0,014358KW = 0,0192Hp$$

Ecuaciones de diseño para el biorreactor o fermentador

Dimensionado del equipo

Considerando que se desea procesar un volumen de operación igual a 79 litros o 0,079m³, por cada carga de materia prima al equipo y utilizando la relación descrita por (Wkren et al., 1991, pp.400-506) para dimensionamiento de reactores mezclados

(29)

$$V = \frac{(\pi)(d^2)(h)}{4}$$

$$d = h$$

$$V = \frac{(\pi)(d^3)}{4}$$

$$d = D_T$$

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}}$$

Donde:

d= Diámetro(m)

V= Volumen (m^3)

h= Altura(m)

D_T = Diámetro total(m)

$$D_T = \sqrt[3]{\frac{4(0,079m^3)}{\pi}} = 0,465m \quad (31)$$

$$D_a = 0,5(D_T)$$

$$D_a = 0,5(0,465m) = 0,232m \quad (32)$$

$$C = \frac{1}{3}(D_T)$$

$$C = \frac{1}{3}(0,465m) = 0,155m \quad (33)$$

$$W = \frac{1}{5}(D_a) \quad (34)$$

$$W = \frac{1}{5}(0,232m) = 0,046m$$

$$D_d = \frac{2}{3}(D_a) \quad (35)$$

$$D_d = \frac{2}{3}(0,232m) = 0,154m$$

$$L = \frac{1}{9}(D_a) \quad (36)$$

$$L = \frac{1}{9}(0,232m) = 0,025m$$

$$J = \frac{1}{12}(D_T)$$

$$J = \frac{1}{12}(0,465m) = 0,038m$$

Según la norma API 650 tiene un estándar cubre los requisitos mínimos para diseño, fabricación, instalación, materiales e inspección de tanques cilíndricos verticales, no refrigerados, con techo abierto o cerrado, contruidos con chapas de acero soldadas (Garcia, 1987, p.195). Basándose en esta norma para los tanques el cual indica que se debe dejar una distancia o sobredimensionar con un 30% con el fin de evitar derrames, se realiza los cálculos para determinar la altura del mismo.

$$H = 1,3(D_T) \quad (37)$$

$$H = 1,3(0,465m) = 0,604m$$

Aplicación del factor de seguridad

$$h_{fs} = 30\%(D_T) \quad (38)$$

$$h_{fs} = 30\%(0,465m)$$

$$h_{fs} = 0,140m$$

$$h_r = D_T + h_{fs}$$

$$h_r = 0,465m + 0,140m$$

$$h_r = 0,605m \quad (39)$$

Determinación del volumen máximo del reactor

$$V_{max} = \pi * \left(\frac{D_T}{2}\right)^2 * h_r \quad (40)$$

$$V_{max} = \pi * \left(\frac{0,465m}{2}\right)^2 * 0,605m$$

$$V_{max} = 0,102m^3$$

Cámara de calefacción

Para el proceso de fermentación se necesita que el fermentador se conserve a una temperatura de 30°C por un lapso mayor a 12 horas. Para lograr mantener el interior del fermentador a dicha temperatura se requirió incorporar una chaqueta de calentamiento que recubra el contenido del fermentador para ello se necesita agua como fluido de transferencia de calor y una resistencia eléctrica para la fuente de calor.

Diámetro de la chaqueta de calentamiento

$$\begin{aligned}D_C &= D_T + 0,3 * D_T & (41) \\D_C &= 0,465m + 0,3 * 0,465m \\D_C &= 0,604m\end{aligned}$$

Espesor de la cámara de calentamiento

$$\begin{aligned}E_c &= \frac{D_C - D_T}{2} & (42) \\E_c &= \frac{0,604m - 0,465m}{2} \\E_c &= 0,070m\end{aligned}$$

Altura de la cámara de calentamiento

$$\begin{aligned}h_c &= h_r + E_c & (43) \\h_c &= 0,605m + 0,070m \\h_c &= 0,675m\end{aligned}$$

Cálculo del volumen total del reactor

$$\begin{aligned}V_t &= \pi * \left(\frac{D_C}{2}\right) * h_c & (44) \\V_t &= \pi * \left(\frac{0,604m}{2}\right)^2 * 0,675m \\V_t &= 0,193m^3\end{aligned}$$

Cálculo del volumen de la cámara de calentamiento

$$\begin{aligned}V_C &= V_t - V_{max} & (45) \\V_C &= 0,193m^3 - 0,102m^3 \\V_C &= 0,091m^3\end{aligned}$$

Balance de materia

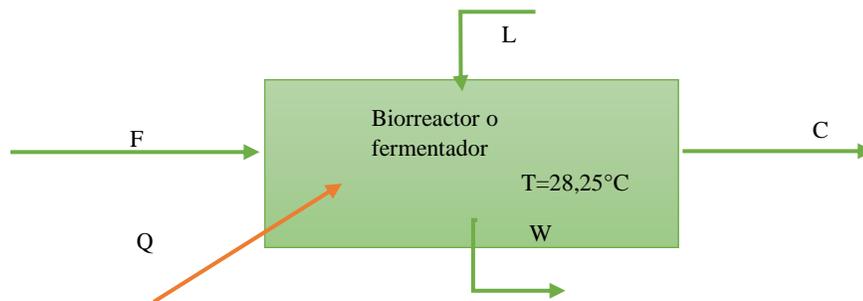
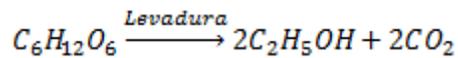


Figura 8: Flujos de materia y parámetros involucrados en los balances.

Fuente: Elaboración propia.



Masa de la levadura

La adición de la levadura (*Saccharomyces cerevisiae* Fermentis Safteq Blue Agave Yeast) se realiza según la especificación descrita en el empaque; 0,5g de levadura por litro de mosto.

Balance de masa

$$F + L = C + W \quad (46)$$

$$F + L - W = C$$

$$C = 22,131kg + 0,01195kg - 1,327kg$$

$$C = 20,815kg$$

Balance de energía

Determinación del régimen de flujo

(47)

$$N_{Re} = \frac{(N)(Da^2)(\rho)}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(3rps)(0,232m)^2(1000,23kg/m^3)}{2,2 \times 10^{-3} Pa \cdot s}$$

$$N_{Re} = 73413,244$$

Cálculo de la Potencia:

$$P = (KT)(N^3)(Da^5)(\rho) \quad (48)$$

Los criterios para considerar el diseño de acuerdo a diversas especificaciones. En el trabajo presente, se tomará el valor de KT igual a 1,7 dado a que es un flujo turbulento y se diseña en base a una paleta plana de dos palas por el tipo de fluido manejado.

$$P = (1,7)(3rps)^3(0,232m)^5\left(\frac{1000,23kg}{m^3}\right) \quad (49)$$

$$P = 30,85 \text{ Watt}$$

Cálculo de la eficiencia

$$\varepsilon = \frac{\left[\left((V_m - V_f) * {}^\circ GL_v \right) - (V_f * {}^\circ GL_f) \right]}{V_m * \%ART * 0,6475 * \rho}$$

$$\varepsilon = \frac{\left[\left((238933,08 - 11,95) * 10 \right) - (11,95 * 18) \right]}{23,9 * 16,3 * 0,6475 * 1000,22}$$

$$\varepsilon = 94,61\%$$

Donde:

V_m = volumen de mosto.

V_f = volumen de levadura

${}^\circ GL_v$ = Grado alcohólico

${}^\circ GL_f$ = contenido de alcohol de la levadura

ART = Total de azúcares reductores en el mosto.

Cálculo de la potencia consumida

$$\varepsilon = \frac{P}{P_c} * 100 \quad (50)$$

$$P_c = \frac{30,85 \text{ Watt}}{94,61} * 100$$

$$P_c = 32,607 \text{ Watt}$$

Determinación del calor consumido

$$Q_{ca} = Q_{pe}$$

Determinación del calor perdido

$$Q_{pe} = 2\pi kH \frac{(T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

$$Q_{pse} = 2\pi \left(\frac{15,1W}{Km} \right) (0,465m) \frac{(287 - 301)K}{\ln\left(\frac{0,233}{0,232}\right)}$$

$$Q_{ca} = Q_{pse} = 143601,868Watt$$

Cálculo de la energía total suministrada al equipo

$$E = Q_{pse} + P_c \quad (52)$$

$$E = (143601,868 + 32,607)Watt$$

$$E = 143634,475Watt = 143,634KW$$

Ecuaciones de diseño para la torre de destilación

Balance de masa

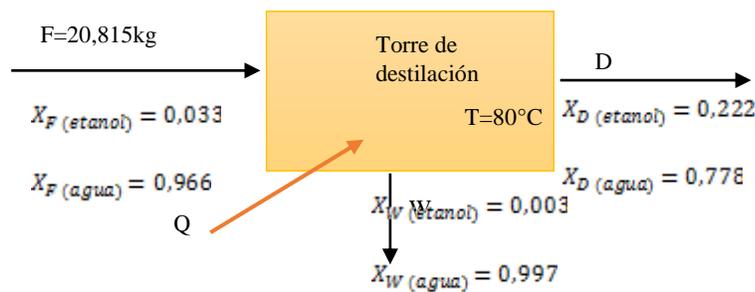


Figura 9: Flujos de materia y parámetros involucrados en los balances.
Fuente: Elaboración propia.

Balance Global:

$$F = W + D \quad (53)$$

$$20,815kg - W = D$$

$$D = 2,848kg$$

Balance parcial en el etanol:

$$FX_F = WX_W + DX_D \quad (54)$$

$$(20,815kg)(0,033) = W(0,003) + D(0,222)$$

$$0,686 = W(0,003) + (20,815 - W)(0,222)$$

$$W = 17,967kg$$

Balance de energía

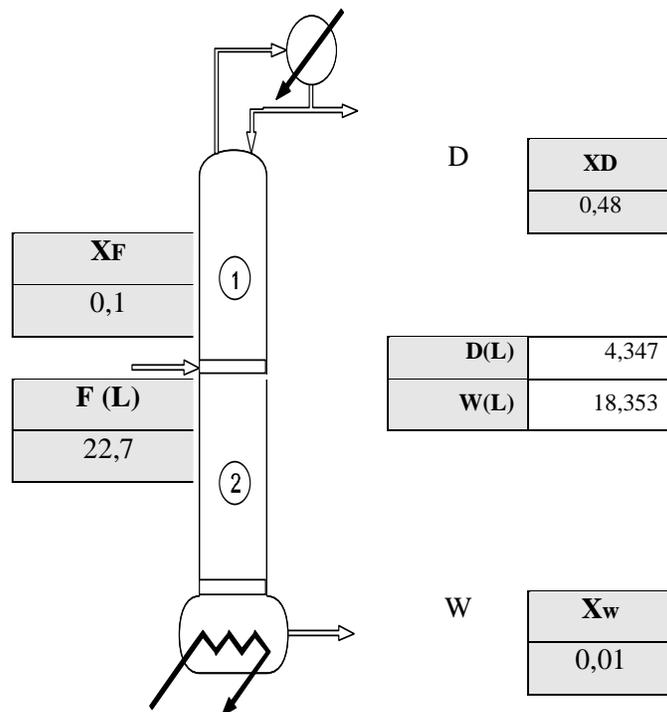


Figura 10: Flujos de materia y parámetros involucrados en los balances.
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de los volúmenes de etanol

$$F_{etanol} = F * \% \frac{V}{V_{etanol}} \quad (55)$$

$$F_{etanol} = 22,7 \text{ L} * \frac{10}{100}$$

$$F_{etanol} = 2,27 \text{ L}$$

$$D_{etanol} = D * \% \frac{V}{V_{etanol}}$$

$$D_{etanol} = 4,346 \text{ L} * \frac{48}{100}$$

$$D_{etanol} = 2,086 \text{ L}$$

$$W_{etanol} = W * \% \frac{V}{V_{etanol}}$$

$$W_{etanol} = 18,353 \text{ L} * \frac{1}{100}$$

$$W_{etanol} = 0,183 \text{ L}$$

Cálculo de los volúmenes de agua

$$F_{agua} = F - F_{etanol} \quad (58)$$

$$F_{agua} = (22,7 - 2,27) L$$

$$F_{agua} = 20,43L \quad (59)$$

$$D_{agua} = D - D_{etanol}$$

$$D_{agua} = (4,346 - 2,086) L \quad (60)$$

$$D_{agua} = 2,26 L$$

$$W_{agua} = W - W_{etanol}$$

$$W_{agua} = (18,353 - 0,183) L$$

$$W_{agua} = 18,170L$$

Cálculo de la masa de etanol en cada corriente

$$m_{etanol} = V_{etanol} * \rho_{etanol} \quad (61)$$

Alimentación:

$$m_{F_{etanol}} = F_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{F_{etanol}} = 2,27 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{F_{etanol}} = 1,791 kg$$

Destilado:

$$m_{D_{etanol}} = D_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{D_{etanol}} = 2,086 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{D_{etanol}} = 1,645 kg$$

Residuo:

$$m_{W_{etanol}} = W_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{W_{etanol}} = 0,183 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{W_{etanol}} = 0,144 kg$$

Cálculo de la masa de agua en cada corriente

$$m_{agua} = V_{agua} * \rho_{agua} \quad (62)$$

Alimentación:

$$m_{F_{agua}} = F_{agua} * \rho_{agua}$$
$$m_{F_{agua}} = 20,430L * 0,997 \frac{kg}{L}$$
$$m_{F_{agua}} = 20,368 kg$$

Destilado:

$$m_{D_{agua}} = D_{agua} * \rho_{agua}$$
$$m_{D_{agua}} = 2,26 L * 0,997 \frac{kg}{L}$$
$$m_{D_{agua}} = 2,253kg$$

Residuo:

$$m_{W_{agua}} = W_{agua} * \rho_{agua}$$
$$m_{W_{agua}} = 18,170 L * 0,997 \frac{kg}{L}$$
$$m_{W_{agua}} = 18,115 kg$$

Cálculo de la masa total en cada corriente

$$m_T = m_{etanol} + m_{agua} \quad (63)$$

Alimentación:

$$m_F = m_{F_{etanol}} + m_{F_{agua}}$$
$$m_F = 1,791 kg + 20,368 kg$$
$$m_F = 22,159 kg$$

Destilado:

$$m_D = m_{D_{etanol}} + m_{D_{agua}}$$
$$m_D = 1,645 kg + 2,253kg$$
$$m_D = 3,898 kg$$

Residuo:

$$m_W = m_{W_{etanol}} + m_{W_{agua}}$$

$$m_W = 0,144 \text{ kg} + 18,115 \text{ kg}$$

$$m_W = 18,259 \text{ kg}$$

Cálculo del número de moles de etanol en cada corriente

$$n_{\text{etanol}} = \frac{m_{\text{etanol}}}{M_{\text{etanol}}} \quad (64)$$

Alimentación:

$$n_{F_{\text{etanol}}} = \frac{m_{F_{\text{etanol}}}}{M_{\text{etanol}}}$$
$$n_{F_{\text{etanol}}} = \frac{1,791 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$
$$n_{F_{\text{etanol}}} = 38,875 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_{D_{\text{etanol}}} = \frac{m_{D_{\text{etanol}}}}{M_{\text{etanol}}}$$
$$n_{D_{\text{etanol}}} = \frac{1,645 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$
$$n_{D_{\text{etanol}}} = 35,706 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_{W_{\text{etanol}}} = \frac{m_{W_{\text{etanol}}}}{M_{\text{etanol}}}$$
$$n_{W_{\text{etanol}}} = \frac{0,144 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$
$$n_{W_{\text{etanol}}} = 3,125 \text{ mol}$$

Cálculo del número de moles de agua en cada corriente

$$n_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{M_{\text{agua}}} \quad (65)$$

Alimentación:

$$n_{F_{\text{agua}}} = \frac{m_{F_{\text{agua}}}}{M_{\text{agua}}}$$
$$n_{F_{\text{agua}}} = \frac{20,368 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{F_{agua}} = 1130,299 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_{D_{agua}} = \frac{m_{D_{agua}}}{M_{agua}}$$

$$n_{D_{agua}} = \frac{2,253 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{D_{agua}} = 125,027 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_{W_{agua}} = \frac{m_{W_{agua}}}{M_{agua}}$$

$$n_{W_{agua}} = \frac{18,115 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{W_{agua}} = 1005,271 \text{ mol}$$

Cálculo de las fracciones molares

$$X_{etanol} = \frac{n_{etanol}}{n_{etanol} + n_{agua}} \quad (66)$$

$$X_{agua} = 1 - X_{etanol}$$

Alimentación:

$$X_{F(etanol)} = \frac{n_{F etanol}}{n_{F etanol} + n_{F agua}}$$

$$X_{F(etanol)} = \frac{38,875 \text{ mol}}{38,875 \text{ mol} + 1130,299 \text{ mol}}$$

$$X_{F(etanol)} = 0,033$$

$$X_{F(agua)} = 1 - X_{F(etanol)}$$

$$X_{F(agua)} = 1 - 0,033$$

$$X_{F(agua)} = 0,966$$

Destilado:

$$X_{D(etanol)} = \frac{n_{D etanol}}{n_{D etanol} + n_{D agua}}$$

$$X_{D(etanol)} = \frac{35,706 \text{ mol}}{35,706 \text{ mol} + 125,027 \text{ mol}}$$

$$X_{D(etanol)} = 0,222$$

$$X_{D(agua)} = 1 - X_{D(etanol)}$$

$$X_{D(agua)} = 1 - 0,222$$

$$X_{D(agua)} = 0,778$$

Residuo:

$$X_{W(etanol)} = \frac{n_{W_{etanol}}}{n_{W_{etanol}} + n_{W_{agua}}}$$

$$X_{W(etanol)} = \frac{3,125 \text{ mol}}{3,125 \text{ mol} + 1005,271 \text{ mol}}$$

$$X_{W(etanol)} = 0,003$$

$$X_{W(agua)} = 1 - X_{W(etanol)}$$

$$X_{W(agua)} = 1 - 0,003$$

$$X_{W(agua)} = 0,997$$

Cálculo del número de moles totales en cada corriente

$$n_T = n_{etanol} + n_{agua} \quad (67)$$

Alimentación:

$$n_F = n_{F_{etanol}} + n_{F_{agua}}$$

$$n_F = 38,875 \text{ mol} + 1130,299 \text{ mol}$$

$$n_F = 1169,174 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_D = n_{D_{etanol}} + n_{D_{agua}}$$

$$n_D = 35,706 \text{ mol} + 125,027 \text{ mol}$$

$$n_D = 160,733 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_W = n_{W_{etanol}} + n_{W_{agua}}$$

$$n_W = 3,125 \text{ mol} + 1005,271 \text{ mol}$$

$$n_W = 1008,396 \text{ mol}$$

Número mínimo de platos teóricos por el método de McCabe-Thiele

Cuando la relación de reflujo es máxima $RR \rightarrow \infty$ las pendientes de las rectas de operación coinciden con la diagonal $X = Y$. De esta forma se calcula el número mínimo de etapas de equilibrio o platos teóricos ($N \rightarrow N_{min}$).

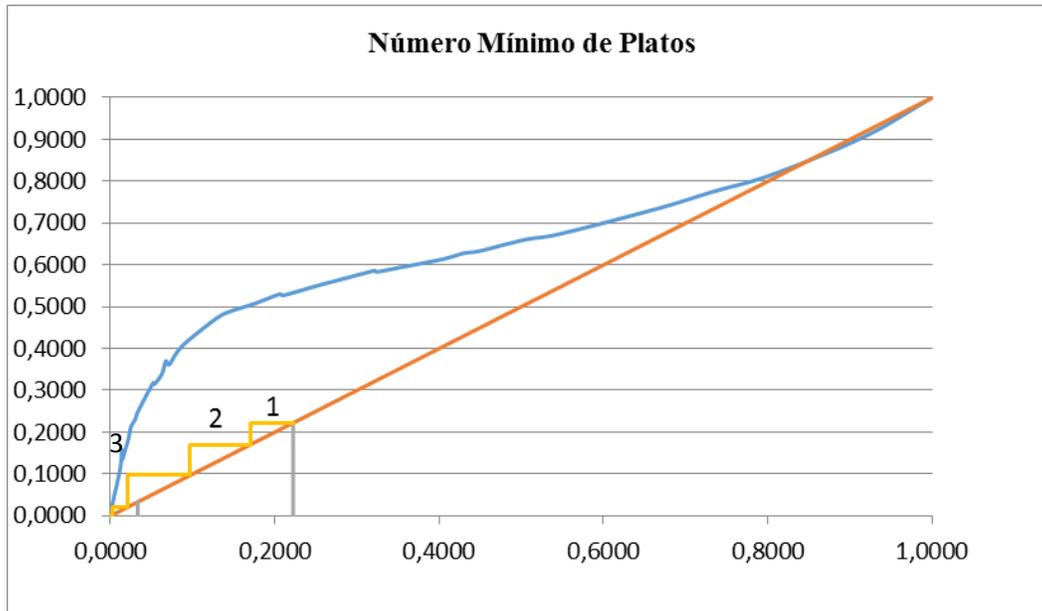


Figura 11: Dimensiones para el sistema de mezclado.
Fuente: (Uribe, 2013).

Cálculo de la cantidad de calor necesario para proporcionar a la mezcla

$$Q = (h_D - h_F) \quad (68)$$

$$Q = (C_{pMEZCLA}(T_f - T_i) - C_{pMEZCLA}(T_r - T_i))$$

Donde:

Q = Calor suministrado a la mezcla

$C_{pMEZCLA}$ = Capacidad calorífica de la mezcla etanol/agua

T_f = Temperatura del proceso

T_i = Temperatura inicial

T_r = Temperatura de referencia

$$Q = (C_{pMEZCLA}(80 - 25) - C_{pMEZCLA}(25 - 25))$$

$$Q = (C_{pMEZCLA}(80 - 25))$$

$$Q = 4,170KJ/kgK * (55K) \quad (69)$$

$$Q = \frac{229,363kJ}{kg} * \frac{4,541kg}{h}$$

$$Q = \frac{1041,537kJ}{h} = 0,289kW$$

$$C_{pMEZCLA} = \sum X_i C_{p_i}$$

$$C_{pMEZCLA} = X_{etanol} C_{p_{etanol}} + X_{agua} C_{p_{agua}}$$

$$C_{pMEZCLA} = 0,033 * 2,84 \frac{KJ}{kgK} + 0,966 * \frac{4,22KJ}{kgK}$$

$$C_{pMEZCLA} = 4,170KJ/kgK$$

Balance de masa global del proceso

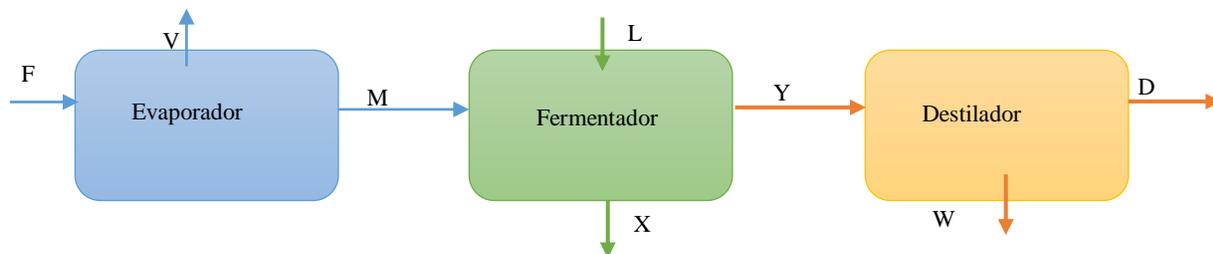


Figura 12: Flujos de materia en el balance global del proceso.
Fuente: Realización propia.

Balance global del proceso

$$E = S \quad (70)$$

$$F + L = V + X + W + D$$

$$28,56kg + 0,01195kg - 6,43kg - 1,327kg - 17,967 = D$$

$$D = 2,847$$

3. Consumo de energía del proceso

$$Q_{total} = Q_{Evaporador} + Q_{Fermentador} + Q_{Destilador} \quad (71)$$

$$Q_{total} = 0,00225kW + 143,634kW + 0,289kW$$

$$Q_{total} = 143,925kW = 192,928HP$$

Resultados

Caracterización de la materia prima

Tabla 9: Propiedades físicas del dulce de cabuya.

Parámetro	Valor
Densidad	1000,229kg/m ³
Viscosidad al 3,5%	0,0022Pa.s
pH	6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Propiedades químicas del dulce de cabuya.

Parámetro	Valor
Sólidos solubles totales	13,33°Brix

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Propiedades bromatológicas del dulce de cabuya.

Parámetro Valor	Dulce de cabuya natural	Dulce de cabuya concentrado
Humedad (%)	90,202	78,100
Ceniza (%)	1,212	1,829
Proteína (%)	0,715	0,536
Grasa (%)	2,3	0,48
Fibra (%)	0,295	0,03
ELN (%)	5,276	19,025

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Propiedades microbiológicas del dulce de cabuya.

Determinaciones	Método de análisis	Resultado
Coliformes totales (UFC/g)	Siembra en masa	100
Escherichia coli (UFC/g)	Siembra en masa	Ausencia
Mohos y Levaduras (UFC/g)	Siembra en masa	Ausencia

Fuente: AQMIC, 2021.

Los habitantes de Pujilí siguen el mismo método tradicional para la recolección del dulce de cabuya, sin embargo se muestran diferencias de grados brix en cada planta que se obtiene el dulce. Por lo tanto, las personas encargadas del proceso de obtención del dulce, mencionan que esta diferencia se debe a la madurez de la planta, la hora de recolección y la forma del raspado para que se de la exudación del jugo.

Se registró la medida de los grados brix como indicativo de calidad del dulce de cabuya debido a, que mayor sea el contenido de azúcares en la materia prima, mayor rendimiento se obtendrá en el proceso de obtención de alcohol. Además, se tomó datos de pH, con el fin de controlar este parámetro el cual es de suma importancia al momento de colocar la levadura, como se observa en la tabla 4-2, en la fermentación se trabaja en un rango de 5-6pH.

En la tabla 3-4 y tabla 4-4 se muestran los resultados de la evaluación químico bromatológico del dulce de cabuya natural y concentrada, donde se observa que no existe una variante significativa entre las dos muestras, además del análisis microbiológico en condiciones normales, en la zona de Pujilí, recolectada artesanalmente en el turno de medio día.

Tabla 13: Evaluación organoléptica del dulce de cabuya

Factores organolépticos	Resultados
Color	Ligeramente amarillo turbio
Olor	Característico a cabuya
Sabor	Dulce
Aspecto	Líquido

Fuente: Realización propia.

El dulce recién recolectado posee las características organolépticas que se muestran en la tabla 5- Siendo estas características de un dulce recién recolectado de una cabuya en buenas condiciones.

Diseño del proceso

Resultados obtenidos en el evaporador de simple efecto

Para realizar el diseño del proceso en el evaporador de simple efecto, con agitador, se efectuó las ecuaciones correspondientes de ingeniería obteniendo así las siguientes variables.

Tabla 14: Datos necesarios para el balance de masa en el evaporador.

Característica Composición	Entrada		Salida	
	Glucosa	Agua	Glucosa	Agua
°Brix	13,3	-	16,3	-
Número de moles	0,620	49,308	0,783	47,677
Fracción molar	0,0124	0,987	0,016	0,983
Capacidad calorífica (kJ/kgK)	4,212		4,208	

Fuente: Realización propia.

Tabla 15: Resultados del balance de masa en el evaporador.

(F) Alimentación	(L) Concentrado	(V) Evaporado
10,57kg/h	8,19kg/h	2,38kg/h

Fuente: Realización propia.

Tabla 16: Datos necesarios para el balance de energía en el evaporador.

Temperatura evaporización (°C)	Temperatura referencia (°C)	Temperatura alimentación (°C)	Calor latente de vaporización (kJ/kg)	Presión Saturación (Kpa)
91,1	25	19	2256,54	73,356

Fuente: Realización propia.

Tabla 17: Resultados del balance de energía en el evaporador.

Entalpía vaporización (kJ/kg)	Entalpía mezcla concentrado (kJ/kg)	Entalpía alimentación (kJ/kg)	Flujo másico del vapor saturado (kg/h)	Flujo de calor necesario en el evaporador (kJ/s)	Eficiencia (%)
2661,2	278,148	25,272	3,935	2,466	34,158

Fuente: Realización propia.

Tabla 18: Dimensiones para el sistema de mezclado en el evaporador.

Volumen (m^3)	Dt (m)	Da (m)	C (m)	W (m)	Dd (m)	L (m)	J (m)	H (m)
0,05	0,399	0,199	0,133	0,039	0,132	0,022	0,033	0,518

Fuente: Realización propia.

Tabla 19: Resultados del sistema de agitación.

Régimen de flujo	36009,189
Velocidad de rotación (rps)	2
Potencia (Watt)	14,358
Potencia (Kw)	0,014358
P, Hp	0,0192

Fuente: Realización propia.

El evaporador de simple efecto cuenta con un tanque de alimentación el cual ha sido diseñado para un volumen total de 50 litros (0,05 m³) con el fin de eliminar parcialmente la cantidad de agua presente en el dulce de cabuya y así aumentar su concentración (Benito, 2010,p.12). Menciona que para evitar una reducción en su coeficiente de transferencia de calor el cual puede ser provocado por la acumulación de producto en las paredes, el tanque debe ser diseñado de forma cilíndrica con fondo semiesférico evitando la formación de zonas muertas.

Se realizaron pruebas experimentales para la concentración del dulce de cabuya, se inició con un volumen de 28,56 litros de dulce y en el transcurso de 2,7 horas se pudo observar que la concentración iba aumentando conforme aumentaba la temperatura, se comenzó a 13,33 °Bx y se llegó a 16,33 °Bx.

Las variables que se controlan durante el proceso de evaporación son: Temperatura, pH, °Brix, que permitirán el correcto funcionamiento del equipo y obtener nuestro producto deseado.

Para el proceso de evaporación es necesario un intercambiador de calor, en este caso se optó por una resistencia eléctrica, y un tanque de doble fondo, debido a la concentración de azúcares que se desea llegar. Mediante un balance de energía se obtuvo que el calor necesario en el evaporador es de 2,466Kw.

La alimentación debe estar en constante agitación durante toda la operación, por lo tanto, se necesita implementar un sistema de agitación, diseñado de acuerdo a las propiedades del producto final, por otro lado, la implementación de este agitador tendrá un beneficio en el

coeficiente global de transferencia de calor a causa de las corrientes de convección que se da en el interior del evaporador. El flujo a trabajar es un flujo turbulento es por ello que se diseñó en base a eso un disco de seis palas que permite el movimiento dentro del evaporador. En la tabla 11-4 se muestran los resultados obtenidos para la potencia del agitador, dado que no existen rotores de 0.019HP se toma el valor de 0.5 HP para la especificación del equipo.

Resultados obtenidos en el biorreactor o fermentador

Para realizar el diseño del proceso en el fermentador, se efectuó las ecuaciones correspondientes de ingeniería obteniendo así las siguientes variables.

Tabla 20: Resultados del balance de masa en el fermentador.

(F) Alimentación	(C) Fermentado	(L) Levadura	(W)Residuo
22,131kg	20,815kg	0,01195kg	1,327kg

Fuente: Realización propia.

Tabla 21: Dimensiones para el sistema de mezclado en el fermentador.

Volumen (m^3)	Dt (m)	Da (m)	C (m)	W (m)	Dd (m)	L (m)	J (m)	H (m)
0,079	0,465	0,232	0,155	0,046	0,154	0,025	0,038	0,604

Fuente: Realización propia.

Tabla 22: Dimensiones para la cámara de calefacción.

Diámetro de la chaqueta calentamiento (m)	0,604
Espesor de la cámara calentamiento (m)	0,070
Altura de la cámara calentamiento (m)	0,675
Volumen total del reactor (m^3)	0,193
Volumen de la cámara calentamiento (m^3)	0,091

Fuente: Realización propia.

Tabla 23: Resultados del balance de energía en el fermentador.

Potencia consumida (Watt)	32,607
Energía total suministrada (kW)	143,634
Eficiencia (%)	94,61

Fuente: Realización propia.

Tabla 24: Resultados del sistema de agitación.

Régimen de flujo	73413,244
Velocidad de rotación (rps)	3
Potencia (Watt)	30,85
Potencia (Kw)	0,03085
P, Hp	0,0413

Fuente: Rrealización propia.

El fermentador o biorreactor dispone con un tanque de alimentación el cual ha sido diseñado para un volumen total de 79 litros (0,079 m³), el cual depende de la cantidad de materia prima que se suministre. Se realizaron pruebas experimentales para la fermentación, con el fin de identificar la levadura adecuada para este proceso, partiendo de la materia prima, se trabajo con la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) Fermentis Safteq Blue Aagave Yeast, la misma que contiene sus especificaciones, de la cantidad de levadura a añadir es de 0,5gr por litro de dulce, la temperatura de trabajo es de 27°C-30°C, en un tiempo de 360h y los grados brix necesarios para transformar en en alcohol es de 16-20°Brix.

Las variables que se controlan durante el proceso de fermentación son: Temperatura, pH, °Brix. Para el proceso es necesario suministrar calor con el fin de mantener la temperatura adecuada de fermentación, el mismo que es determinado mediante un balance de energía siendo este 32,607watt.

Es necesario tener una agitación las primeras horas de fermentación con el fin de homogenizar el mosto, por lo tanto, se necesita implementar un sistema de agitación, el cual es diseñado de acuerdo a las propiedades del flujo, al ser este un flujo turbulento se diseña en base a una paleta plana de dos palas que permite el movimiento dentro del fermentador. En la tabla 16-4 se muestran los resultados obtenidos para la pontencia del agitador, dado que no existen rotores de 0.0413HP se toma el valor de 0.5 HP para la especificación del equipo.

Resultados obtenidos en la torre de destilación

Tabla 25: Resultados del balance de masa en el destilador.

(F) Alimentación	(D) Destilado	(W) Residuo
20,815kg	2,848kg	17,967kg

Fuente: Rrealización propia.

Tabla 26: Cantidad de sustancia en cada corriente.

Volúmenes					
Etanol			Agua		
Alimentación	Residuo	Destilado	Alimentación	Residuo	Destilado
2,27L	0,18L	2,08L	20,43L	18,17L	2,26L
Masa					
Etanol			Agua		
Alimentación	Residuo	Destilado	Alimentación	Residuo	Destilado
1,79kg	0,144kg	1,64kg	20,36kg	18,11kg	2,25kg
Masa total					
Alimentación		Residuo		Destilado	
22,15kg		18,25kg		3,89kg	
Moles					
Etanol			Agua		
Alimentación	Residuo	Destilado	Alimentación	Residuo	Destilado
38,87mol	3,12mol	35,70mol	1130,29mol	1005,27mol	125,02mol
Fracción Molar					
Etanol			Agua		
Alimentación	Residuo	Destilado	Alimentación	Residuo	Destilado
0,033	0,003	0,222	0,966	0,997	0,778
Moles totales					
Alimentación		Residuo		Destilado	
1169,17mol		1008,39mol		160,73mol	

Fuente: Rrealización propia.

Tabla 27: Resultados del balance de energía en el destilador.

Número mínimo de platos	3
Calor suministrado a la mezcla(kW)	0,289
Capacidad calorífica mezcla (kj/kgK)	4,170

Fuente: Rrealización propia.

El destilador simple dispone con un tanque de alimentación, una columna de destilación, y un condensador. Se realizaron pruebas experimentales para la destilación, con el fin de determinar la cantidad de etanol que se produce, se trabajo a la temperatura de 78°C-80°C, en un tiempo de 5h, con una alimentación de 22,7L obteniendo 4,4L de etanol al 47%. La variable a controlar durante el proceso es la temperatura. Para el proceso es necesario suministrar calor con el fin de mantener la temperatura adecuada de destilación, el mismo que es determinado mediante un balance de energía siendo este 0,289kw. Finalmente se determino el número mínimo de platos teóricos por el método de McCabe-Thiele, el número mínimo de etapas es de 3.

Resultados obtenidos en el balance global del proceso

Tabla 28: Resultados del balance global del proceso.

Alimentación al evaporador (kg)	28,56
Evaporización en el evaporador(kg)	6,43
Levadura (kg)	0,01195
Residuo en el fermentador (kg)	1,32kg
Destilado (kg)	2,84kg
Residuo (kg)	17,96
Consumo de energía en el proceso (Kw)	143,92
Consumo de energía en el proceso (Hp)	192,92

Fuente: Realización propia.

Resultados obtenidos en la destilación

Tabla 21-4: Resultados obtenidos en la destilación.

Muestra	Tiempo de destilado	Grado Alcohólico	Temperatura destilado
16,3°Brix	5h	47%	80°C

Fuente: Realización propia.

Resultados de la encuesta del producto elaborado

Grado alcohólico

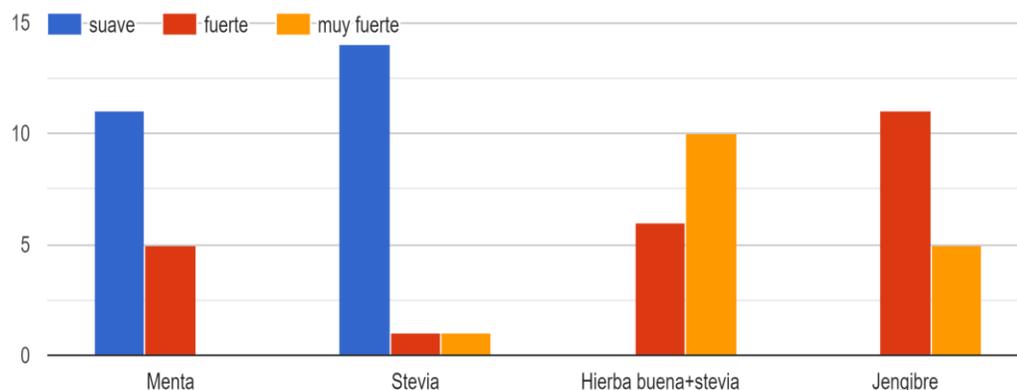


Gráfico 1: Resultados de la encuesta del grado alcohólico del producto elaborado

Fuente: Realización propia.

Grado de aceptabilidad

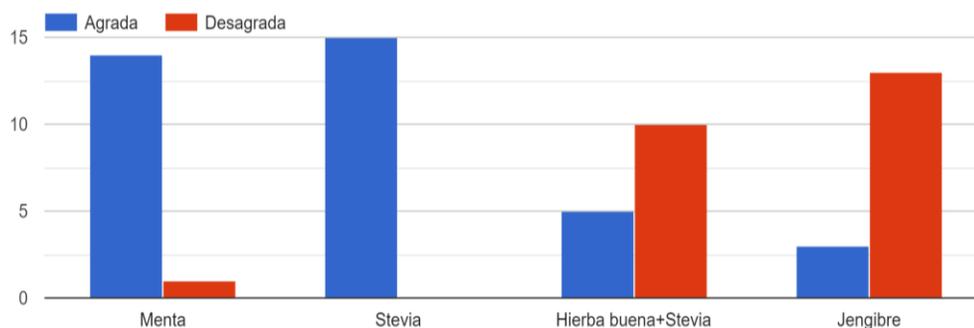


Gráfico 2: Resultados de la encuesta del grado de aceptabilidad del producto elaborado.
Fuente: Rrealización propia.

Para bajar el grado alcohólico del destilado, se utilizó agua destilada, con el fin de no afectar los aromas y sabores que pueden aportar el agua debido a sus sales disueltas. Posterior a ello se tomó como referencia los licores del tequila del mercado en relación a su grado alcohólico que varía entre 45% y 35%. Nuestro producto elaborado contenía 38°Gl y especias añadidas, de acuerdo a las pruebas organolépticas de las cuatro muestras de bebidas alcohólicas presentadas, la de stevia tuvo más aceptación con un 100%, la muestra de menta tiene una aceptabilidad de 93%, la de hierba buena más stevia un 33% y la de jengibre con un 20%.

Conclusiones

- Se diseñó un proceso industrial para la elaboración de una bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (*Agave americano*), el cual parte con la adquisición de la materia prima, seguidamente las operaciones adecuadas que incluyen; evaporación, fermentación y destilación simple, estos procesos cumplieron con su control de calidad en cada etapa y evidenciaron la fiabilidad del mismo.
- Dentro del análisis experimental se identificó las características físicas, químicas, microbiológicas, bromatológicas y organolépticas de la materia prima en su estado natural a 13,3°brix y en una concentración de 16,3°brix para la obtención de una bebida alcohólica, revelando así que el dulce de cabuya posee una humedad de 90,202% en el dulce natural y 78,100% en el concentrado, ceniza 1,212% en el natural y 1,829% en el concentrado, proteína

0,715% en el natural y 0,536% en el concentrado, grasa 2,3% en el natural y 0,48% en el concentrado, fibra 0,295% en el natural y 0,03% en el concentrado, ELN 5,276% en el natural y 19,025 en el concentrado, además los análisis microbiológicos los cuales dieron como resultado ausencia de *Escherichia coli*, mohos y levaduras, y 100 UFC/g en coliformes totales, valores que están dentro del rango permisible, finalmente el análisis organoléptico del dulce de cabuya cumple con las características de un dulce recién recolectado de una cabuya en buenas condiciones, por lo tanto, se considera apta para la fabricación de la bebida alcohólica.

- Las variables del proceso que fueron identificadas para el diseño de este proyecto son: temperatura la misma que tiene que llegar a ser 91,1°C en la operación de evaporización con el fin de eliminar parcialmente el agua presente en el dulce, en la fermentación a 28°C, un pH de 5 a 6 en el dulce esto significa que es ligeramente ácido, los grados brix del dulce, se encuentra entre 10 y 14 y en el concentrado de 16 a 18, el tiempo de fermentación alcohólica de 15 días, seguidamente la variable controlada en el proceso de destilación es la temperatura, la cual oscila en un rango de 78-80°C, debido a que la temperatura de ebullición del etanol está en los 78,37°C. Todos estos aspectos son controlados durante la fabricación de la bebida alcohólica y las operaciones unitarias fueron, evaporación, fermentación alcohólica y destilación simple.
- Se realizó el diseño ingenieril para el proceso industrial de la elaboración de la bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (*Agave americano*), al realizar el balance de masa se obtuvo un rendimiento de 10%, esto se debe a las pérdidas que existe en el proceso, éstas se encuentran en la evaporación y al finalizar la fermentación alcohólica, además el °Gl que ingreso al destilador fue de 10%, el cual no favorece al proceso de destilación, esto se debe a las variables manejadas en el proceso de fermentación, por lo tanto, el diseño se podría implementar si estas variables de fermentación fueran controladas con el fin de obtener un °Gl más elevado. Las dimensiones para el tanque de evaporación el mismo que se calculó a partir del volumen de la materia prima disponible: altura del fluido 0.518m; diámetro tanque 0.399m, volumen 0.05 m³, cuenta con un agitador de disco de seis palas que homogenizará la mezcla durante el proceso de evaporación, las dimensiones para el agitador son; diámetro del agitador 0.199m, altura del agitador desde el fondo del tanque 0.133m, ancho de la paleta 0,039m, ancho de la placa deflectora 0,033m y una potencia de 0,0192Hp. Para el fermentador las medidas del tanque son: altura del fluido 0.604m; diámetro tanque 0.465m,

volumen 0.079 m³, cuenta con un agitador paleta plana de dos palas que homogenizará la mezcla cada 8 horas, las dimensiones para el agitador son; diámetro del agitador 0.232m, altura del agitador desde el fondo del tanque 0.155m, ancho de la paleta 0,046m, ancho de la placa deflectora 0,038m y una potencia de 0,0413Hp. Finalmente se calculó el consumo de energía en todo el proceso, teniendo un valor 143,92Kw, esto significa que se necesitara un generador de vapor o caldera de 192,92HPB, la cual se encargara de distribuir el vapor necesario para el proceso, mediante un diagrama de tuberías e instrumentación o P&ID y un diagrama de Flujo de Proceso (PFD).

Referencias

1. ALBACETE, T. (2015). "Manual de Instrucciones." España.
2. ALEJANDRA, MAYRA, AND HERAS NERIS. 2004. "Diseño de Tanque de agitación."
3. AMBULUDI, M. (2014). "Implementación de Un Destilador Simple Para La Obtención de Etanola a Partir Del Penco Azul (Agave Americana) Para La Planta de Alimentos Del Campus Juan Lunardi Paute." P.34in.Cuenca.
4. BENITO, O. (2010). "ESAACLE." Universidad Autónoma de Barcelona 12.
5. BONIFÁZ, G. (2018). "El Agave." Allpa, La Voz de La Tierra. Retrieved (<https://www.allpa.org/el-agave/>).
6. BOWEN, S. (2015). "Divided Spirits. Tequila, Mezcal and the Politics of Production." P. 35 in. Oakland.
7. BRITO, H. (2017). "Texto Básico de Operaciones Unitarias I." Pp. 39–50 in. Riobamba.
8. BUITRAGO, et al.,. 2016. "Elaboración de Vinos, Otras Bebidas Alcohólicas, Aguas, Cafés e Infusiones: UF0848." Pp. 252–56 in. Antequera, Málaga, Spain.
9. CANFORT LABORATORIO Y EDUCACIÓN SUPPLIES CO., LTD. (2019). "Refractómetro Manual Brix de Metal Con Atc, 0-10%." Retrieved (<http://www.canfortlab.com/387-pp387.html>).
10. CARRILLO, L. (2007). "Los Destilados de Agave En México y Su Denominación de Origen." Pp. 41–49 in.
11. CODIGO, MANUAL D. E. INSTRUCCIONES. (2019). "MANUAL USUARIO Viscosímetros Viscosimeters USER MANUAL." 2019:1–124.

12. CRT,(2019). “Proceso de Elaboración de Tequila.” Consejo Regulador Del Tequila. Retrieved (<https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>).
13. DIAZ, J. (2016). “Fermentadores Industriales.” CETOTEC. Retrieved (<https://www.cetotec.com/es/tecnologia-de-vinagre/fermentadores-de-vinagre-componentes/fermentador-de-vinagre/fermentador-industrial/>).
14. DIGITAL, M. (2020). “MULTIMEDIOS.” México. Retrieved (<https://www.milenio.com/estados/tequila-y-su-origen-por-que-solo-se-puede-producir-en-mexico>).
15. FERNÁNDEZ, M. (2012). “Plantas y Frutos Medicinales.” Retrieved (<http://fernandezsendin.blogspot.com/2012/07/la-carqueixa-plantamedicinalvirtudes-y.html%0D>).
16. GARCIA, J. 1987. “Tanques De Almacenamiento De Agua.” Revista IMCYC 25(195).
17. GAVILÁNEZ, NANDY, AND ANGELA HERNÁNDEZ. 2018. “escuela superior politécnica de chimborazo.” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
18. GOKEL, G. (2011). “Refractómetro – Medición Brix En La Industria de Bebidas y Zumos.” A. Kruss Optronic 1:3.
19. GONZÁLES, C. (2014). Caracterización Del Valor Nutricional de Alimentos. Montevideo, Uruguay.
20. GRACÍA,et al. (2013). “Agave Kavandivi (Agavaceae: Group Striatae), a New Species from Oaxaca, Mexico.” Revista Mexicana de Biodiversidad 84(04):2–6.
21. HERAS,A. (2004). “Diseño de Tanque de Agitación.”
22. INKANATURAL. (2014). “Agave: Propiedades y Usos Tradicionales.” Inkanatura World Peru Export SAC. Retrieved (<https://www.inkanatural.com/es/arti.asp?ref=agave>).
23. JULIA, LIC, AND MUÑOZ DE COTE. 2010. “Las Bebidas Alcohólicas En La Historia de La Humanidad.” 42–52.
24. JURADO, S. (2009). “Estudio de La Cadena Agroindustrial de La Cabuya En La Producción de Miel y Licor de Cabuya.”
25. KLAGES, F. (1968). “Tratado de Química Organica. Tomo II.” P. 790 in. Alemania.

26. LÓPEZ, L.(2013). “ELABORACIÓN, CONTROL DE CALIDAD Y EVALUACION DE LA ACTIVIDAD ANTIDIABÉTICA DE LA MIEL DE AGAVE (Agave Americana L.).”
27. LOPEZ, M. (2008). “El Agave.” Departamento de Investigación UNACH. Retrieved (<http://www.agave.org.mx/>).
28. MORA, D. 2019. “Las Historias Que Esconde La ‘Planta de Las Mil Maravillas.’” La Hora 1. Retrieved (<https://www.lahora.com.ec/noticia/1102266373/las-historias-que-esconde-la-planta-de-las-mil-maravillas>).
29. MURIÁ, J. 2016. “El Famoso Tequila.” Editorial Miguel Ángel Porrúa. (2a. ed.):15–21.
30. Naturvegan Ecologico S.L. 2014. “Stevia, Propiedades Medicinales y Beneficios de Su Consumo.” EcoAgricultor. Retrieved (<https://www.ecoagricultor.com/la-stevia-y-sus-propiedades/>).
31. OKDIARIO. (2016). “Licor de Menta Casero.” Retrieved (<https://okdiario.com/recetas/licor-menta-casero-2519910>).
32. QUISHPE, T. (2020). “SOBRE COMO INICIAMOS MISHKY HUARMY.” Mishky Huarmy, SAVIA DE AGAVE CONCENTRADA 1. Retrieved (<http://www.mishkyhuarmy.com/?tag=agave>).
33. RAPIDO, I. 2016. “Chaguarmishqui Tiene Su Truco.” Ultimas Noticias 1. Retrieved (<https://www.ultimasnoticias.ec/noticias/31604-chaguarmishqui-dulce-tradicion-sierra.html>).
34. SAUZA, J. (1873). “Casa Sauza.” México. Retrieved (<https://www.casasauza.com/fabricacion-tequila>).
35. TÉCNICA, NORMA. 1992. “DESCRIPTORES: Bebidas Espirituosas, Alcoholes, Aguardientes, Licores, Fermentación, Destilación, Maceración, Definiciones. -1- 1992-018.” 1–11.
36. TORRELAVEGA. (2015). “Cálculo de La Densidad.” 39–43.
37. URIBE, V. (2013). “Diseño y Cálculo de Un Agitador de Fluidos.”
38. VÁZQUEZ, et al. (2007). “Residues, Alcoholic Fermentation: An Option for Renewable Energy Production from Agricultural.” Scielo 8(ISSN 1405-7743):2–4.

39. VEREMA. (2012). “Blog de Licores y Destilados.” Retrieved (<https://www.verema.com/blog/licores-destilados/1022979-cocteles-alcohol-recetas-mas-populares-faciles-hacer>).
40. WILLIAMS, I. (2015). “Tequila. A Global History.” Pp. 60–65 in. Londres.
41. WKREN, L. (1991). “Operaciones Unitarias En Ingenieria Quimica.” Pp. 400–506 in Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica. Madrid.

© 2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).