

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1 Etanol

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. (Garcia & Garcia, 2010)

Actualmente la producción de bioetanol a partir de cultivos ricos en sacarosa y almidón registra un desarrollo sin precedentes. Y es que el producto presenta claras ventajas: es limpio y renovable; ayuda a reducir las emisiones de carbono y permite conservar las reservas de combustibles fósiles; es barato cuando se produce de forma eficiente y es versátil. (Garcia & Garcia, 2010)

El bioetanol de camote es un producto químico obtenido a partir de la hidrólisis o sacarificación del almidón para obtener azúcares simples fermentables, posteriormente pasan a la etapa de fermentación y destilación. (Garcia & Garcia, 2010)

Químicamente se lo conoce como etanol o alcohol etílico, su fórmula química: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. Es un líquido incoloro e inflamable, con sabor a quemado y olor agradable. (Siliceo, 2014)

Según (Siliceo, 2014), el bioetanol es utilizado principalmente como combustible en mezcla con gasolina, aunque tiene otras aplicaciones como las siguientes:

- En bebidas fermentadas para el consumo humano, vinos, agua ardiente, vodka, ron, brandy.
- En la industria, como disolución de nitrocelulosa, disolvente de colorante en industrias alimenticias y textil, disolventes de resina, jabón, aceites y ceras, para la fabricación de ácido acético, vinagre y acetaldehído.
- El etanol, también es utilizado como desinfectante y antiséptico, porque destruye los microorganismos presentes en el área de contacto. En los últimos años, debido a la pandemia, un gran porcentaje de etanol fue utilizado para la elaboración de geles y desinfectante, utilizados para evitar el contagio.

En la tabla I-1, se detallan las propiedades físicas y químicas del bioetanol.

Tabla I-1: Propiedades físicas y químicas del bioetanol

Propiedades físicas y químicas del bioetanol	
Apariencia	Líquido claro
Olor	Alcohol concentrado
Gravedad específica (20 °C)	0,78 g/cm ³
Punto de ebullición, (1 atm)	78 °C
Densidad relativa del vapor	1,6 (Aire = 1)
Solubilidad en agua	Miscible en agua
pH	7,0
Temperatura de auto ignición	363 °C
Límite inferior de inflamabilidad	3,5 (% Vol. en aire)
Límite superior de inflamabilidad	19 (% Vol. en aire)
Punto de fusión	-117 °C

Fuente: Quimipac, 2020

1.2 Camote

Esta planta tiene origen en la selva de Perú, en Centroamérica y México, entre las variedades más consumidas se encuentra el camote blanco, amarillo y morado.

El camote (*Ipomoea batatas L.*) es un tubérculo que se cultiva alrededor del mundo con una producción mundial de 150 millones de toneladas. Es un cultivo de fácil propagación y pocos requerimientos nutricionales por lo que sus costos de producción son bajos. (Vidal, Zaucedo, & Ramos, 2018)

A pesar de su alta productividad y bajos costos de producción, su siembra es bastante rústica, pues se le maneja en el campo de forma natural. Tiene múltiples aplicaciones, en cosecha se utiliza toda la planta ya sea como alimento, forraje, medio de propagación o como materia prima súper barata para la industria. (Vidal, Zaucedo, & Ramos, 2018)

1.2.1 Taxonomía

El camote (*Ipomoea batatas L.*) pertenece a la clase Magnoliopsida, familia Convolvulaceae, género *Ipomoea*. En la tabla I-2, se detalla la taxonomía del camote.

Tabla I-2: Taxonomía del camote

Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheophytae
Sub – División	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sub – Clase	dicotyledoneae
Grado evolutivo	Metachlamydeae
Grado de Ordenes	Tetraciclicos
Orden	Polemoniales
Familia	Convolvulaceae
Nombre científico	<i>Ipomoea batatas (L.) Lam.</i>
Nombre común	Camote

Fuente: Herbario Universitario UAJMS, 2021

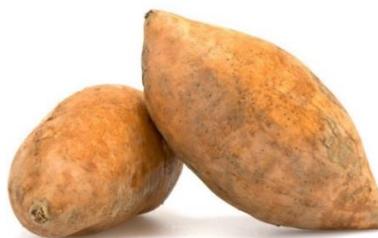
1.2.2 Descripción morfológica

El camote (*Ipomoea batatas L.*) es una planta de consistencia herbácea, porte rastrero y vivaz (Rios & Zelada, 2017). A continuación, se realiza la descripción morfológica del camote:

1.2.2.1 Sistema radicular

La raíz es la parte más importante de la planta, ya que constituye el objeto principal del cultivo. Las raíces son abundantes y ramificadas, produciendo tubérculos de formas y colores variados (según variedad), de carne excelente, azucarada, perfumada y rica en almidón, con un elevado contenido de caroteno y vitamina C, y una proporción apreciable de proteínas. (Rios & Zelada, 2017)

En la figura 1-1, se observa la forma del camote, color y su peso puede variar desde los 200-300 gramos hasta los 6 Kg.



Fuente: Rios & Zelada, 2017

Figura 1-1 Camote

1.2.2.2 Tallo

También llamado rama, de longitud variable (de 10 cm a 6 cm), es cilíndrico (calibre de 4 mm) y rastrero. Puede ser glabro (sin pelos) o pubescente (veloso). El color varía entre verde, morado o combinación de ambos. (Humacata, 2014)

1.2.2.3 Hojas

Son muy numerosas, simples, alternas, insertadas aisladamente en el tallo, sin vaina, con peciolo largo de hasta 20 cm, coloración y vellosoidad semejantes al tallo. Limbo ligeramente muy desarrollado y tiene una forma acorazonada (aunque hay variedades con hojas enteras, hendidas y muy lobuladas). (Humacata, 2014)

1.2.2.4 Flores

Se agrupan en una inflorescencia del tipo de cima bípara, con raquis de hasta 20 cm que se sitúan en la axila de una hoja con 4 centímetros de diámetro por cinco de largo, incluido el pedúnculo floral; el cáliz posee cinco sépalos separados, y la corola cinco pétalos soldados, con figura embudiforme y coloración violeta o blanca; el androceo lo constituyen cinco estambres y el gineceo un pistilo bicarpelar. (Humacata, 2014)

1.2.2.5 Fruto

Es una pequeña capsula redondeada de tamaño inferior a un centímetro, en cuyo interior se alojan de una a cuatro pequeñas semillas redondeadas de color pardo a negro. Mil semillas pesan de 20 a 25 gramos. (Humacata, 2014)

1.2.3 Variedades

En la actualidad, al describir un cultivar se toma en cuenta el carácter de la pulpa, húmeda o seca (moist o drytype), aclarando que estos términos se refieren al ablandamiento de los camotes cuando se cocinan, como consecuencia del desdoblamiento de los almidones en maltosa, (Folquer, 1978). De igual manera, Folquer (1978), menciona que según este factor y el del color de la pulpa, la siguiente es la agrupación de las variedades con mayor difusión mundial:

- a) Tipo seco:
- Pulpa blanca o cremosa.
 - Pulpa amarilla.
 - Pulpa morada.
- b) Tipo húmedo:
- Pulpa anaranjada (con alto contenido en carotenoides).
 - Pulpa amarilla.

1.2.4 Composición química

El camote es un alimento de alta energía, sus raíces tienen un contenido de carbohidratos totales de 25% a 30% de los cuales el 98% es considerado fácilmente digestible. El camote es rico en carbohidratos y vitamina A y puede producir más energía comestible por hectárea por día que el trigo, arroz o yuca. Tiene una gran diversidad de usos que incluyen el consumo de la raíz fresca, o de las hojas procesadas como forraje como así también del tubérculo; se puede producir: almidón, harina y alcohol. (Vidal, Zaucedo, & Ramos, 2018)

La composición química que se detalla en la tabla I-3, puede variar de acuerdo con las características genéticas del cultivar, sistema de producción agrícola seleccionado (densidad de plantas, características del suelo), condiciones climáticas y prácticas de manejo agronómico.

Tabla I-3: Composición química del camote (*Ipomoea batatas L.*) en su estado fresco

Composición química (g/100 g)	Valor promedio	Composición química (g/100 g)	Valor promedio
Humedad	71,61 ± 0,03	Almidón	71,89 ± 0,06
Materia seca	28,39 ± 0,02	Azúcares totales	14,83 ± 0,02
Cenizas totales	1,53 ± 0,01	Azúcares reductores	9,88 ± 0,02
Grasas	1,02 ± 0,01	Fibra dietaría	6,19 ± 0,01
Proteínas	4,13 ± 0,01	Taninos	0,41 ± 0,01

Fuente: Garcia , Perez, Garcia, & Madriz, 2016

1.3 Almidón

El almidón es una mezcla de dos polímeros, amilosa y amilopectina, cuya proporción relativa en cualquier almidón, así como el peso molecular específico y el tamaño de los gránulos, determinan sus propiedades fisicoquímicas y su potencialidad de aprovechamiento en ciertos procesos industriales. (Martinez, 2007)

1.3.1 Estructura química del almidón

El almidón está compuesto esencialmente de D-glucosa, aunque puede contener otros constituyentes en bajos niveles como los lípidos de 0,5 a 1%, bajos niveles de minerales como fósforo y nitrógeno e inclusive trazas de proteínas, dependiendo de la fuente botánica usada para su extracción.

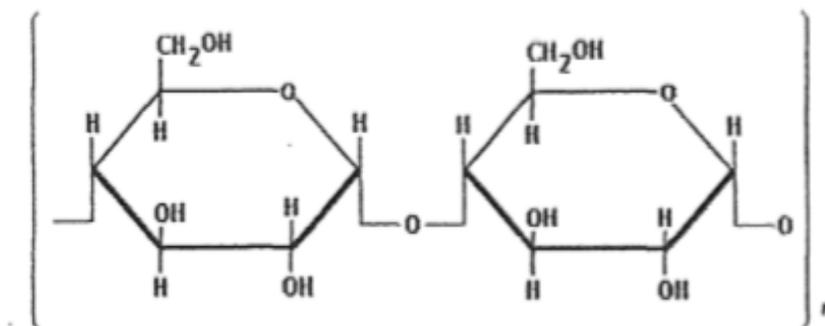
Químicamente el almidón está compuesto por dos polímeros: amilosa, un polímero considerado esencialmente lineal, y amilopectina, la cual es altamente ramificada (Hoseney, 1998). Ambos polímeros presentan diferencias en sus propiedades estructurales y funcionales.

La mayoría de los almidones están compuestos de 25% de amilosa y 75% de amilopectina, sin embargo, en almidones modificados genéticamente la proporción de amilopectina puede alcanzar hasta 99% con bajo contenido de amilosa o denominados cerosos y en almidones de alto contenido de amilosa entre 50 y 70%. (Conde, 2003)

1.3.2 Amilosa

La amilosa es considerada como un polímero lineal, adquiere una forma helicoidal formada por moléculas de glucosa unidas por enlaces α -(1,4), aunque se ha reportado un bajo grado de ramificación y cadenas de poca longitud unidas a la cadena central por enlaces α -(1,6). (Hoseney, 1998)

Las moléculas de amilosa contienen, en promedio de 500 a 6000 unidades de D-glucosa repartidas en un número de cadenas que va de 1 a 20. Cada cadena presenta un grado de polimerización (GP) promedio de 500 siendo GP el número de unidades de glucosa que se encuentran unidas en una cadena. (McAllister, 1979). En la figura 1-2, se muestra la estructura química de la amilosa.

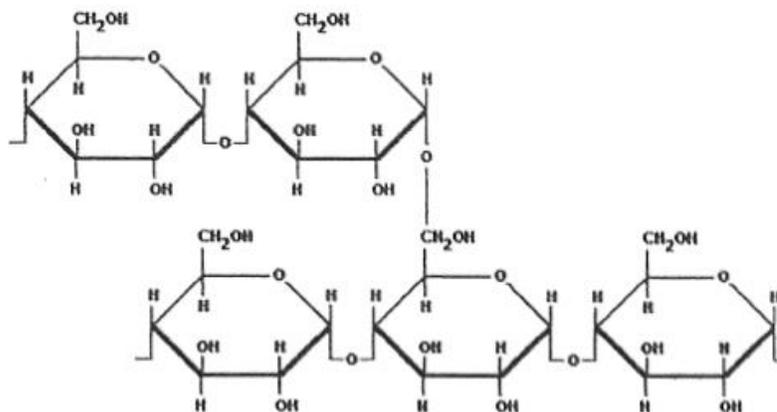


Fuente: (Martinez, 2007).

Figura 1-2 Estructura química de la amilosa.

1.3.3 Amilopectina

La amilopectina (figura 1-3) es el componente principal en la mayoría de los almidones, alcanzando en ciertos casos niveles de hasta 98-99%. Consiste de unidades de D-glucosa unidas por enlaces α -(1,6), presentando un grado de ramificación localizadas cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa y estas cadenas laterales. (Hoseney, 1998).



Fuente: Martinez, 2007

Figura 1-3 Estructura química de la amilopectina.

1.3.4 Temperatura de gelatinización de almidones de tubérculos

Los almidones nativos de las diferentes especies de vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales estarán influenciadas por sus estructuras granular y molecular. Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas:

gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento y absorción de agua. (Hernandez, Torrico, Chel, & Betancur, 2008)

Los gránulos de almidón se encuentran en un sistema polimérico semicristalino, donde la cristalinidad varía de 15 a 45%, y es atribuida a las cadenas cortas lineales de la amilopectina, que forman dobles hélices organizadas en una estructura cristalina tridimensional. Durante el proceso de gelatinización, el orden molecular dentro de los gránulos es destruido gradual e irreversiblemente, por esto la temperatura de gelatinización es característica para cada tipo de almidón y depende de la transición vítrea de la fracción amorfa del almidón. (Hernandez, Torrico, Chel, & Betancur, 2008)

En la tabla I-4, se observan las temperaturas de gelatinización, publicadas en un trabajo de investigación caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. (Hernandez, Torrico, Chel, & Betancur, 2008)

Tabla I-4: Temperatura de gelatinización de almidones de distintos tubérculos

Almidones	T_i (°C) (Temperatura de inicial)	T_p (°C) (Temperatura de pico)	T_f (°C) (Temperatura de final)
Makal	72,5	78,4	84,0
Camote	55,2	61,3	68,2
Yuca	57,8	65,2	75,3
Sagú	62,2	74,9	89,2

Fuente: Hernandez, Torrico, Chel, & Betancur, 2008

1.4 Hidrólisis del almidón

Se conoce como hidrólisis del almidón a la transformación del mismo en compuestos más livianos como dextrinas y azúcares. (Rios & Zelada, 2017)

Industrialmente la hidrólisis se realiza por métodos enzimáticos o con soluciones de ácidos, tales como ácido clorhídrico o sulfúrico; y se aplica calor para facilitar el rompimiento de los enlaces glucosídicos. (Rios & Zelada, 2017)

Un factor que afecta el grado de hidrólisis de los diferentes tipos de almidones es el tamaño promedio de los gránulos de almidón. Se ha comprobado que los gránulos de

menor tamaño se hidratan con mayor rapidez que los gránulos de mayor tamaño, ya que estos presentan una mayor superficie de contacto relativa. (Rios & Zelada, 2017).

1.4.1 Hidrólisis ácida del almidón

En 1811, Kirchoff fue el primero en obtener un subtítulo del azúcar a través de la hidrólisis ácida del almidón. Desde entonces este proceso ha sido modificado y mejorado para producir jarabes, glucosa cristalizada y otros productos de gran valor comercial (Rios & Zelada, 2017). La química de este proceso se representa por la siguiente ecuación (1-1) reacción:



El almidón sometido a hidrólisis ácida, ya sea con ácido clorhídrico (comúnmente utilizado) o ácido sulfúrico, sufre una serie de modificaciones, en donde las regiones amorfas asociadas con moléculas de amilopectina, son más susceptibles a la degradación que las regiones cristalinas. (Rios & Zelada, 2017)

Los enlaces α -(1,4), tanto de la amilosa como de la amilopectina, son menos estables al ataque del ácido que los enlaces α -(1,6). El rompimiento de los enlaces no ocurre al azar, ya que, al realizar la hidrólisis ácida, el primer producto en aparecer es la D-glucosa, seguida de disacáridos y trisacáridos. Esto se debe a que los enlaces terminales de las moléculas son rápidamente hidrolizados, y por tanto aparece inicialmente la glucosa. El porcentaje de degradación depende de la concentración del ácido, de la temperatura y del tiempo de hidrólisis. (Rios & Zelada, 2017)

La hidrólisis ácida del almidón a glucosa, es una técnica que tiene muchas desventajas, tales como: formación de productos no deseables, flexibilidad muy pobre (el producto final sólo se puede modificar cambiando el grado de hidrólisis), por último, es necesario que el equipo resista al ácido, y a las temperaturas requeridas durante este proceso. Dentro de los productos de degradación, además de la glucosa; se tiene hidroximetilfurfural, ácido levulónico y ácido fórmico. (Rios & Zelada, 2017)

1.4.2 Hidrólisis enzimática del almidón

La hidrólisis enzimática es el proceso que tiene por objeto la transformación del almidón de las materias primas amiláceas en azúcares. Dicha transformación es catalizada por enzimas α -amilasa y glucoamilasa; cuya función es romper las moléculas de almidón, catalizando la ruptura de enlaces α -(1,4) y α -(1,6) respectivamente.

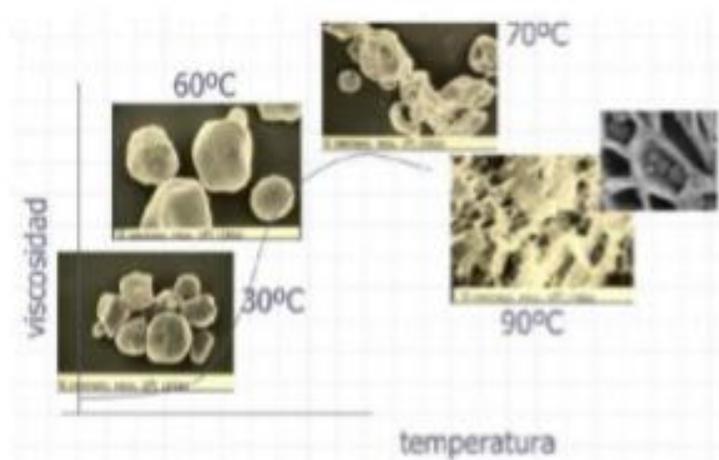
Los pasos o etapas para la hidrólisis del almidón son: gelatinización, licuefacción y sacarificación. Para las dos últimas etapas es necesario usar una enzima específica que se encarga de las rupturas parciales y totales de los enlaces involucrados en la cadena de almidón. (Rios & Zelada, 2017)

A continuación, se presenta el proceso de hidrólisis enzimática del almidón:

1.4.2.1 Gelatinización

La gelatinización del almidón es el colapso (ruptura) del orden molecular, al entrar en contacto con el agua fría, se hidrata; y al aplicarle calor, el gránulo empieza a hincharse, hasta que en cierta temperatura la estructura del gránulo se altera, manifestado por cambios irreversibles del gránulo de almidón en las propiedades tales como la fusión de las zonas cristalinas del gránulo, pérdida de birrefringencia (se pierde el alto grado de orden molecular dentro del gránulo) y solubilización de las moléculas que conforman el almidón (ver figura 1-4).

El grado de gelatinización es un parámetro importante que se ve afectado por la temperatura, la presión, la concentración de almidón y el tiempo de tratamiento. La viscosidad suele ser menor después del tratamiento con calor, debido a que los gránulos de almidón se mantienen intactos en su mayoría y la amilosa solubiliza muy pobremente. (Rios & Zelada, 2017)



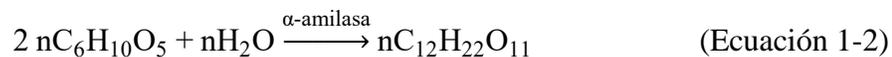
Fuente: Rios & Zelada, 2017

Figura 1-4 Cinética de la verificación de la gelatinización del almidón

1.4.2.2 Licuefacción

Es el primer paso en la producción de glucosa, se efectúa por medio de la actividad de una enzima α -amilasa, esta degrada la amilosa en maltosa y pequeños compuestos de glucosa, transformando así una sustancia inicialmente viscosa (almidón) en una sustancia dulce y menos viscosa. (Zambrano, 2013)

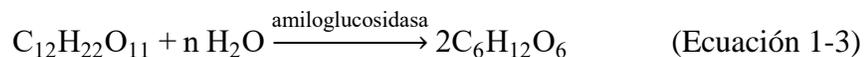
La licuefacción se remite a bajar la viscosidad del almidón gelatinizado, ésta etapa es crítica puesto que, si la pasta de elevada viscosidad se enfría, se produce una cristalización de la amilosa, la que se torna insoluble (almidón retrogradado). La amilosa en estas condiciones constituye una pérdida ya que no es hidrolizada por las enzimas. (Zambrano, 2013). La reacción que ocurre en ésta etapa es la siguiente:



1.4.2.3 Sacarificación

Los procesos enzimáticos para la producción de glucosa requieren de una segunda etapa después de la licuefacción del almidón. Esta etapa se efectúa por medio de una enzima que actúa frente a cualquiera de los dos tipos de enlaces presentes, conocida

como amiloglucosidasa o glucoamilasa. Ésta enzima es producida por numerosos tipos de hongos y algunas bacterias. (Cuevas & Pazos, 2015)



1.4.3 Enzimas

El proceso de conversión de almidón gelatinizado a un jarabe glucosado generalmente está representado en 2 etapas: licuefacción y sacarificación, donde se emplea dos tipos de enzimas α -amilasa y amiloglucosidasa (AMG).

1.4.3.1 α -amilasa

La α -amilasa, también conocida como α -1,4 glucanohidrolasa; es una gluconasa endoactiva que catalizan la hidrólisis al azar de los enlaces α -(1,4) glucosídicos de la región central de las cadenas de amilosa y amilopectina excepto en las proximidades de los puntos de ramificación (Van Der & Marc, 2002). La velocidad de hidrólisis es más lenta en los enlaces cercanos a los puntos de ramificación. La hidrólisis de la amilopectina por esta enzima produce glucosa, maltosa y una serie de dextrinas que contienen enlaces ramificados conformados por 4 o más residuos de moléculas de glucosa que presentan enlaces α -(1,6) provenientes de las uniones glucosídicos de la estructura original. Los productos obtenidos en mayor concentración son maltosa, maltotriosa y maltopentosa, hidrolizando completamente la maltohexosa. (Cruz, 2012)

1.4.3.2 β -amilasa

Las β -amilasas son exo-enzimas, que catalizan los enlaces α -1,4 alternos de los extremos no reductores del almidón, causando la inversión de la configuración anomérica de la maltosa generada de alfa a beta, además esta enzima es incapaz de hidrolizar los enlaces α -1,6 de la amilopectina por lo que la degradación de estos sustratos es incompleta, produciendo entre un 50–60% de β -maltosa y β -dextrina limitante. (Kavanagh, 2011)

1.4.3.3 Amiloglucosidasa (AMG)

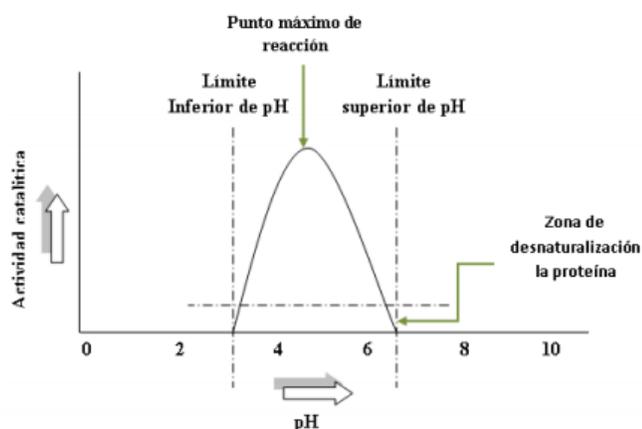
La enzima amiloglucosidasa o glucoamilasa tiene la capacidad de hidrolizar tanto los enlaces α - (1,4) como los alfa (1,6) glucosídicos de moléculas de almidón; su acción prolongada puede causar la ruptura total del polisacárido, el principal producto final de la acción de la glucoamilasa sobre el almidón es la glucosa, lo que la diferencia claramente de la alfa y beta amilasa. Su actividad máxima entre pH 4,0 y 5,5 y a temperaturas alrededor de 55 – 65 °C. (Cuevas & Pazos, 2015)

1.4.4 Factores que influyen en la cinética de la hidrólisis enzimática

La velocidad a la que las reacciones enzimáticas proceden, depende de varios factores; dentro de los que destacan el pH del medio de reacción, la temperatura, la concentración de sustrato y de enzima, entre los más importantes.

1.4.4.1 Efecto del pH

Todas las enzimas tienen un pH óptimo de actividad o supervivencia el cual se encuentra entre un valor mínimo y máximo y es altamente dependiente de la temperatura, el sustrato y la concentración de enzimas. El pH es una función logarítmica que representa el cambio de 10 unidades de hidrógeno por cada unidad de pH lo que significa, que pequeño cambio puede ocasionar la desnaturalización de la proteína. (Madigan, 2008). En la figura 1-5, representa la actividad catalítica en función del pH.

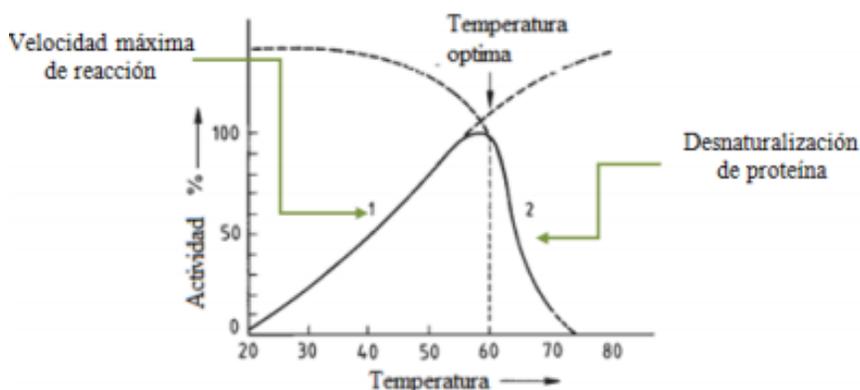


Fuente: Madigan, 2008

Figura 1-5 Efecto del pH en la cinética de la hidrólisis enzimática

1.4.4.2 Efecto de la temperatura

Las reacciones enzimáticas catalíticas obtienen las condiciones óptimas de reacción al encontrar la temperatura más adecuada para llevar a cabo la reacción (Figura 1-6). La existencia de una dependencia directa entre el incremento termodinámico y la tasa de reacción hasta cierto punto donde la enzima es desnaturizada. La temperatura óptima de reacción es dependiente del tipo de enzima y proceso que se pretende utilizar. (Villada, 2010).



Fuente: Villada, 2010

Figura 1-6 Temperatura óptima de la actividad enzimática

1.4.4.3 Concentración de sustrato

Una enzima funciona de manera más eficiente cuando la concentración de sustrato está en exceso en relación con la concentración de enzima. Esto se debe a que las colisiones “exitosas” con el reactivo son más frecuentes, asegurando así que la mayor cantidad de enzima se encuentre activa. En estas condiciones, el producto se obtiene a la máxima velocidad posible para la cantidad de enzima presente. En caso de que la concentración de sustrato sea menor, la velocidad de reacción disminuye. (Badui, 2006).

1.4.5 Cinética de la hidrólisis enzimática.

1.4.5.1 Modelo de Michaelis - Menten

Cuando la velocidad de las reacciones generalmente catalizada por enzimas puede ser simple o compleja, dependiendo de las concentraciones de enzimas y sustratos, la presencia o ausencia de inhibidores y/o cofactores, así como condiciones de

temperatura y pH. La más simple forma de ley de velocidad para reacciones enzimáticas fue propuesta por Henri (1902) y un mecanismo fue propuesto por Michaelis y Menten en 1913. (Fernandez & Perales, 2008)

El mecanismo o modelo de Michaelis – Menten, comprende dos pasos, el primer paso de comienzo rápido, formación reversible de un complejo enzima sustrato, ES, seguido por uno lento, velocidad de descomposición para formar los productos y dar como resultado la enzima libre.

Consideremos la siguiente reacción dada $S \rightarrow P$, con una enzima como catalizador. Es asumido que la enzima E y el sustrato S se combinan para formar el complejo ES, el cual se disocia para dar como producto P y enzima.



La velocidad neta de desaparición de S es:

$$(-r_s)_{\text{neta}} = K_1 C_E C_S - K_2 C_{ES^*} \quad \text{(Ecuación 1-6)}$$

En un pseudo equilibrio $(-r_s) = 0$, ampliando que esta reacción se desarrolla en forma muy rápida:

$$K_1 C_E C_S = K_2 C_{ES^*} \quad \text{(Ecuación 1-7)}$$

$$K_m = \frac{K_2}{K_1} = \frac{C_E C_S}{C_{ES^*}} \quad \text{(Ecuación 1-8)}$$

Donde:

K_m = Constante de equilibrio de disociación para C_{ES^*}

C_E = Concentración de la enzima, E

C_S = Concentración del sustrato, S

C_{ES^*} = Concentración del complejo, ES^*

La concentración del complejo enzima – sustrato de la ecuación (1-7) es:

$$C_{ES^*} = \frac{K_1}{K_2} C_E C_S \quad \text{(Ecuación 1-9)}$$

La descomposición del complejo para el producto y enzima libre es asumida como irreversible, y velocidad controlada:



La velocidad de formación del producto P es:

$$v = (r_p) = K_3 C_{ES^*} \quad (\text{Ecuación 1-11})$$

C_S y C_{ES^*} están relacionadas por el balance de materia para una cantidad total de enzima, C_{ET} :

$$C_E + C_{ES^*} = C_{ET} \quad (\text{Ecuación 1-12})$$

Combinando la ecuación (1-9) y (1-12), tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{K_2 C_{ES^*}}{K_1 C_S} + C_{ES^*} &= C_{ET} \\ C_{ES^*} &= \frac{K_1 C_S C_{ET}}{K_2 + K_1 C_S} \\ C_{ES^*} &= \frac{C_S C_{ET}}{\left(\frac{K_2}{K_1} + C_S\right)} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 1-13})$$

Combinando las ecuaciones (1-11) y (1-13), se tiene:

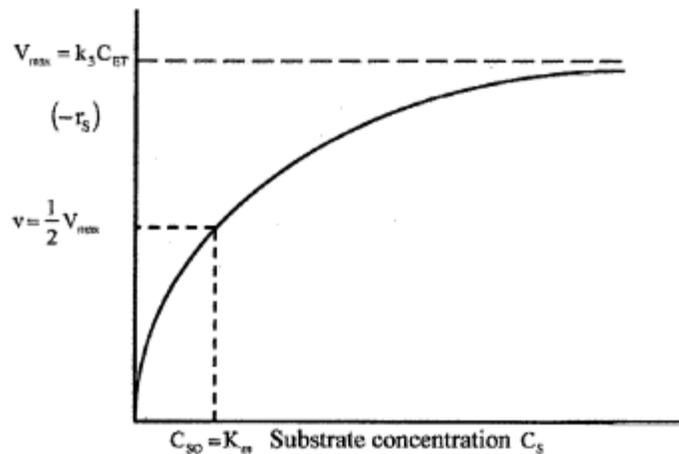
$$\begin{aligned} v = (r_p) &= \frac{K_3 C_S C_{ET}}{\left(\frac{K_2}{K_1} + C_S\right)} \\ v = (r_p) &= \frac{K_3 C_S C_{ET}}{(K_m + C_S)} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 1-14})$$

Donde K_m en este instante es referido como la constante de Michaelis – Menten. r_p es expresado como la velocidad de reacción. La Figura 1-7, muestra el efecto de la concentración del sustrato C_S sobre la velocidad de reacción ($-r_s$) de acuerdo con la cinética clásica de Michaelis – Menten.

$$(-r_s) = \frac{V_{\max} C_S}{K_m + C_S} \quad (\text{Ecuación 1-15})$$

Donde:

$$V_{\max} = K_3 C_{ET} \quad (\text{Ecuación 1-16})$$



Fuente: (Fernandez & Perales, 2008).

Figura 1-7 Cinética clásica de Michaelis – Menten.

A concentraciones bajas de sustrato:

$$K_m \gg C_s \quad \text{y} \quad (-r_s) = \frac{V_{\max} C_s}{K_m} \quad (\text{Ecuación 1-17})$$

A concentraciones altas de sustrato:

$$C_s \gg K_m \quad \text{y} \quad (-r_s) = V_{\max} \quad (\text{Ecuación 1-18})$$

Donde la concentración del sustrato es tal que la reacción = $(1/2) V_{\max}$

$$(-r_s) = \frac{V_{\max} C_s}{K_m + C_s} = \frac{V_{\max}}{2} \quad (\text{Ecuación 1-19})$$

Resolviendo la ecuación (1-19) para la constante de Michaelis nos da:

$$\frac{2 C_{S1/2}}{K_m + C_{S1/2}} = 1$$

$$K_m = C_{S1/2} \quad (\text{Ecuación 1-20})$$

La constante de Michaelis – Menten es igual a la concentración del sustrato a la cual la velocidad de reacción es igual a la mitad de la velocidad máxima. Los parámetros K_m y V_{\max} característicos de las reacciones enzimáticas, son descritas por la cinética de

Michaelis - Menten, V_{\max} es dependiente de la concentración total de enzima C_{ET} ecuación (1-13), mientras que K_m no lo es. (Fernandez & Perales, 2008)

Si V_{\max} la velocidad máxima reemplazamos por $V_{\max} = K_3 C_{ET}$ en la ecuación (1-12), tenemos:

$$(r_p) = \frac{V_{\max} C_S}{K_m + C_S} \quad (\text{Ecuación 1-21})$$

La ecuación (1-21), es conocida como la ecuación de Michaelis -Menten. Esta representa la cinética de muchas reacciones catalizadas por enzimas, la cual envuelve un solo sustrato. La interpretación de K_m como una constante de equilibrio no es válida universalmente, desde la suposición de que la reacción reversible es un proceso de equilibrio rápido que a menudo no es logrado. (Fernandez & Perales, 2008)

1.4.5.2 Estimación de K_m y V_{\max}

La forma no lineal de la ecuación (1-21) de Michaelis - Menten, no permite simples estimaciones de los parámetros cinéticos (K_m y V_{\max}).

Tres proposiciones pueden ser adoptadas:

- Uso de los valores de velocidades iniciales con una forma linearizada de la ley de velocidad.
- Uso de los valores concentración - tiempo con una forma linearizada de la ley de velocidad integrada.
- Uso de los valores concentración - tiempo con la ley de velocidad integrada en una forma no lineal.

a. Forma linearizada de la ecuación de Michaelis - Menten

La ecuación (1-21) de Michaelis – Menten, no está bien representada para poder estimar los parámetros cinéticos V_{\max} y K_m . Reordenando la ecuación (1-21), nos da varias opciones para graficar y estimar los parámetros.

$$v = \frac{V_{\max} C_S}{K_m + C_S} \quad (\text{Ecuación 1-22})$$

Reordenando nos da:

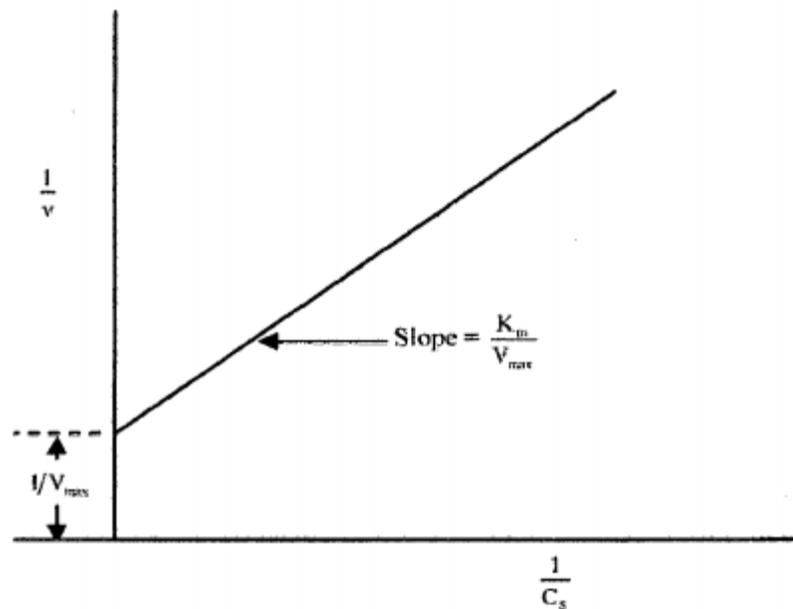
$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_m}{V_{\max}} \frac{1}{C_S} \quad (\text{Ecuación 1-23})$$

La ecuación (1-23), es referida como la ecuación de Lineweaver - Burk envolviendo separadamente las variables dependiente e independiente $1/v$ y $1/C_S$, respectivamente.

La ecuación (1-23), puede ser nuevamente reordenada para dar:

$$\frac{C_S}{v} = \frac{K_m}{V_{\max}} + \frac{1}{V_{\max}} C_S \quad (\text{Ecuación 1-24})$$

La figura 1-8, es la gráfica donde se representa la ecuación de Lineweaver – Burk.



Fuente: Fernandez & Perales, 2008

Figura 1-8 Gráfica de Lineweaver – Burk

La figura 1-8, produce una línea recta con pendiente K_m/V_{\max} , entonces:

$$v = \frac{1}{C_S} * \frac{dC_S}{dt} \quad (\text{Ecuación 1-25})$$

$$v = \frac{1}{C_S} * \frac{C_S - C_{S0}}{t - t_0} \quad (\text{Ecuación 1-26})$$

b. Forma linearizada de la ecuación integrada de Michaelis -Menten

Para un reactor batch de volumen constante, usando la ecuación (1-23) tenemos:

$$(r_p) = (-r_s) = \frac{-dC_S}{dt} = \frac{V_{\max} C_S}{K_m + C_S} \quad (\text{Ecuación 1-27})$$

Reordenando la ecuación (1-27) nos da:

$$(K_m + C_S) \frac{dC_S}{C_S} = -V_{\max} dt \quad (\text{Ecuación 1-28})$$

$$-K_m \frac{dC_S}{C_S} - dC_S = V_{\max} dt \quad (\text{Ecuación 1-29})$$

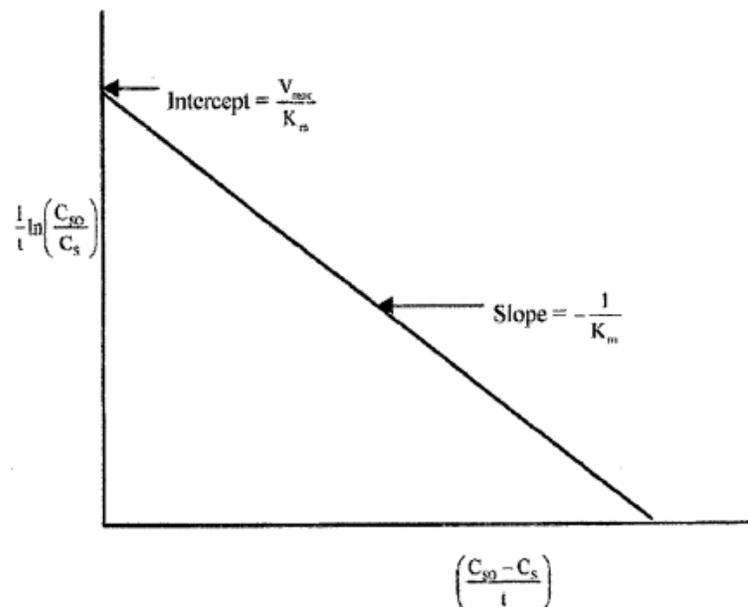
Integrando la ecuación (1-29) con las condiciones límite $C_S = C_{S_0}$ a un $t = 0$, tenemos:

$$-K_m \ln \left(\frac{C_S}{C_{S_0}} \right) - (C_S - C_{S_0}) = V_{\max} t \quad (\text{Ecuación 1-30})$$

La ecuación (1-30), puede aún ser reordenada para dar:

$$\frac{1}{t} \ln \left(\frac{C_{S_0}}{C_S} \right) = \frac{V_{\max}}{K_m} - \frac{1}{K_m} \left(\frac{C_S - C_{S_0}}{t} \right) \quad (\text{Ecuación 1-31})$$

Los parámetros K_m y V_{\max} pueden ser estimados de la ecuación (1-31) usando valores ajustados de C_S como una función de t para una C_{S_0} dada. La Figura 1-9, muestra la correspondiente grafica en términos de concentración de sustrato.



Fuente: Fernandez & Perales, 2008

Figura 1-9 Evaluación de K_m y V_{\max} para la ecuación integrada de Michaelis- Menten

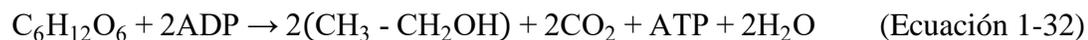
1.5 Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es el proceso a través del cual los azúcares contenidos en el mosto o medio de cultivo se convierten en alcohol etílico en un medio anaerobio y por la acción de la levadura, con la presencia de nutrientes, temperatura, pH y acidez óptima, de manera que la levadura pueda actuar correctamente sobre los azúcares y la fermentación, para obtener un rendimiento esperado. (Pari, 2013)

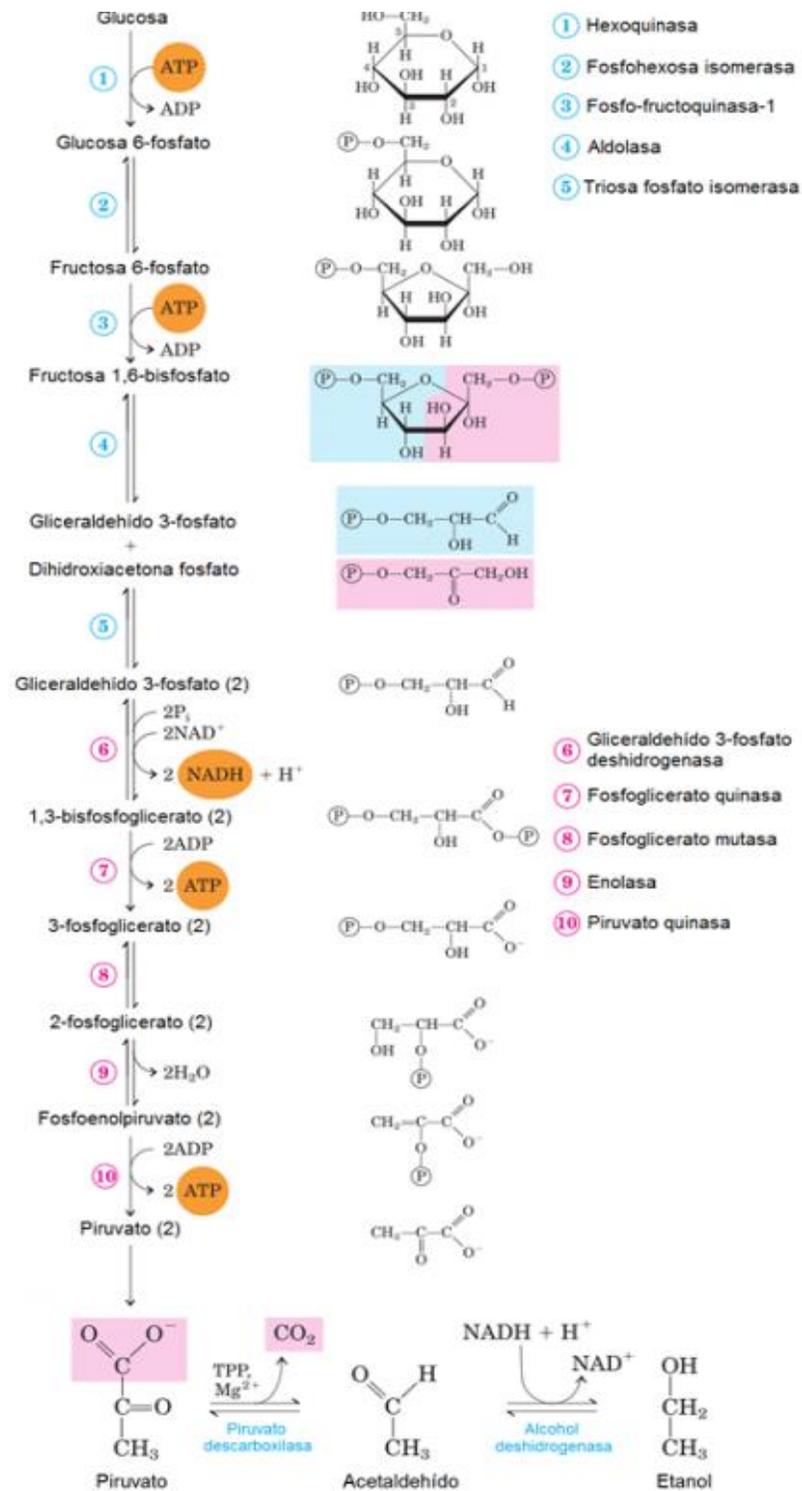
El proceso simplificado de la fermentación alcohólica es el siguiente:



Los rendimientos moleculares de la reacción son:



La fermentación alcohólica inicia con el ingreso de la glucosa a las células del microorganismo, donde es degradada a dos moléculas de piruvato siguiendo la ruta del glucólisis conocida como Embden-Meyerhof-Parmass (Figura 1-10). El piruvato es transformado en acetaldehído mediante dextrcarboxilación, el cual es finalmente reducido hasta etanol. (Blanco, 2020)



Fuente: Blanco, 2020

Figura 1-10 Ruta metabólica para la producción de etanol a partir de glucosa

1.5.1 Factores que influyen en la fermentación alcohólica

A continuación, se muestran los factores más importantes que cumplen un papel desencadenante en el proceso fermentativo, siendo los °Brix, pH y la temperatura los factores más importantes.

1.5.1.1 Concentración de azúcares

Determina el tiempo de la fase de multiplicación celular (crecimiento exponencial), de la fase estacionaria y de la fase de muerte. La concentración de azúcares debe mantenerse en niveles bajos para la multiplicación inicial de la levadura. La concentración excesiva de hidratos de carbono en forma de monosacáridos y disacáridos (glucosa, maltosa, lactosa, sacarosa, etc.) puede frenar la actividad de la levadura. (Zambrano, 2013)

De 10 °Brix a 18 °Brix de concentración de azúcar (generalmente glucosa) es satisfactoria, en ocasiones se emplean concentraciones demasiado altas que inhiben el crecimiento de las levaduras. (Zambrano, 2013)

Si los °Brix es bajo el grado alcohólico obtenido será pobre, por lo contrario, si el °Brix es muy alto la fermentación no se efectúa, pues la presión osmótica que se ejerce sobre las levaduras es grande y no permiten que actúen sobre las levaduras. (Zambrano, 2013)

1.5.1.2 Levadura

Saccharomyces cerevisiae es un hongo eucariótico unicelular comúnmente conocido como levadura. La *Saccharomyces cerevisiae*, ha sido tradicionalmente usada en la producción de bebidas alcohólicas y alimentos ya que fermenta y asimila la glucosa y normalmente también la sacarosa, maltosa y galactosa, no así la lactosa. No utiliza nitratos, y tolera pH: 4 – 5,5. (Fajardo & Sarmiento, 2007)

Es la especie de levaduras utilizada por excelencia para la obtención de etanol a nivel industrial puesto que es un microorganismo de fácil manipulación y recuperación, no es exigente en cuanto a su cultivo, no presenta alto costo, tolera altas concentraciones de etanol, en la fermentación produce bajos niveles de subproductos, es osmotolerante, capaz de utilizar altas concentraciones de azúcares, presenta alta viabilidad celular para

el reciclado y características de floculación y sedimentación para el procesamiento posterior. (Fajardo & Sarmiento, 2007)

1.5.1.3 pH

Es un factor importante en la fermentación, debido a su importancia en el control de la contaminación bacteriana como también el efecto en el crecimiento de las levaduras, en la velocidad de la fermentación y en el rendimiento de etanol con *Saccharomyces cerevisiae*. La reacción óptima para un proceso fermentativo con levaduras se debe realizar a un pH de 4,5 y 5,0. (Carpenter, 1979)

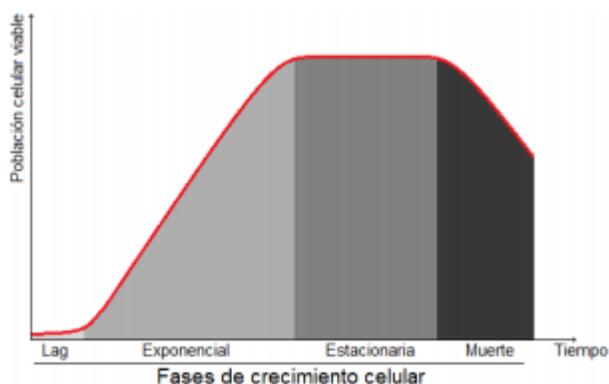
1.5.1.4 Temperatura

A mayor temperatura la fermentación alcohólica transcurre más rápidamente y es menos pura. Se produce menos etanol y más cantidad de compuestos secundarios, por otro lado, las levaduras tienen en los 30 °C su temperatura óptima de desarrollo. Por encima de los 35 °C la actividad decrece y a 45 °C mueren. (Espinoza, 2015)

1.5.2 Cinética de la fermentación alcohólica

Los microorganismos crecen en el espectro en variedad de entornos físicos y químicos, su crecimiento y otras actividades fisiológicas en el tacto de una respuesta en su entorno fisicoquímico. Cinética de fermentación describe el crecimiento y formación de producto por microorganismos, no sólo el crecimiento celular activo, sino también a las actividades de descanso y la muerte de las células. (Apaza, 2016)

El desarrollo de todo microorganismo está caracterizado por fases o etapas de adaptación, crecimiento, estabilidad y muerte (figura 1-11), las cuales ocurren en función del tiempo.



Fuente: Blanco, 2020

Figura 1-11 Fases de crecimiento celular de microorganismos

La fase de adaptación, fase de latencia o fase Lag, corresponde a la etapa durante la cual los microorganismos se adaptan a las condiciones del medio antes de reiniciar el ciclo celular. Normalmente esta etapa puede tardar entre 12 – 24 horas, periodo durante el cual las células se encuentran en un proceso de ajuste metabólico y reparación celular y por tanto no están en capacidad de reproducirse. Por este motivo, la población permanece constante. La duración de esta etapa puede variar dependiendo del estado de salud y metabólico de las células, del tamaño del inóculo y de la diferencia entre el medio del inóculo y el medio de fermentación. Durante la fase exponencial o fase Log, las células del microorganismo, ya adaptado a las condiciones del medio de fermentación, se duplican de manera continua y a ritmo constante, de modo que por cada período de tiempo la población crece exponencialmente a medida que se consumen los nutrientes del medio. Esta fase corresponde a la de mayor reproducción celular y su duración depende de la concentración inicial del sustrato limitante (en la mayoría de los casos, glucosa), de la temperatura y de características genéticas del organismo que determinan por ejemplo su habilidad para adaptarse a los nutrientes disponibles. (Blanco, 2020)

Una vez el sustrato empieza a escasear, el microorganismo empieza a disminuir su velocidad de crecimiento y se propaga menos en el medio, hasta alcanzar la fase estacionaria en la que el número de células del microorganismo no incrementa ni disminuye, pues la tasa de reproducción se equilibra con la tasa de muerte, por tanto,

la velocidad de crecimiento de la población es cero. Esta limitación en el crecimiento ocurre debido a dos situaciones: el agotamiento de nutrientes esenciales en el medio y la acumulación de sustancias de desecho, las cuales son tóxicas para las células en la mayoría de los casos. A pesar de esto, las células viables aún presentan actividad celular y metabólica. Finalmente, el ciclo de crecimiento entra en una fase de muerte o declive caracterizada por una mayor tasa de muerte debido al agotamiento de nutrientes y de reservas de energía, como consecuencia la población celular disminuye. Lo anterior ocurre debido a que, durante el proceso fermentativo, las células de levadura están expuestas a diferentes condiciones de estrés que afectan su velocidad de reproducción. Algunas de estas condiciones son ambientales como deficiencia de nutrientes, alta temperatura y contaminación del medio, mientras que otras se relacionan con el funcionamiento del microorganismo como la producción de metabolitos de desecho tóxicos, como el etanol. (Blanco, 2020)

Los modelos cinéticos consisten en expresiones matemáticas que relacionan el comportamiento de una o más variables de respuesta de interés a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales. Estas relaciones vienen dadas por la estequiometría particular del proceso en estudio y, por tanto, si ésta varía en función de las condiciones de operación, el modelo cinético no será válido. Un enfoque para el establecimiento de estos modelos cinéticos consiste en el análisis en estado estable del sistema, según el cual no existe acumulación de materias primas y por tanto todo el sustrato consumido es transformado en metabolitos y biomasa. (Blanco, 2020)

Cuando se trata de procesos de fermentación alcohólica, algunas de las variables de mayor interés son las velocidades de producción de metabolitos (como alcohol, glicerol, ácidos orgánicos), de consumo de sustratos (como azúcares, nitrógeno, oxígeno) y de crecimiento del microorganismo en el biorreactor, así como el rendimiento y la productividad. En este caso, un modelo cinético puede ser, por ejemplo, la correlación de la velocidad de consumo de nitrógeno asimilable por la levadura a lo largo del tiempo de fermentación. (Blanco, 2020)

Cuando se realizan análisis cinéticos de la fermentación alcohólica, se deben revisar dos conceptos de suma importancia: la productividad y el rendimiento. La primera se define como la velocidad de producción de un compuesto o de crecimiento celular por unidad de volumen del reactor.

$$q_{i,x} = \left[\frac{\text{masa de compuesto o células}}{(\text{unidad de volumen})(\text{unidad de tiempo})} \right] \quad (\text{Ecuación 1-33})$$

$q_{i,x}$ = velocidad de crecimiento celular

El rendimiento para el proceso de fermentación alcohólica se define como la relación entre las velocidades volumétricas de consumo de sustrato o de la producción de metabolitos. (Blanco, 2020)

$$Y_{j,i} = Y_{i/j} = \left[\frac{q_i}{q_j} \right] = \left[\frac{r_i}{r_j} \right] \quad (\text{Ecuación 1-34})$$

$Y_{j,i}$ = Rendimiento

q_i = velocidad volumétrica de consumo o producción

r_i = velocidad específica de consumo o producción

Por ejemplo, el rendimiento etanol/glucosa se calcula como el cociente entre las velocidades de producción de etanol y de consumo de glucosa.

$$Y_{\frac{\text{eta}}{\text{glu}}} = \left[\frac{q_{\text{eta}}}{q_{\text{glu}}} \right] \quad (\text{Ecuación 1-35})$$

$Y_{\frac{\text{eta}}{\text{glu}}}$ = Rendimiento etanol/glucosa

q_{eta} = Velocidad de producción de etanol

q_{glu} = Velocidad de consumo de glucosa

1.6 Destilación

La destilación es una de las operaciones básicas más importantes de la industria química y permite separar los componentes de una mezcla líquida al estado de sustancias puras. (Ocon & Tojo, 1974)

Con el nombre de destilación se entiende la separación de los componentes de una mezcla líquida por vaporización parcial de la misma, de tal manera que la composición del vapor obtenido sea distinta de la composición del líquido de partida, resultando distinta también la composición del líquido residual (Ocon & Tojo, 1974)

1.6.1 Destilación simple

La destilación simple consiste en la vaporización parcial de una mezcla con producción de vapor más rico en componentes más volátiles que la mezcla líquida inicial, quedando un residuo líquido más rico en componentes menos volátiles. Se puede llevar a cabo de dos maneras:

- Destilación de equilibrio o cerrada.- En este caso el líquido se lleva a una temperatura intermedia entre principio y fin de ebullición, dejando que la fase vapor alcance el equilibrio con la fase líquida, a esa temperatura. (Ocon & Tojo, 1974)
- Destilación diferencial o abierta.- Este método de destilación es el que se efectúa normalmente en los laboratorios cuando se trabaja sin reflujo, llevando continuamente los vapores producidos hasta el condensador. (Ocon & Tojo, 1974)

1.6.2 Rectificación

La operación de rectificación consiste en hacer circular en contracorriente el vapor de una mezcla con el condensado procedente del mismo vapor, en un aparato denominado columna de rectificación. (Ocon & Tojo, 1974)

Las partes esenciales de una columna de rectificación son: la columna propiamente dicha, que es donde se verifica el contacto íntimo entre el líquido y el vapor; el calderín, situado en la base de la columna en donde se hace hervir la mezcla a separar; y el

condensador de reflujo situado en la cúspide de la columna, que se encarga de suministrar el líquido descendente para su contacto con el vapor. (Ocon & Tojo, 1974)

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

El presente Trabajo de Investigación aplicado ha sido desarrollado en las instalaciones del Departamento de Procesos Industriales Biotecnológicos y Ambientales, perteneciente a la facultad de Ciencias y Tecnología, de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

2.1 Caracterización de la materia prima

En el Departamento de Tarija, no se dispone de variedades mejoradas de camote. Actualmente el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal, está en proceso de selección de una variedad mejorada, entre tanto se recomienda utilizar las variedades criollas que mejor se adapten a la zona y que posean características de uso en fresco o para procesamiento. Las variedades criollas se agrupan por el color de la pulpa: amarilla y morada.

En el Valle Central de Tarija la variedad de camote que tradicionalmente se cultiva es de pulpa amarilla, en tanto este proyecto hace el uso de esa variedad de camote.

Según (Estrada, 2018), en su trabajo de investigación menciona el efecto de dos temperaturas de almacenamiento sobre la vida poscosecha y la calidad composicional del camote; evaluó distintos parámetros como pérdida de peso, firmeza, color de pulpa, contenido de azúcares totales, almidones, carotenoides y contenido total de proteínas, todo esto durante periodos de 0, 7, 14 y 21 días de almacenamiento. Demostró que la pérdida de peso se mantiene casi estable durante 14 días; mientras que la cantidad de azúcares presentó una tendencia a incrementar; el contenido de almidón presentó un comportamiento estable durante las dos primeras semanas, después se observó una tendencia a disminuir su concentración.

De acuerdo al trabajo de investigación realizado por (Estrada, 2018), se decidió utilizar un camote con un tiempo de poscosecha comprendido entre 7 a 15 días, así garantizaremos la calidad del camote; baja pérdida de peso, firmeza, cantidad de almidón el cual es un factor muy importante para la producción de azúcares.

La tabla II-1, muestra los resultados la caracterización fisicoquímica de la materia que fueron realizados en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, (ver Anexo A).

Tabla II-1: Análisis fisicoquímico del camote

Parámetros	Unidad	Resultados
Azúcares reductores	%	1,17
Cenizas	%	1,70
Fibra	%	0,46
Grasa	%	0,18
Hidratos de carbono	%	24,39
Humedad	%	71,27
Proteínas total (N×6,25)	%	2

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2021

2.2 Selección del método en el proceso de hidrólisis para la obtención de bioetanol del camote

Para la selección del método experimental, obtención de bioetanol de camote se consideran los dos métodos citados en párrafos anteriores. Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo a la escala de Likert. En la tabla II-2, se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método más adecuado.

Tabla II-2: Escala de calificación Likert en el proceso de hidrólisis

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	5
Muy buena	4
Buena	3
Regular	2
Mala	1

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla II-3, se muestra la ponderación definida según el peso que se consideró adecuado para cada factor evaluado. El factor se determina de acuerdo a las condiciones donde el proyecto está siendo desarrollado.

Tabla II-3: Valores de ponderación para la selección del método de la hidrólisis

Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Calificación	Calificación
		Hidrólisis ácida	Hidrólisis enzimática
Aplicabilidad del proceso	Por las características del proyecto se desea que el proceso seleccionado pueda generar el mayor rendimiento en la obtención de azúcares reductores. La hidrólisis ácida, requiere de temperaturas altas y concentración de pH muy ácidos. Mientras la hidrólisis enzimática trabaja a temperaturas máximas de 90 °C y pH mínimo de 5.5, presenta muchas ventajas y es muy utilizada en las industrias.	3	4
Generación de subproductos y residuos	En el proceso de hidrólisis ácida se tienen, además de la glucosa, hidroximetilfurfural, ácido levulónico y ácido fórmico. Tanto la hidrólisis ácida como la enzimática generan residuos, pero el residuo proveniente de la hidrólisis enzimática, es más limpio por la menor concentración de ácido.	3	4
Costos	Los equipos y reactivos para llevar a cabo la hidrólisis ácida requieren que sean más sofisticados y los reactivos difíciles de conseguir en cantidad, debido al uso limitado de cierta cantidad en el país. Mientras que la hidrólisis enzimática se encuentra con los equipos necesarios para llevar acabo ya sea en un rotavapor o por medio de un baño maría con agitación, con lo que respecta a los reactivos no es difícil su adquisición porque se encuentra en venta libre.	4	4
Confiabilidad del proceso	Se considera que el método de hidrólisis enzimática proporciona una mejor calidad de azúcares; el método de hidrólisis ácida, utiliza ácidos en concentraciones altas no tiene mucha confiabilidad por las desventajas que presentan estos.	3	4
Complejidad de operación del proceso	Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable. Aunque la hidrólisis enzimática requiere de mucho tiempo.	4	4
Influencia de la temperatura	En ambos procesos la temperatura es un factor muy importante; en la hidrólisis enzimática no se requiere temperaturas superiores a los 90 °C, haciendo más fácil es trabajo; mientras que la hidrólisis ácida trabaja con temperaturas superiores a los 120 °C.	4	5

Fuente: Elaboración propia, 2021

La tabla II-4, hace referencia a la calificación obtenida de dos tipos de hidrólisis, representados en una matriz de decisión.

Tabla II-4: Matriz de decisión para el método (proceso tecnológico) de obtención de bioetanol del camote

Selección del método experimental					
Factor evaluado	Valoración porcentual (%)	Hidrólisis ácida		Hidrólisis enzimática	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Aplicabilidad del proceso	20	3	12	4	16
Generación de subproductos y residuos	10	3	6	4	8
Costos	20	4	16	4	16
Confiabilidad del proceso	20	3	12	4	16
Complejidad de operación del proceso	20	4	16	4	16
Influencia de la temperatura	10	4	8	5	10
Total	100		70		82

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.3 Diseño experimental para el proceso de obtención de bioetanol

2.3.1 Diseño factorial para el proceso de hidrólisis enzimática

Para determinar las variables significativas del presente trabajo de investigación, se plantea un diseño factorial con dos niveles y tres factores con dos repeticiones, por tanto, el número de tratamientos son 16.

Según la revisión bibliográfica el proceso de licuefacción es importante, porque la adición de la enzima α -amilasa degrada la amilosa en maltosa y pequeños compuestos de glucosa. Se plantea realizar un estudio de las variables que influyen en este proceso como la cantidad de enzima α -amilasa, temperatura del proceso y pH.

Según varios autores mencionan que las mejores temperaturas de hidrólisis enzimática para obtener dextrinas y azúcares, está comprendida entre los 70 °C hasta los 90 °C. Además, (Huayta, 2014), en su trabajo de investigación realizó el proceso de hidrólisis enzimática a temperaturas comprendidas entre 70 °C y 80 °C.

El pH de trabajo en procesos de licuefacción está comprendido entre 5,5 a 6,5. Según (Guigou, 2011), en su trabajo de investigación para la producción de bioetanol combustible a partir de boniato; trabajo con valores de pH igual a 5,7 y 6,0, mientras que la temperatura se mantuvo constante a 90 °C.

En la tabla II-5, muestra los niveles de variación de los factores en el proceso de hidrólisis enzimática. En vista de la información recabada para el presente trabajo, se fijó dos intervalos de temperaturas 75 °C y 85 °C, pH del proceso de licuefacción 5,5 y 6,0 y la cantidad de enzima α -amilasa 0,4 g y 0,6 g (según especificación del proveedor, se debe usar 1 gramo/litro de enzima).

Tabla II-5: Niveles de variación de los factores en el proceso de hidrólisis enzimática

Nivel	Factor A pH	Factor B Temperatura (°C)	Factor C Cantidad de enzima α -amilasa (g)
Inferior	5,5	75	0,4
Superior	6,0	85	0,6

Fuente: Elaboración propia, 2021

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial 2^3 .

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 2^3 = 8$$

Se realizará dos repeticiones.

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 8 * 2 = 16 \text{ experimentos}$$

Variable respuesta será la cantidad de azúcares reductores producidos.

La tabla II-6, muestra el orden de los factores en el diseño experimental para ejecutar el proceso de hidrólisis enzimática dentro del laboratorio de operaciones unitarias.

Tabla II-6: Matriz de diseño experimental en el proceso de hidrólisis enzimática

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima α -amilasa (g)	% Azúcares reductores
1	5,5	75	0,4	A ₁
2	6,0	75	0,4	A ₂
3	5,5	85	0,4	A ₃
4	6,0	85	0,4	A ₄
5	5,5	75	0,6	A ₅
6	6,0	75	0,6	A ₆
7	5,5	85	0,6	A ₇
8	6,0	85	0,6	A ₈

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.3.2 Diseño factorial para el proceso de fermentación alcohólica

De acuerdo a la información recopilada en bibliografía; el proceso de fermentación debe estar sujeto a un análisis, para ello se realizará un tratamiento de las variables que influyen en el proceso.

El estudio se realizará mediante un diseño con un arreglo factorial de 2^2 , correspondiente a la combinación de 2 factores y 2 niveles con 2 repeticiones, por tanto, el número de combinaciones de tratamiento son 8.

Los factores son:

Factor A: Cantidad de levadura, niveles (1,0 g y 1,2 g).

Factor B: pH, niveles (4,0 y 5,0).

La variable respuesta será el rendimiento del grado alcohólico obtenido.

La tabla II-7, se presentan todas las combinaciones que puedan darse entre las variables que se sometan a prueba.

Tabla II-7: Matriz de diseño experimental en el proceso de la fermentación alcohólica

Prueba	Factor A Cantidad de levadura (g)	Factor B pH inicial	Rendimiento
1	1,0	4,0	R ₁
2	1,2	4,0	R ₂
3	1,0	5,0	R ₃
4	1,2	5,0	R ₄

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4 Procedimientos y técnicas para la obtención de los resultados

2.4.1 Materiales de laboratorio, equipos, utensilios e insumos utilizados para obtener bioetanol de camote

Para llevar a cabo la parte experimental del trabajo de investigación, se utilizó los siguientes materiales, equipos y utensilios:

2.4.1.1 Materiales de laboratorio

En la tabla II-8, se detallan los materiales de laboratorio utilizados en la parte experimental para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote.

Tabla II-8: Materiales de laboratorio

Material	Capacidad	Calidad	Cantidad
Termómetro de mercurio	(0 – 300) °C	Vidrio	1
Vaso de precipitado	600 ml	Vidrio	1
Matraz aforado	250 ml	Vidrio	1
Vidrio de reloj	Pequeño	Vidrio	1
Pipetas	5 ml, 10 ml	Vidrio	2
Probeta	250 ml	PVC	1
Pizeta	500 ml	PVC	1
Papel filtro	80 cm × 60 cm	Papel	2
Espátula	Pequeña	Acero inoxidable	1
Frascos	200 ml	Vidrio	16
Tachos para la fermentación	2500 ml	PVC	4

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.1.2 Equipos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol del camote

En la tabla II-9, se detallan los equipos utilizados en la parte experimental para obtener bioetanol del camote, para un mayor detalle ver Anexo K.

Tabla II-9: Equipos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

Equipo	Marca	Fuente de energía	Descripción
Secador de tiro forzado	Eurobras	Eléctrica	Equipo utilizado para secar las muestras de camote.
Molino de martillos	Weber Bros	Eléctrica	Equipo que tiene la finalidad de reducir el tamaño de partícula.
Rotap de tamices	Orto Alresa	Eléctrica	Equipo utilizado para separar las partículas de diferente tamaño
Baño maría	Mjw	Eléctrica	Equipo utilizado para elevar la temperatura de la muestra a hidrolizar
Agitador mecánico	-	Eléctrica	Utilizado para agitar la muestra en el proceso de hidrólisis enzimática
Refractómetro	Ivymen	Eléctrica	Equipo usado para determinar la cantidad los °Brix en el proceso de hidrólisis y fermentación alcohólica.
Termostato de inmersión	J. P. Selecta	Eléctrica	Equipo utilizado para mantener la temperatura constante en el proceso de fermentación alcohólica
Rota vapor	Heidolph	Eléctrica	Equipo utilizado para llevar a cabo la destilación de la muestra
Balanza analítica	Gibertini	Eléctrica	Equipo utilizado para determinar el peso de las muestras
pH – metro	pH Meter	Digital	Utilizado para la medición de pH en las muestras

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.1.3 Utensilios e insumos utilizados en proceso de obtención de bioetanol

En la tabla II-10, se detallan los utensilios utilizados en la parte experimental para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote.

Tabla II-10: Utensilios utilizados en el proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

Utensilios	Capacidad	Calidad	Cantidad
Fuentes	5000 ml	Plástico	2
Cuchillo	Mediano	Acero inoxidable	1
Jarra graduada	2500 ml	Plástico	1
Repasadores	Medianos	Algodón	2

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla II-11, se detallan los insumos utilizados en la parte experimental para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote.

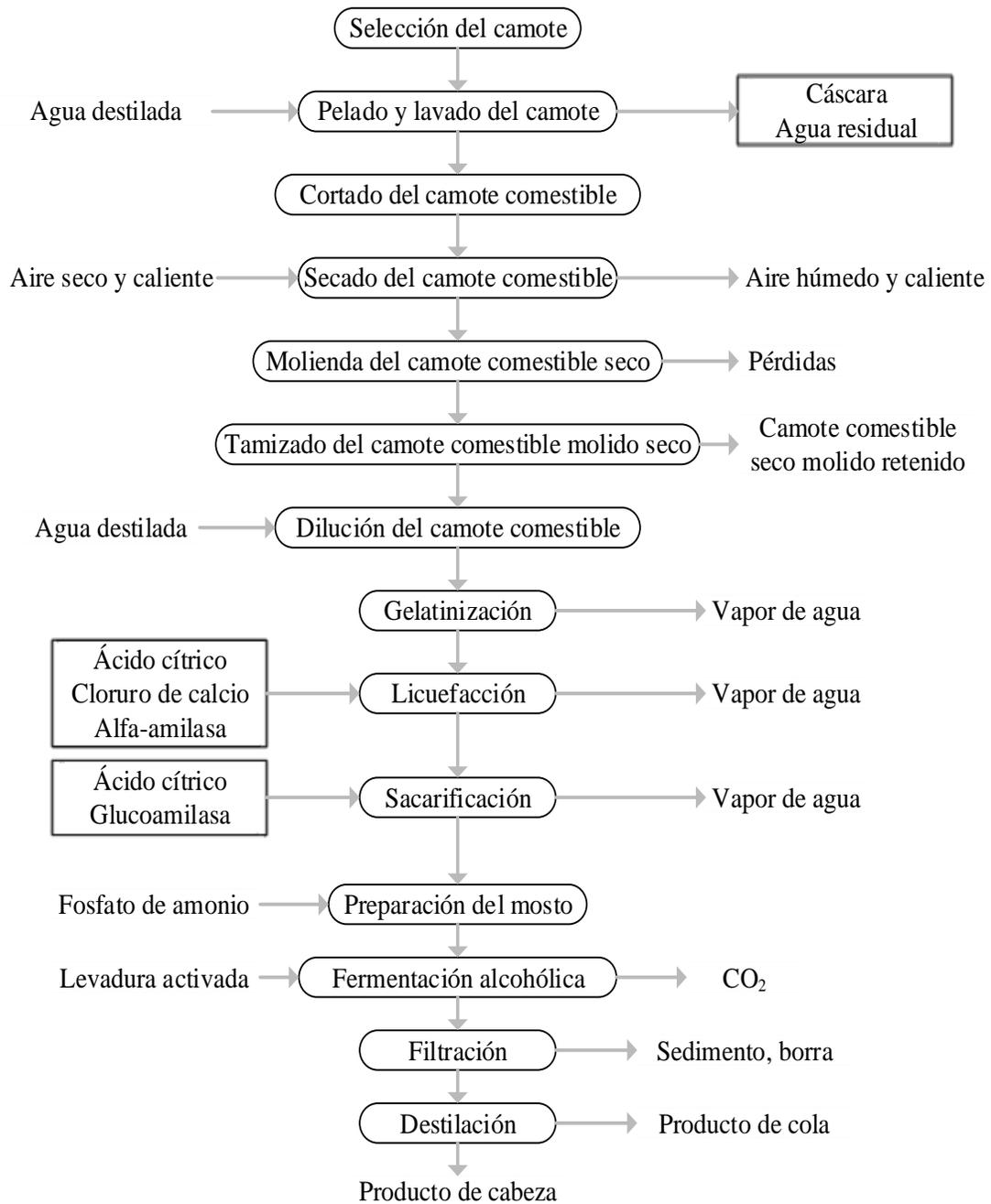
Tabla II-11: Insumos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

Insumos	Estado	Procedencia	Marca
Cloruro de calcio	Sólido	Bolivia	SOLQUIFAR
Ácido cítrico	Sólido	Bolivia	SOLQUIFAR
Lugol	Líquido	Bolivia	SOLQUIFAR
Fosfato de amonio	Sólido	Bolivia	SOLQUIFAR
Enzima α -amilasa	Sólido	Argentina	AEB ANDINA S.A.
Enzima glucoamilasa	Sólido	Argentina	AEB ANDINA S.A.
<i>Saccharomyces cerevisiae bayanus</i>	Sólido	Argentina	AEB ANDINA S.A.

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.2 Proceso para la obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

En la figura II-1, se muestra el diagrama de flujo para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática a partir del camote.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-1 Diagrama de bloques del proceso experimental para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

2.4.3 Descripción del proceso para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote

Las operaciones involucradas para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote, se describen a continuación:

2.4.3.1 Selección de la materia prima

La materia prima adquirida proviene del Departamento de Tarija, Municipio Orondo, Valle de la Concepción. En esta parte del proceso, se tomó en cuenta el estado del camote, sin perforaciones, presencia de muestras extrañas y deben ser conservadas a temperatura ambiente para su posterior tratamiento, considerando un tiempo de poscosecha no mayor a 15 días (ver figura 2-2).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-2 Selección del camote

Después de la selección de la materia prima, estas deben ser pesadas para cuantificar el uso de la misma (ver figura 2-3).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-3 Pesado del camote

2.4.3.2 Pelado y lavado

Se procedió al pelado del camote que consiste en el retiro de la cáscara de camote, haciendo uso de un cuchillo de acero inoxidable, seguidamente mediante un lavado con agua destilada relación másica 1:1 (camote/agua destilada), se elimina las impurezas adheridas a la superficie del camote (ver figura 2-4).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-4 Lavado del camote comestible

2.4.3.3 Cortado

Para facilitar el proceso de secado del camote comestible, se procedió al cortado en rodajas, esta etapa se realizó de forma manual y con ayuda de un cuchillo de acero inoxidable tratando que las rodajas del camote comestible se encuentren aproximadamente entre 1 mm a 3 mm de espesor (ver figura 2-5).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-5 Cortado del camote comestible

2.4.3.4 Secado

En el proceso de secado de las muestras de camote comestible proveniente de la etapa de cortado, en primer lugar, se realizó el ajuste de las condiciones de trabajo en el secador de bandejas, que consiste en poner en funcionamiento el equipo y se dejó calentar por un tiempo de 30 minutos alcanzar la temperatura de secado (60 °C).

Para determinar la pérdida de peso en función del tiempo de las muestras de camote proveniente de la etapa de cortado, se procede a introducir las muestras en las 3 bandejas con malla milimétrica que se encuentran dentro de la cámara de secado y registrando a cada hora la variación del peso hasta permanecer constante. Según el análisis fisicoquímico del camote, tabla II-1, el contenido de humedad es de 71,27% y logrando reducir el contenido de humedad del camote comestible al finalizar la etapa secado a un 4,16 % (ver figura 2-6).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-6 Secado del camote comestible

2.4.3.5 Molienda

El camote comestible seco proveniente de la etapa de secado con un contenido de humedad igual a 4,16%, se llevó a molienda con la finalidad de tener un menor tamaño de partícula. La etapa de molienda, se realizó primeramente en un molino de rodillo (ver figura 2-7) para reducir el tamaño de las rodajas secas a 3 mm de diámetro.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-7 Molido del camote comestible seco en molino de rodillos

Posteriormente, se pasa al molino de martillos donde se consigue un menor tamaño de partícula (ver figura 2-8).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-8 Molido del camote comestible en molino de martillos

2.4.3.6 Tamizado

Se realiza el tamizado con la finalidad de usar un solo tamaño de partícula, para que esta tenga una mayor superficie de contacto y favorecer en el rendimiento de azúcares reductores en la etapa de hidrólisis enzimática. Una vez terminado la molienda, se procede a tamizar la muestra obtenida de camote comestible seco molido en el rotap vibratorio eléctrico que tiene abertura de malla de 0,5 mm y 0,25 mm en la serie de Tyler, el tiempo utilizado para realizar la etapa fue de 30 minutos y una velocidad de 2500 rpm (ver figura 2-9).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-9 Tamizado del camote comestible seco molido

2.4.3.7 Dilución

En la etapa de dilución se trabajó en una relación del 13,06% de gramos de camote comestible seco molido/volumen de agua destilada. Haciendo uso de una balanza analítica, pesar 60 gramos de camote comestible seco molido y preparar la dilución en 400 ml de agua destilada.

2.4.3.8 Gelatinización

Con ayuda de un baño maría, realizar el calentamiento de la dilución hasta 70 °C durante 15 minutos y retirar del baño maría (ver figura 2-10).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-10 Gelatinización del camote comestible seco

2.4.3.9 Licuefacción

Esperar que el producto de la gelatinización se encuentre a una temperatura de 60 °C y regular las condiciones del proceso de licuefacción, con la adición de ácido cítrico a valores de pH (5,5 y 6,0). Adicionar la enzima α -amilasa (0,4 g y 0,6 g) y colocar a calentamiento a la temperatura de estudio (75 °C y 85 °C).

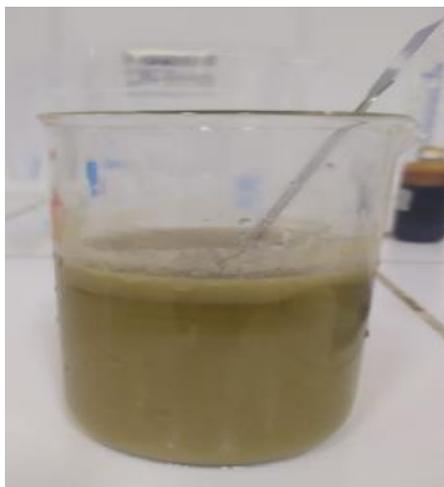
Llevar a cabo el proceso durante 120 minutos, midiendo cada 30 minutos los °Brix y aplicando la prueba del yodo, para observar la transformación de almidón en sus respectivas dextrinas (ver figura 2-11).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-11 Etapa de licuefacción

2.4.3.10 Sacarificación

Una vez retirada la muestra del proceso de licuefacción enfriar la solución hasta que la temperatura sea de 60 °C, ajustar el pH a 5 y adicionar la enzima glucoamilasa según las especificaciones técnicas del fabricante (1 gramo/litro) (ver figura 2-12).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-12 Etapa de sacarificación

- **Prueba del yodo**

La prueba del yodo es una reacción química usada para determinar la presencia o alteración del almidón. Esta reacción es el resultado de la formación de cadenas de poliyoduro a partir de la reacción del almidón con el yodo presente en la solución de un reactivo llamado lugol. La amilosa forma hélices donde se juntan las moléculas de yodo, formando un color azul oscuro. La amilopectina, forma hélices mucho más cortas y las moléculas de yodo son incapaces de juntarse, obteniéndose un color entre naranja y amarillo. A medida que avanza la hidrólisis enzimática, se observa un cambio de color de azul a rosa, esto debido a que el almidón se está convirtiendo en sus respectivas dextrinas (Escuela superior politecnica de Chimborazo, 2021).

En la figura 2-13, se observa el cambio de color a medida que avanza la hidrólisis enzimática, es decir se produce la conversión de almidón sus respectivas dextrinas.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-13 Prueba del yodo a medida que avanza la hidrólisis enzimática

2.4.3.11 Preparación del mosto

Obtenido el ensayo de la hidrólisis enzimática con mayor porcentaje de azúcares reductores, se realizó la fermentación de acuerdo al diseño experimental.

Para dar inicio al proceso, se procedió a la esterilización de los materiales y del hidrolizado y luego se introdujo el hidrolizado de camote (1 litro) a un reactor de polipropileno de 2,5 litros.

Como nutrientes se utilizó fosfato de amonio, se reguló el pH en estudio (4,0 y 5,0) haciendo uso de ácido cítrico 0,1 M.

2.4.3.12 Fermentación alcohólica del producto de la hidrólisis enzimática

Se prepara una solución que contenga 50 ml de agua destilada, 1 gramo de sacarosa y agregó la cantidad de levadura *Saccharomyces cerevisiae bayanus* en estudio siendo esta (1,0 g y 1,2 g), luego entró a una fase de inoculación a una temperatura de 38 °C y se espera el tiempo necesario hasta la activación del inóculo, observando un aumento en el volumen y burbujeo (ver figura 2-14).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-14 Activación de la levadura

Una vez activada la levadura adicionar al mosto, agitar y posteriormente tapar el recipiente ya que el mismo cuenta con una salida de gases para disminuir la presión en el interior del fermentador, la fermentación se realizó a una temperatura entre 30 °C a 32 °C (ver figura 2-15).

La fermentación en tubérculos dura aproximadamente 2 días, dependiendo de la temperatura, pH y cantidad de levadura. Para determinar la culminación del proceso de fermentación se midió los °Brix a determinados tiempos, el proceso de fermentación termino cuando no hubo variación de los °Brix y pH.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-15 Fermentación alcohólica del mosto

2.4.3.13 Filtración

Terminada la fase de fermentación se procedió a filtrar al vacío el mosto fermentado, por un lapso de 2 horas (ver figura 2-16).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-16 Filtración

2.4.3.14 Destilación

Se procedió a realizar una destilación simple para separar nuestro producto de interés. El proceso de destilación se realizó en el equipo llamado rotavapor, el mosto filtrado se traspasó a un balón dando inicio al proceso de la destilación (ver figura 2-17).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-17 Destilación

Una vez terminada la destilación, se tomó 200 ml de producto destilado y se traspasó a una probeta de 250 ml para realizar la lectura del grado alcohólico (ver figura 2-18).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-18 Medición del grado alcohólico

2.4.4 Parte experimental de la cinética de la hidrólisis enzimática

Para determinar la cinética de la hidrólisis enzimática, se trabajó con el experimento donde se obtuvo mayor porcentaje de azúcares reductores. Según los resultados proporcionados por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), el experimento número 8 presenta un mayor porcentaje de azúcares reductores.

Para determinar la cinética de la hidrólisis enzimática es necesario conocer la cantidad de azúcares a medida que avanza la hidrólisis enzimática. Se llevó a cabo el proceso de hidrólisis enzimática, tomando muestras cada 30 minutos e inactivando la enzima con ácido cítrico a un pH de 3,5.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizada la parte experimental prosigue el procesamiento de los resultados, con los cuales se desea determinar el mejor experimento tanto en el proceso de hidrólisis enzimática como en la fermentación, mediante el uso de un programa estadístico. Así mismo, determinar las cinéticas de la hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica.

3.1 Secado del camote comestible

Para llevar a cabo el proceso de hidrólisis se necesita la materia prima deshidratada. Se procedió al secado del camote comestible en un secadero de tiro forzado, a 60 °C de temperatura y un tiempo determinado, hasta que el peso de la muestra se mantenga constante, es importante resaltar que el tiempo de seco depende de la cantidad de muestra que se cargue al equipo. En la tabla III-1, muestra los datos del peso del camote comestible respecto al tiempo.

Tabla III-1: Datos de la curva de secado

Tiempo (min)	Peso del camote comestible (g)
0	100,310
30	96,334
60	89,551
90	83,184
120	73,934
150	64,684
180	55,249
210	48,115
240	43,125
270	37,787
300	35,029
330	33,742
360	33,435
390	33,273
420	33,105
450	33,297
480	33,035
500	33,035

Fuente: Elaboración propia, 2021

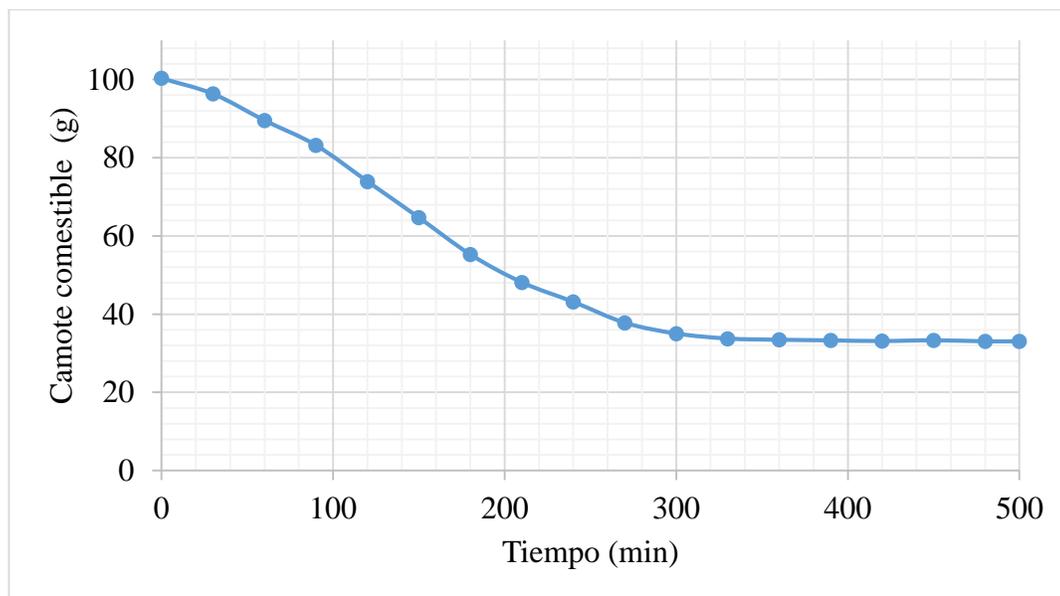
A partir de los datos de secado podemos determinar la humedad de la muestra, mediante la ecuación (3-1):

$$\text{Humedad relativa (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3-1})$$

$$\text{Humedad relativa (\%)} = \frac{100,310 - 33,035}{100,301} * 100$$

$$\text{Humedad relativa (\%)} = 67,07\%$$

En la figura 3-1, se aprecia la curva de la variación del peso del camote comestible debido a la pérdida de agua en el proceso de secado.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-1 Pérdida de peso del camote comestible

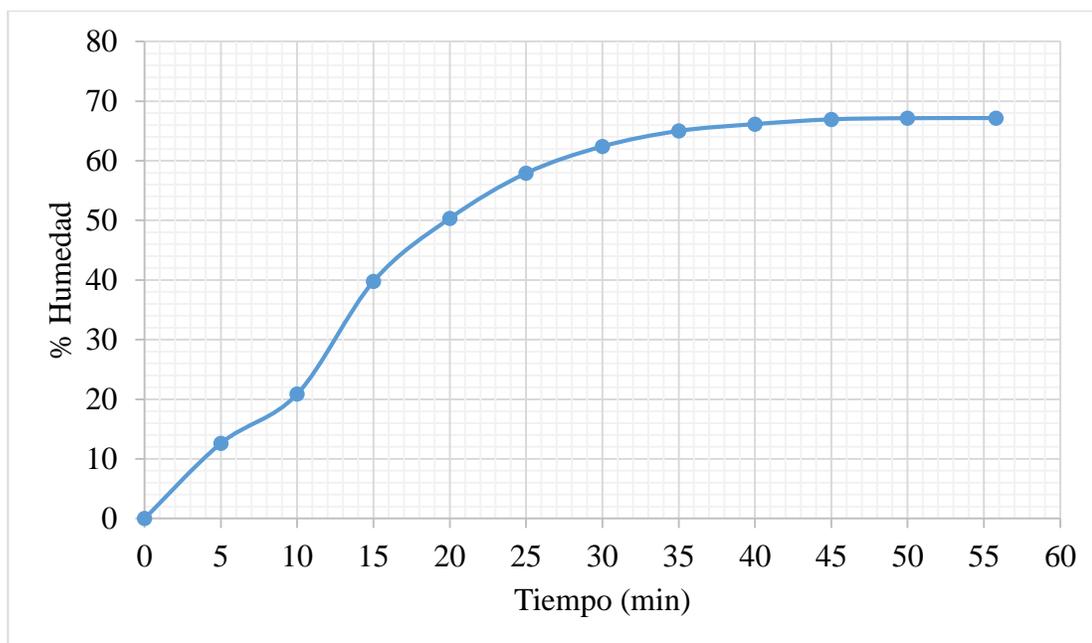
También, se realizó el secado de una pequeña muestra de camote comestible en un secadero infrarrojo para determinar su humedad, para ello se pesó 7,2342 gramos de camote cortado en rodajas finas de 0,5 mm. En la tabla III-2, muestra los valores del porcentaje de humedad del camote comestible determinados en el secadero infrarrojo.

Tabla III-2: Datos de la humedad del camote comestible

Tiempo (min)	Humedad %
0	0
5	12,63
10	20,90
15	39,80
20	50,35
25	57,92
30	62,41
35	65,00
40	66,15
45	66,95
50	67,14
55,8	67,16

Fuente: Elaboración propia, 2021

La figura 3-2, muestra la curva de la variación del porcentaje de humedad del camote comestible respecto al tiempo.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-2 Porcentaje de humedad del camote comestible

De acuerdo a los datos de secado, se concluye que ambos son muy semejantes. El contenido de humedad permite cuantificar la cantidad de camote comestible seco molido se debe utilizar en el proceso de hidrólisis enzimática.

3.2 Resultados del proceso de hidrólisis enzimática

En la tabla III-3, se presentan los resultados del porcentaje de azúcares reductores, obtenidos de la parte experimental y analizados por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, así como sus respectivas replicas (ver Anexo B).

Tabla III-3: Resultados del porcentaje de azúcares reductores del proceso de hidrólisis enzimática

N°	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima (g)	% Azúcares reductores I	% Azúcares reductores II
1	-1	-1	-1	6,94	6,60
2	+1	-1	-1	6,10	6,15
3	-1	+1	-1	8,22	8,37
4	+1	+1	-1	8,91	8,78
5	-1	-1	+1	7,77	8,82
6	+1	-1	+1	8,94	7,82
7	-1	+1	+1	8,86	8,95
8	+1	+1	+1	9,61	9,89

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2021

En la tabla III-3, se observa que el valor de los azúcares reductores oscila entre 6,10% y 9,89%, estos valores son el resultado de un tiempo de 3 horas de hidrólisis enzimática y se demuestra la posibilidad de obtener azúcares a partir de la hidrólisis enzimática del camote comestible seco molido.

3.2.1 Análisis estadístico del diseño factorial realizado en el proceso de hidrólisis enzimática

El análisis estadístico se realizó mediante IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 23.0; permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera los resultados más significativos.

El diseño factorial, se realiza con el propósito de establecer si los factores pH, temperatura y cantidad de enzima tienen influencia en el porcentaje de azúcares reductores en el proceso de hidrólisis enzimática.

En la tabla III-4, se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado; cada factor tiene un nivel alto (+1) y un nivel bajo (-1).

Tabla III-4: Matriz de diseño experimental para el etapa de hidrólisis enzimática

N°	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima (g)	% Azúcares reductores
1	-1	-1	-1	6,94
2	+1	-1	-1	6,10
3	-1	+1	-1	8,22
4	+1	+1	-1	8,91
5	-1	-1	+1	7,77
6	+1	-1	+1	8,94
7	-1	+1	+1	8,86
8	+1	+1	+1	9,61
9	-1	-1	-1	6,60
10	+1	-1	-1	6,15
11	-1	+1	-1	8,37
12	+1	+1	-1	8,78
13	-1	-1	+1	8,82
14	+1	-1	+1	7,82
15	-1	+1	+1	8,95
16	+1	+1	+1	9,89

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla III-5, se puede observar el análisis estadístico basado en los resultados de las interacciones de pH, temperatura, cantidad de enzima y sus respectivas replicas, tomando como respuesta el porcentaje de azúcares reductores obtenido para cada ensayo y replica.

Tabla III-5: Análisis de varianza en la etapa de hidrólisis enzimática

Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	19,372	6	3,229	21,560	0,000
Intersección	1068,146	1	1068,146	7132,827	0,000
pH	0,174	1	0,174	1,164	0,309
Temperatura	9,688	1	9,688	64,692	0,000
Cantidad enzima	7,009	1	7,009	46,806	0,000
pH – Temperatura	0,956	1	0,956	6,381	0,032
pH – Cantidad enzima	0,263	1	0,263	1,754	0,218
Temperatura – Cantidad enzima	1,283	1	1,283	8,565	0,017
Error	1,348	9	0,150		
Total	1088,866	16			
Total corregida	20,720	15			

Fuente: Elaboración propia, 2021

Las variables más significativas son poseen una significancia menor al 5% (0,05), con una probabilidad de 95%.

La variable pH tiene un nivel de significancia igual a 0,309, también se puede observar que la iteración pH – cantidad de enzima tiene una significancia de 0,218, quedando ambas descartadas porque no cumplen con el requisito del valor menor a 0,05.

Según el análisis de varianza, se puede verificar que a un nivel de significancia 5 %, las variables temperatura, cantidad de enzima, pH – concentración de enzima y temperatura – cantidad, cumplen con el requisito (menor al 0,05).

3.2.2 Análisis de regresión lineal múltiple en la etapa de hidrólisis enzimática

Establecido lo anterior, se procede a realizar la regresión lineal múltiple a fin de establecer el modelo matemático. En la tabla III-6, se muestran los resultados de la regresión.

Tabla III-6: Coeficiente del modelo

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Significancia	Intervalo de confianza de 95% para B	
	B	Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	8,171	0,101		81,138	0,000	7,949	8,392
Temperatura	0,778	0,101	0,684	7,727	0,000	0,556	1,000
Cantidad enzima	0,662	0,101	0,582	6,573	0,000	0,440	0,884
Temperatura – cantidad enzima	-0,283	0,101	-0,249	-2,812	0,017	-0,505	-0,061
pH – temperatura	0,244	0,101	0,215	2,427	0,034	0,023	0,466

Fuente: Elaboración propia, 2021

Los resultados de la tabla III-6, establecen los coeficientes de los efectos en el modelo; no obstante, el nivel de significancia de la interacción factor pH y temperatura es mayor a 0,025 por lo que el modelo resulta en:

$$\% \text{ Azúcares reductores} = 8,171 + 0,778 * T + 0,662 * CE - 0,283 * TCE \quad (\text{Ecuación 3-2})$$

Donde:

T = Temperatura

CE = Cantidad de enzima

TCE = Temperatura – cantidad de enzima

A partir de esta ecuación (3-2), se puede enunciar que: a mayor temperatura y cantidad de enzima mayor es el porcentaje de azúcares reductores, si bien con el aumento de las variables en la interacción disminuye la cantidad del porcentaje de azúcares reductores por tener signo negativo, debido a que las enzimas presentan un rango de temperaturas de trabajo.

3.2.3 Cinética del proceso de hidrólisis enzimática del camote comestible seco molido

En la tabla III-7, se presenta el porcentaje de azúcares reductores en función al tiempo, de acuerdo a las condiciones donde alcanzó una mayor conversión en azúcares reductores (ver Anexo D).

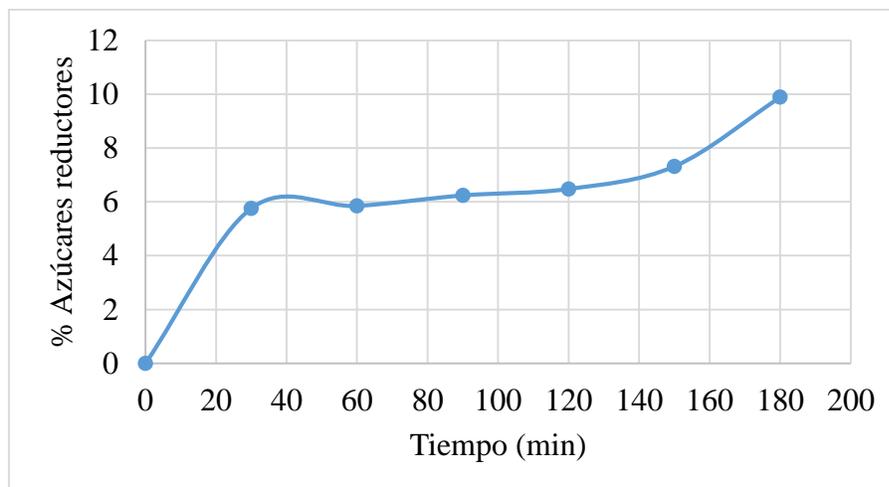
Tabla III-7: Porcentaje de azúcares reductores en función del tiempo de hidrólisis enzimática

Tiempo (min)	% Azúcares reductores
0	0,00
30	5,76
60	5,85
90	6,24
120	6,48
150	7,32
180	9,89

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2021

En la figura 3-3, muestra el aumento de azúcares reductores en función del tiempo.

Analizando la figura 3-3, se observa una curva que representa el aumento de azúcares reductores en el transcurso de la reacción en función del tiempo, de la cual se deduce que el mayor grado de hidrólisis se logra a los 180 minutos, esto debido a la actuación de la última enzima glucoamilasa que se encarga de convertir la maltosa en glucosa.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-3 Cantidad de porcentaje de azúcares reductores formada en función del tiempo

Para determinar la cinética de la hidrólisis enzimática, es necesario realizar cálculos estequiométricos para determinar la cantidad de sustrato presente después de realizada la hidrólisis, conociendo la cantidad de azúcares reductores expresados en glucosa (ver Anexo E).

La ecuación de Michaelis – Menten, no está bien representada para poder estimar los parámetros cinéticos V_{max} y K_m . Partiendo de la ecuación (1-23) de Lineweaver – Burk, nos da la opción de graficar y estimar los parámetros.

La tabla III-8, muestra el tratamiento de los datos para determinar la constante de la velocidad de reacción.

Tabla III-8: Tratamiento de datos para determinar la cinética de la hidrólisis enzimática

Tiempo (min)	Cantidad de glucosa	Cantidad de sustrato (Cs)	Δt	ΔC_s	$\Delta C_s/\Delta t$	v	1/ Cs	1/v
0	0	15,000	30	5,184	-	-	0,067	-
30	5,76	9,816	30	0,081	370,348	37,730	0,102	0,027
60	5,85	9,735	30	0,351	85,465	8,779	0,103	0,114
90	6,24	9,384	30	0,216	138,880	14,800	0,107	0,068
120	6,48	9,168	30	0,756	39,680	4,328	0,109	0,231
150	7,32	8,412	30	2,313	12,969	1,542	0,119	0,649
180	9,89	6,098	-	-	-	0,000	0,164	-

Fuente: Elaboración propia, 2021

Donde:

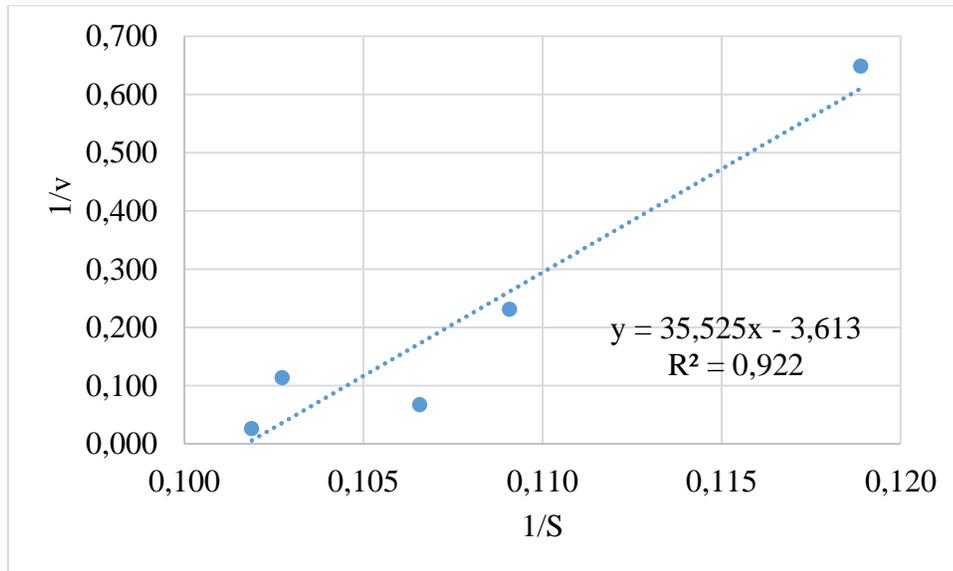
Δt = Variación de tiempo

ΔC_S = Variación de la cantidad de sustrato

$\Delta C_S/\Delta t$ = Variación de la cantidad de sustrato sobre la variación del tiempo

v = velocidad de reacción

La figura 3-4, muestra la velocidad de formación de glucosa vs. concentración de sustrato.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-4 Velocidad de formación de glucosa vs. concentración de sustrato

De la figura 3-4, se tiene:

Pendiente = $m = 35.525$

Intercepto = $b = 3,613$

De la ecuación (1-25), la velocidad máxima de reacción está representada por la siguiente ecuación:

$$V_{\max} = \frac{1}{\text{Intercepto}} \quad (\text{Ecuación 3-3})$$

$$V_{\max} = 0,277 \text{ min}^{-1}$$

De la ecuación (1-25), la constante de Michaelis – Menten es:

$$K_m = \text{Pendiente} * V_{\max} \quad (\text{Ecuación 3-4})$$

$$K_m = 9,84 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Finalmente, reemplazando valores en la ecuación (1-22) de Michaelis – Menten, se tiene la cinética del proceso de hidrólisis enzimática:

$$v = \frac{V_{\max} [C_S]}{K_m + [C_S]}$$

$$v = \frac{0,277 [C_S]}{9,84 + [C_S]} \quad (\text{Ecuación 3-5})$$

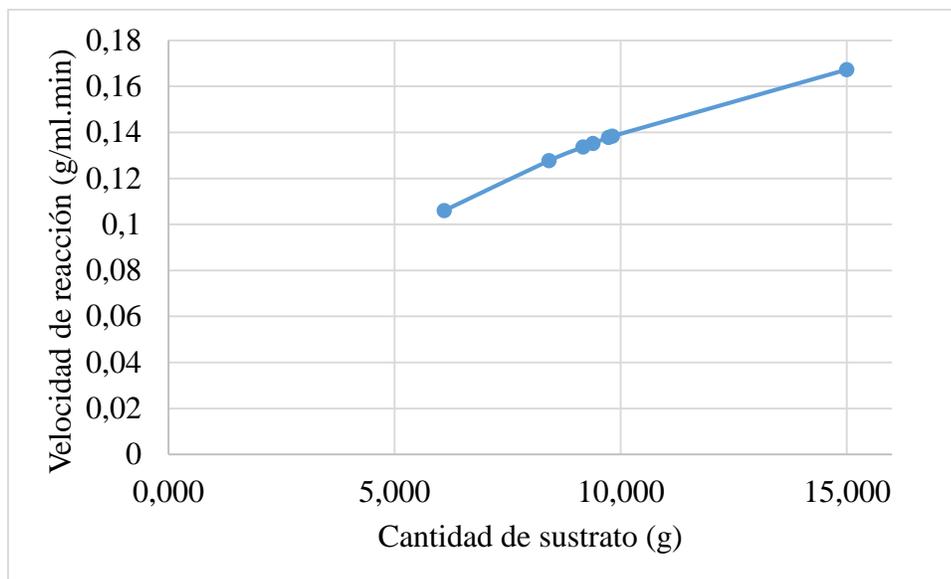
Reemplazando valores en de la ecuación (3-5) en la tabla III-9, se observan los valores de la velocidad de reacción respecto a la cantidad de sustrato.

Tabla III-9: Datos de la cinética de la hidrólisis enzimática

Cantidad de sustrato (g)	Velocidad de reacción (g/ml min)
15,000	0,167
9,816	0,138
9,735	0,138
9,384	0,135
9,168	0,134
8,412	0,128
6,098	0,106

Fuente: Elaboración propia, 2021

La figura 3-5, se observa la curva de velocidad de reacción para la producción de azúcares reductores en base a la tabla III-9.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-5 Cinética de la hidrólisis enzimática determinada mediante la ecuación de Michaelis – Menten

3.3 Resultados del proceso de fermentación alcohólica y destilación

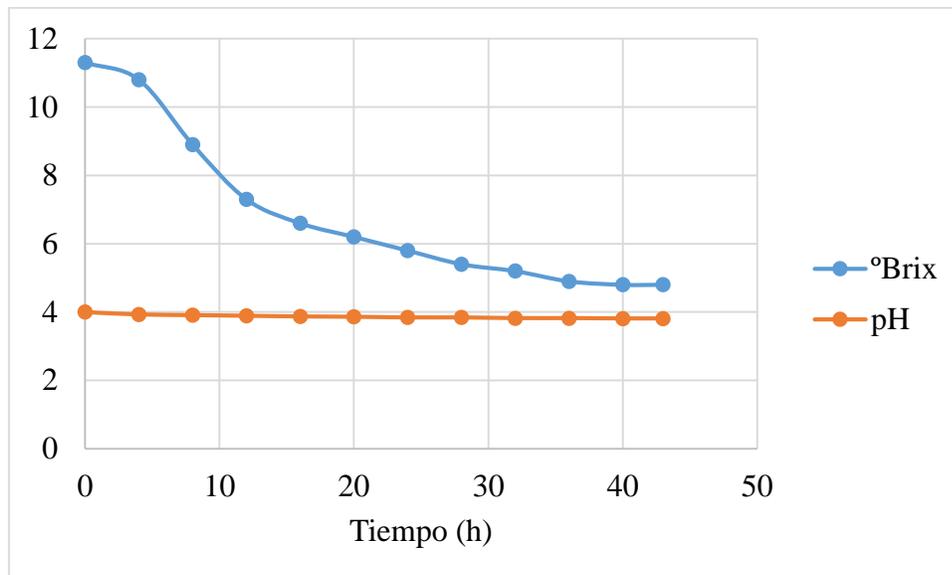
En la tabla III-10, se muestra la variación de los °Brix, pH en función del tiempo. Se puede apreciar que la fermentación está comprendida entre las 42 a 48 horas, llevándose a cabo una disminución del °Brix y pH hasta permanecer constantes.

Tabla III-10: Medición de los °Brix y pH en función del tiempo

Tiempo (h)	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH
0	11,3	4	11,5	4	11,4	5	11,8	5
4	10,8	3,93	9,8	3,92	11,1	4,95	11,2	4,91
8	8,9	3,91	8,5	3,90	9,2	4,83	8,7	4,85
12	7,3	3,89	7,3	3,89	7,9	4,71	7,1	4,76
16	6,6	3,87	6,5	3,88	6,3	4,67	6,3	4,67
20	6,2	3,86	6,2	3,86	6,1	4,65	6,1	4,64
24	5,8	3,84	6,0	3,85	6,0	4,63	5,9	4,63
28	5,4	3,84	5,6	3,83	5,9	4,61	5,8	4,61
32	5,2	3,82	5,3	3,81	5,8	4,60	5,7	4,60
36	4,9	3,82	5,0	3,80	5,7	4,58	5,5	4,58
40	4,8	3,81	4,7	3,78	5,5	4,57	5,4	4,57
43	4,8	3,81	4,7	3,78	-	-	-	-
44	-	-	-	-	5,5	4,57	5,3	4,55
48	-	-	-	-	-	-	5,3	4,55

Fuente: Elaboración propia, 2021

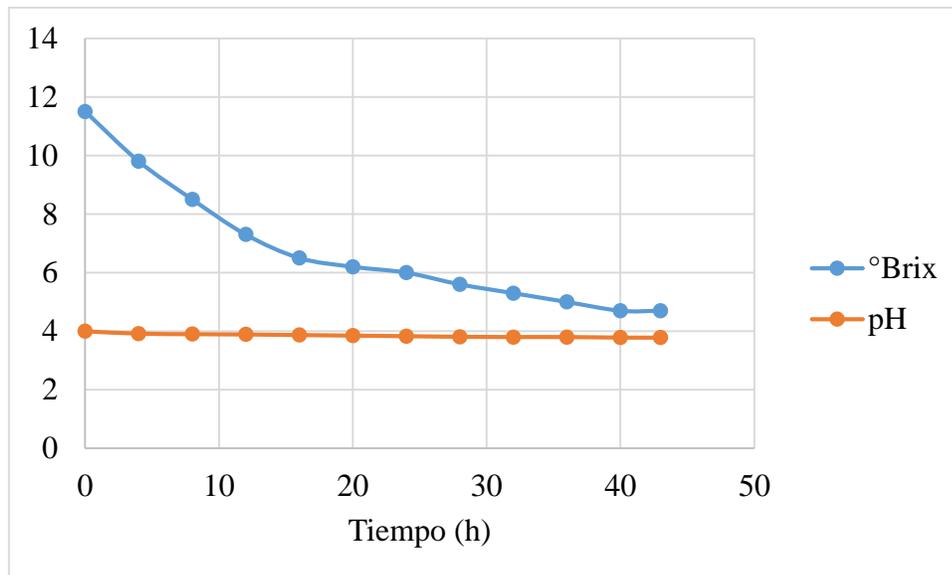
La figura 3-6, muestra la variación de los °Brix y pH en función del tiempo; partiendo de un °Brix igual a 11,3, la levadura *Saccharomyces cerevisiae bayanus* tiene una fase de adaptación en las primeras 4 horas, concluyendo la etapa de fermentación alcohólica en las 43 horas. Así mismo la variación del pH fue mínima, partió de 4 hasta reducir a 3,81.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-6 Prueba 1, tiempo vs. pH y °Brix

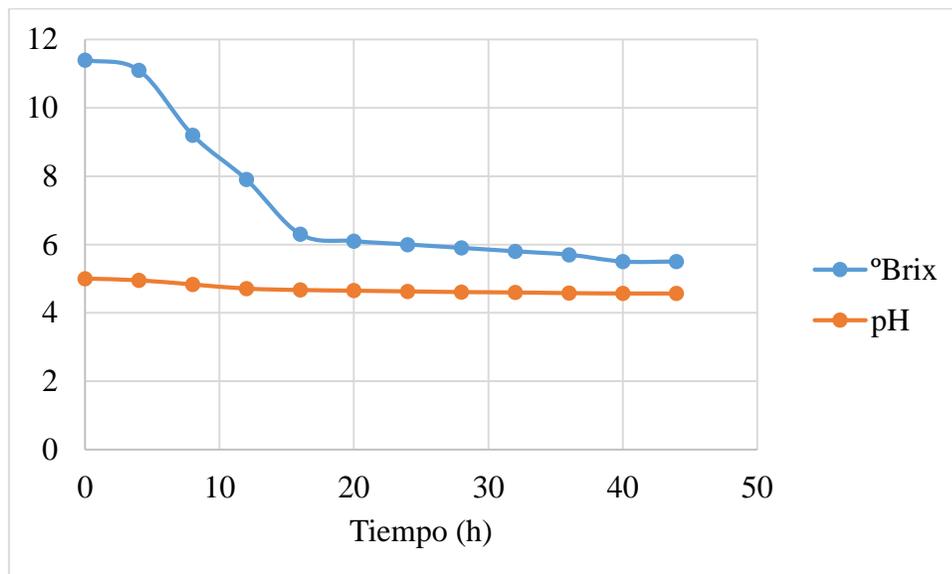
En la figura 3-7, muestra la variación de los °Brix y pH en función del tiempo; partiendo de un °Brix igual a 11,5, posteriormente se observa una reducción considerable de los °Brix concluyendo la etapa de fermentación alcohólica en las 43 horas y 4,7 °Brix. También se observa una variación de pH, partió de 4 hasta reducir a 3,78.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-7 Prueba 2, tiempo vs. pH y °Brix

En la figura 3-8, muestra la variación de los °Brix y pH en función del tiempo; partiendo de un °Brix igual a 11,4, la levadura *Saccharomyces cerevisiae bayanus* entro en una fase de adaptación en las primeras 4 horas. Posteriormente se observa una reducción de °Brix considerable hasta las 16 horas para luego ver una reducción mínima, la variación del pH fue mínima de 5 hasta reducir a 4,57.

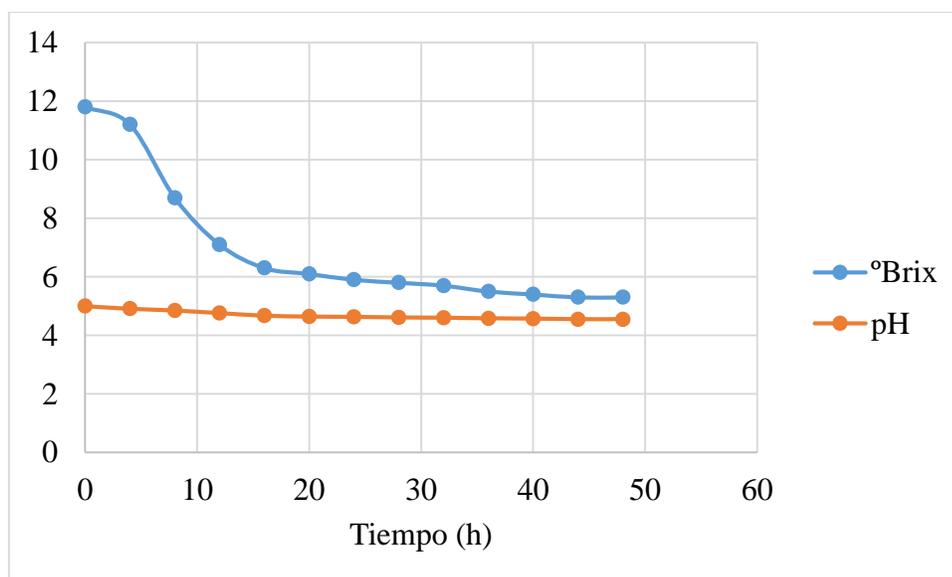


Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-8 Prueba 3, tiempo vs. pH y °Brix

En la figura 3-9, muestra la variación de los °Brix y pH en función del tiempo; se observa que partiendo de 11,8 °Brix, la levadura *Saccharomyces cerevisiae bayanus* tiene una fase de adaptación en las primeras 4 horas. Posteriormente ocurre una reducción de °Brix considerable hasta las 20 horas, luego se aprecia una reducción mínima concluyendo la etapa de fermentación alcohólica en las 48 horas.

La variación del pH es de 5 hasta reducir a 4,55.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-9 Prueba 4, tiempo vs. pH y °Brix

Observando la variación de los °Brix y pH podemos concluir que los valores son muy cercanos esto debido que el tiempo de fermentación es muy corto, durante las primeras 16 horas de fermentación, la levadura a metabolizado cantidades apreciables de azúcar principalmente donde la cantidad de levadura es mayor. A medida que transcurre el tiempo se observa una tendencia de las curvas a mantenerse constante mostrando que la levadura *Saccharomyces cerevisiae bayanus* está entrando en fase estacionaria y una posterior muerte.

Para determinar la cantidad de alcohol producido, se procedió a la destilación de las pruebas. Los resultados se muestran en la tabla III-11.

Tabla III-11: Bioetanol obtenido para el diseño experimental en el proceso de fermentación alcohólica

Prueba	Volumen fermentado (ml)	Volumen destilado producto de cabeza (ml)	Grado alcohólico producto de cabeza (°GL)	Volumen de alcohol obtenido (ml)
1	1000	337	9,0	30,33
2	1000	319	9,6	30,62
3	1000	313,5	10,0	32,08
4	1000	323,6	12,3	39,80

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla III-12, se presentan los resultados del rendimiento de alcohol, obtenidos de la parte experimental, así como sus respectivas replicas (ver Anexo F).

Tabla III-12: Resultados del rendimiento de alcohol obtenido

Prueba	Cantidad de levadura (g)	pH	Rendimiento
1	1,0	4,0	44,82
2	1,2	4,0	45,25
3	1,0	5,0	47,40
4	1,2	5,0	58,81
5	1,0	4,0	43,75
6	1,2	4,0	45,69
7	1,0	5,0	47,64
8	1,2	5,0	56,86

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla III-12, se observa el valor del rendimiento oscila entre 44,82% y 58,81%; estos valores son el resultado de un tiempo de fermentación aproximadamente 48 horas.

3.3.1 Análisis estadístico del diseño factorial en proceso de fermentación

El diseño factorial se realiza con el propósito de establecer si los factores de cantidad de levadura y pH tienen influencia en el rendimiento de alcohol obtenido, en la etapa de fermentación. En este sentido se selecciona un diseño 2^2 es decir, dos factores en dos niveles.

En la tabla III-13, se muestra los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado.

Tabla III-13: Datos introducidos para el análisis de varianza en el proceso de fermentación

Prueba	Cantidad de levadura	pH	Rendimiento
1	-1	-1	44,82
2	+1	-1	45,25
3	-1	+1	47,40
4	+1	+1	58,81
5	-1	-1	43,75
6	+1	-1	45,69
7	-1	+1	47,64
8	+1	+1	56,86

Fuente: Elaboración propia, 2021

Para obtener un resultado significativo se debe tomar en cuenta los factores y sus interacciones entre sí, que tenga un valor menor a 0,05 (lo que significa un nivel de probabilidad del 95%).

En la tabla III-14, se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta, rendimiento, tomando en cuenta los factores cantidad de levadura y pH, así como su interacción.

Tabla III-14: Análisis de varianza en la etapa de fermentación alcohólica

Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	229,483	3	76,494	117,716	0,000
Intersección	19033,956	1	19033,956	29290,895	0,000
Cantidad de levadura	66,125	1	66,125	101,758	0,001
pH	121,680	1	121,680	187,250	0,000
Cantidad de levadura – pH	41,678	1	41,678	64,138	0,001
Error	2,599	4	0,650		
Total	19266,039	8			
Total corregida	232,083	7			

Fuente: Elaboración propia, 2021

Se puede observar, que cumplen el requisito las dos variables, una interacción, que es de cantidad de levadura – pH (0,001).

3.3.2 Análisis de regresión lineal en el proceso de fermentación alcohólica

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuesta.

La tabla III-15, muestra los valores de los coeficientes del modelo en el proceso de fermentación alcohólica.

Tabla III-15: Coeficientes del modelo en el proceso de fermentación alcohólica

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Significancia	Intervalo de confianza de 95% para B	
	B	Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	48,778	0,285		171,146	0,000	47,986	49,569
Cantidad de levadura	2,875	0,285	0,534	10,088	0,001	2,084	3,666
pH	3,900	0,285	0,724	13,684	0,000	3,109	4,691
Cantidad levadura – pH	2,283	0,285	0,424	8,009	0,001	1,491	3,074

Fuente: Elaboración propia, 2021

De los datos indicados en la tabla III-15, se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de fermentación, correlaciona el rendimiento de alcohol obtenido con las variables, cantidad de levadura, pH y la interacción cantidad de levadura – pH, para el caso analizado es el siguiente:

$$\text{Rendimiento} = 48,778 + 2,875 * \text{CL} + 3,900 * \text{pH} + 2,283 * \text{CL} * \text{pH} \quad (\text{Ecuación 3-6})$$

Donde:

CL = Cantidad de levadura

Por consiguiente, el rendimiento está en función de la cantidad de levadura, el pH y la interacción de ambos, siendo estos de signo positivo, es decir que mientras mayor sea la cantidad de levadura y el pH, se ve favorecido el rendimiento de alcohol.

3.3.3 Cinética de la fermentación alcohólica

Para poder predecir la rapidez o consumo de reactantes, es decir el grado de influencia de los azúcares en la fermentación alcohólica, se determinó la cinética química de la reacción a través del método integral (Levenspiel, 1986). Para un sistema discontinuo de volumen constante, la medida de la velocidad de reacción del reactivo A corresponden a la ecuación (3-7):

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k f(C_A) \quad (\text{Ecuación 3-7})$$

$$-r_A = k C_A^n \quad (\text{Ecuación 3-8})$$

Donde:

$-r_A$ = velocidad de desaparición de la reacción fermentativa (g/ml. min), k es la constante cinética, C_A la concentración de reactante A (g/ml) y n orden de reacción.

Linealizando la ecuación (3-8), resulta:

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k + n \ln(C_A) \quad (\text{Ecuación 3-9})$$

$$y = b + a x \quad (\text{Ecuación 3-10})$$

La ecuación (3-10), representa la ecuación de una recta.

El modelo de la cinética de crecimiento celular, se llevó a cabo mediante el método de los tres puntos para determinar el modelo cinético en función del tiempo y los °Brix de fermentación a partir de los resultados experimentales, para encontrar la pendiente en cada uno de los puntos observados por lo que se trabajó con la ecuación (3-11), ecuación (3-12) y ecuación (3-13).

$$Y_o = \frac{-3Y_o + 4Y_1 - Y_2}{2h} \quad (\text{Ecuación 3-11})$$

$$Y_1 = \frac{-Y_o + Y_2}{2h} \quad (\text{Ecuación 3-12})$$

$$Y_2 = \frac{Y_o - 4Y_1 + 3Y_2}{2h} \quad (\text{Ecuación 3-13})$$

Donde:

h = Intervalo de tiempo

Y_0, Y_1, Y_2 = datos °Brix, tomados de la tabla III-10.

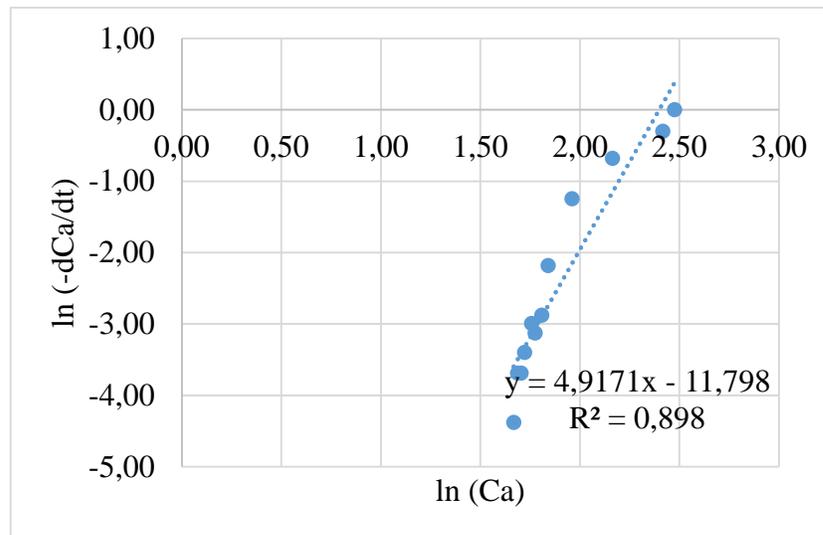
La tabla III-16, indica los resultados del método de los tres puntos de una ecuación linealizada para encontrar la pendiente y determinar la cinética de en la etapa de fermentación (ver Anexo G).

Tabla III-16: Estadísticas de la cinética en el proceso de fermentación alcohólica por el método de los tres puntos

Tiempo (h)	°Brix	$(-dCa/dt)$	$\ln(-dCa/dt)$	$\ln(Ca)$
0	11,9	0	0	2,48
4	11,2	0,74	-0,30	2,42
8	8,7	0,51	-0,68	2,16
12	7,1	0,29	-1,25	1,96
16	6,3	0,11	-2,18	1,84
20	6,1	0,06	-2,88	1,81
24	5,9	0,04	-3,13	1,77
28	5,8	0,05	-3,00	1,76
32	5,6	0,03	-3,40	1,72
36	5,5	0,02	-3,69	1,70
40	5,4	0,02	-3,69	1,69
44	5,3	0,01	-4,38	1,67
48	5,3	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la figura 3-10, se representa una recta para determinar la cinética en la etapa de fermentación alcohólica



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-10 Linealización para determinar la cinética de fermentación alcohólica

Reemplazando valores de la ecuación (3-13), se tiene:

$$y = 4,9171 x - 11,798$$

Sabiendo que:

$$b = \ln k = -11,798, \text{ aplicando anti logaritmo } k = 7,519 \cdot 10^{-6}$$

$$a = n = 4,9171$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-8), se tiene:

$$-r_A = 7,519 \cdot 10^{-6} Ca^{4,9171} \quad (\text{Ecuación 3-14})$$

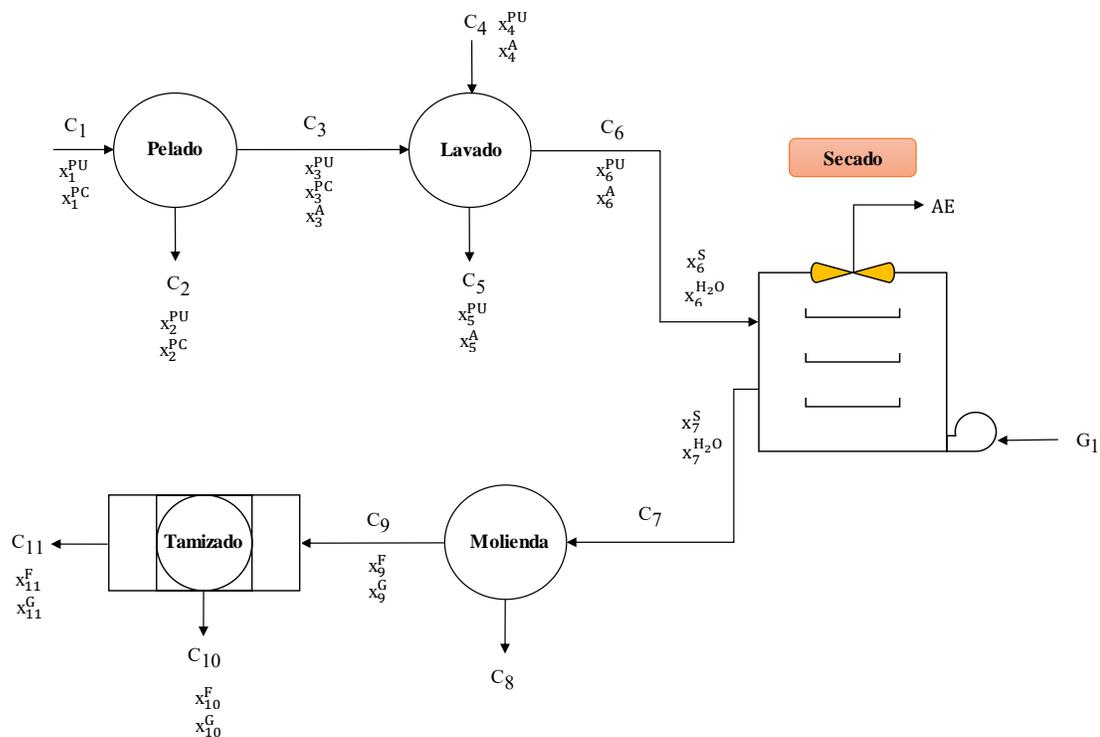
La ecuación (3-14), representa el modelo matemático que rige la cinética de la etapa de fermentación alcohólica con una constante de $7,519 \cdot 10^{-6}$ y un orden igual a 4,9171, esta ecuación nos permite determinar la velocidad del proceso de fermentación en función de la reducción de los °Brix.

3.4 Balance de materia para la obtención de bioetanol del camote

Para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote, se dividió en tres partes; acondicionamiento de la materia prima, hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica.

3.4.1 Balance de materia en el acondicionamiento de la materia prima

El balance de materia del proceso de acondicionamiento de la materia prima, se realizó para una base de cálculo de 1000 g de camote y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-11



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-11 Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de camote comestible seco molido

Donde:

C_1 = Cantidad de camote (g)

C_2 = Cantidad de cáscara camote (g)

C_3 = Cantidad de camote comestible (g)

C_4 = Cantidad de agua destilada (g)

C_5 = Cantidad de agua residual (g)

C_6 = Cantidad de camote comestible lavado (g)

C_7 = Cantidad de camote comestible seco (g)

C_8 = Cantidad de pérdida de camote comestible seco (g)

C_9 = Cantidad de camote comestible seco molido (g)

C_{10} = Cantidad retenida de camote comestible seco molido(g)

C_{11} = Cantidad de camote comestible seco molido en el tamizado (g)

x_1^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_1

x_1^{PC} = Fracción de cáscara de camote en la corriente C_1

x_2^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_2

x_2^{PC} = Fracción de cáscara de camote en la corriente C_2

x_3^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_3

x_3^{PC} = Fracción de cáscara de camote en la corriente C_3

x_3^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_3

x_3^A = Fracción de agua destilada en la corriente C_3

x_4^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_4

x_4^A = Fracción de agua destilada en la corriente C_4

x_5^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_5

x_5^A = Fracción de agua destilada en la corriente C_5

x_6^{PU} = Fracción de camote comestible en la corriente C_6

x_6^A = Fracción de agua destilada en la corriente C_6

X_6^S = Fracción sólida de camote comestible

$x_6^{H_2O}$ = Fracción de agua en el camote comestible

X_7^S = Fracción sólida de camote comestible seco

$x_7^{H_2O}$ = Fracción de agua en el camote comestible seco

x_9^F = Fracción de los componentes finos en la corriente C_9

x_{10}^F = Fracción de los componentes finos en la corriente C_{10}

x_{11}^F = Fracción de los componentes finos en la corriente C_{11}

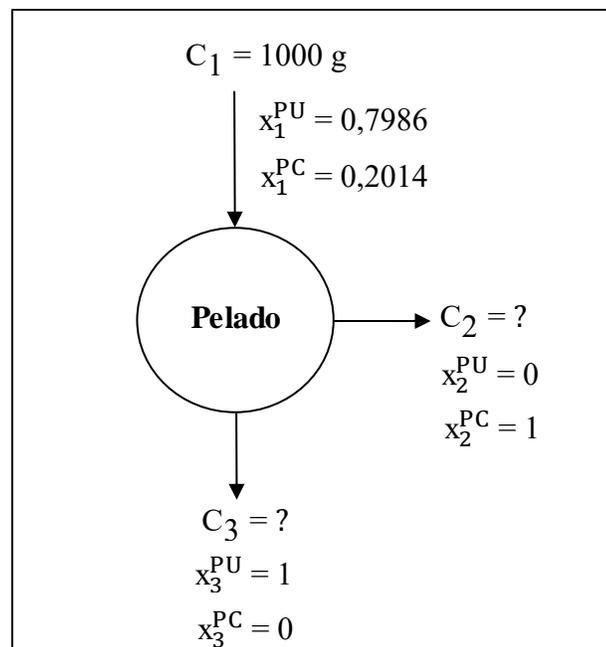
x_9^G = Fracción de los componentes gruesos en la corriente C_9

x_{10}^G = Fracción de los componentes gruesos en la corriente C_{10}

x_{11}^G = Fracción de los componentes gruesos en la corriente C_{11}

3.4.1.1 Balance de materia en la etapa de pelado

La figura 3-12, muestra el proceso de balance de materia en la etapa de pelado partiendo de 1000 g de camote para realizar el balance de materia. En esta etapa la fracción de camote comestible es de 0,7986 y la fracción de cáscara de camote igual 0,2014, datos que fueron tomados de la parte experimental del trabajo.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-12 Etapa de pelado del camote

Balance de materia global en la etapa de pelado del camote:

$$C_1 = C_2 + C_3$$

(Ecuación 3-15)

Balance parcial para la fracción comestible en la etapa de pelado del camote:

$$C_1 * x_1^{PU} = C_2 * x_2^{PU} + C_3 * x_3^{PU}$$

$$1000 * 0,7986 = C_2 * 0 + C_3 * 1$$

$$C_3 = 798,600 \text{ g de camote comestible}$$

Balance parcial para la fracción de cáscara de camote en la etapa de pelado del camote:

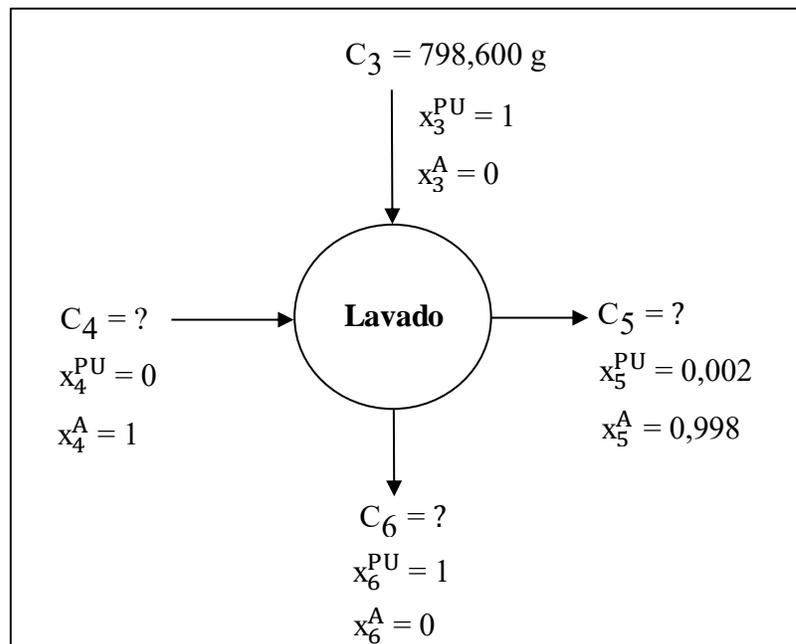
$$C_1 * x_1^{PC} = C_2 * x_2^{PC} + C_3 * x_3^{PC}$$

$$1000 * 0,2014 = C_2 * 1 + C_3 * 0$$

$$C_2 = 201,400 \text{ g de cáscara de camote}$$

3.4.1.2 Balance de materia en la etapa de lavado del camote comestible

En la figura 3-13, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa del lavado del camote pelado. Se procedió a lavar el camote comestible en una relación másica de 1:1 (agua destilada/camote comestible).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-13 Etapa de lavado del camote comestible

Balance de materia global en la etapa de lavado del camote comestible:

$$C_3 + C_4 = C_5 + C_6 \quad (\text{Ecuación 3-16})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con una relación 1:1 de cantidad de agua destilada con camote comestible.

$$\frac{C_3}{C_4} = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ g}} \quad (\text{Ecuación 3-17})$$

Entonces:

$$C_3 = C_4 = 798,600 \text{ g de agua destilada}$$

Balance parcial para el agua destilada en la etapa de lavado del camote comestible:

$$C_3 * x_3^A + C_4 * x_4^A = C_5 * x_5^A + C_6 * x_6^A$$

$$798,600 * 0 + 798,600 * 1 = C_5 * 0,998 + C_6 * 0$$

$$C_5 = 800,200 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la porción de camote comestible en la etapa de lavado:

$$C_3 * x_3^{PU} + C_4 * x_4^{PU} = C_5 * x_5^{PU} + C_6 * x_6^{PU}$$

$$798,600 * 1 + 798,600 * 0 = 800,200 * 0,002 + C_6 * 1$$

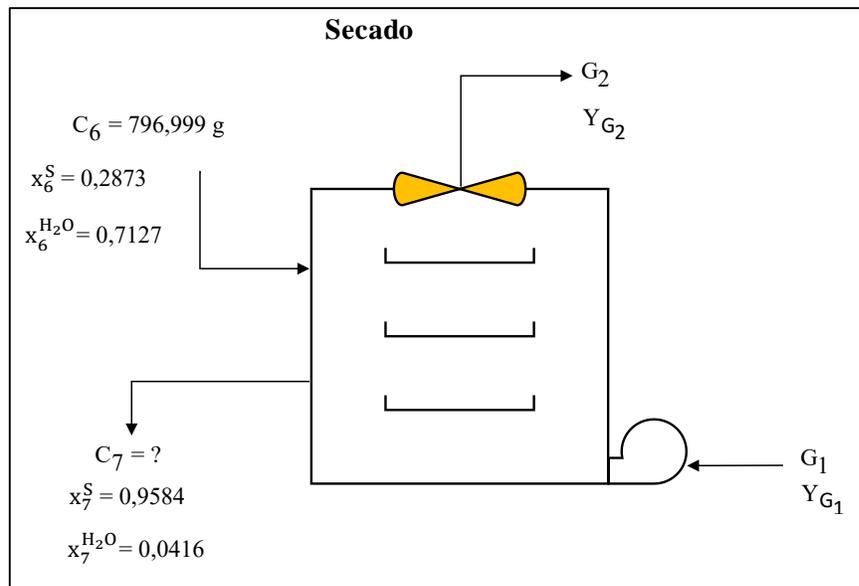
$$C_6 = 796,999 \text{ g de camote comestible lavado}$$

3.4.1.3 Balance de materia en la etapa de secado del camote comestible

Una vez finalizada la etapa del lavado del camote comestible, es necesario cortarlo en rodajas (1 a 3 milímetros de espesor) para su posterior secado. Es importante mencionar que no se contempla en el balance de materia de la etapa de cortado del camote comestible, porque todo el camote es cortado y llevado al secadero.

En la figura 3-14, se muestra la etapa de secado del camote comestible con un peso de 796,999 g con un contenido de humedad inicial en base húmeda 71,27 % determinado mediante el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (ver tabla II-1) y al finalizar

la etapa de secado del camote comestible la humedad es de 4,16% (humedad determinada por un secado con radiación infrarroja).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-14 Etapa de secado del camote comestible

El balance de materia global en la etapa de secado del camote comestible, se tomó en cuenta la ecuación (3-18) mencionada por (Valiente, 1994).

$$C_6 + G_1 = C_7 + G_2 \quad (\text{Ecuación 3-18})$$

Balance de parcial por componentes sólidos en la etapa de secado:

$$C_6 * X_6^S = C_7 * X_7^S$$

$$796,999 * 0,2873 = C_7 * 0,9584$$

$$C_7 = 238,917 \text{ g de camote comestible seco}$$

Balance parcial en base seca en la etapa de secado; para ello se tomó en cuenta la ecuación (3-19) mencionada por (Singh & Heldman, 2009).

$$C_6 * X_6 + G_1 * Y_{G1} = C_7 * X_7 + G_2 * Y_{G2} \quad (\text{Ecuación 3-19})$$

Donde:

G_1 = Caudal másico de aire seco a la entrada del secadero (Kg aire seco/h)

G_2 = Caudal másico de aire seco a la salida del secadero (Kg aire seco/h)

C_6 = Caudal másico de sólido seco (Kg sólido seco/h)

C_7 = Caudal másico de sólido seco (Kg sólido seco/h)

X = Humedad del producto (Kg agua/Kg sólido seco)

Y = Humedad del aire (Kg agua/Kg aire seco)

Para determinar la cantidad de aire seco que circula en el secadero, se considerando un sistema abierto:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$C_6 = C_7 = C$$

Reemplazando variables en la ecuación (3-19) se tiene:

$$C * X_6 + G * Y_{G_1} = C * X_7 + G * Y_{G_2} \quad (\text{Ecuación 3-20})$$

Dividiendo la ecuación (3-20) entre C, se tiene:

$$X_6 + G * Y_{G_1} / C = X_7 + G * Y_{G_2} / C \quad (\text{Ecuación 3-21})$$

Ordenando la ecuación (3-21), se tiene:

$$\frac{G * Y_{G_2}}{C} - \frac{G * Y_{G_1}}{C} = X_6 - X_7 \quad (\text{Ecuación 3-22})$$

Factorizando G/C de la ecuación (3-22), se tiene:

$$G = \frac{(X_6 - X_7) * C}{Y_{G_2} - Y_{G_1}} \quad (\text{Ecuación 3-23})$$

A partir de la ecuación (3-23), se puede determinar la cantidad de aire seco en la etapa de secado del camote comestible.

El contenido de humedad de base seca del camote comestible en la etapa del secado, se determinó mediante la ecuación (3-24) (Singh & Heldman, 2009).

$$X = \frac{X_{\text{agua}}}{X_{\text{sólido seco}}} \quad (\text{Ecuación 3-24})$$

Entonces la humedad inicial en base seca en etapa de secado es:

$$X_6 = \frac{0,7127}{0,2873}$$

$$X_6 = 2,4807 \text{ Kg agua/Kg sólido seco}$$

Para calcular el contenido de humedad en base seca al final de la etapa de secado se procede con la ecuación (3-24):

$$X_7 = \frac{0,0416}{0,9584}$$

$$X_7 = 0,0434 \text{ Kg agua/Kg sólido seco}$$

Según (Gutierrez, 1875), la altura de la ciudad de Tarija es 1866 msnm; por tanto, los datos fueron introducidos en el software Psicrom 1,0 de psicrometría y los resultados se muestran en la tabla III-17, en base a temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo que fueron medidos a la entrada y salida del secador de tiro forzado (ver Anexo I).

Tabla III-17: Propiedades psicométricas del aire

Propiedades	Aire frío	Aire saturado
Tbs (°C)	20	40
Tbh (°C)	15	26
HR%	61,83	35,81
Y (g/agua/Kg aire seco)	11,37	21,09
PVP(kpa)	1,446	2,644

Fuente: Elaboración propia, 2021

Donde:

HR = Humedad relativa

PVP = Presión parcial de vapor de agua

Y = Humedad absoluta (g de agua/Kg aire seco)

Tbs = Temperatura del bulbo seco

Tbh = Temperatura del bulbo húmedo

Para una cantidad de camote comestible de 796,999 g la relación de cantidad de materia seca (C) es de 238,917 g.

Por lo tanto, para calcular la cantidad de masa de aire seco se utiliza la ecuación (3-23), citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$G = \frac{(2,4807 - 0,0434) * 238,917}{21,09 - 11,37}$$

$G = 59,909$ Kg de aire seco

Para calcular de masa de agua evaporada se tomó en cuenta la siguiente ecuación:

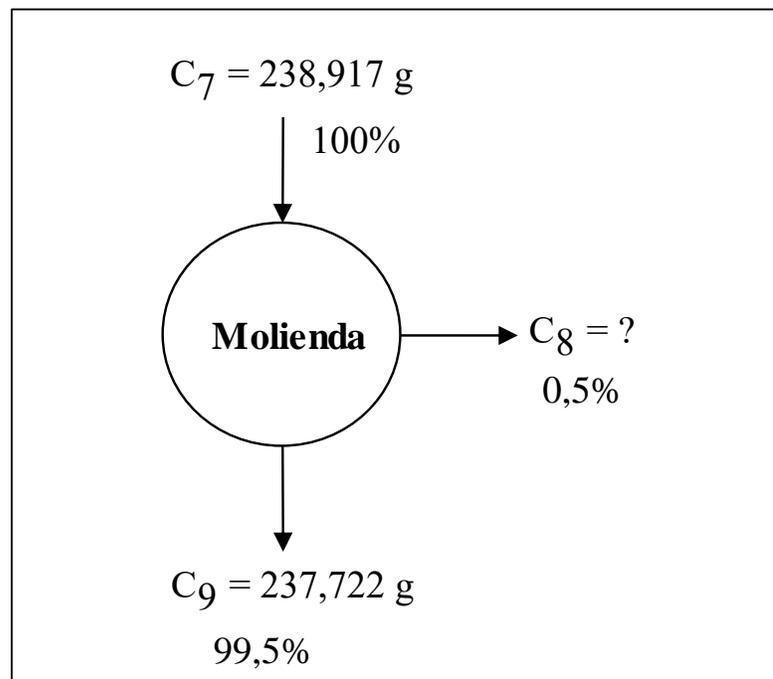
$$AE = (X_6 - X_7) * C \quad (\text{Ecuación 3-25})$$

$$AE = (2,4807 - 0,0434) * 238,917$$

$AE = 582,312$ g de agua evaporada

3.4.1.4 Balance de materia en la etapa de molienda del camote comestible seco

En la figura 3-15, se muestra el balance de materia en la etapa de molienda del camote seco. En la etapa ingresa 238,917 g y sale 237,722 g (peso determinado en una balanza analítica).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-15 Etapa de molienda del camote comestible seco

Balance de materia global en la etapa de molienda del camote comestible seco:

$$C_7 = C_8 + C_9 \quad (\text{Ecuación 3-26})$$

Balance parcial de la fracción de camote comestible seco para determinar la pérdida en la etapa de molienda:

$$C_8 = C_7 * 0,5 / 100$$

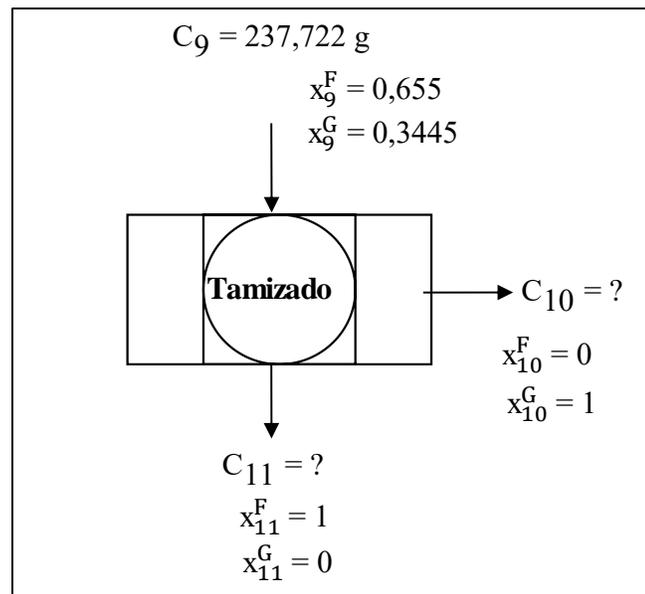
$$C_8 = 237,917 * 0,5 / 100$$

$$C_8 = 1,185 \text{ g de pérdida de camote comestible seco}$$

3.4.1.5 Balance de materia en la etapa de tamizado del camote comestible seco molido

En la figura 3-16, se muestra el balance de materia en la etapa de tamizado, para tal efecto se realizó con 237,722 g de camote comestible proveniente de la etapa de molienda.

Cabe mencionar que no existe una reutilización de la masa retenida de camote comestible seco en la etapa de tamizado, por el contenido de fibra en la merma.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-16 Etapa de tamizado del camote comestible seco molido

Balance de materia global en la etapa de tamizado del camote comestible seco molido:

$$C_9 = C_{10} + C_{11} \quad (\text{Ecuación 3-27})$$

Balance parcial para la fracción de componentes finos en la etapa de tamizado del camote comestible seco molido.

$$C_9 * x_9^F = C_{10} * x_{10}^F + C_{11} * x_{11}^F$$

$$237,722 * 0,6555 = C_{10} * 0 + C_{11} * 1$$

$$C_{11} = 155,827 \text{ g de camote comestible seco tamizado}$$

Balance parcial para la fracción de componentes gruesos en la etapa de tamizado del camote comestible seco molido.

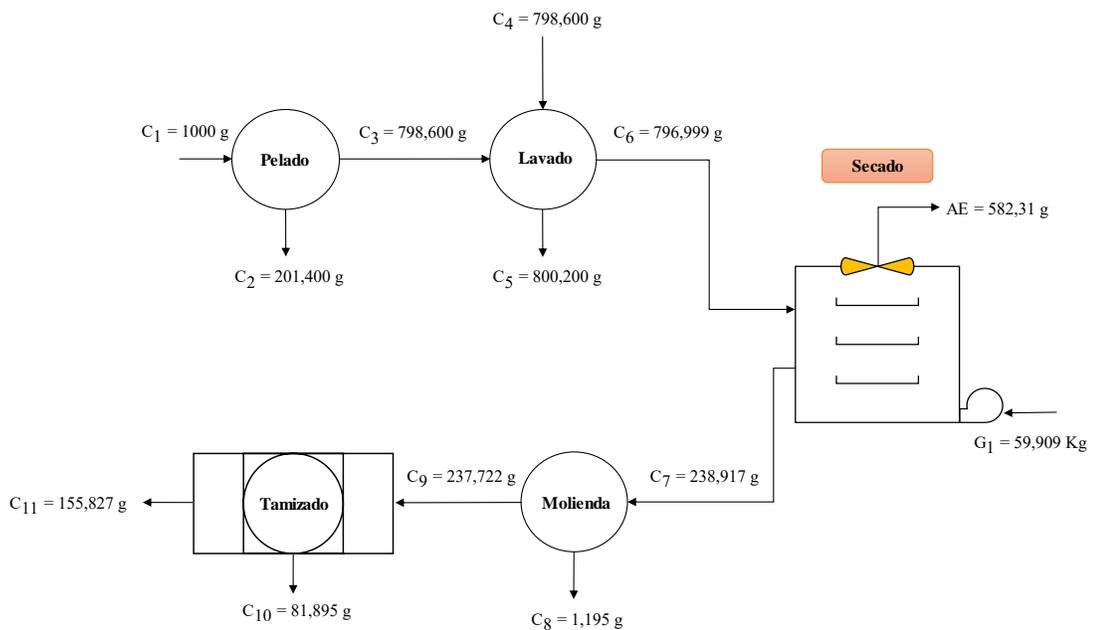
$$C_9 * x_9^G = C_{10} * x_{10}^G + C_{11} * x_{11}^G$$

$$237,722 * 0,3445 = C_{10} * 1 + C_{11} * 0$$

$$C_{10} = 81,895 \text{ g de camote comestible seco molido retenido en la etapa de tamizado}$$

3.4.2 Resumen general de balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima

En la figura 3-17, se muestra el resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima.

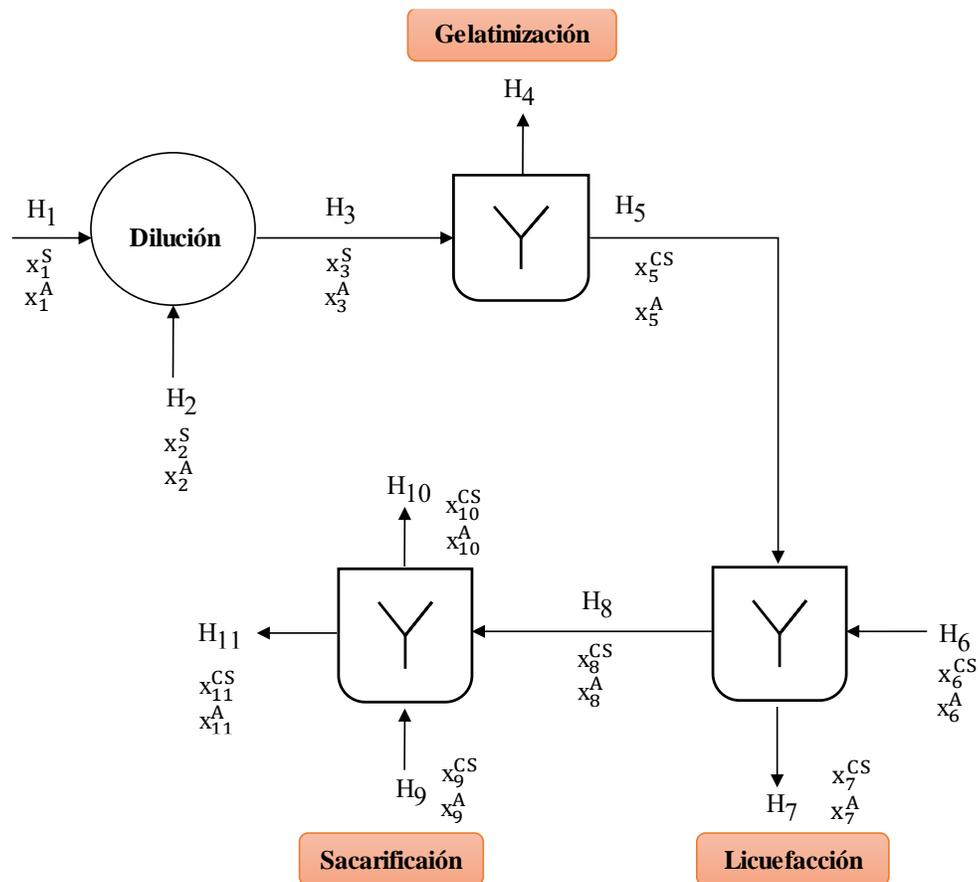


Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-17 Resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima

3.4.3 Balance de materia en la hidrólisis enzimática

El balance de materia del proceso de hidrólisis enzimática, se realizó para una base de cálculo de 60 g de camote comestible seco molido y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-18.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-18 Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática

Donde:

H_1 = Cantidad de sustrato (g)

H_2 = Cantidad de agua destilada (g)

H_3 = Cantidad de dilución preparada (g)

H_4 = Vapor generado en el proceso de gelatinización (g)

H_5 = Dilución gelatinizada (g)

H_6 = Corriente de dosificación en la etapa de licuefacción (g)

H_7 = Cantidad de agua desprendida en la etapa de licuefacción (g)

H_8 = Cantidad de producto de licuefacción (g)

H_9 = Corriente de dosificación en la etapa de sacarificación (g)

H_{10} = Cantidad de agua desprendida en la etapa de sacarificación (g)

H_{11} = Cantidad de producto de sacarificación (g)

X_1^S = Fracción de sustrato en la corriente H_1

x_1^A = Fracción de agua destilada en la corriente H_1

x_2^S = Fracción de sustrato en la corriente H_2

x_2^A = Fracción de agua destilada en la corriente H_2

x_3^S = Fracción de sustrato en la corriente H_3

x_3^A = Fracción de agua destilada en la corriente H_3

x_5^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_5

x_5^A = Fracción de agua en la corriente H_5

x_6^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_6

x_6^A = Fracción de agua en la corriente H_6

x_7^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_7

x_7^A = Fracción de agua en la corriente H_7

x_8^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_8

x_8^A = Fracción de agua en la corriente H_8

x_9^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_9

x_9^A = Fracción de agua en la corriente H_9

x_{10}^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_{10}

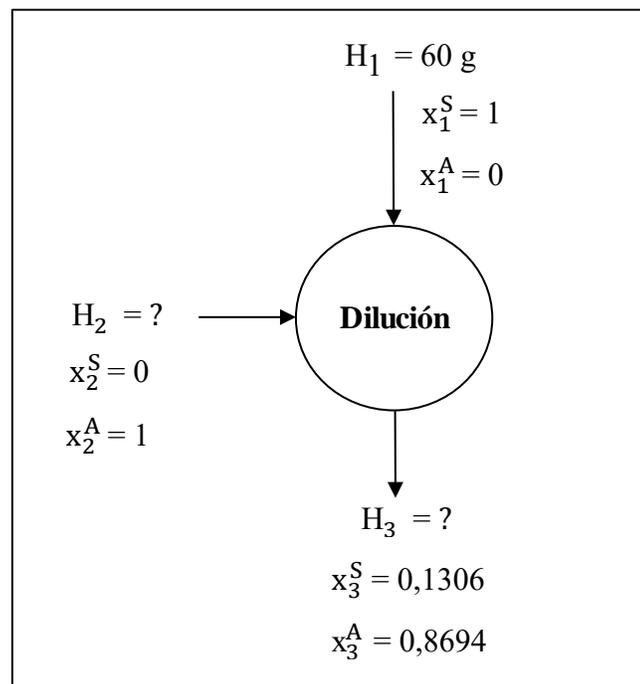
x_{10}^A = Fracción de agua en la corriente H_{10}

x_{11}^{CS} = Fracción de componentes sólidos en la corriente H_{11}

x_{11}^A = Fracción de agua en la corriente H_{11}

3.4.3.1 Balance de materia en la etapa de dilución con camote comestible seco en polvo

Para dar inicio al proceso de hidrólisis enzimática, se trabajó con 60 gramos de camote comestible seco en polvo (sustrato) y 400 ml de agua destilada. La figura 3-19, muestra el proceso del balance de materia en la etapa de dilución.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-19 Etapa de dilución

H_2 = Cantidad de agua destilada (g) = 400 ml * 0,9982 g/ml = 399,280 g

Balance de materia global en la etapa de dilución:

$$H_1 + H_2 = H_3 \quad (\text{Ecuación 3-28})$$

Balance parcial para el sustrato (camote comestible seco molido) en la etapa de dilución:

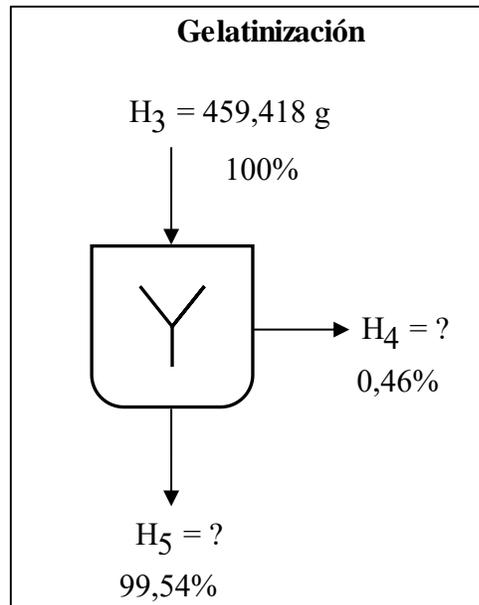
$$H_1 * x_1^S + H_2 * x_2^S = H_3 * x_3^S$$

$$60 * 1 + 399,280 * 0 = H_3 * 0,1306$$

$$H_3 = 459,418 \text{ g de dilución}$$

3.4.3.2 Balance de materia en la etapa de gelatinización

En la figura 3-20, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de gelatinización partiendo de 459,418 g de dilución y rendimientos de cada corriente.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-20 Etapa de gelatinización de la dilución

Balance de materia global en la etapa de gelatinización de la dilución:

$$H_3 = H_4 + H_5 \quad (\text{Ecuación 3-29})$$

Para el cálculo de H_5 , se tomó en cuenta los porcentajes de rendimiento en la etapa de gelatinización:

$$H_5 = H_3(0,9954)$$

$$H_5 = 459,418 * 0,9954$$

$$H_5 = 457,305 \text{ g de dilución gelatinizada}$$

Para el cálculo de H_4 , se tomó en cuenta los porcentajes de rendimiento en la etapa de gelatinización:

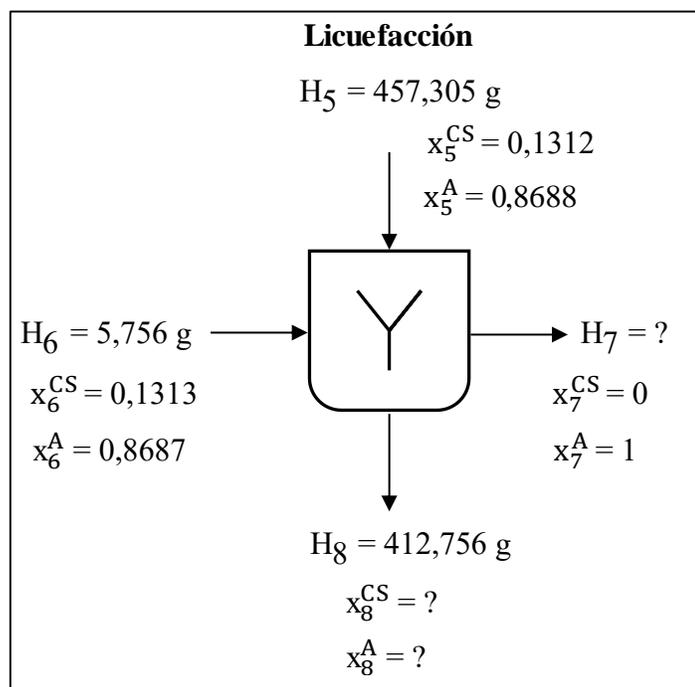
$$H_4 = H_3(0,0046)$$

$$H_4 = 459,418 * 0,0046$$

$H_4 = 2,113$ g de agua desprendida en la etapa de gelatinización

3.4.3.3 Balance de materia en la etapa de licuefacción

En la figura 3-21, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de licuefacción del producto proveniente de la etapa de gelatinización, obteniendo 412,756 g de producto de licuefacción (peso en balanza analítica).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-21 Etapa de licuefacción

Cabe mencionar que la corriente H_6 , es igual a 5,756 g, porque está compuesta por: 0,06 g de CaCl_2 , 0,6 g de enzima α -amilasa y 5,096 g de solución de ácido cítrico 0,1 M.

Balance de materia global en la etapa de licuefacción:

$$H_5 + H_6 = H_7 + H_8 \quad (\text{Ecuación 3-30})$$

Balance parcial para los componentes sólidos en la etapa de licuefacción:

$$H_5 * x_5^{CS} + H_6 * x_6^{CS} = H_7 * x_7^{CS} + H_8 * x_8^{CS}$$

$$457,305 * 0,1312 + 5,756 * 0,1313 = H_7 * 0 + 412,756 * X_8^{CS}$$

$$x_8^{CS} = 0,1472 \text{ fracción sólida en la corriente } H_8$$

Entonces, la fracción de agua en la corriente H_8 :

$$x_8^A = 1 - x_8^{CS} = 1 - 0,1472 = 0,8528$$

Balance parcial para en agua en la etapa de licuefacción:

$$H_5 * x_5^A + H_6 * x_6^A = H_7 * x_7^A + H_8 * x_8^A$$

$$457,305 * 0,8688 + 5,756 * 0,8687 = H_7 * 1 + 412,756 * 0,8528$$

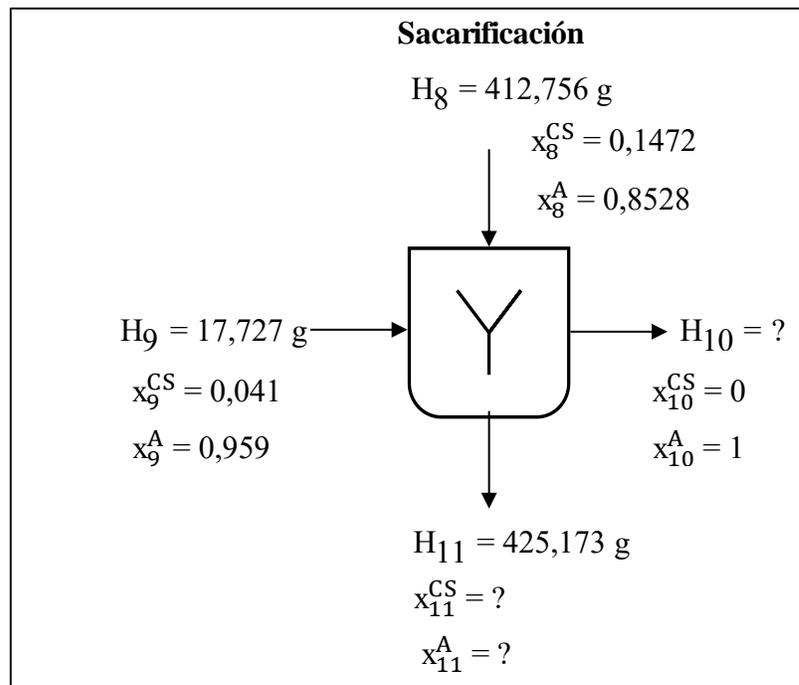
$$H_7 = 50,309 \text{ g de agua desprendida en la etapa de licuefacción}$$

En esta etapa de licuefacción, es necesario determinar la cantidad de azúcares reductores presentes en los 412,756 g de la corriente de salida H_8 .

De la tabla III-7, se sabe que la cantidad de azúcares reductores en el producto de licuefacción es de 6,48 g presentes por cada 100 g, entonces la cantidad de azúcares reductores presente en la corriente H_8 es de 26,747 g.

3.4.3.4 Balance de materia en la etapa de sacarificación

En la figura 3-22, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de sacarificación, obteniendo al final de esta etapa 425,173 g de producto de sacarificación (peso en balanza analítica).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-22 Etapa de sacarificación

Cabe mencionar que la corriente H_9 , es igual a 17,727 g porque está compuesta por: 0,4 g de enzima glucoamilasa y 17,327 g de ácido cítrico 0,1 M.

Balance de materia global en la etapa de sacarificación:

$$H_8 + H_9 = H_{10} + H_{11} \quad (\text{Ecuación 3-31})$$

Balance parcial para los componentes sólidos en la etapa de sacarificación:

$$H_8 * x_8^{CS} + H_9 * x_9^{CS} = H_{10} * x_{10}^{CS} + H_{11} * x_{11}^{CS}$$

$$412,756 * 0,1472 + 17,727 * 0,041 = H_{10} * 0 + 425,173 * x_{11}^{CS}$$

$$x_{11}^{CS} = 0,1446 \text{ fracción sólida de la corriente } H_{11}$$

Entonces, la fracción de agua en la corriente H_{11} :

$$x_{11}^A = 1 - x_{11}^{CS} = 1 - 0,1446 = 0,8554$$

Balance parcial para en agua en la etapa de sacarificación:

$$H_8 * x_8^A + H_9 * x_9^A = H_{10} * x_{10}^A + H_{11} * x_{11}^A$$

$$412,756 * 0,8528 + 17,727 * 0,9590 = H_{10} * 1 + 425,173 * 0,8554$$

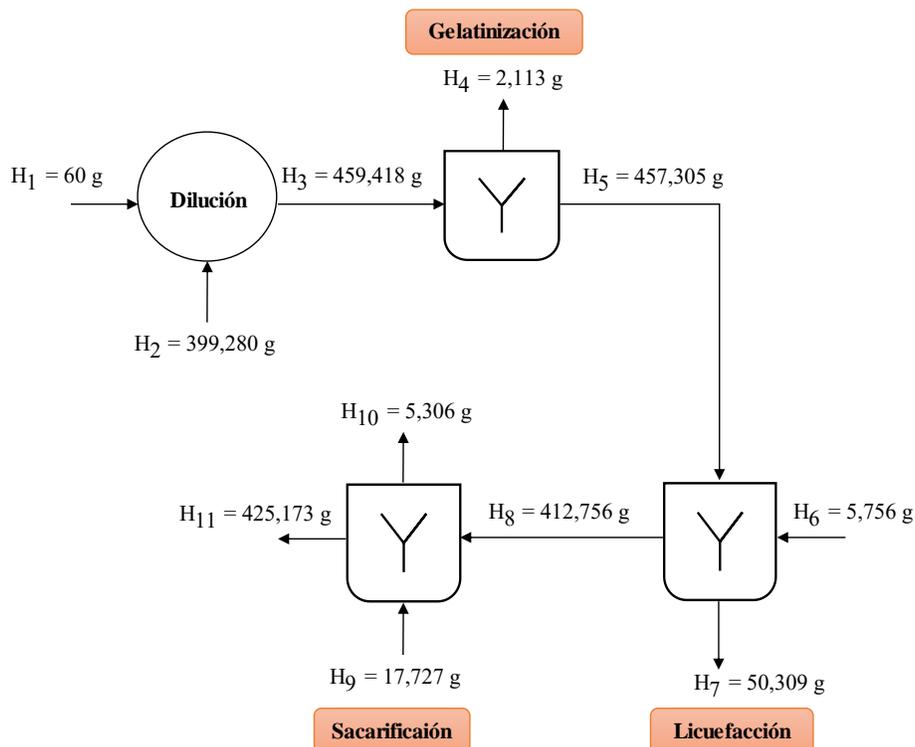
$H_{10} = 5,306$ g de agua desprendido en la etapa de sacarificación

En esta etapa de sacarificación, es necesario determinar la cantidad de azúcares reductores presentes en los 425,173 g corriente de salida H_{11} .

De la tabla III-3, se sabe que la cantidad de azúcares reductor promedio es de 9,75 g presentes en 100 g de producto de sacarificación, esto quiere decir que la cantidad de azúcares reductores presente en la corriente H_{11} es igual a 41,4544 g.

3.4.4 Resumen general del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática

En la figura 3-23, se muestra el resumen general del balance de materia en la etapa de la hidrólisis enzimática.

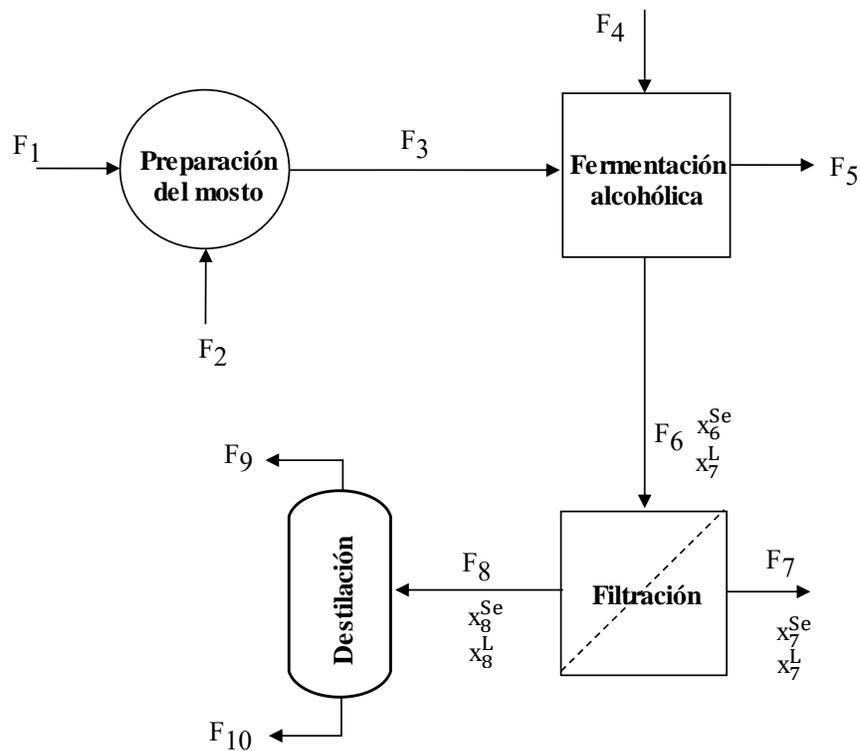


Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-23 Resumen general del balance de materia para el proceso de hidrólisis enzimática

3.4.5 Balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica

Para llevar a cabo el proceso de fermentación alcohólica, se requiere de un volumen igual a 1000 ml de producto hidrolizado del camote comestible seco molido proveniente de la etapa final de sacarificación. La figura 3-24, muestra el diagrama de flujo para obtener bioetanol.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-24 Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de bioetanol

Donde:

F_1 = Cantidad de producto hidrolizado (g)

F_2 = Cantidad de fosfato de amonio (g)

F_3 = Cantidad de mosto preparado (g)

F_4 = Cantidad de levadura activada (g)

F_5 = Cantidad de dióxido de carbono desprendido (g)

F_6 = Cantidad de producto de la fermentación alcohólica (g)

F_7 = Cantidad de sedimento (g)

F_8 = Cantidad de producto fermentado filtrado (g)

F_9 = Cantidad de producto de cabeza (g)

F_{10} = Cantidad de producto de cola (g)

x_6^{Se} = Fracción de sedimento presente en la corriente F_6

x_7^{Se} = Fracción de sedimento presente en la corriente F_7

x_8^{Se} = Fracción de sedimento presente en la corriente F_8

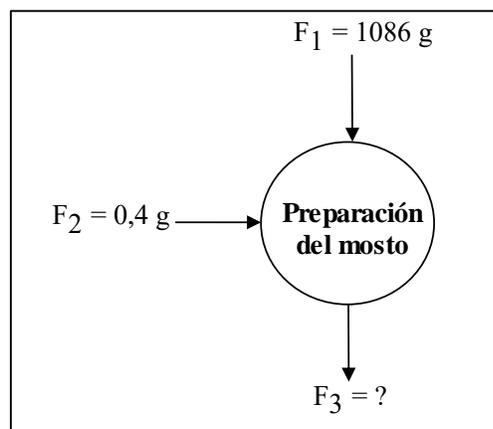
x_6^L = Fracción del mosto sin sedimento presente en la corriente F_6

x_7^L = Fracción del mosto sin sedimento presente en la corriente F_7

x_8^L = Fracción del mosto sin sedimento presente en la corriente F_8

3.4.5.1 Balance de materia en la etapa de preparación del mosto

En la figura 3-25, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de preparación del mosto para llevar a cabo la fermentación, se inició con 1000 ml de producto hidrolizado y 0,4 g de fosfato de amonio.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-25 Etapa de preparación del mosto

d_{mosto} = densidad del mosto = 1,086 g/ml (Dato determinado, ver Anexo M)

V_{mosto} = Volumen del mosto = 1000 ml

Según (Chang, 1999) la ecuación para la densidad es:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \text{ o } d = \frac{m}{V} \quad (\text{Ecuación 3-32})$$

Donde d, m y V significan densidad, masa y volumen, respectivamente.

Partiendo de la ecuación (3-32), para que el balance de materia está en unidad másica, es necesario determinar la masa del producto de sacarificación que ingresa a la etapa de preparación del mosto:

$$F_1 = d_{\text{mosto}} * V_{\text{mosto}}$$

$$F_1 = 1,086 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 1000 \text{ ml}$$

$$F_1 = 1086 \text{ g}$$

Balance de materia general en la etapa de preparación del mosto:

$$F_1 + F_2 = F_3 \quad (\text{Ecuación 3-33})$$

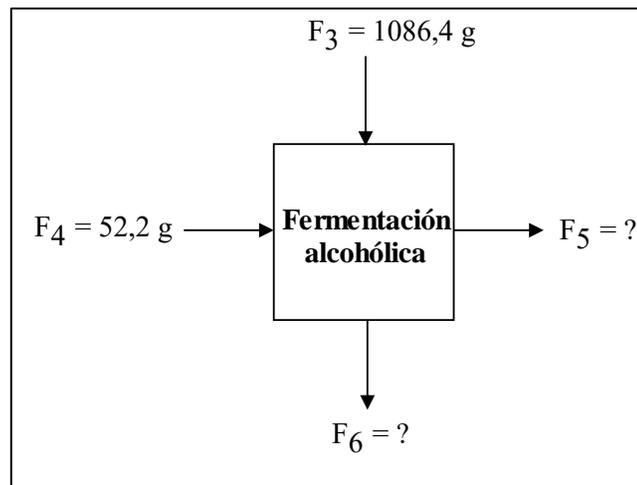
Reemplazando valores en la ecuación (3-33):

$$1086 + 0,4 = F_3$$

$F_3 = 1086,4 \text{ g}$ de mosto preparado para llevar a cabo la fermentación

3.4.5.2 Balance de materia en la etapa de la fermentación alcohólica del mosto preparado

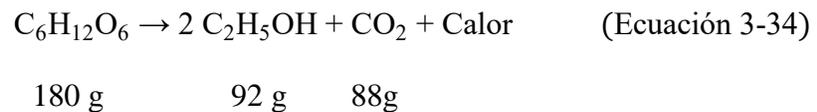
La figura 3-26, muestra el proceso del balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica del mosto preparado. Para llevar a cabo la fermentación es necesario activar la levadura 1,2 % por cada litro de mosto, una vez preparada la levadura activada *Saccharomyces cerevisiae bayanus* tiene una masa igual a de 52,2 g.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-26 Etapa de fermentación del mosto

Para determinar la cantidad de dióxido de carbono desprendido del proceso de fermentación alcohólica, se debe realizar cálculos estequiométricos mediante la ecuación (3-34).



Sabiendo que el porcentaje de azúcares reductor promedio al final del proceso de hidrólisis enzimática, es de 9,75% expresados en glucosa (ver tabla III-3). A continuación, se determina la cantidad de glucosa presente en el mosto:

$$\text{Cantidad de glucosa presente en el mosto} = 1086,4 \text{ g} * \frac{9,75}{100}$$

$$\text{Cantidad de glucosa presente en el mosto} = 105,924 \text{ g}$$

Finalmente, la cantidad de CO₂ desprendido del proceso de fermentación alcohólica es:

$$F_5 = 105,924 \text{ g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 * \frac{88 \text{ g CO}_2}{180 \text{ g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$$

$$F_5 = 51,785 \text{ g de dióxido de carbono desprendido}$$

Balance de materia general en la etapa de fermentación alcohólica:

$$F_3 + F_4 = F_5 + F_6 \quad \text{(Ecuación 3-35)}$$

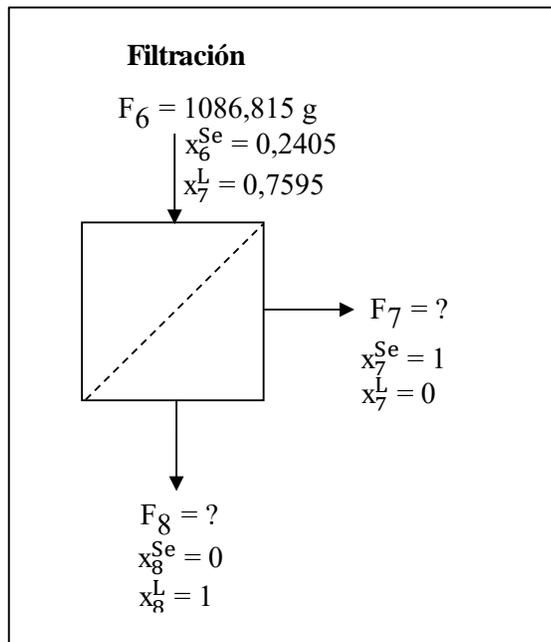
Reemplazando valores en la ecuación (3-35), se tiene:

$$1086,4 + 52,2 = 51,785 + F_6$$

$$F_6 = 1086,815 \text{ g de producto fermentado}$$

3.4.5.3 Balance de materia en la etapa de filtración del producto fermentado

En la figura 3-27, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de filtración del producto fermentado en función al rendimiento obtenido.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-27 Etapa de filtración

Balance de materia general en la etapa de filtración del producto fermentado:

$$F_6 = F_7 + F_8 \quad (\text{Ecuación 3-36})$$

Balance parcial para el sedimento en la etapa de filtración del mosto fermentado.

$$F_6 * x_6^{Se} = F_7 * x_7^{Se} + F_8 * x_8^{Se}$$

$$1086,815 * 0,2405 = F_7 * 1 + F_8 * 0$$

$$F_7 = 261,379 \text{ g de sedimento proveniente de la filtración}$$

Para el cálculo de F_8 , se tomó en cuenta el balance parcial para el mosto sin sedimento en la etapa de filtración:

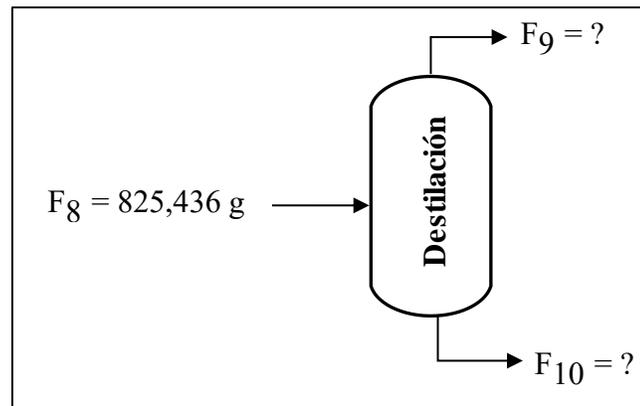
$$F_6 * x_6^L = F_7 * x_7^L + F_8 * x_8^L$$

$$1086,815 * 0,7595 = F_7 * 0 + F_8 * 1$$

$$F_8 = 825,436 \text{ g de producto filtrado}$$

3.4.5.4 Balance de materia en la etapa destilación

En la figura 3-28, se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de destilación obteniendo un producto de cabeza igual 323,6 ml y con un grado alcohólico igual a 12,3 °GL.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-28 Etapa de destilación

$d_{\text{producto obtenido}} = \text{densidad del producto obtenido} = 0,983 \text{ g/ml}$ (Dato determinado, ver el método el Anexo M)

Partiendo de la ecuación Entonces F_8 expresada en ml:

$$F_9 = 0,983 \text{ g/ml} * 323,6 \text{ ml}$$

$$F_9 = 318,099 \text{ g}$$

Balance de materia general en la etapa de destilación del producto fermentado filtrado:

$$F_8 = F_9 + F_{10} \quad (\text{Ecuación 3-37})$$

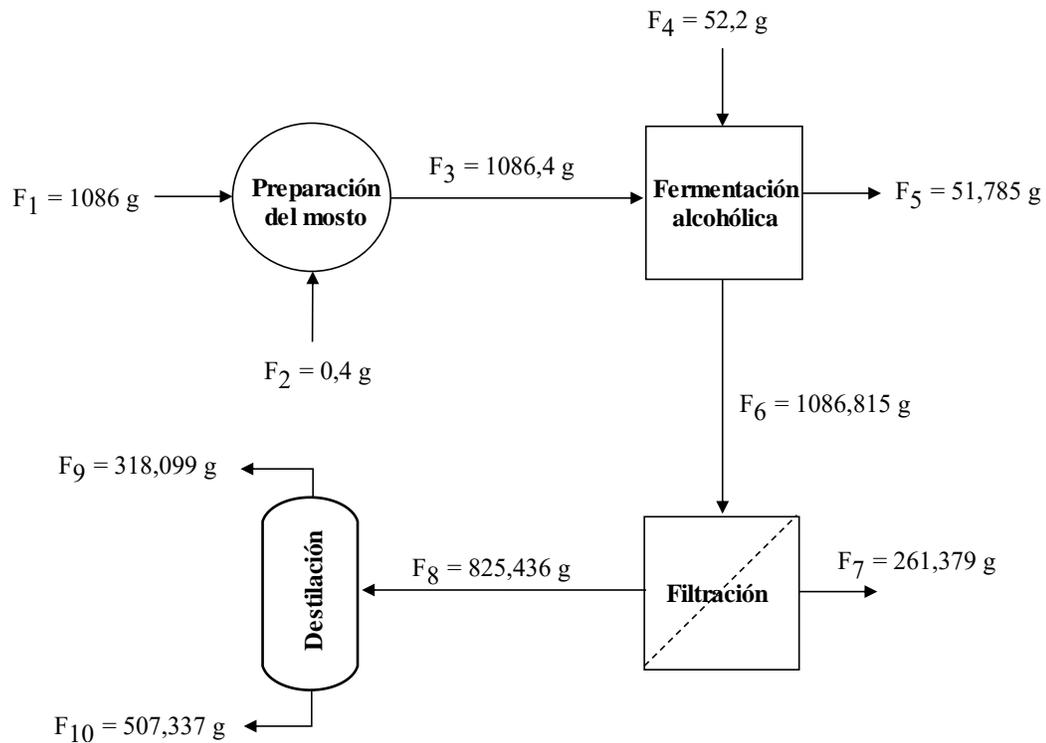
Reemplazando valores en la ecuación (3-37), el producto de cola es:

$$F_{10} = 825,436 \text{ g} - 318,099 \text{ g}$$

$$F_{10} = 507,337 \text{ g producto de cola}$$

3.4.6 Resumen general del balance de materia en el proceso de fermentación para obtener bioetanol

En la figura 3-29, se muestra el resumen general del balance de materia en la etapa de fermentación para la obtención de bioetanol.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-29 Resumen general del balance de materia para obtener bioetanol

3.5 Balance de energía para la obtención de bioetanol del camote

Para realizar el balance de energía se deben considerar los procesos que impliquen un intercambio de energía dentro del sistema.

Aplicando la primera ley de la termodinámica “Ley de la conservación de la energía”. Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y sus

alrededores, entonces se dice que el sistema es cerrado, descrita mediante la siguiente ecuación. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} + \Delta U = Q + W \quad (\text{Ecuación 3-38})$$

Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos donde la de energía cinética y potencial son tan pequeños que pueden considerarse a estos como despreciables, sino solamente en su energía interna. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} = 0$$

Como el sistema se encuentra en un estacionario el volumen se mantiene constante por lo cual no se efectúa el trabajo en el sistema. (Smith & Abbott, 1996)

$$W = 0$$

Entonces la ecuación es:

$$\Delta U = Q \quad (\text{Ecuación 3-39})$$

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{ganado}}$$

Según (Smith & Abbott, 1996), para un sistema estacionario a volumen constante el calor sensible y latente es igual a :

$$Q_{\text{sensible}} = m C_p \Delta T \quad (\text{Ecuación 3-40})$$

$$Q_{\text{latente}} = m * \lambda \quad (\text{Ecuación 3-41})$$

Donde:

m = Masa del componente (Kg)

C_p = Capacidad calorífica (Kcal/ Kg °C)

ΔT = Diferencial de temperatura (°C)

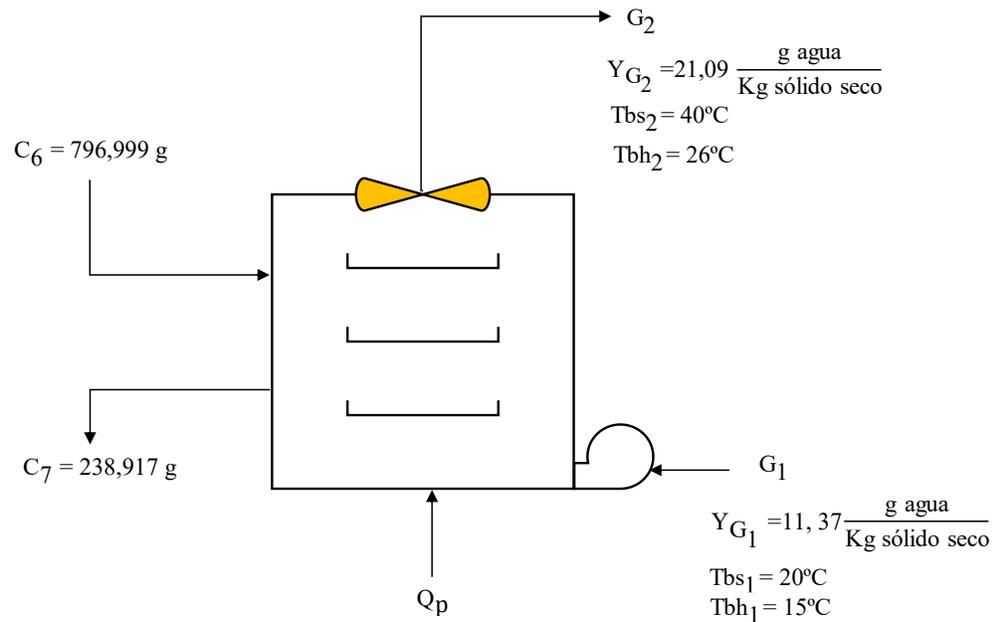
T_f = Temperatura final (°C)

T_i = Temperatura inicial (°C)

λ = Calor latente de vaporización (Kcal/Kg)

3.5.1 Balance de energía en la etapa de secado del camote comestible

En la figura 3-30, se muestra el balance de energía para el camote comestible proveniente de la etapa de cortado. Así mismo, se extrajeron valores de humedad relativa, temperatura del bulbo seco y temperatura del bulbo húmedo de la tabla III-17.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-30 Etapa del secado de la porción comestible de camote

Donde los datos son:

C_6 = Cantidad de camote comestible (g)

C_7 = Cantidad de camote comestible seco (g)

G_1 = Cantidad de aire caliente a la entrada del secador (g)

Y_{G_1} = Humedad absoluta (Kg de agua/ Kg aire seco)

T_{bs_1} = Temperatura de bulbo seco a la entrada del secador ($^\circ\text{C}$)

T_{bh_1} = Temperatura de bulbo húmedo a la entrada del secador ($^\circ\text{C}$)

G_2 = Cantidad de aire húmedo a la salida del secador (g)

Y_{G_2} = Humedad absoluta (Kg de agua/ Kg aire seco)

T_{bs2} = Temperatura de bulbo seco a la salida del secador (°C)

T_{bh2} = Temperatura de bulbo húmedo a la salida del secador (°C)

Balance combinado de materia y energía en el proceso de secado, a continuación, se detalla la ecuación (3-42) según (Valiente, 1994).

$$C_6H_6 + G_1H_{G1} + Q_p = C_7H_7 + G_2H_{G2} \quad (\text{Ecuación 3-42})$$

Considerando un sistema abierto tenemos:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$C_6 = C_7 = C$$

Reemplazando variables en la ecuación (3-42), se obtiene:

$$C H_6 + G H_{G1} + Q_p = C H_7 + G H_{G2} \quad (\text{Ecuación 3-43})$$

Donde:

G = Cantidad de aire (Kg aire seco)

C = Cantidad de producto (Kg)

H_6 = Entalpía del producto al ingreso del secadero (KJ/Kg sólido seco)

H_7 = Entalpía del producto a la salida del secadero (KJ/Kg sólido seco)

H_{G1} = Entalpía del aire al ingreso del secadero (KJ/Kg sólido seco)

H_{G2} = Entalpía del aire a la salida del secadero (KJ/Kg sólido seco)

Q_p = Calor aportado al sistema (KJ)

Despejando Q_p y ordenando las variables de la ecuación (3-43), se tiene:

$$Q_p = G(H_{G2} - H_{G1}) + C(H_7 - H_6) \quad (\text{Ecuación 3-44})$$

Para calcular la entalpía del aire, se tomó en cuenta la ecuación (3-45), mencionada por (Singh & Heldman, 2009).

$$H_a = C_S(T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación 3-45})$$

Donde:

C_S = Calor húmedo (KJ/Kg de aire seco °C)

T_a = Temperatura del aire °C

T_0 = Temperatura de referencia, igual a 0°C

Y = Humedad absoluta (g agua/Kg de aire seco)

H_L = Calor latente de vaporización del agua (KJ/Kg de agua)

Para calcular el calor húmedo del aire, se tomó en cuenta la ecuación (3-46) mencionada por (Singh & Heldman, 2009), donde: el calor específico del aire seco es de 1,005 (KJ/Kg aire seco °C) y el calor específico para el agua 1,88 (KJ/Kg agua °C).

$$C_S = 1,005 + 1,88 Y \quad (\text{Ecuación 3-46})$$

Reemplazando la ecuación (3-45) en (3-46), se tiene:

$$H_a = (1,005 + 1,88 Y)(T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación 3-47})$$

Ajustando los datos de la ecuación (3-47) a presión de la ciudad de Tarija (610 mmHg), se obtiene el calor específico del aire seco 0,81 (KJ/Kg aire seco °C) y el calor específico del agua es 1,51 (KJ/Kg agua °C), mencionado por (López, 2021). Entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

$$H_a = (0,81 + 1,51 Y)(T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación 3-48})$$

Reemplazando datos en la ecuación (3-48), para determinar la entalpía del aire a la entrada del secador.

Donde:

H_L = 2454,1 KJ/Kg entalpía del agua a 20 °C (ver Anexo I)

Y_{G_1} = 0,0113 Kg de agua/ Kg aire seco

$$T_{G_1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_{G_1} = 0,81 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] + 1,51 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * 0,0113 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right] (20 - 0)^\circ\text{C} + 0,0113 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right] * 2454,1 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$H_{G_1} = 44,273 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

Reemplazando datos en la ecuación (3-48), para determinar la entalpía del aire a la salida del secador.

Donde:

$$H_L = 2406,7 \text{ KJ/Kg entalpía del agua a } 40 \text{ }^\circ\text{C (ver Anexo I)}$$

$$Y_{G_2} = 0,0211 \text{ Kg de agua/ Kg aire seco}$$

$$T_{G_2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_{G_2} = 0,81 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] + 1,51 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * 0,0211 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right] (40 - 0)^\circ\text{C} + 0,0211 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right] * 2406,7 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$H_{G_2} = 84,456 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

Para calcular la entalpía del producto, se tiene la ecuación (3-49):

$$H_P = C_{P_p}(T_P - T_0) + X_P C_{P_X}(T_P - T_0) \quad (\text{Ecuación 3-49})$$

Donde:

$$C_{P_p} = \text{Calor específico del producto (KJ/Kg } ^\circ\text{K)}$$

$$T_P = \text{Temperatura del producto (} ^\circ\text{K)}$$

$$X_P = \text{Humedad del producto (Kg agua/Kg sólido seco)}$$

$$C_{P_X} = \text{Calor específico del agua (KJ/Kg agua } ^\circ\text{K)}$$

Para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimento, se procede a partir de la ecuación (3-50) citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$Cp_p = x_c * Cp_c + x_r * Cp_r + x_g * Cp_g + x_f * Cp_f + x_a * Cp_a + x_w * Cp_w \quad (\text{Ecuación 3-50})$$

Donde:

$$Cp_c = 1,4 \text{ (KJ/Kg } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico de los carbohidratos (Lewis, 1993)}$$

$$Cp_r = 1,6 \text{ (KJ/Kg } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico de las proteínas (Lewis, 1993)}$$

$$Cp_g = 1,7 \text{ (KJ/Kg g } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico de las grasas (Lewis, 1993)}$$

$$Cp_f = 1,5 \text{ (KJ/Kg } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico de la fibra (Lewis, 1993)}$$

$$Cp_a = 0,8 \text{ (KJ/Kg } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico de las cenizas (Lewis, 1993)}$$

$$Cp_w = 4,18 \text{ (KJ/Kg } ^\circ\text{K)} = \text{Calor específico del agua (Lewis, 1993)}$$

x_c = Fracción másica de los carbohidratos

x_r = Fracción másica de la proteína

x_g = Fracción másica de la grasa

x_f = Fracción másica de la fibra

x_a = Fracción másica de las cenizas

x_w = Fracción másica del agua

Reemplazando los valores en la ecuación (3-49), se obtiene:

$$Cp_p = x_c * 1,4 + x_r * 1,6 + x_g * 1,7 + x_f * 1,5 + x_a * 0,8 + x_w * 4,18 \quad (\text{Ecuación 3-51})$$

En la tabla III-18, muestra los datos de la composición fisicoquímica del camote, estos valores son utilizados para calcular el calor específico del camote se tomó en cuenta de los datos de la tabla II-1.

Tabla III-18: Datos de la composición fisicoquímica del camote

Componentes	Símbolo	Fracción másica
Hidratos de carbono	x_c	0,2439
Proteínas	x_r	0,02
Grasa	x_g	0,0018
Fibra	x_f	0,0046
Cenizas	x_a	0,0170
Humedad	x_w	0,7127

Fuente: Elaboración propia, 2021

Reemplazando valores de la tabla III-18, en la ecuación (3-51), se tiene:

$$Cp_6 = 0,2439 * 1,4 + 0,02 * 1,6 + 0,0018 * 1,7 + 0,0046 * 1,5 + 0,0170 * 0,8 + 0,7127 * 4,18$$

$$Cp_6 = 3,376 \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} \right]$$

A partir de la ecuación (3-49), se obtiene la entalpía de la muestra del camote comestible en la entrada del secador:

$$H_6 = 3,376 \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} \right] * (293,15 - 0)^\circ K + 2,4807 \left[\frac{Kg}{Kg} \right] * 4,18 \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} \right] * (293,15 - 0)^\circ K$$

$$H_6 = 4029,442 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

Para calcular el calor específico del camote comestible seco, reemplazando datos en la ecuación (3-49).

$$Cp_7 = 1,477 \text{ KJ/Kg } ^\circ K \text{ (Fernandez \& Rodriguez , 2018)}$$

$$T_P = 313,15 \text{ } ^\circ K$$

$$H_7 = 1,477 \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} \right] (313,15 - 0)^\circ K + 0,0434 \left[\frac{Kg}{Kg} \right] * 4,18 \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} \right] (313,15 - 0)^\circ K$$

$$H_7 = 519,332 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

Reemplazando datos en la ecuación (3-43), se tiene:

$$Q_p = 59,909 \text{ Kg} * (84,456 - 44,273) \left[\frac{KJ}{Kg} \right] + 0,239 \text{ Kg} * (519,332 - 4029,442) \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

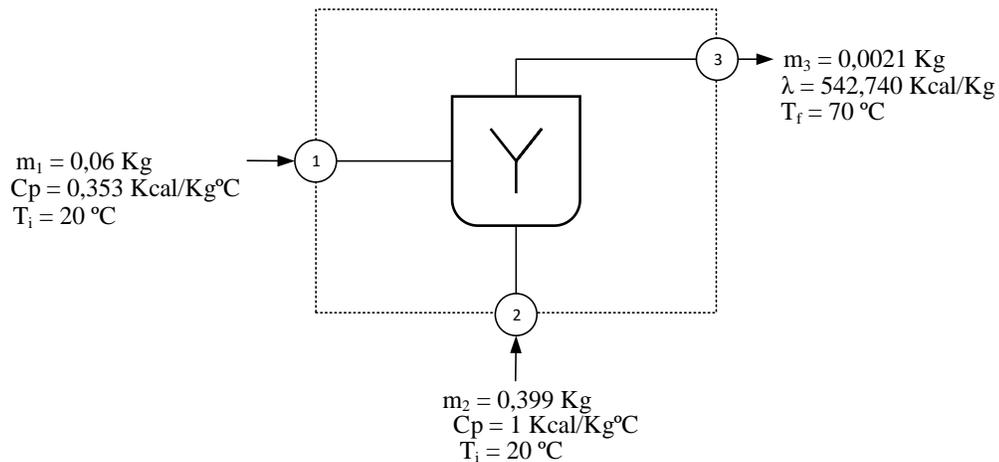
$$Q_p = 1571,698 \text{ KJ}$$

$$Q_p = 375,636 \text{ Kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado del camote comestible es de 375,636 Kcal.

3.5.2 Balance de energía en la etapa de gelatinización

Para calcular la energía requerida en la etapa de gelatinización, se debe determinar el calor sensible debido al calentamiento del agua desde 20 °C hasta 70 °C con la presencia de camote comestible seco molido, este proceso se realizó en un baño maría. En la figura 3-31, representa el sistema utilizado para el proceso de gelatinización.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-31 Etapa de gelatinización para el balance de energía

La energía total que requiere el sistema para llevar a cabo el proceso de gelatinización es:

$$Q_G = Q_{SG} + Q_{LG} + E_{BMG} \quad (\text{Ecuación 3-52})$$

Donde:

Q_G = Calor total que se requiere en el proceso de gelatinización (Kcal)

Q_{SG} = Calor sensible de gelatinización (Kcal)

Q_{LG} = Calor latente para evaporar el agua en la etapa de gelatinización (Kcal)

Partiendo de la ecuación (3-40), el calor sensible requerido para la etapa de gelatinización es:

$$Q_{SG} = m_1 * Cp_1 * (T_f - T_i) + m_2 * Cp_2 * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación 3-53})$$

Donde:

m_1 = Masa de camote comestible seco molido = 0,06 Kg

Cp_1 = Capacidad calorífica del camote comestible seco = 0,353 Kcal/Kg °C, citado por (Fernandez & Rodriguez , 2018)

m_2 = masa de agua presente en la gelatinización = 0,399 kg

Cp_2 = Capacidad calorífica del agua, 1,0 Kcal/Kg °C (Chang, 1999).

m_3 = masa de vapor de agua = 0,0021 kg

λ = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-53):

$$Q_{SG} = 0,06 \text{ Kg} * 0,353 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \right] * (70 - 20)^\circ\text{C} + 0,399 \text{ Kg} * 1 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \right] * (70 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SG} = 21,009 \text{ Kcal}$$

Partiendo de la ecuación (3-41), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de gelatinización es:

$$Q_{LG} = m_3 * \lambda \quad (\text{Ecuación 3-54})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-54):

$$Q_{LG} = 0,0021 \text{ Kg} * 542,74 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

$$Q_{LG} = 1,140 \text{ Kcal}$$

Es necesario determinar la energía requerida para la calefacción del sistema del baño maría. Por tanto, se utilizó la siguiente ecuación citada por (Valiente, 1994).

$$P = \frac{E}{t} \quad (\text{Ecuación 3-55})$$

Donde:

P = Potencia eléctrica (Kw)

E = Energía consumida en una unidad de tiempo (Kwh)

t = Tiempo (h)

Partiendo de la ecuación (3-55), la energía requerida para el sistema de calefacción del baño maría es:

$$E_{\text{BMG}} = P * t$$

$$E_{\text{BMG}} = 0,105 \text{ Kw} * 0,75 \text{ h}$$

$$E_{\text{BMG}} = 0,079 \text{ Kwh} = 67,973 \text{ kcal}$$

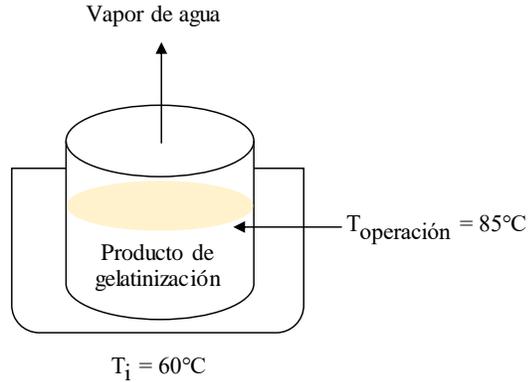
Reemplazando valores en la ecuación (3-53), la energía total que requiere el sistema para llevar a cabo el proceso de gelatinización es:

$$Q_G = 21,009 \text{ Kcal} + 1,140 \text{ Kcal} + 67,973 \text{ Kcal}$$

$$Q_G = 90, 122 \text{ Kcal}$$

3.5.3 Balance de energía en el proceso de licuefacción

En esta etapa de licuefacción existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño maría. El sistema utilizado para la etapa de licuefacción está dado por la figura 3-32.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-32 Balance de energía en la etapa de licuefacción

La energía total requerida para llevar a cabo el proceso de licuefacción es:

$$Q_L = Q_{SL} + Q_{LL} + E_{BML} + E_{A_1} \quad (\text{Ecuación 3-56})$$

Donde:

Q_L = Calor requerido para llevar a cabo la de licuefacción (Kcal)

Q_{SL} = Calor sensible en la etapa de licuefacción (Kcal)

Q_{LL} = Calor latente en la etapa de licuefacción (Kcal)

E_{BML} = Energía requerida por el baño maría en la etapa de licuefacción (Kcal)

E_{A_1} = Energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de licuefacción (Kcal)

Partiendo de la ecuación (3-40), el calor sensible requerido en la etapa de licuefacción es:

$$Q_{SL} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_{HC} * C_{p_{HC}} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación 3-57})$$

Donde los datos son:

m_{HC} = masa de camote comestible seco molido = 0,06 Kg

$C_{p_{HC}}$ = capacidad calorífica del camote comestible seco = 0,353 Kcal/Kg °C, citado por (Fernandez & Rodriguez , 2018).

m_{H_2O} = masa de agua presente en la licuefacción = 0,397 Kg

$C_{p_{H_2O}}$ = capacidad calorífica del agua, 1,0 Kcal/Kg °C (Chang, 1999).

m_{VA} = masa de vapor de agua = 0,050 Kg

λ_{H_2O} = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 Kcal/Kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-57):

$$Q_{SL} = 0,397 \text{ Kg} * 1 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * (85 - 60)^\circ\text{C} + 0,06 \text{ Kg} * 0,353 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * (85 - 60)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SL} = 6,273 \text{ Kcal}$$

Partiendo de la ecuación (3-41), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de licuefacción es:

$$Q_{LL} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad (\text{Ecuación 3-58})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-58):

$$Q_{LL} = 0,050 \text{ Kg} * 542,74 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

$$Q_{LL} = 27,137 \text{ Kcal}$$

La energía requerida para el baño maría en la etapa de licuefacción, se determina mediante la ecuación (3-55), reemplazando valores:

$$E_{BML} = P * t$$

$$E_{BML} = 0,105 \text{ Kw} * 2 \text{ h}$$

$$E_{BML} = 0,21 \text{ Kwh} = 180,688 \text{ Kcal}$$

Es necesario determinar la energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de licuefacción mediante la ecuación (3-55), reemplazando valores:

$$E_{A1} = P * t$$

$$E_{A_1} = 0,105 \text{ Kw} * 2 \text{ h}$$

$$E_{A_1} = 0,210 \text{ Kwh} = 180,688 \text{ Kcal}$$

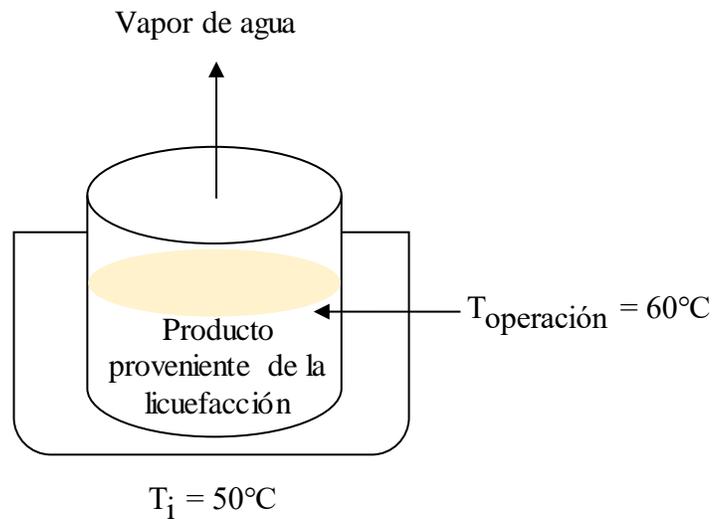
Partiendo de la ecuación (3-56), la energía requerida en el proceso de licuefacción es:

$$Q_L = 6,273 \text{ Kcal} + 27,137 \text{ Kcal} + 180,688 \text{ Kcal} + 180,688 \text{ Kcal}$$

$$Q_L = 394,786 \text{ Kcal}$$

3.5.4 Balance de energía en el proceso de sacarificación

En esta etapa de sacarificación existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño maría. El sistema utilizado para la etapa de licuefacción está dado por la figura 3-33.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-33 Balance de energía en la etapa de sacarificación

La energía total requerida para llevar a cabo el proceso de sacarificación está dada por:

$$Q_S = Q_{SS} + Q_{LS} + E_{BMS} + E_{A_2} \quad (\text{Ecuación 3-59})$$

Donde:

Q_S = Calor total que requiere la etapa de sacarificación (Kcal)

Q_{SS} = Calor sensible en la etapa de sacarificación (Kcal)

Q_{LS} = Calor latente en la etapa de sacarificación (Kcal)

E_{BMS} = Energía requerida por el baño maría en la etapa de sacarificación (Kcal)

E_{A_2} = Energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de sacarificación (Kcal)

Partiendo de la ecuación (3-40), el calor sensible requerido en la etapa de sacarificación es:

$$Q_{SS} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_{HC} * C_{p_{HC}} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación 3-60})$$

Donde:

m_{HC} = masa de camote comestible seco molido = 0,035 Kg

$C_{p_{HC}}$ = Capacidad calorífica del camote comestible seco molido = 0,353 Kcal/Kg °C, citada por (Fernandez & Rodriguez , 2018).

m_{H_2O} = masa de agua presente en la sacarificación = 0,349 Kg

$C_{p_{H_2O}}$ = Capacidad calorífica del agua, 1,0 Kcal/Kg °C (Chang, 1999).

m_{VA} = masa de vapor de agua = 0,005 Kg

λ_{H_2O} = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 Kcal/Kg, a la presión atmosférica de la Ciudad de Tarija. (Smith & Abbott, 1996)

Partiendo de la ecuación (3-60), el calor sensible en la etapa de sacarificación:

$$Q_{SS} = 0,349 \text{ Kg} * 1 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * (60 - 50)^\circ\text{C} + 0,035 \text{ Kg} * 0,353 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \right] * (60 - 50)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SS} = 3,614 \text{ Kcal}$$

Partiendo de la ecuación (3-40), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de sacarificación es:

$$Q_{LS} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad (\text{Ecuación 3-61})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-61):

$$Q_{LS} = 0,005 \text{ Kg} * 542,74 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

$$Q_{LS} = 2,714 \text{ Kcal}$$

La energía requerida para el baño maría en la etapa de sacarificación, se determina mediante la ecuación (3-55), reemplazando valores:

$$E_{BML} = P * t$$

$$E_{BML} = 0,105 \text{ Kw} * 1 \text{ h}$$

$$E_{BML} = 0,105 \text{ Kwh} = 92,493 \text{ Kcal}$$

Es necesario determinar la energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de sacarificación mediante la ecuación (3-55), reemplazando valores:

$$E_{A_2} = P * t$$

$$E_{A_2} = 0,105 \text{ Kw} * 1 \text{ h}$$

$$E_{A_2} = 0,105 \text{ Kwh} = 92,493 \text{ Kcal}$$

Por tanto, reemplazando valores en la ecuación (3-59) la energía requerida en el proceso de sacarificación es:

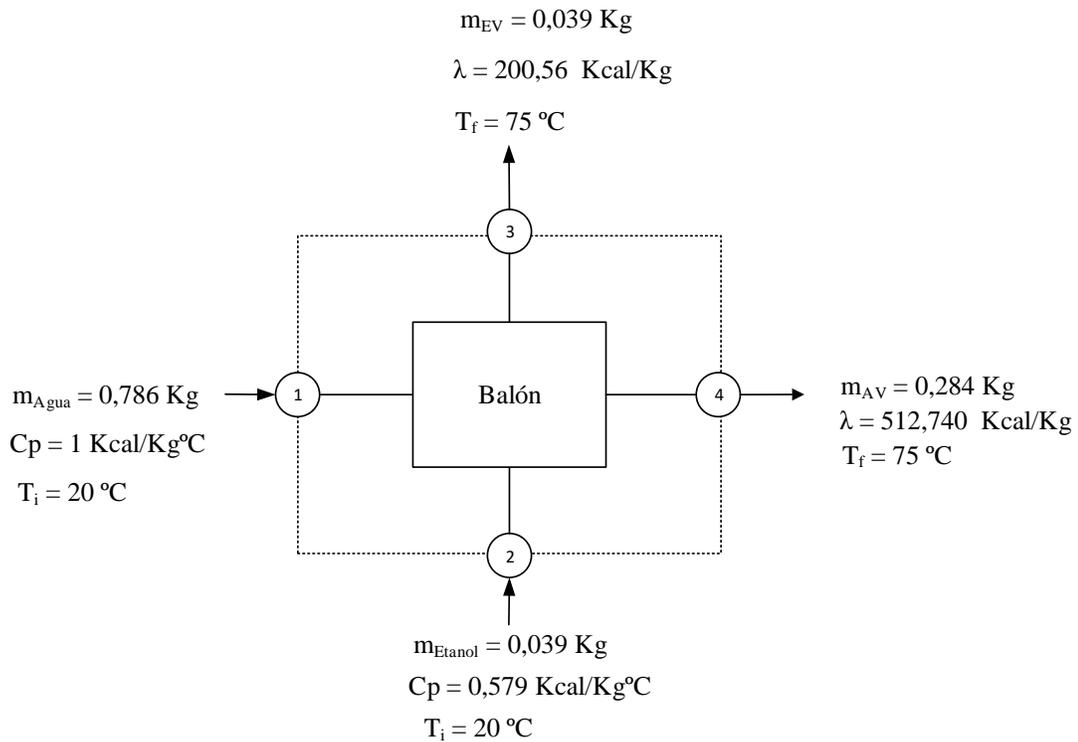
$$Q_S = 3,614 \text{ Kcal} + 2,714 \text{ Kcal} + 92,493 \text{ Kcal} + 92,493 \text{ Kcal}$$

$$Q_S = 191,314 \text{ Kcal}$$

3.5.5 Balance de energía en el proceso de destilación

La energía utilizada en el rotavapor es igual a la suma de la energía necesaria para generar el vapor dentro del balón de evaporación, más el calor retirado por el agua de enfriamiento del condensador. Esta parte del proceso se dividió en dos sistemas para una mayor compresión.

En la figura 3-34, se representa el balón en cual se llevará a cabo la separación de los componentes presentes en la muestra.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-34 Balance de energía en el balón del sistema de destilación

Donde:

m_{Agua} = masa del agua presente en el balón

$C_{p_{\text{Agua}}}$ = Capacidad calorífica del agua, (Chang, 1999),

m_{Etanol} = masa de etanol presente en el balón

$C_{p_{\text{Etanol}}}$ = Capacidad calorífica del etanol, (Smith & Abbott, 1996).

m_{AV} = masa del agua evaporada

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 Kcal/Kg, valor mencionado por (Smith & Abbott, 1996).

m_{EV} = masa de etanol evaporado

λ_{Etanol} = Calor latente de vaporización del etanol = 200,56 Kcal/Kg, obtenido de tablas en el Anexo I.

Masa total que ingresa a la etapa de destilación es igual a 825,436 g, sabiendo que el 4,8% es el alcohol probable presente en la muestra (ver Anexo J).

El calor total que se requiere en el balón es:

$$Q_B = Q_{SB} + Q_{LB} \quad (\text{Ecuación 3-62})$$

Donde:

Q_B = Calor total en el balón del sistema de destilación (Kcal)

Q_{SB} = Calor sensible de la mezcla en el balón (Kcal)

Q_{LB} = Calor latente de la mezcla en el balón (Kcal)

Partiendo de la ecuación (3-40), el calor sensible para subir la temperatura de la mezcla a ebullición:

$$Q_{SB} = m_{\text{Agua}} * C_{p_{\text{Agua}}} * \Delta T + m_{\text{Etanol}} * C_{p_{\text{Etanol}}} * \Delta T \quad (\text{Ecuación 3-63})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-63):

$$Q_{SB} = 0,786 \text{ Kg} * 1 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] * (75 - 20)^\circ\text{C} + 0,039 \text{ Kg} * 0,579 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] * (75 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SB} = 44,472 \text{ Kcal}$$

Partiendo de la ecuación (3-41), el calor latente para evaporar la mezcla:

$$Q_{LB} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} + m_{EV} * \lambda_{\text{Etanol}} \quad (\text{Ecuación 3-64})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-63):

$$Q_{LB} = 0,284 \text{ Kg} * 512,740 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right] + 0,039 \text{ Kg} * 200,56 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

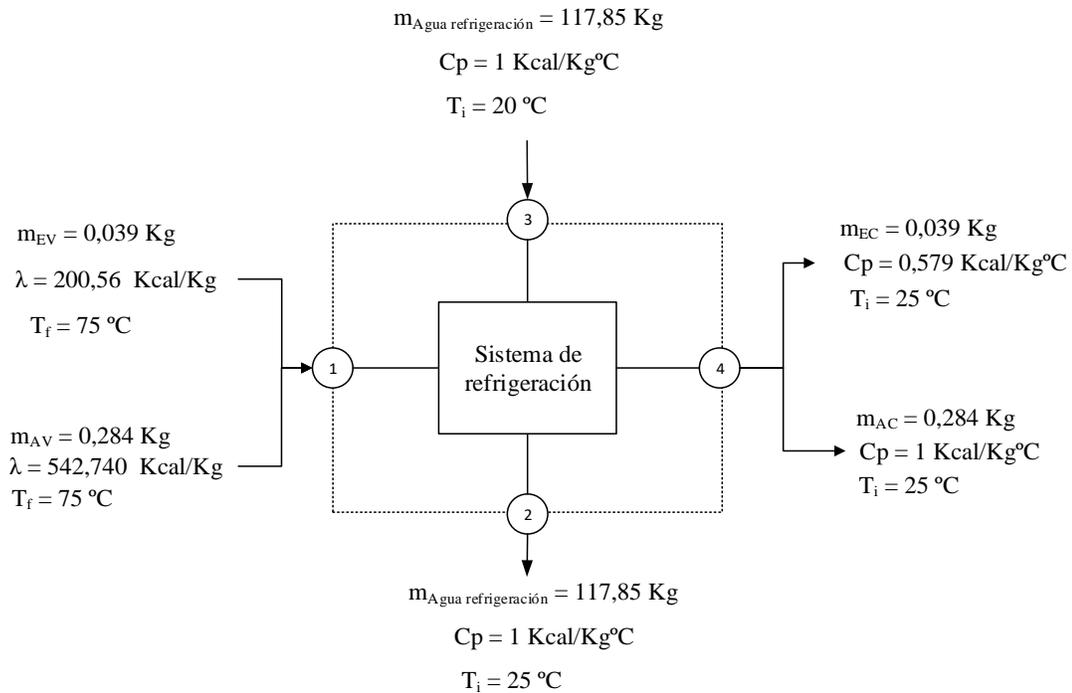
$$Q_{LB} = 153,44 \text{ Kcal}$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-62), el calor total que se requiere en el balón:

$$Q_B = 44,472 \text{ Kcal} + 153,44 \text{ Kcal}$$

$$Q_B = 197,912 \text{ Kcal}$$

En la figura 3-35, se representa el sistema de refrigeración en cual se llevará a cabo la condensación.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-35 Balance de energía en el sistema de refrigeración

Donde:

m_{AV} = masa del agua evaporada

λ_{H_2O} = Calor latente de vaporización del agua, (Smith & Abbott, 1996).

$m_{\text{Agua refrigeración}}$ = masa del agua de refrigeración

m_{AC} = masa del agua de condensada

$C_{p_{\text{Agua}}}$ = Capacidad calorífica del agua, (Chang, 1999).

m_{EV} = masa de etanol evaporado

λ_{Etanol} = Calor latente de vaporización del agua = 200,56 Kcal/Kg, obtenido de tablas del Anexo I.

m_{EC} = masa de etanol condensado.

$C_{p_{\text{Etanol}}}$ = Capacidad calorífica del etanol, (Smith & Abbott, 1996)

El calor total empleado en el sistema de refrigeración es:

$$Q_{\text{TSR}} = Q_{\text{CSR}} + Q_{\text{ASR}} \quad (\text{Ecuación 3-65})$$

Donde:

Q_{TSR} = Calor total en el sistema de refrigeración (Kcal)

Q_{CSR} = Calor cedido en el sistema de refrigeración (Kcal)

Q_{ASR} = Calor absorbido en el sistema de refrigeración (Kcal)

El calor cedido por el agua y etanol en el sistema de refrigeración es:

$$Q_{\text{CSR}} = m_{\text{VA}} * \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{AC}} * C_{p_{\text{Agua}}} * \Delta T + m_{\text{EC}} * C_{p_{\text{Etanol}}} * \Delta T + m_{\text{EV}} * \lambda_{\text{Etanol}}$$

$$Q_{\text{CSR}} = 0,284 * 512,740 + 0,284 * 1 * (25 - 75) + 0,039 * 200,56 + 0,039 * 0,579 * (25 - 75)$$

$$Q_{\text{CSR}} = 138,11 \text{ Kcal}$$

Calor absorbido por el condensador, considerando el flujo másico del agua 133,42 Kg/h y un tiempo de 53 minutos, es:

$$Q_{\text{ASR}} = m_{\text{Agua refrigeración}} C_{p_{\text{Agua}}} \Delta T$$

$$Q_{\text{ASR}} = 117,85 \text{ Kg} * 1 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] * (25-20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{ASR}} = 589,25 \text{ Kcal}$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-65), el calor total empleado en el sistema de refrigeración es:

$$Q_{\text{TSR}} = 138,11 \text{ Kcal} + 589,25 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{TSR}} = 727,36 \text{ Kcal}$$

3.5.6 Energía empleada para cada equipo utilizado en el proceso para la obtención de bioetanol

Es importante determinar el cálculo de energía consumida en función de la potencia de cada equipo empleado durante el desarrollo de la fase experimental.

En la tabla III-19, se presentan las condiciones de operación en las que se hace uso de cada equipo. Las características de cada equipo son adquiridas de las placas de información de cada uno (ver Anexo K).

Tabla III-19: Potencia y tiempo de operación para cada equipo empleado

Equipo	Potencia (Kw)	Tiempo de operación (h)
Secadero de tiro forzado	1,1	28
Molino de martillos	1,0	0,018
Rotap	0,92	0,333
Agitador mecánico	0,105	3,0
Termostato de inmersión	0,96	48

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla III-20, se aprecia el valor de la energía empleada por cada equipo utilizado.

Tabla III-20: Energía consumida para cada equipo utilizado

Equipo	Energía empleada (Kwh)
Secadero de tiro forzado	30,8
Molino de martillos	0,018
Tamiz vibratorio	0,306
Agitador mecánico	0,315
Termostato de inmersión	46,08

Fuente: Elaboración propia, 2021

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Después de haber realizado el trabajo de investigación de la obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote (*Ipomoea batatas L.*) a escala laboratorio, se hace posible concluir lo siguiente:

- En base a la caracterización del camote, se obtienen los siguientes resultados fisicoquímicos; azúcares reductores 1,17%; cenizas 1,70%; fibra 0,46%; grasa 0,18%; hidratos de carbono 24,39%; humedad 71,27%; proteínas totales 2%.
- La selección del método para el proceso de hidrólisis, se logra a través de una matriz de decisión comparando los siguientes métodos: hidrólisis acida e hidrólisis enzimática. Los evaluados fueron: aplicabilidad del proceso, generación de subproductos y residuos, costos, confiabilidad del proceso, complejidad de operación del proceso e influencia de la temperatura; obteniendo el método con mayor puntaje de 82/100 la hidrólisis enzimática.
- Como resultado de los experimentos realizados según el diseño factorial en el proceso de hidrólisis enzimática, la combinación más óptima para este proceso es: pH de solución 6 (+), temperatura de 85 °C (+) y cantidad de la enzima α -amilasa 0,6 g (+). Por obtener una mayor concentración de azúcares reductores 9,75 % en un tiempo de 3 horas.
- En el proceso de fermentativo del hidrolizado de camote, los mejores resultados se vieron en las siguientes condiciones: pH 5,0 y una cantidad de *Sccharomyces cerevisiae bayanus* 1,2 g, donde se obtuvo un mayor grado alcohólico de 12,3 °GL en comparación a las demás pruebas experimentales.
- Se logró demostrar que es posible obtener bioetanol del camote y que tiene un potencial para ser utilizado como materia prima para la obtención de bioetanol, puesto que genero un rendimiento del 58,81%.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda, en el proceso de secado del camote comestible, realizar en un secadero de tiro forzado, porque presenta una circulación del aire y se puede evitar el desprendimiento de azúcares en la superficie de las rodajas del camote comestible.
- Ampliar el estudio concerniente al acondicionamiento de la materia prima, tomando en cuenta una nueva alternativa para la extracción del almidón de camote.
- Se recomienda a las futuras investigaciones introducir nuevas variables como ser: tiempo de hidrólisis y las revoluciones por minuto en la agitación. al diseño experimental en el proceso de hidrólisis enzimática.