



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FERMENTACIÓN REFERIDA A LOS AZÚCARES  
FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000 LITROS  
DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA**

**Humberto Mazariegos Barrios**

Asesorado por el Ing. Marco Antonio Fuentes León

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FERMENTACIÓN REFERIDA A LOS AZÚCARES  
FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000 LITROS  
DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HUMBERTO MAZARIEGOS BARRIOS**

ASESORADO POR EL ING. MARCO ANTONIO FUENTES LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León De Paz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FERMENTACIÓN REFERIDA A LOS AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000 LITROS DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de noviembre de 2011.

  
**Humberto Mazariegos Barrios**

Guatemala, septiembre de 2012

Ing. Victor Monzon  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química  
Director de Escuela

Estimado Ingeniero:

Por este medio me dirijo a usted para manifestarle que el estudiante Humberto Mazariegos Barrios carne 2003-31178, finalizo con la realización del informe final denominado "DETERMINACION DE LA EFICIENCIA REFERIDA A LOS AZUCARES FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERIA DE 300,000 LITROS DE ALCOHOL POR DIA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA"

En dicho informe en la cual asesore al estudiante en la realización.

Atentamente,



Marco Antonio Fuentes Leon

Ingeniero Químico

Colegiado 1081

*Marco Antonio Fuentes*

*Ingeniero Químico*

*Colegiado 1081*



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 05 de octubre de 2012  
Ref. EIQ.TG-IF.044.2012

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-266-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por el estudiante universitario: **Humberto Mazariegos Barrios**

Identificado con número de carné: **2003-31178**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA REFERIDA A LOS AZUCARES  
FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000  
LITROS DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Marco Fuentes**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga, Hilda Palma  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Periodo 2009 - 2012



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.167.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **HUMBERTO MAZARIEGOS BARRIOS** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FERMENTACIÓN REFERIDA A LOS AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000 LITROS DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FERMENTACIÓN REFERIDA A LOS AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS 4 FERMENTADORES DE UNA DESTILERÍA DE 300,000 LITROS DE ALCOHOL POR DÍA, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA MELAZA,** presentado por el estudiante universitario: **Humberto Mazariegos Barrios,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, julio de 2013

/cc



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Historia de la fermentación.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Mecanismo de la fermentación alcohólica.....	5
2.2. Azúcar.....	8
2.3. Enzima.....	9
2.4. Medicación de azúcar.....	9
2.5. Azúcares totales.....	9
2.6. Azúcares residuales.....	10
2.7. Sólidos totales.....	10
2.8. Sólidos disueltos.....	10
2.9. Sólidos suspendidos.....	10
2.10. Azúcares reductores.....	10
2.11. Biorreactores.....	11
2.12. Melaza.....	14
2.13. Composición de la caña de azúcar.....	15

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Variables.....	19
3.1.1.	Azúcares reductores totales (ART) .....	19
3.1.2.	Azúcares residuales (AR) .....	20
3.1.3.	Azúcares infermentables.....	22
3.1.4.	Determinación del grado alcohólico de los cuatro fermentadores.....	22
3.1.5.	Medición de m <sup>3</sup> de melaza alimentada a cada fermentador. ....	22
3.1.6.	Densidad de melaza.....	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	23
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	24
3.3.1.	Operadores de sala.....	24
3.3.2.	Operadores de campo .....	24
3.3.3.	Ayudantes de campo .....	24
3.3.4.	Asesor .....	25
3.3.5.	Personal de mantenimiento .....	25
3.3.6.	Analista de laboratorio .....	25
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	25
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	27
3.6.1.	Cálculo de brix hidrométrico y densidad de melaza referida a 20 °C .....	27
3.6.2.	Cálculo de azúcares reductores en melaza.....	27

3.6.3.	Metros cúbicos de melaza utilizados en fermentadores y niveles de llenado de los fermentadores .....	28
3.6.4.	Conversión de m <sup>3</sup> a galones .....	28
3.6.5.	Galones de melaza a kilogramos de melaza .....	28
3.6.6.	Cálculo de azúcares residuales .....	29
3.6.7.	Cálculo de azúcares infermentables .....	29
3.6.8.	Cálculo de azúcares fermentables.....	30
3.6.9.	Grado alcohólico .....	30
3.6.10.	Litros de alcohol producidos en el fermentador .....	30
3.6.11.	Litros de alcohol teóricos referidos a los azúcares fermentables .....	30
3.6.12.	Cálculo de eficiencia.....	31
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	31
3.8.	Análisis estadístico.....	51
4.	RESULTADOS.....	53
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	59
	CONCLUSIONES .....	63
	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICE.....	69
	ANEXOS.....	81



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema de Embdem-Meyerhof.....	06
2.	Partes del fermentador.....	13
3.	Eficiencias de fermentador 1.....	53
4.	Grados alcohólicos de fermentador 1.....	53
5.	Eficiencias de fermentador 2.....	54
6.	Grados alcohólicos de fermentador 2.....	54
7.	Eficiencia de fermentador 3.....	55
8.	Grados alcohólicos de fermentador 3.....	55
9.	Eficiencias de fermentador 4.....	56
10.	Grados alcohólicos de fermentador 4.....	56
11.	Azúcares en melaza.....	58

### TABLAS

I.	Características de la melaza.....	14
II.	Composición química de la caña de azúcar.....	15
III.	Métodos empleados para la determinación de azúcares.....	19
IV.	Grados brix de melaza corregidos, mes de enero.....	31
V.	Grados brix de melaza corregidos, mes de febrero.....	32
VI.	Grados brix de melaza corregidos, mes de marzo.....	34
VII.	Kilogramos de melaza, fermentador 1.....	35
VIII.	Kilogramos de melaza, fermentador 2.....	36
IX.	Kilogramos de melaza, fermentador 3.....	37

X.	Kilogramos de melaza, fermentador 4 .....	38
XI.	Análisis de azúcares para fermentador 1 .....	39
XII.	Análisis de azúcares para fermentador 2.....	40
XIII.	Análisis de azúcares para fermentador 3.....	41
XIV.	Análisis de azúcares para fermentador 4.....	42
XV.	Eficiencias de fermentador 1 .....	43
XVI.	Eficiencias de fermentador 2 .....	44
XVII.	Eficiencias de fermentador 3 .....	45
XVIII.	Eficiencias de fermentador 4 .....	46
XIX.	Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 1.....	47
XX.	Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 2.....	48
XXI.	Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 3.....	49
XXII.	Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 4.....	50
XXIII.	Promedio de azúcares en melaza.....	51
XXIV.	Rango de eficiencias para fermentador 1 .....	57
XXV.	Rango de eficiencias para fermentador 2 .....	57
XXVI.	Rango de eficiencias para fermentador 3 .....	57
XXVII.	Rango de eficiencias para fermentador 4 .....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>GL</b>	Grados Gay Lussac
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>%</b>	Porcentaje
<b>% w/w</b>	Porcentaje en volumen





## GLOSARIO

<b>Azúcar residual</b>	Es el azúcar que tras la fermentación permanece en el vino. Tras la fermentación puede quedar en el vino azúcar, porque la levadura se murió o porque se ha detenido la fermentación.
<b>Azúcares no fermentables</b>	La melaza utilizada para fermentar con levadura contiene sustancias reductoras no fermentables, las cuales son determinadas por titulación, utilizando el reactivo de Fehling.
<b>Azúcares reductores</b>	Son aquellos que, como la glucosa, fructosa, lactosa y maltosa presentan un carbono libre en su estructura y pueden reducir, en determinadas condiciones, a las sales cúpricas, o reactivo de Fehling.
<b>Fehling</b>	El reactivo de Fehling es una solución descubierta por el químico alemán Van der Fehling y que se utiliza como reactivo para la determinación de azúcares reductores.
<b>Fermentación</b>	Es un proceso de transformación de un sustrato orgánico producido por enzimas de levaduras, bacterias u hongos, en el cual se puede liberar gases o no.

<b>Fructuosa</b>	Es un monosacárido con la misma fórmula empírica que la glucosa, pero con diferente estructura.
<b>Glucosa</b>	Es un monosacárido de fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$ . Es una forma de azúcar que se encuentra libre en las frutas y miel.
<b>Grados Gay Lussac</b>	Es la medida de alcohol contenida en volumen; es decir, la concentración de alcohol contenida en una bebida.
<b>Melaza</b>	Es un producto líquido espeso derivado de la caña de azúcar y en menor medida de la remolacha azucarera, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es similar al de la miel, aunque de color parduzco muy oscuro.

## RESUMEN

Se determinó la eficiencia de fermentación referida a los azúcares fermentables, que contienen las melazas que se utilizan como materia prima para la fermentación en los fermentadores tipo batch, en una destilería de 300,000 litros de alcohol.

Se analizaron los azúcares presentes en la melaza, se midió el grado alcohólico (°GL) mediante un destilador y un densímetro digital, la cantidad de melaza (m<sup>3</sup>), los grados °brix, el volumen en porcentaje de los fermentadores y se midieron los azúcares residuales al final de la fermentación.

Mediante el método de Lane-Eynon se determinaron los azúcares presentes en la melaza y la cantidad de alcohol que es posible obtener en la fermentación de los 4 fermentadores, comparado con la cantidad de alcohol que se obtuvo experimentalmente, según la operación de la destilería.

La melaza se utilizó para fermentar y obtener mosto fermentado, del cual se determinó el grado alcohólico; este es aprovechado para destilar el mosto en las columnas de destilación.



## OBJETIVOS

### General

Determinar la eficiencia de los 4 fermentadores de una destilería de 300,00 litros de alcohol por día, a través de la medición del porcentaje en volumen de los azúcares fermentables.

### Específicos

1. Analizar el porcentaje en volumen de los azúcares fermentables de la melaza utilizada en cada uno de los fermentadores mediante el método de ICUMSA GS4/3-7.
2. Determinar el grado alcohólico en grados Gay Lussac ( $^{\circ}$ GL) de cada uno de los fermentadores a través de un densímetro.
3. Calcular los litros de alcohol teóricos de la melaza alimentada a cada fermentador a través de la ecuación de Gay-Lussac: 1 g de glucosa produce 0.64 ml de etanol.
4. Determinar la relación entre los litros de alcohol de cada fermentador obtenidos experimentalmente, dividido entre los litros de alcohol teóricos.

## **HIPÓTESIS**

Es factible determinar la eficiencia en los cuatro fermentadores de la destilería a través del análisis de azúcares fermentables, utilizando los métodos de ICUMSA.

## INTRODUCCIÓN

La fermentación es el proceso mediante el cual los azúcares en las mieles y jugos provenientes de la caña de azúcar son transformados mediante la acción de microorganismos (levadura), en alcohol etílico (etanol) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En la parte inicial del presente trabajo se da a conocer la historia de la fermentación y el mecanismo de la fermentación alcohólica, incluyendo los elementos que en ella intervienen.

El proceso de fermentación es de tipo *batch*, y cuenta con 4 fermentadores con una capacidad de 1 800 000 litros. El proceso inicia en el laboratorio con el crecimiento de levadura y el inocuo es trasegado a los reactores; seguidamente a los activadores de levadura o semilleros para finalizar en los fermentadores. El mosto fermentado a 8 °GL es alimentado a la columna destrozadora que inicia el proceso de destilación para separar los alcoholes que fueron producidos en la fermentación y obtener alcohol al 96.4 °GL.

En el laboratorio se analizaron los azúcares reductores totales, los grados brix, el grado alcohólico que alcanzan los fermentadores y los azúcares residuales, para obtener la eficiencia de fermentación en cada fermentador. Todo esto corresponde a las variables de estudio, que se incluyen en el capítulo 3.

A partir de la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, se hizo el análisis estadístico; cuyos resultados son presentados en tablas y gráficas, incluyendo su interpretación.





# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Historia de la fermentación

El conocimiento real de la fermentación se inicia en 1762; en este año Becher da a conocer el resultado de sus trabajos afirmando que solo la presencia de azúcares, podría por fermentación, originar el alcohol.

En el siglo XVIII se consiguen notables progresos en el desarrollo de la fermentación alcohólica. En 1774 Mac Bride consigue identificar el gas desprendido en la fermentación como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); en 1766, Cavendish mide la cantidad total de este gas que se desprende en una fermentación. A fines de siglo, en 1773, publica Lavoiser su obra *Traite Elementaire de Chimie*, en el cual pone de manifiesto los resultados de sus numerosos trabajos que lo llevan a afirmar que en la fermentación, el azúcar se desdobla en alcohol y anhídrido carbónico, mediante una reacción química que cumple la ley que lleva su nombre o “Ley de la Conservación de la Materia”.

En el siglo XIX se consiguen progresos importantes; en efecto se abandona la idea de que la fermentación era una reacción química y se considera la función biológica que desempeña la levadura. Gay-Lussac, en el año 1810, señala que para que se produzca la fermentación es necesaria la presencia de una sustancia azucarada. Asimismo, opinaba que el oxígeno era muy importante y formula su ecuación de la fermentación:



En 1836, varios autores manifiestan que las levaduras son vegetales y que en su vida se encuentra la causa de la fermentación alcohólica. Las levaduras de acuerdo con los resultados de las investigaciones de Leeuwenhock, son pequeñas esférulas que se multiplican y que solo en estado viviente ejercen acción sobre el azúcar (Teoría Vitalista).

Por esta misma época, varios científicos afirmaban que la fermentación era producida por una sustancia en descomposición, no por ser un ser vivo que se desarrolla y reproduce (Teoría Mecánica).

Intervino entonces Pasteur, quien hizo evidente que la levadura descompone el azúcar como consecuencia de su actividad vital.

Demostró también que en la fermentación de 100 partes de sacarosa se originaban primero: 105.4 partes de azúcar invertido, las que a su vez, mediante la fermentación, producen 51.1 partes de alcohol etílico, 49.4 de anhídrido carbónico, 3.2 partes de glicerina, 0.7 partes de ácido succínico y una partes de otras sustancias.

En 1983 Kye-Joon Lee y otros colaboradores, hicieron un estudio donde evaluaron la alta producción de etanol por fermentación con *Zymomonas mobilis* y, efectuando los estudios cinéticos.

En el mismo año, Thomas Karsch y otros colaboradores estudiaron algunas de las ventajas y desventajas de la producción de alcohol con *Zymomonas* y *saccharomyces*.

La utilidad actual de las mieles o melaza en los ingenios de Guatemala, es para producir etanol o en menor proporción para concentrados; la producción de etanol se realiza por medio de la fermentación de la cual se obtiene mosto y este se destila en las columnas de destilación.

De acuerdo con la ecuación de Gay-Lussac, 1 g de glucosa produce 0.6475 ml de etanol.

La eficiencia de la fermentación en las destilerías se puede referir a los azúcares reductores totales o a los azúcares fermentables que se encuentran en las mieles que produce la fabricación de azúcar.

En Guatemala operan 5 destilerías las cuales son: Bioethanol, DARSA, Servicios Manufactureros, Palo Gordo y Mag Alcoholes; la más antigua es la de Ingenio Palo Gordo.

Las eficiencias de fermentación han sido de 75-80% en los años de 1977; en la actualidad, con el desarrollo de nuevas tecnologías y condiciones de operación, se ha alcanzado entre el 90-92%.

El alcohol etílico es un combustible muy satisfactorio y es posible que se sustituya a la gasolina del petróleo como el principal combustible para los motores. El alcohol etílico se produce directamente de la caña de azúcar mediante un sistema de fermentación continua o batch.

Como una alternativa a su uso como combustible, el alcohol (etanol) puede ser utilizado como solvente y producto intermedio. Más de 70 productos químicos orgánicos se han derivado del etanol.

El potencial de etanol en esta área ha sido analizado, junto con breves descripciones de los procesos, temperatura y presión, catalizadores y equipos utilizados.

El etanol se puede mezclar con la gasolina en diferentes proporciones. En Estados Unidos, el gasohol es una mezcla de 90% de gasolina y 10% de alcohol absoluto. En Brasil se usa el 100% como alcohol.

Las tecnologías fundamentales de la fermentación y destilación de alcohol se desarrollaron ampliamente durante la II Guerra Mundial. En aquella época, algunos países utilizaron 100% de alcohol como combustible para los automóviles. El principal impulsor de la producción de alcohol es de orden económico: el alza de los precios del petróleo.

Se han comparado los costos de producción del alcohol a partir de diferentes materias primas. Se discuten varios aspectos, incluyendo las mejoras para aumentar la capacidad del fermentador, la concentración del producto y el sustrato, el uso de nuevos organismos, la manipulación genética, la reducción de costos de la separación, la eficiencia y el manejo del efluente indeseable.

El alcohol se puede producir también a partir de la caña. Es poco probable que desviar la caña destinada a la producción de azúcar para la producción de etanol resulte económicamente satisfactorio. Sin embargo, en condiciones favorables, la caña podría servir como la única materia prima aun para un período corto. Por ejemplo, con mieles de bajo grado 40 a 42% y de 1.3 a 1.5 horas, el proceso suministra una concentración de alcohol de 7.2 a 7.5% (en volumen).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Mecanismo de la fermentación alcohólica

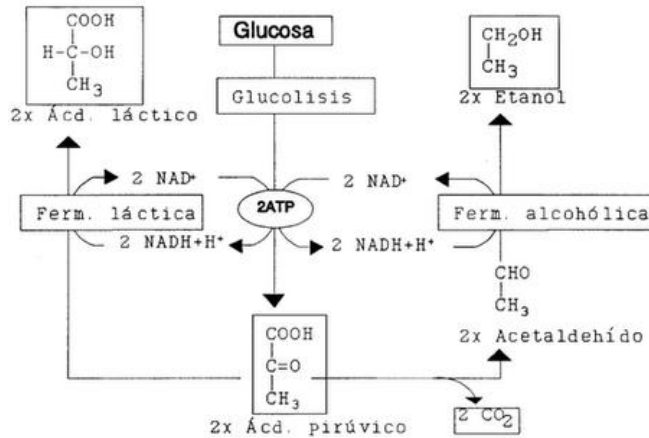
Con el tiempo han sido propuestos muchos mecanismos que pretenden explicar la fermentación (Lebedew, Kluver, Meyerhof, entre otros). Con el fin de facilitar la comprensión del complicado proceso. La fermentación alcohólica más ampliamente conocida es la escisión de glucosa para formar etanol y  $\text{CO}_2$ , en especial, predominante en levaduras.

Las levaduras utilizan las mismas reacciones del camino de Embden-Meyerhof hallado en animales para producir piruvato. El piruvato es dextracarboxilado en levaduras por una enzima que utiliza pirofosfato de tiamina como coenzima. El derivado hidroxietiltiamina intermedio se descompone para liberar acetaldehído libre al medio, el cual es entonces reducido por NADH a etanol.

Cabe subdividir el mecanismo anaerobio de la glucosa en esas etapas: fosforilación inicial, síntesis de glucógeno, conversión en triosa, etapa oxidativa y formación del lactato o etanol.

Se representan en el siguiente esquema las reacciones que son base de la fermentación alcohólica, con las enzimas que rigen cada reacción, que a veces se llama “esquema de Embden-Meyerhof”

Figura 1. Esquema de Embden-Meyerhof



Fuente: FRAZIER, W.; WESTHOFF, D. Microbiología de los alimentos. p. 6.

La glucosa y otros azúcares experimentan fosforilación obligada como primer paso del metabolismo. Esta fosforilación es catalizada por una subclase de un grupo de enzimas, las “cinasas irreversibles”; el producto de la reacción de ATP y glucosa en presencia de la cinasa adecuada y  $\text{Mg}^{++}$  es glucosa-6-fosfato. La irreversibilidad de esta reacción se explica por la formación de un éster fosfato a expensas del enlace de fosfato rico en energía; este paso es muy importante, pues al unir a partir de la glucosa-6-fosfato, se generan muchas rutas metabólicas.

La formación de ácido láctico, producto terminal del metabolismo anaerobio de la glucosa va precedida de desdoblamiento del esqueleto de la hexosa en triosa. La primera reacción que experimenta la glucosa-6-fosfato, en esta vía metabólica es su conversión en fructosa-6-fosfato, reacción catalizada por fosfohexosaisamerasa.

La fructosa-6-fosfato experimenta la fosforilación por el ATP en presencia de  $\text{Mg}^{++}$  fosfofructocinasa, formándose fructosa-1,6-difosfato.

La fructosa-1,6-difosfato se desdobra en dos moléculas de fosfotriosa por la acción de la hexosa-difosfato aldosa; el producto de la reacción es una mezcla equimolecular de gliceraldehído-3-fosfato y fosfato de dihidroxiacetona.

La conversión de gliceraldehído-3-fosfato en ácido 1,3 difosfoglicérico es la primera de las dos reacciones de la glucólisis en las cuales se generan enlaces de fosfato rico en energía; el aldehído del gliceraldehído-3-fosfato se condensa con grupo sulfhidrilo de la enzima. El producto de la condensación experimenta deshidrogenación convirtiéndose en un compuesto de tipo mercaptano de ácido o tioéster; los dos átomos de hidrógeno son aceptados por NAD; en consecuencia, en la subsiguiente reacción de intercambio con fosfato inorgánico, se produce un fosfato carboxílico rico en energía.

El enlace de fosfato rico en energía producido en la etapa oxidativa se convierte en ATP por virtud de una fosfogliceratinasa, en presencia de  $Mg^{++}$ ; la cinasa transfiere el carboilfosfato del ácido difosfoglicérico al ADP, formándose ATP y ácido 3-fosfoglicérico; este ácido se convierte de manera irreversible en ácido 2-fosfoglicérico por la acción de la fosfogliceromutasa, la cual utiliza como coenzima el ácido 2,3-difosfoglicérico.

El ácido 2,3 difosfoglicérico experimenta deshidratación reversible a ácido fenolpirúvico por la acción de la enolasa; la acción de esta encima exige  $Mg^{++}$ . El fosfato rico en energía del fosfoenolpirúvico es transferido al ADP por la piruvatocinasa en presencia de  $Mg^{++}$ , dando como resultado la formación de ácido pirúvico; en esta etapa la ruta metabólica se bifurca; el camino que se tome depende del organismo particular.

En las células de las levaduras hay una pirúvicodescarboxilasa anaerobia que desdobra el ácido pirúvico en  $CO_2$  y acetaldehído.

El acetaldehído se reduce a etanol; este producto terminal de la fermentación alcohólica, por virtud de una alcoholdehidrogenasa que actúa en sentido inverso. El NADH necesario para esta reducción proviene de la etapa oxidativa.

Todo lo anterior se refiere a la fermentación de la glucosa. Cuando se van a fermentar disacáridos, se admite la existencia de una hidrolasa que realiza la hidrólisis correspondiente, para luego empezar el proceso normal.

La fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de aire (oxígeno -  $O_2$ ), originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono (por regla general azúcares como la glucosa, la fructosa, la sacarosa, el almidón, etc.) para obtener como productos finales: un alcohol en forma de etanol (cuya fórmula química es:  $CH_3-CH_2-OH$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en forma de gas y unas moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico.



## 2.2. Azúcar

Es una materia prima en forma de miel virgen o en forma de miel de purga (melaza).

El azúcar (sucrosa) es una mezcla de glucosa y fructosa. La glucosa del azúcar invertido, es realmente la que la levadura utiliza para convertirla en alcohol.



Para que esté disponible, es necesario “invertir” la sacarosa. La inversión se puede llevar a cabo por la acidificación de la solución de azúcar o más rápidamente con la ayuda de una enzima llamada “invertasa” producida naturalmente por la propia levadura.

### **2.3. Enzima**

Es un compuesto orgánico que acelera una reacción.

### **2.4. Medición de azúcar**

Una forma práctica y rápida de medir la concentración de azúcar en una solución es por medio del hidrómetro, con escalas arbitrarias en grados Baumé ( $^{\circ}\text{Be}$ ) o grados brix.

Un grado brix corresponde a 1% en peso de una solución pura de azúcar. Para la miel virgen o melaza la conversión de grados brix a porcentaje de azúcar ya no es exacta, puesto que en dichas soluciones hay sólidos (impurezas) que no son azúcares y que afectan la densidad. La densidad (y la escala brix) se ve afectada también por la temperatura; mientras más caliente menos denso y viceversa.

### **2.5. Azúcares totales**

Incluye todos los azúcares presentes en la solución o en la miel, incluyendo los azúcares no fermentables.

## **2.6. Azúcares residuales**

Son los azúcares que en determinado momento no pueden ser convertidos en alcohol. Siempre hay un pequeño porcentaje de azúcar residual al final de la fermentación. En miel virgen puede ser de 0.1-0.5%. En melaza es un valor más alto de 0.3% a 1.5%. Debe recordarse que al inicio de una fermentación ya existe cierta cantidad de azúcar residual, que en general representa la porción que no es glucosa.

## **2.7. Sólidos totales**

Son aquellos sólidos que no son agua en la melaza, incluyendo los azúcares que estén disueltos (sólidos disueltos) y los sólidos que permanecen en suspensión, como tierra, bagacillo, etc.

## **2.8. Sólidos disueltos**

Son azúcares, compuestos de calcio, potasio, sodio, azufre, nitrógeno y gomas.

## **2.9. Sólidos suspendidos**

Estos pueden corresponder a tierra, gomas, bagacillo, microorganismos, azúcar y cristalizado.

## **2.10. Azúcares reductores**

Existen dos reacciones de oxidación y de reducción. Si un determinado compuesto se oxida es un reductor y si se reduce es un oxidante.

Los azúcares que reducen el reactivo de Fehling, se llaman azúcares reductores. La mayoría de azúcares, incluyendo la glucosa son reductores. La sacarosa, sucrosa o azúcar común es no reductora. Los azúcares residuales, son no reductores y como regla general son infermentables.

El objetivo principal de la levadura al metabolizar el azúcar anaeróticamente (sin presencia de aire), es generar energía (ATP) necesaria para el mantenimiento de vida, crecimiento y multiplicación, perpetuando así la especie.

El etanol y  $\text{CO}_2$  resultantes constituyen productos de excreción, sin utilidad metabólica para la célula. En condiciones aeróbicas (presencia de aire), el etanol y otros productos de excreción pueden ser oxidados metabólicamente, generando más ATP y biomasa.

Junto con el etanol y el  $\text{CO}_2$ , el metabolismo anaeróbico permite la formación y excreción de compuestos como:

- Glicerina
- Ácidos orgánicos (succínico, acético, pirúvico, etc.)
- Alcoholes superiores
- Otros compuestos de menor significado cuantitativo

## **2.11. Biorreactores**

El biorreactor, es sin duda, uno de los equipos fundamentales de la microbiología industrial. Es el recipiente donde se realiza el cultivo, y su diseño debe ser tal, que asegure un ambiente uniforme y adecuado para los microorganismos.

Las tareas que realiza el biorreactor pueden resumirse del siguiente modo:

- Mantener las células uniformemente distribuidas en todo el volumen de cultivo a fin de prevenir la sedimentación o la flotación.
- Mantener constante y homogénea la temperatura.
- Minimizar los gradientes de concentración de nutrientes.
- Suministrar oxígeno a una velocidad tal que satisfaga el consumo.
- El diseño debe ser tal que permita mantener el cultivo puro; una vez que todo el sistema ha sido esterilizado y posteriormente sembrado con el microorganismo deseado.

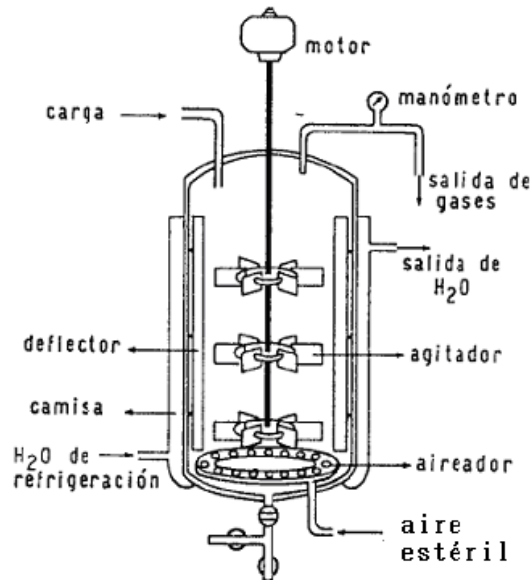
Para satisfacer los cuatro primeros puntos es necesario que el biorreactor esté provisto de un sistema de agitación; además, para el suministro de oxígeno se requiere de un sistema que inyecte aire en el cultivo.

Se describirán brevemente dos tipos de biorreactores de uso muy difundido: el tanque agitado y el *"air lift"*. En el primero de ellos, la agitación se realiza mecánicamente mediante un eje provisto de turbinas accionado por un motor.

El aire se inyecta por la parte inferior del tanque y es distribuido por una corona que posee pequeños orificios espaciados regularmente. El chorro de aire que sale de cada orificio es "golpeado" por las paletas de la turbina inferior, generándose de este modo miles de pequeñas burbujas de aire, desde las cuales difunde hacia el seno del líquido.

El sistema de agitación se completa con cuatro o seis deflectores que tienen por finalidad cortar o romper el movimiento circular que imprimen las turbinas al líquido, generando de este modo mayor turbulencia y mejor mezclado.

Figura 2. **Partes del fermentador**



Fuente: LYONS, Jacques; KELSALL, T.P. Alcohol Text Book. p. 254.

El tanque está rodeado por una camisa por la que circula agua, lo que permite controlar la temperatura. Para tanques mayores que 1000 o 2000 litros, este sistema ya no es eficiente y es reemplazado por un serpentín que circula adyacente a la pared interior del tanque. Debe tenerse en cuenta que a medida que es mayor el volumen de cultivo también lo es la cantidad de calor generado, por lo que se hace necesario una mayor área de refrigeración. Los tanques son de acero inoxidable y están pulidos a fin de facilitar la limpieza y posterior esterilización.

## 2.12. Melaza

La melaza o miel de caña es un producto líquido espeso derivado de la caña de azúcar y en menor medida de la remolacha azucarera, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es similar al de la miel aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce, ligeramente similar al del regaliz, con un pequeño regusto amargo.

Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en hidratos de carbono además de vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre y magnesio. Su contenido de agua es bajo. Se elabora mediante la cocción del jugo de la caña de azúcar hasta la evaporación parcial del agua que contiene, formándose un producto meloso semicristalizado.

Tabla I. **Características de la melaza**

Grados brix	78 – 93 %
Sólidos totales	75 – 78 %
Azúcares totales	44 – 60 %
Azúcares no fermentables	40 – 55 %
Compuestos inorgánicos	8 – 12 %
Gravedad específica	1.38 – 1.52
pH a 40 brix dilución	4,5 – 4,6

Fuente: CHEN, James. Manual de azúcar de caña. p. 473.

### 2.13. Composición de la caña de azúcar

Los tallos corresponden a la sección anatómica y estructural de la planta de caña de azúcar, que presenta mayor valor económico e interés para la fabricación de azúcar y la elaboración de alcohol, motivo por el cual su composición química reviste especial significado.

En términos generales, la composición química de la caña de azúcar es la resultante de la integración e interacción de varios factores que intervienen en forma directa e indirecta sobre sus contenidos, variando los mismos entre lotes, localidades, regiones, condiciones del clima, variedades, edad de la caña, estado de madurez de la plantación, grado de despunte del tallo, manejo incorporado, periodos de tiempo evaluados, características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, grado de humedad (ambiente y suelo), fertilización aplicada, entre muchos otros, como se anota en la tabla II adjunta.

Tabla II. **Composición química de la caña de azúcar**

<b>Constituyente químico</b>	<b>Porcentaje %</b>
Agua	73-76
Sólidos	24-27
- Sólidos solubles (brix)	10 -16
- Fibra seca	11-16

Fuente: CHEN, James. Manual de azúcar de caña. p. 47.

En términos globales, la caña está constituida principalmente por jugo y fibra, siendo la fibra la parte insoluble en agua formada por celulosa, la que a su

vez se compone de azúcares simples como la glucosa (dextrosa). A los sólidos solubles en agua expresados como porcentaje y representados por la sacarosa, los azúcares reductores y otros componentes, comúnmente se les conoce como brix. La relación entre el contenido de la sacarosa presente en el jugo y el brix se denomina pureza del jugo.

El contenido “aparente” de sacarosa, expresado como un porcentaje en peso y determinado por polarimetría, se conoce como “pol”. Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que contemplan los azúcares reductores como la glucosa y la fructuosa y otras sustancias orgánicas e inorgánicas, se denominan usualmente “no pol” o “no sacarosa”, los cuales corresponden porcentualmente a la diferencia entre brix y pol.

La tabla II revela que en la caña de azúcar el contenido de agua representa entre el 73 y el 76%. Los sólidos solubles totales (brix, porcentaje de caña) fluctúan entre 10 y 16%, y la fibra (% de caña) varía entre 11 y 16%.

Entre los azúcares más simples se encuentran la glucosa y la fructuosa (azúcares reductores), que existen en el jugo de caña con grado avanzado de madurez, en una concentración entre 1 y 5%.

La calidad del azúcar crudo y de otros productos como el color y el grano (dureza) del dulce dependen en buena parte de la proporción de estos azúcares reductores, los cuales, cuando aumentan por causa del deterioro o la inmadurez de la planta, pueden producir incrementos en el color y grano defectuoso en el dulce.

Además de los azúcares contenidos en el jugo, existen también otros constituyentes químicos de naturaleza orgánica e inorgánica, representados por



sales de ácidos orgánicos, minerales, polisacáridos, proteínas y otros no azúcares.

La calidad de los jugos afecta el procesamiento de la caña y la recuperación de la sacarosa en la fábrica. El contenido de almidones en el jugo es bajo (aproximadamente entre 50 y 70 mg/l); se ha encontrado que esta es una característica muy ligada a las variedades, que puede ser modificada (reducida) mediante prácticas agrícolas como el riego y la fertilización con potasio.

De la composición de la caña, el 99% corresponde a los elementos hidrógeno, carbono y oxígeno. Su distribución en el tallo es de aproximadamente un 74,5% de agua, 25% de materia orgánica y 0,5% de minerales.

Para muchos tecnólogos y especialistas, la caña como materia prima se constituye fundamentalmente de fibra y jugo, donde:

Caña = jugo + fibra

Caña = fibra + sólidos solubles (brix)



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

A continuación se describen las variables utilizadas.

##### 3.1.1. Azúcares reductores totales (ART)

La melaza contiene entre un 40-50 % de azúcares fermentables.

Los azúcares reductores totales incluyen todos los azúcares presentes en la solución o en la miel, incluyendo los azúcares no fermentables.

Se lleva a cabo por medio del análisis conocido como Prueba de Fehling.

Tabla III. **Métodos empleados para la determinación de azúcares**

<b>Método</b>	<b>Determinación</b>	<b>Resultados esperados</b>
Método GS4/3-7 Manual de ICUMSA	Azúcares reductores	48 – 60 %w/w
Praj Standard Methods. Azúcares infermentables	Azúcares infermentables	3 – 5 %w/w
Praj Standard Methods Azúcares residuales	Azúcares residuales	1 – 3 %w/w

Fuente: elaboración propia.

Las muestras de melaza se tomaron del tanque de almacenamiento en los siguientes horarios: a las 7:00 y a las 15:00 hrs; se analizarán los azúcares reductores totales y los grados brix de la melaza.

El promedio de los resultados de azúcares reductores, serán los azúcares que ingresarán a los fermentadores en un día de operación de la destilería. El procedimiento a utilizar se encuentra detallado en los anexos.

El total de muestras de melaza son 180, de las cuales se toman día a día y el promedio del día serán los azúcares reductores a tomar en cada uno de los recipientes donde se estarán fermentando; en promedio, se concluyen 2 fermentadores al día y de estos se detallan de acuerdo con la siguiente programación.

Total de muestras para análisis de azúcares reductores totales 180.

### **3.1.2. Azúcares residuales (AR)**

Son los azúcares que en determinado momento no pueden ser convertidos en alcohol. Siempre hay un pequeño porcentaje de azúcar residual al final de la fermentación. En miel virgen, puede ser de 0.1-0.5%. En melaza, es un valor más alto de 0.3% a 1.5%. Debe recordarse que al inicio de una fermentación ya existe cierta cantidad de azúcar residual, que en general representa la porción que no es glucosa.

Se realizó la prueba de Fehling (ver la tabla V), la cual establece el método a utilizar; los azúcares residuales en el mosto son importantes porque permiten determinar si la fermentación ha sido completa.

Las muestras se tomarán al final de cada fermentación, la forma de establecer que el fermentador ha llegado a su tiempo de fermentación es por medio de los grados brix; si estos se logran repetir 2 o más veces, se dará como finalizada la fermentación para fines operativos, ya que el tiempo de fermentación puede durar mucho más tiempo, aunque el grado alcohólico aumenta ligeramente, no va ser considerable para la operación.

De acuerdo con la programación que se muestra en la tabla V, se analizaron los azúcares residuales de la melaza.

A continuación se presenta el total de análisis de azúcares residuales por cada fermentador; debe tomarse en consideración que los cuatro fermentadores tienen las mismas características de volumen y diseño.

El total de muestras por fermentador para análisis de azúcares residual es de 48.

Para establecer cuándo se termina la fermentación y se envía a destilación se procedió de la siguiente forma:

- Se midieron los grados brix del mosto del fermentador al terminar el llenado del fermentador.
- Se midieron los grados brix cada 2 horas.
- Al repetir 2 o más veces, se procedió a dar por terminada la fermentación y se tomó la muestra final de mosto fermentado.

### **3.1.3. Azúcares infermentables**

El jugo o melaza utilizada para fermentar con levadura contiene sustancias reductoras no fermentables, las cuales son determinadas por titulación, usando soluciones de Fehling.

Los azúcares infermentables se midieron a través del método de Praj Industries, los cuales se detallan en los anexos de la presente investigación. El análisis de infermentables en la melaza se tomó de la misma muestra para analizar azúcares reductores, se realizarán dos corridas al día, y el promedio será el % de azúcares infermentables en el día de operación. El total de muestras por fermentador fue de 180.

### **3.1.4. Determinación del grado alcohólico de los cuatro fermentadores**

De la misma muestra para determinar los azúcares residuales después de la fermentación, se tomará para el grado alcohólico del fermentador que se envíe a destilación para rectificarlos y obtener alcohol al 96 %. Para cada fermentador se tomaron 48 análisis de grado alcohólico, según el procedimiento que se detalla en los anexos.

### **3.1.5. Medición de m<sup>3</sup> de melaza alimentada a cada fermentador**

La cantidad de melaza alimentada a cada fermentador se controló mediante un caudalímetro, el cual está debidamente calibrado. En los anexos se adjunta la marca del caudalímetro, la capacidad y la calibración de dicho equipo.

### 3.1.6. Densidad de melaza

Se toman los grados brix de la melaza y su temperatura, seguidamente se utilizan las tablas que relacionan el brix y la temperatura, y se obtiene la densidad de la melaza. Esto se adjunta en los anexos.

La eficiencia de fermentación se realizó de la siguiente manera:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{Litros alcohol reales producidos en fermentación}}{\text{Litros alcohol teóricos}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Los litros de alcohol teóricos se calcularon de la siguiente forma:

$$\text{Recuperación teórica} = \text{total de azúcar fermentable} * 0.64 \quad (\text{Ec. 2})$$

Se calcularon los litros de alcohol reales de la siguiente forma:

$$\text{Litros de alcohol reales} = \text{litros de vino} * \text{grado alcohólico} \quad (\text{Ec. 3})$$

Los litros de alcohol teóricos se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Litros de alcohol teóricos} = \text{m}^3 \text{ de melaza} * \text{AR} * 0,64 * \% \text{ nivel} \quad (\text{Ec. 4})$$

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

La eficiencia de fermentación será referida a los azúcares fermentables presentes en la miel que se utilice en el proceso de fermentación.

El estudio se llevó a cabo durante 3 meses de producción de la destilería, por lo que las muestras y la operación de los fermentadores se estableció por la destilería.

Los 4 fermentadores tienen una capacidad de 1, 800,000 litros.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

El personal disponible incluye operadores de sala y de campo, ayudantes, asesor, personal de mantenimiento y analista de laboratorio.

#### **3.3.1. Operadores de sala**

Es la persona encargada de manejar los controles para el llenado de los fermentadores y llevar el control de los parámetros de nivel de llenado, temperaturas, la adición de nutrientes, los *batch* de ácido, el tiempo de fermentación.

#### **3.3.2. Operadores de campo**

Se encarga de abrir y cerrar válvulas en los fermentadores, también lleva el control del antiespumante, nutrientes y realiza los movimientos necesarios para mantener temperaturas

#### **3.3.3. Ayudantes de campo**

Es la persona que auxilia al operador de campo y al operador de sala para realizar las tareas en el área de fermentación.



### **3.3.4. Asesor**

Es la persona que apoya en la realización del presente anteproyecto brindando la asesoría necesaria.

### **3.3.5. Personal de mantenimiento**

Personal que se encarga de realizar labores correctivas, preventivas y otros trabajos asignados.

### **3.3.6. Analista de laboratorio**

Persona que se encarga de tomar muestras de fermentación y destilación para realizar los análisis.

## **3.4. Recursos materiales disponibles**

- Materiales
  - Computadora
  - Papel bond
  - Internet
  
- Reactivos
  - Reactivos estándar Fehling A y B
  - Solución de subacetato de plomo 10% w/v
  - Solución de oxalato ortofosfato sódico potásico
  - Indicador de azul de metileno 1 % w/v
  - Hidróxido de sodio 1 N

- Ácido clorhídrico 6.34 N
  
- Cristalería
  - Erlenmeyer de 250 mL
  - Matraz volumétrico de 200 mL, 250 mL
  - Bureta de 50 mL
  - Pipeta de 25 mL
  - *Beaker* de 250 mL
  - Probeta de 25 mL
  
- Instrumentos
  - Balanza analítica ( $\pm 0.0001$  g)
  - Plato de calentamiento con agitación magnética
  - Barra magnética
  - Termómetro de 0 a 100° C

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Para la determinación de los azúcares reductores y azúcares residuales se realizarán titulaciones como lo indican los métodos: Method GS4/3-7, Manual ICUMSA (1994) Method 4, Estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia (1992) y en Manual de Praj, Analytical methods for cane feestack based fermentation and distillation process. July 14-2004. 4a ed. PRAJ Standar Methods.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

A continuación se presentan los resultados de los cálculos de brix hidrométrico y densidad de melaza.

#### **3.6.1. Cálculo de brix hidrométrico y densidad de melaza referida a 20 °C**

Para la primera corrida del día, la lectura de la dilución es de 50% de miel / 50% de agua; la lectura del hidrómetro es de 44.10, con una temperatura de 25 °C (ver tabla de corrección de brix relación a la temperatura de 20 °C).

Se ubica entre la tercera y cuarta columna para interpolar y posteriormente se debe desplazar a la fila de temperatura de 25 °C; el valor que se intercepta en este caso es de 0.38, entonces se suma a la lectura observada en el hidrómetro  $44.10 + 0.38$  y este valor se multiplica por 2; así  $44.5 \times 2 = 89.0$  brix y se toma la lectura de la densidad en la tabla con el brix corregido de 89.0 y para este caso es de 5.5719 Kg/gal (ver tablas IV a la XLVIII para las demás corridas de *brix* y densidad).

#### **3.6.2. Cálculo de azúcares reductores en melaza**

Para la primera corrida del día, se gastaron 18,70 ml en la titulación y para los azúcares reductores se tiene que: % azúcares reductores =  $1040/18,70 = 55,61$ ; para la segunda corrida del día 03/01/2012, se gastaron 19,30 ml en la titulación y para los azúcares reductores se tiene que: % azúcares reductores =  $1040/19,30 = 53,88$ . El promedio que se utilizó para los azúcares reductores del día fue de:  $(55,61 + 53,88)/2 = 54,75$  (ver tablas LII a la LIII, para los demás azúcares reductores)

### **3.6.3. Metros cúbicos de melaza utilizados en fermentadores y niveles de llenado de los fermentadores**

Los metros cúbicos de los fermentadores se toman del caudalímetro de melaza que posee cada fermentador, los cuales quedan registrados durante y después del llenado de los fermentadores, así como el nivel de los fermentadores. En el primer día, para el fermentador 1 se tiene que la metros cúbicos de melaza fueron de 280 y un nivel de 76,4% (ver tablas XLIX a la LII, para los demás niveles y m<sup>3</sup> de melaza por fermentador). La capacidad de los fermentadores es de 1800 m<sup>3</sup>

### **3.6.4. Conversión de m<sup>3</sup> a galones**

1 m<sup>3</sup> equivale a 264,1 galones

Para 280 m<sup>3</sup> de melaza:

$$280 \text{ m}^3 \times \frac{263.1 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3} = 73976 \text{ galones}$$

### **3.6.5. Galones de melaza a kilogramos de melaza**

Con la densidad de la melaza, que fue de 5,5719 kg/gal para la primer corrida del día para el fermentador 1.

$$73976 \text{ gal} \times \frac{5.5719 \text{ kg}}{1 \text{ gal}} = 412279.34 \text{ kg}$$

### 3.6.6. Cálculo de azúcares residuales

Para el fermentador 1, para el día 01/03/2012, se tiene que los ml consumidos fueron de 42,27, el factor de dilución es de 0,1 y el factor de Fehling es de 0,9861

$$\text{Azúcar residual} = \frac{5,127}{\text{ml consumidos} \times \text{factor de dilución} \times \text{factor}} \quad (\text{Ec.5})$$

$$\text{Azúcar residual (\% w/v)} = \frac{5,127}{42,27 \times 0,1 \times 0,9861}$$

$$\text{Azúcar residual (\% w/v)} = 1,23$$

### 3.6.7. Cálculo de azúcares infermentables

$$\text{Azúcares infermentables en la materia prima} = \frac{5,127}{A \times F.F \times D.F} \quad (\text{Ec.6})$$

F. F. = Factor Fehling (a partir de la estandarización de la solución de Fehling)

A = Volumen consumido de filtrado (mL)

D. F. = Factor de dilución =  $(20/250) \times (125/250) = 0,04$

Volumen consumido para 27,65

$$\text{Infermentables en la materia prima} = \frac{5,127}{27,65 \times 0,04 \times 0,9861}$$

Azúcares infermentables = 4,70

### **3.6.8. Cálculo de azúcares fermentables**

Para los azúcares fermentables de 54,75

Azúcar fermentable = Azúcares reductores – azúcares infermentables

Azúcar fermentable =  $54,75 - 4,70 = 50,05$

### **3.6.9. Grado alcohólico**

Se toma la muestra del fermentador que será enviado a destilación y mediante el procedimiento de medición de grado alcohólico.

### **3.6.10. Litros de alcohol producidos en el fermentador**

Litros de alcohol producidos = capacidad de fermentador x nivel x °GL (Ec.7)

Litros de alcohol producidos =  $1,800,000 \times 0,764 \times 0,0798$

Litros de alcohol producidos = 109740,96 litros

### **3.6.11. Litros de alcohol teóricos referidos a los azúcares fermentables**

Para el fermentador 1, para la corrida del día se tiene:

Litros de alcohol teóricos =  $412279,34 \times 50,05 \times 0,64$

Litros de alcohol teóricos = 132048,12 litros

### 3.6.12. Cálculo de eficiencia

Para el fermentador 1, para la corrida del día se tiene:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{Litros alcohol reales producidos en fermentación}}{\text{Litros alcohol teóricos}} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\% \text{ eficiencia} = 109740,96/132048,12$$

$$\% \text{ eficiencia} = 83,11$$

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En las tablas que se presentan a continuación, se incluyen los resultados de los experimentos realizados para encontrar los grados brix de melaza.

Tabla IV. Grados brix de melaza corregidos, mes de enero

Brix de dilución	Corrección	Temperatura °C	Brix + corrección	Grados brix corregidos
44,12	0,38	25,00	44,50	89,00
44,07	0,47	26,00	44,54	89,08
43,57	0,38	25,00	43,95	87,90
43,78	0,47	26,00	44,25	88,50
43,17	0,38	25,00	43,55	87,10
43,84	0,47	26,00	44,31	88,62
44,39	0,31	24,00	44,70	89,40
43,68	0,47	26,00	44,15	88,30
43,64	0,31	24,00	43,95	87,90
43,88	0,47	26,00	44,35	88,70
43,54	0,31	24,00	43,85	87,70
43,88	0,47	26,00	44,35	88,70
44,17	0,38	25,00	44,55	89,10
44,02	0,47	26,00	44,49	88,98

Continuación de la tabla IV.

44,63	0,47	26,00	45,10	90,20
44,53	0,38	25,00	44,91	89,82
43,98	0,47	26,00	44,45	88,90
44,63	0,38	25,00	45,01	90,02
44,08	0,47	26,00	44,55	89,10
44,53	0,38	25,00	44,91	89,82
44,28	0,47	26,00	44,75	89,50
44,85	0,38	25,00	45,23	90,46
44,68	0,47	26,00	45,15	90,30
44,95	0,38	25,00	45,33	90,66
44,84	0,47	26,00	45,31	90,62
44,97	0,38	25,00	45,35	90,70
44,61	0,47	26,00	45,08	90,16
44,47	0,38	25,00	44,85	89,70
44,64	0,47	26,00	45,11	90,22

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Grados brix de melaza corregidos, mes de febrero**

<b>Brix dilución</b>	<b>Corrección</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Brix + corrección</b>	<b>Grados brix corregidos</b>
44,91	0,47	26,00	45,38	90,76
44,77	0,38	25,00	45,15	90,30
44,61	0,47	26,00	45,08	90,16
44,17	0,38	25,00	44,55	89,10
44,76	0,47	26,00	45,23	90,46
44,67	0,38	25,00	45,05	90,10
44,76	0,47	26,00	45,23	90,46
44,53	0,38	25,00	44,91	89,82
43,98	0,47	26,00	44,45	88,90
44,67	0,38	25,00	45,05	90,10
44,46	0,47	26,00	44,93	89,86
44,07	0,38	25,00	44,45	88,90
44,84	0,47	26,00	45,31	90,62
44,80	0,38	25,00	45,18	90,35
44,36	0,47	26,00	44,83	89,66



Continuación de la tabla V.

44,37	0,38	25,00	44,75	89,50
44,38	0,47	26,00	44,85	89,70
44,76	0,38	25,00	45,14	90,28
44,62	0,47	26,00	45,09	90,18
45,05	0,38	25,00	45,43	90,86
44,78	0,47	26,00	45,25	90,50
44,75	0,38	25,00	45,13	90,26
44,71	0,47	26,00	45,18	90,35
44,73	0,38	25,00	45,11	90,22
44,14	0,47	26,00	44,61	89,22
44,63	0,38	25,00	45,01	90,02
43,71	0,47	26,00	44,18	88,35
44,63	0,38	25,00	45,01	90,02
43,71	0,47	26,00	44,18	88,35
44,63	0,38	25,00	45,01	90,02
43,71	0,47	26,00	44,18	88,35
44,53	0,38	25,00	44,91	89,82
43,58	0,47	26,00	44,05	88,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Grados brix de melaza corregidos, mes de marzo**

<b>Brix dilución</b>	<b>Corrección</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Brix + corrección</b>	<b>Grados brix corregidos</b>
44,83	0,38	25,00	45,21	90,42
44,28	0,47	26,00	44,75	89,50
44,63	0,38	25,00	45,01	90,02
44,74	0,47	26,00	45,21	90,42
44,23	0,38	25,00	44,61	89,22
44,06	0,47	26,00	44,53	89,06
44,27	0,38	25,00	44,65	89,30
43,54	0,47	26,00	44,01	88,02
43,77	0,38	25,00	44,15	88,30
44,04	0,47	26,00	44,51	89,02
43,67	0,38	25,00	44,05	88,10
44,38	0,47	26,00	44,85	89,70
44,15	0,38	25,00	44,53	89,06
44,96	0,47	26,00	45,43	90,86
44,27	0,38	25,00	44,65	89,30
44,54	0,47	26,00	45,01	90,02
43,90	0,38	25,00	44,28	88,56
44,06	0,47	26,00	44,53	89,06
44,67	0,38	25,00	45,05	90,10
44,48	0,47	26,00	44,95	89,90
44,50	0,38	25,00	44,88	89,75
43,14	0,47	26,00	43,61	87,22
44,37	0,38	25,00	44,75	89,50
44,18	0,47	26,00	44,65	89,30
44,37	0,38	25,00	44,75	89,50
43,98	0,47	26,00	44,45	88,90
44,37	0,38	25,00	44,75	89,50
44,26	0,47	26,00	44,73	89,46

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Kilogramos de melaza, fermentador 1**

<b>Fecha</b>	<b>°GL</b>	<b>Nivel %</b>	<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Galones de melaza</b>	<b>Densidad kg/gal</b>	<b>Kg de melaza</b>
03/01/2012	7,11	79,10	270,00	71334,00	5,57	399185,06
04/01/2012	7,98	77,60	275,00	72655,00	5,55	404488,55
06/01/2012	7,98	76,40	280,00	73976,00	5,57	411731,92
09/01/2012	8,39	79,40	280,00	73976,00	5,56	413710,78
10/01/2012	7,18	80,10	280,00	73976,00	5,55	414494,93
12/01/2012	8,20	78,50	282,00	74504,40	5,61	416397,64
13/01/2012	8,35	77,90	283,00	74768,60	5,59	439489,83
16/01/2012	8,11	77,80	284,00	75032,80	5,59	420442,54
17/01/2012	8,08	78,50	285,00	75297,00	5,86	422261,81
18/01/2012	8,16	76,50	285,00	75297,00	5,88	425589,94
20/01/2012	8,50	75,50	285,00	75297,00	5,61	421365,78
23/01/2012	9,11	73,90	286,00	75561,20	5,61	419323,10
25/01/2011	7,60	80,10	280,00	73976,00	5,60	413969,70
31/01/2011	7,94	78,90	280,00	73976,00	5,60	414494,93
02/02/2011	8,32	78,50	282,00	74504,40	5,61	417638,14
03/02/2011	8,49	77,90	283,00	74768,60	5,60	418408,82
07/02/2011	8,25	77,90	281,00	74240,20	5,60	415448,16
08/02/2011	7,46	80,40	271,00	71598,20	5,59	399983,34
10/02/2011	8,22	78,20	282,00	74504,40	5,62	418360,83
12/03/2012	8,18	77,20	282,00	74504,40	5,59	416393,92
17/03/1900	8,17	76,10	282,00	74504,40	5,59	416393,92
16/03/2012	8,25	75,80	283,00	74768,60	5,59	417870,49
20/03/2012	7,95	77,90	280,00	73976,00	5,59	413440,77
21/03/2012	7,81	77,10	281,00	74240,20	5,59	414917,34
23/03/2012	7,76	77,10	280,00	73976,00	5,59	413440,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Kilogramos de melaza, fermentador 2**

<b>Fecha</b>	<b>°GL</b>	<b>Nivel %</b>	<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Galones de melaza</b>	<b>Densidad kg/gal</b>	<b>Kg de melaza</b>
03/01/2012	8,10	77,50	280,00	73976,00	5,57	412279,34
05/01/2011	8,27	77,00	282,00	74504,40	5,54	412825,16
06/01/2012	8,37	78,50	283,00	74768,60	5,57	417507,86
09/01/2012	8,36	80,50	282,00	74504,40	5,56	416665,86
11/01/2012	7,31	78,80	275,00	72655,00	5,58	426048,92
12/01/2012	8,11	78,20	280,00	73976,00	5,57	414520,82
17/01/2012	8,19	77,30	284,00	75032,80	5,86	421234,14
19/01/2012	7,58	77,60	278,00	73447,60	5,67	411626,06
20/01/2012	7,34	78,50	275,00	72655,00	5,61	406577,38
24/01/2012	8,28	77,80	280,00	73976,00	5,60	412279,34
25/01/2012	8,59	77,80	288,00	76089,60	5,60	425797,40
01/02/2012	8,30	77,60	280,00	73976,00	5,59	413614,61
02/02/2012	8,15	79,40	280,00	73976,00	5,61	414676,17
07/02/2012	8,21	80,50	282,00	74504,40	5,60	416926,62
09/02/2012	8,32	77,90	283,00	74768,60	5,60	419025,66
10/02/2012	8,10	78,20	280,00	73976,00	5,62	415393,73
14/02/2012	8,21	78,50	283,00	74768,60	5,59	417952,74
16/02/2012	7,23	79,10	275,00	72655,00	5,57	404670,19
20/02/2012	8,11	78,50	280,00	73976,00	5,60	414498,62
22/02/2012	7,61	76,90	278,00	73447,60	5,56	408544,93
24/02/2012	8,28	77,00	282,00	74504,40	5,57	414877,75
28/02/2012	8,14	77,00	280,00	73976,00	5,59	413433,37
02/03/2012	8,40	78,00	288,00	76089,60	5,56	422890,78
05/03/2012	7,11	77,60	275,00	72655,00	5,58	405534,78
07/03/2012	7,78	78,70	280,00	73976,00	5,58	412996,91
08/03/2012	8,09	76,10	280,00	73976,00	5,59	413440,77
13/03/2012	8,16	77,60	283,00	74768,60	5,59	417870,49
15/03/2012	8,41	76,50	285,00	75297,00	5,59	420823,64
16/03/2012	8,11	77,40	283,00	74768,60	5,59	417870,49
19/03/2012	7,62	78,00	279,00	73711,80	5,59	411964,19
20/03/2012	8,38	79,30	286,00	75561,20	5,59	422300,21

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Kilogramos de melaza, fermentador 3**

Fecha	°GL	Nivel %	m <sup>3</sup> de melaza	Galones de melaza	Densidad kg/gal	Kg de melaza
04/01/2012	8,04	78,10	280,00	73976,00	5,55	410526,11
05/01/2012	8,41	77,80	288,00	76089,60	5,55	421608,67
09/01/2012	7,28	77,60	275,00	72655,00	5,56	403195,29
11/01/2012	8,23	78,20	281,00	74240,20	5,58	414557,28
13/01/2012	8,23	75,50	283,00	74768,60	5,59	417874,23
16/01/2011	8,29	78,60	283,00	74768,60	5,59	438443,07
17/01/2012	8,28	76,20	283,00	74768,60	5,86	418962,11
19/01/2012	8,22	76,50	283,00	74768,60	5,60	419298,57
24/01/2012	8,12	79,80	280,00	73976,00	5,60	418123,45
26/01/2012	8,19	78,30	283,00	74768,60	5,65	419029,40
30/01/2012	7,24	75,10	275,00	72655,00	5,60	407093,23
01/02/2012	8,11	80,10	280,00	73976,00	5,59	413614,61
03/02/2012	8,61	80,10	285,00	75297,00	5,60	421365,78
06/02/2012	7,25	76,80	275,00	72655,00	5,59	406152,35
07/02/2012	8,14	79,90	280,00	73976,00	5,60	414583,70
09/02/2012	8,07	78,10	280,00	73976,00	5,60	414676,17
13/02/2012	8,23	80,50	283,00	74768,60	5,61	417952,74
15/02/2012	8,11	78,20	280,00	73976,00	5,58	413973,39
16/02/2012	8,16	78,50	283,00	74768,60	5,57	418939,68
21/02/2012	8,48	79,10	285,00	75297,00	5,58	418832,03
22/02/2012	8,08	75,70	280,00	73976,00	5,56	411484,10
23/02/2012	7,26	76,00	275,00	72655,00	5,58	405091,59
24/02/2012	8,41	77,80	288,00	76089,60	5,57	423704,94
28/02/2012	7,26	77,30	275,00	72655,00	5,59	406050,63
06/03/2012	8,07	75,60	280,00	73976,00	5,58	412475,38
07/03/2012	8,16	76,20	282,00	74504,40	5,58	415946,89
09/03/2012	8,19	77,90	283,00	74768,60	5,59	417870,49
13/03/2012	8,07	77,80	280,00	73976,00	5,59	413440,77
14/03/2012	8,11	78,50	283,00	74768,60	5,59	417870,49
15/03/2012	8,02	77,20	280,00	73976,00	5,59	413440,77
16/03/2012	8,23	76,00	283,00	74768,60	5,59	417870,49
21/03/2012	8,28	75,70	284,00	75032,80	5,59	419347,06
22/03/2012	8,40	76,20	288,00	76089,60	5,59	425253,36

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Kilogramos de melaza, fermentador 4**

Fecha	°GL	Nivel %	m <sup>3</sup> de melaza	Galones de melaza	Densidad kg/gal	Kg de melaza
04/01/2012	8,03	78,70	280,00	73976,00	5,55	410526,11
06/01/2012	7,71	78,90	278,00	73447,60	5,57	408901,15
10/01/2012	8,01	78,00	280,00	73976,00	5,55	410526,11
11/01/2012	8,09	78,90	280,00	73976,00	5,58	414768,64
13/01/2012	8,05	76,20	280,00	73976,00	5,59	413444,47
16/01/2012	8,32	78,00	283,00	74768,60	5,59	439489,83
18/01/2012	8,25	75,10	283,00	74768,60	5,88	418962,11
19/01/2012	7,75	77,30	279,00	73711,80	5,60	413106,73
23/01/2012	8,09	75,60	280,00	73976,00	5,61	418123,45
25/01/2012	8,06	78,50	280,00	73976,00	5,60	413973,39
27/01/2012	7,35	76,60	275,00	72655,00	5,60	407093,23
31/01/2012	8,26	77,40	283,00	74768,60	5,60	418408,82
01/02/2012	7,51	80,10	276,00	72919,20	5,59	408055,84
03/02/2012	7,48	80,50	275,00	72655,00	5,60	407180,42
06/02/2012	8,15	78,90	280,00	73976,00	5,59	414676,17
08/02/2012	8,28	80,40	282,00	74504,40	5,59	415406,73
09/02/2012	8,35	77,90	283,00	74768,60	5,60	418408,82
13/02/2012	8,48	79,40	283,00	74768,60	5,61	416879,81
15/02/2012	7,53	77,50	275,00	72655,00	5,58	404136,17
17/02/2012	8,18	76,50	282,00	74504,40	5,60	414877,75
21/02/2012	8,10	78,50	280,00	73976,00	5,58	413973,39
23/02/2012	8,12	78,80	280,00	73976,00	5,58	414853,71
27/02/2012	8,13	77,20	280,00	73976,00	5,60	414587,40
01/03/2012	8,26	77,60	283,00	74768,60	5,59	418577,05
05/03/2012	7,57	80,10	276,00	72919,20	5,58	407009,45
07/03/2012	8,26	76,80	283,00	74768,60	5,58	417421,87
09/03/2012	8,02	78,90	280,00	73976,00	5,58	413440,76
14/03/2012	8,22	77,50	282,00	74504,40	5,58	416393,91
16/03/2012	8,28	76,10	283,00	74768,60	5,58	417870,49
19/03/2012	8,28	75,80	283,00	74768,60	5,58	417870,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Análisis de azúcares para fermentador 1**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcar residual %</b>	<b>Azúcares reductores %</b>	<b>Azúcares infermentables %</b>	<b>Azúcares fermentables %</b>
270,00	1,18	53,34	4,35	48,99
271,00	1,21	56,53	4,00	52,53
275,00	1,21	55,79	4,54	51,25
275,00	1,19	54,79	4,02	50,78
275,00	1,20	54,31	4,53	49,79
276,00	1,22	54,52	4,15	50,37
280,00	1,26	54,75	4,70	50,05
280,00	1,29	56,84	4,51	52,33
280,00	1,31	52,66	4,18	48,49
280,00	1,28	54,32	4,33	49,99
280,00	1,30	55,91	4,29	51,63
280,00	1,31	53,61	4,20	49,41
280,00	1,29	54,04	4,49	49,55
280,00	1,31	54,03	4,36	49,67
280,00	1,30	54,88	4,20	50,69
280,00	1,32	53,20	4,57	48,63
281,00	1,33	56,68	4,05	52,63
281,00	1,35	53,20	4,57	48,63
282,00	1,41	54,70	4,43	50,27
282,00	1,45	56,52	4,33	52,20
282,00	1,47	55,18	4,21	50,97
282,00	1,41	55,18	4,53	50,65
282,00	1,46	54,59	4,39	50,21
282,00	1,43	53,89	4,38	49,51
283,00	1,45	54,99	4,21	50,78
283,00	1,44	56,68	4,13	52,55
283,00	1,46	56,68	4,12	52,56
283,00	1,42	55,32	4,61	50,71
283,00	1,51	53,06	4,64	48,42
284,00	1,57	52,94	4,22	48,72
285,00	1,51	52,68	4,22	48,46
285,00	1,54	52,66	4,32	48,34
285,00	1,56	55,03	4,41	50,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis de azúcares para fermentador 2**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcares residuales %</b>	<b>Azúcares reductores %</b>	<b>Azúcares infermentables %</b>	<b>Azúcares fermentables %</b>
275,00	1,22	55,63	4,36	51,27
275,00	1,20	55,27	4,85	50,42
275,00	1,24	55,03	4,41	50,62
275,00	1,24	54,93	4,15	50,78
278,00	1,25	53,34	4,41	48,93
278,00	1,26	53,61	4,73	48,88
279,00	1,31	53,20	4,57	48,63
280,00	1,35	53,61	4,54	49,07
280,00	1,37	54,31	4,53	49,79
280,00	1,37	54,75	4,70	50,05
280,00	1,37	56,52	4,33	52,20
280,00	1,33	55,18	4,21	50,97
280,00	1,42	54,99	4,21	50,78
280,00	1,36	55,02	4,61	50,42
280,00	1,45	55,61	4,33	51,28
280,00	1,34	56,52	4,44	52,09
280,00	1,34	53,89	4,93	48,96
282,00	1,46	56,68	4,05	52,63
282,00	1,38	54,45	4,60	49,85
282,00	1,35	56,84	4,51	52,33
283,00	1,44	53,89	4,38	49,51
283,00	1,47	53,06	4,64	48,42
283,00	1,48	54,83	4,36	50,47
283,00	1,48	54,74	4,39	50,35
283,00	1,39	55,79	4,54	51,25
285,00	1,51	54,31	4,57	49,75
286,00	1,55	54,88	4,20	50,69
288,00	1,57	53,20	4,57	48,63
288,00	1,56	54,03	4,36	49,67
288,00	1,56	54,32	4,33	49,99

Fuente: elaboración propia.



Tabla XIII. Análisis de azúcares para fermentador 3

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcares residuales %</b>	<b>Azúcares reductores %</b>	<b>Azúcares infermentables %</b>	<b>Azúcares fermentables %</b>
275,00	1,21	56,84	4,51	52,33
275,00	1,22	53,94	4,15	49,79
275,00	1,17	55,62	4,24	51,38
275,00	1,12	55,32	4,61	50,71
275,00	1,21	54,31	4,53	49,79
275,00	1,21	53,20	4,12	49,08
279,00	1,24	53,47	4,62	48,86
280,00	1,37	55,77	4,70	51,07
280,00	1,36	55,61	4,33	51,28
280,00	1,36	56,52	4,44	52,09
280,00	1,33	56,68	4,05	52,63
280,00	1,25	54,74	4,39	50,35
280,00	1,37	54,89	4,07	50,83
280,00	1,34	53,61	4,52	49,09
280,00	1,32	53,08	4,62	48,46
280,00	1,34	53,89	4,38	49,51
280,00	1,35	54,31	4,57	49,75
281,00	1,34	54,93	4,15	50,78
282,00	1,45	53,61	4,54	49,07
283,00	1,31	52,94	4,22	48,72
283,00	1,46	52,68	4,22	48,46
283,00	1,35	53,34	4,35	48,99
283,00	1,37	53,34	4,41	48,93
283,00	1,45	53,34	4,09	49,25
283,00	1,44	56,68	4,12	52,56
283,00	1,36	54,79	4,02	50,78
283,00	1,35	55,17	4,39	50,79
283,00	1,33	53,89	4,38	49,51
283,00	1,46	53,06	4,64	48,42
284,00	1,56	53,20	4,57	48,63
285,00	1,46	56,68	4,13	52,55
285,00	1,44	55,18	4,53	50,65
288,00	1,51	53,70	4,39	49,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis de azúcares para fermentador 4**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcares residuales %</b>	<b>Azúcares reductores %</b>	<b>Azúcares infermentables %</b>	<b>Azúcares fermentables %</b>
275,00	1,20	55,17	4,23	50,94
275,00	1,19	56,68	4,13	52,55
275,00	1,22	54,89	4,07	50,83
276,00	1,23	56,52	4,44	52,09
276,00	1,38	55,63	4,36	51,27
278,00	1,24	55,79	4,54	51,25
279,00	1,29	53,34	4,41	48,93
279,00	1,28	54,10	4,57	49,53
280,00	1,38	55,77	4,31	51,46
280,00	1,38	54,70	4,43	50,27
280,00	1,35	54,93	4,15	50,78
280,00	1,37	52,94	4,22	48,72
280,00	1,41	52,66	4,18	48,49
280,00	1,42	54,32	4,33	49,99
280,00	1,34	55,62	4,24	51,38
280,00	1,38	55,18	4,53	50,65
280,00	1,42	55,32	4,61	50,71
280,00	1,40	54,31	4,53	49,79
280,00	1,35	55,17	4,39	50,79
281,00	1,39	53,10	4,23	48,87
282,00	1,43	56,53	4,00	52,53
282,00	1,33	53,61	4,20	49,08
282,00	1,37	53,89	4,38	49,51
283,00	1,39	52,68	4,22	48,46
283,00	1,40	52,66	4,32	48,34
283,00	1,39	53,94	4,29	49,65
283,00	1,43	54,74	4,39	50,35
283,00	1,44	56,68	4,12	52,56
283,00	1,44	54,04	4,49	49,55
283,00	1,45	53,61	4,54	49,07
283,00	1,41	53,06	4,64	48,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Eficiencias de fermentador 1**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Litros de alcohol reales</b>	<b>Litros de alcohol teóricos</b>	<b>Eficiencia de fermentación</b>
270	99808,38	125146,11	79,75
271	107961,12	134458,40	80,29
275	108391,68	132659,30	81,71
275	106575,84	131501,62	81,05
275	106006,32	129377,48	81,94
276	107030,16	131401,93	81,45
280	109740,96	132048,13	83,11
280	113621,40	138556,70	82,00
280	106822,80	128619,43	83,05
280	109576,80	132443,81	82,73
280	112763,88	136949,12	82,34
280	109774,98	130908,32	83,86
280	107824,86	131332,03	82,10
280	109512,00	130684,53	83,80
280	111474,90	134113,57	83,12
280	107693,28	128662,77	83,70
281	115681,50	139922,94	82,68
281	108387,18	129122,28	83,94
282	113799,60	133953,46	84,95
282	117561,60	139511,19	84,27
282	115704,72	136472,65	84,78
282	114111,00	134658,25	84,74
282	113669,28	133792,36	84,96
282	111912,66	131940,24	84,82
283	120349,80	142830,68	84,26
283	119046,78	140719,26	84,60
283	119352,42	140984,97	84,66
283	115961,94	135281,29	85,72
283	112563,00	129493,05	86,93
284	113544,00	131083,89	86,62
285	113705,64	130961,97	86,82
285	115459,20	131667,31	87,69
285	117921,60	136495,54	86,39
286	121181,22	138101,55	87,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Eficiencias de fermentador 2**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Litros de alcohol reales</b>	<b>Litros de alcohol teóricos</b>	<b>Eficiencia de fermentación</b>
275	103685,04	138462,49	74,88
275	103714,20	131705,05	78,75
275	102940,74	130582,21	78,83
275	99312,48	133054,34	74,64
278	105877,44	128901,52	82,14
278	105337,62	127799,39	82,42
279	106984,80	128203,26	83,45
280	112995,00	132048,13	85,57
280	114156,36	134715,95	84,74
280	115953,12	135306,78	85,70
280	115934,40	137875,95	84,09
280	116479,80	138521,74	84,09
280	114015,60	135504,76	84,14
280	114594,30	133740,47	85,68
280	112820,40	131729,79	85,65
280	110211,48	129700,85	84,97
280	110816,82	129549,18	85,54
282	114622,20	130294,22	87,97
282	121136,40	139546,40	86,81
282	118962,90	140420,89	84,72
282	114760,80	132362,60	86,70
283	118268,10	136929,22	86,37
283	116663,04	135013,42	86,41
283	116007,30	135002,08	85,93
283	113978,88	132408,11	86,08
283	112988,52	129493,05	87,25
284	113955,66	132058,59	86,29
285	115805,70	133976,78	86,44
286	119616,12	136987,43	87,32
288	120294,36	136227,92	88,30
288	117936,00	134418,37	87,74
288	116285,40	132338,85	87,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Eficiencias de fermentador 3

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Litros de alcohol reales</b>	<b>Litros de alcohol teóricos</b>	<b>Eficiencia de fermentación</b>
275	101687,04	135034,94	75,30
275	97870,32	129722,70	75,45
275	100224,00	133542,89	75,05
275	99316,80	131457,08	75,55
275	101015,64	129377,48	78,08
275	101268,00	127534,66	79,40
279	114764,76	140977,44	81,41
280	113026,32	134179,64	84,24
280	116635,68	137224,77	85,00
280	116929,98	137875,95	84,81
280	117069,48	139631,79	83,84
280	113448,06	133611,98	84,91
280	114156,36	134657,27	84,78
280	110098,08	129265,26	85,17
280	109816,56	127926,76	85,84
280	113012,28	131004,50	86,27
280	111445,92	131626,31	84,67
281	115845,48	134727,80	85,98
282	111922,56	130627,29	85,68
283	111845,70	130283,16	85,85
283	117286,92	135980,49	86,25
283	113568,48	131346,30	86,46
283	113189,40	131304,19	86,20
283	115429,86	132064,66	87,40
283	119252,70	140592,61	84,82
283	115300,80	136138,64	84,69
283	114840,18	135817,94	84,55
283	114594,30	132408,11	86,55
283	112586,40	129493,05	86,94
284	112823,28	130500,81	86,45
285	124138,98	141713,74	87,60
285	120738,24	135768,59	88,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Eficiencias de fermentador 4

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Litros de alcohol reales</b>	<b>Litros de alcohol teóricos</b>	<b>Eficiencia de fermentación</b>
275	101341,80	132718,91	76,36
275	108385,20	136929,89	79,15
275	105043,50	131457,41	79,91
276	108279,18	136022,97	79,60
276	109144,26	133538,17	81,73
278	109497,42	134106,49	81,65
279	107833,50	129365,20	83,36
279	108671,04	130589,35	83,22
280	113752,98	135204,31	84,13
280	112460,40	132064,61	85,16
280	114894,18	134796,49	85,24
280	110413,80	128902,06	85,66
280	110088,72	129745,38	84,85
280	113887,80	132444,99	85,99
280	115746,30	136345,52	84,89
280	114453,00	134193,62	85,29
280	115174,08	134625,01	85,55
280	112974,48	132097,49	85,52
280	113900,04	134378,17	84,76
281	111520,08	129772,87	85,93
282	119828,16	139643,13	85,81
282	112638,60	131194,30	85,86
282	114669,00	131940,24	86,91
283	116812,80	136305,13	85,70
283	111523,50	129616,82	86,04
283	115078,32	132953,59	86,56
283	117083,70	134814,67	86,85
283	121196,16	140231,70	86,43
283	115375,68	132739,16	86,92
283	114186,24	131090,51	87,10
283	113419,44	129493,05	87,59
283	112972,32	130041,30	86,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 1**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcar residual</b>	<b>ml consumidos</b>	<b>Incertidumbre azúcar residual</b>
270	1,21	42,97	1,41E-03
271	1,23	42,27	1,45E-03
275	1,21	42,97	1,41E-03
275	1,19	43,69	1,36E-03
275	1,46	35,61	2,05E-03
276	1,39	37,40	1,86E-03
280	1,23	42,27	1,45E-03
280	1,39	37,40	1,86E-03
280	1,31	39,69	1,65E-03
280	1,23	42,27	1,45E-03
280	1,30	39,99	1,63E-03
280	1,31	39,69	1,65E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,33	39,09	1,70E-03
280	1,33	39,09	1,70E-03
280	1,32	39,39	1,68E-03
281	1,33	39,09	1,70E-03
281	1,35	38,51	1,75E-03
282	1,41	36,87	1,91E-03
282	1,45	35,86	2,02E-03
282	1,34	38,80	1,73E-03
282	1,37	37,95	1,80E-03
282	1,48	35,13	2,11E-03
282	1,39	37,40	1,86E-03
283	1,49	34,89	2,14E-03
283	1,29	40,30	1,60E-03
283	1,46	35,61	2,05E-03
283	1,41	36,87	1,91E-03
283	1,51	34,43	2,19E-03
284	1,57	33,12	2,37E-03
285	1,51	34,43	2,19E-03
285	1,52	34,21	2,22E-03
285	1,41	36,87	1,91E-03
286	1,56	33,33	2,34E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 2**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcar residual</b>	<b>ml consumidos</b>	<b>Incertidumbre azúcar residual %</b>
275	1,24	41,93	1,48E-03
275	1,24	41,93	1,48E-03
275	1,20	43,33	1,38E-03
275	1,22	42,62	1,43E-03
278	1,25	41,59	1,50E-03
278	1,26	41,26	1,53E-03
279	1,31	39,69	1,65E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,42	36,61	1,94E-03
280	1,45	35,86	2,02E-03
280	1,34	38,80	1,73E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,33	39,09	1,70E-03
280	1,36	38,23	1,78E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,35	38,51	1,75E-03
280	1,34	38,80	1,73E-03
282	1,37	37,95	1,80E-03
282	1,35	38,51	1,75E-03
282	1,46	35,61	2,05E-03
282	1,38	37,68	1,83E-03
283	1,39	37,40	1,86E-03
283	1,48	35,13	2,11E-03
283	1,48	35,13	2,11E-03
283	1,44	36,11	1,99E-03
283	1,47	35,37	2,08E-03
284	1,52	34,21	2,22E-03
285	1,51	34,43	2,19E-03
286	1,55	33,54	2,31E-03
288	1,56	33,33	2,34E-03

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXI. **Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 3**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcar residual</b>	<b>ml consumidos</b>	<b>Incertidumbre azúcar residual</b>
275	1,21	42,97	1,41E-03
275	1,22	42,62	1,43E-03
275	1,17	44,44	1,32E-03
275	1,12	46,42	1,21E-03
275	1,21	42,97	1,41E-03
275	1,21	42,97	1,41E-03
279	1,24	41,93	1,48E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,36	38,23	1,78E-03
280	1,36	38,23	1,78E-03
280	1,33	39,09	1,70E-03
280	1,25	41,59	1,50E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,34	38,80	1,73E-03
280	1,32	39,39	1,68E-03
280	1,34	38,80	1,73E-03
280	1,35	38,51	1,75E-03
281	1,34	38,80	1,73E-03
282	1,45	35,86	2,02E-03
283	1,31	39,69	1,65E-03
283	1,46	35,61	2,05E-03
283	1,35	38,51	1,75E-03
283	1,37	37,95	1,80E-03
283	1,45	35,86	2,02E-03
283	1,44	36,11	1,99E-03
283	1,36	38,23	1,78E-03
283	1,35	38,51	1,75E-03
283	1,33	39,09	1,70E-03
283	1,46	35,61	2,05E-03
284	1,56	33,33	2,34E-03
285	1,46	35,61	2,05E-03
285	1,44	36,11	1,99E-03
288	1,51	34,43	2,19E-03
288	1,47	35,37	2,08E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Azúcar residual y ml de titulación de fermentador 4**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>Azúcar residual</b>	<b>ml consumidos</b>	<b>Incertidumbre azúcar residual</b>
275	1,20	43,33	1,38E-03
275	1,19	43,69	1,36E-03
275	1,22	42,62	1,43E-03
276	1,23	42,27	1,45E-03
276	1,38	37,68	1,83E-03
278	1,24	41,93	1,48E-03
279	1,29	40,30	1,60E-03
279	1,28	40,62	1,58E-03
280	1,38	37,68	1,83E-03
280	1,38	37,68	1,83E-03
280	1,35	38,51	1,75E-03
280	1,37	37,95	1,80E-03
280	1,41	36,87	1,91E-03
280	1,42	36,61	1,94E-03
280	1,34	38,80	1,73E-03
280	1,38	37,68	1,83E-03
280	1,42	36,61	1,94E-03
280	1,40	37,14	1,88E-03
280	1,35	38,51	1,75E-03
281	1,39	37,40	1,86E-03
282	1,43	36,36	1,97E-03
282	1,33	39,09	1,70E-03
282	1,37	37,95	1,80E-03
283	1,39	37,40	1,86E-03
283	1,34	38,80	1,73E-03
283	1,39	37,40	1,86E-03
283	1,43	36,36	1,97E-03
283	1,44	36,11	1,99E-03
283	1,44	36,11	1,99E-03
283	1,45	35,86	2,02E-03
283	1,41	36,87	1,91E-03
283	1,49	34,89	2,14E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Promedio de azúcares en melaza

Fecha	Azúcares reductores%	Infermentables %	Fermentables %	Grados brix
Enero	54,40	4,32	50,08	89,55
Febrero	55,19	4,31	50,88	89,64
Marzo	53,91	4,51	49,40	89,31

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Media aritmética

$$X = \sum_{i=0}^n \frac{Xi}{n} \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

X = media aritmética

Xi= dato de cada corrida

n = número de datos o corridas

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(Xi - X)^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

S = desviación estándar

$X_i$  = datos de cada corrida

X = media aritmética

n = número de datos o corridas

Incertidumbre:

$$X = Y + \Delta Y$$

Para los azúcares totales, se tiene que:

% azúcares totales (% w/w) = 1040/mL gastados en bureta:

$$\Delta Y = \left| \frac{kY}{X} \right| \Delta X \quad (\text{Ec.11})$$

% azúcares totales = 1040/ml + ((1\*Y)/ml)\*(incertidumbre de bureta)

En donde Y es el valor de azúcares totales que se obtengan por el método.

Para los azúcares residuales, se tiene que:

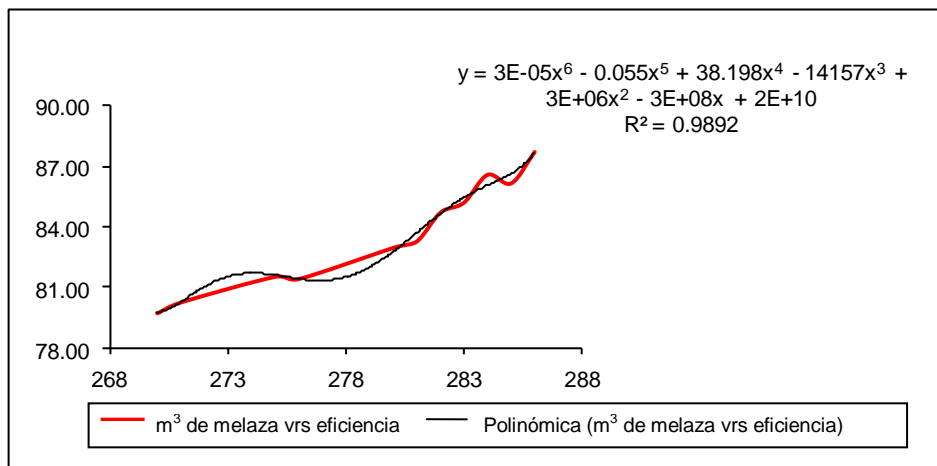
% AR = 25 / mL gastados

% AR = 25/ml + ((1\*Y)/ml)\*(incertidumbre de bureta)

En donde Y es el valor de azúcares residuales que se obtengan por el método de azúcares residuales.

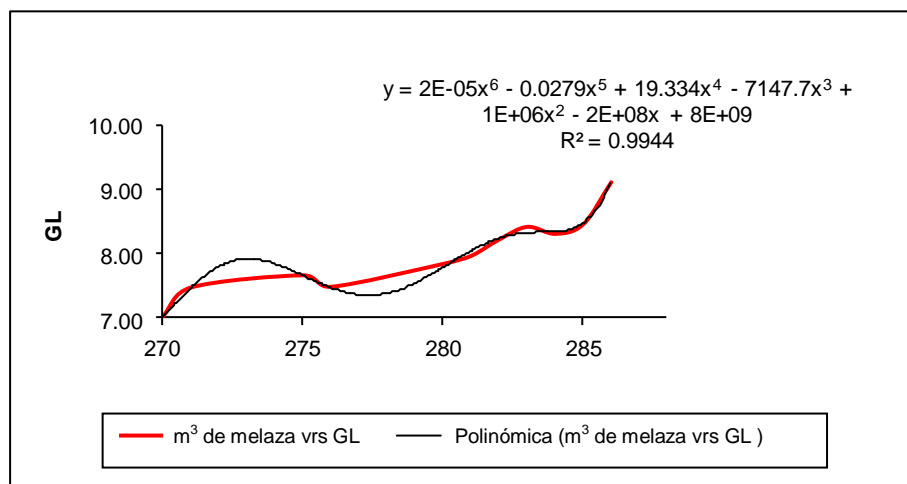
## 4. RESULTADOS

Figura 3. Eficiencias de fermentador 1



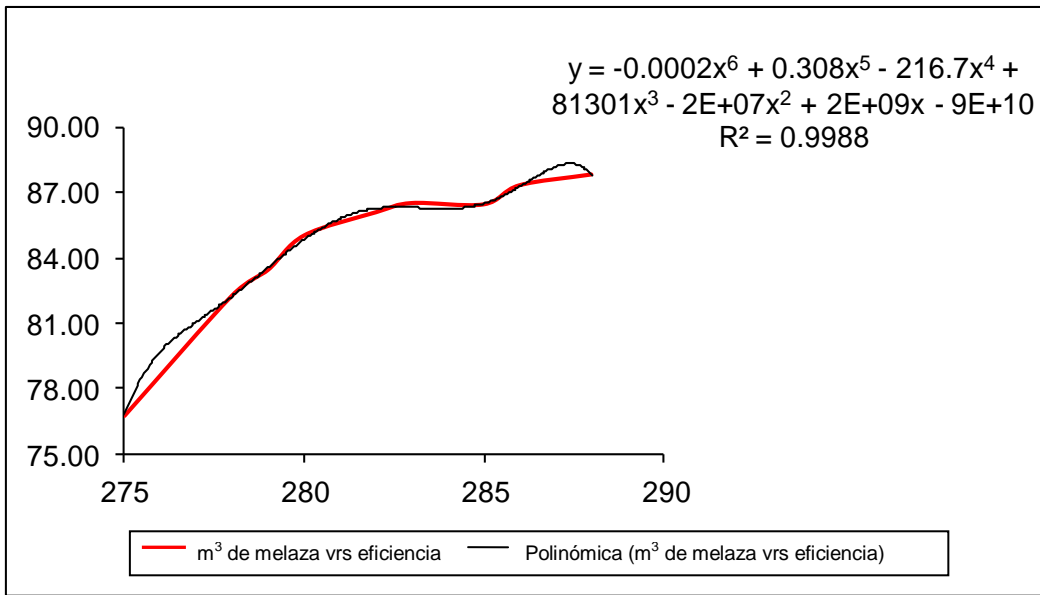
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XV.

Figura 4. Grados alcohólicos de fermentador 1



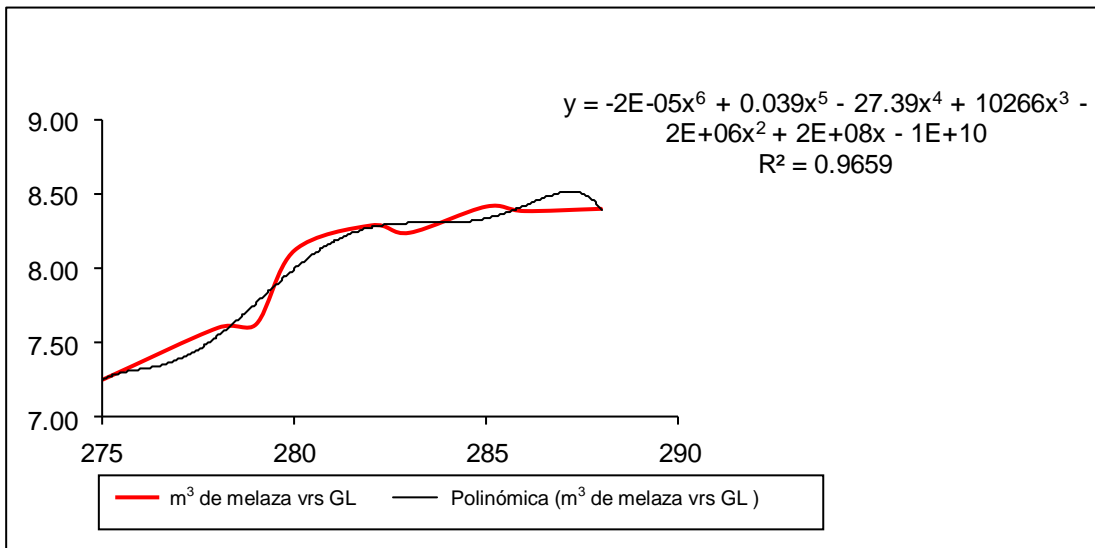
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla VII.

Figura 5. Eficiencias de fermentador 2



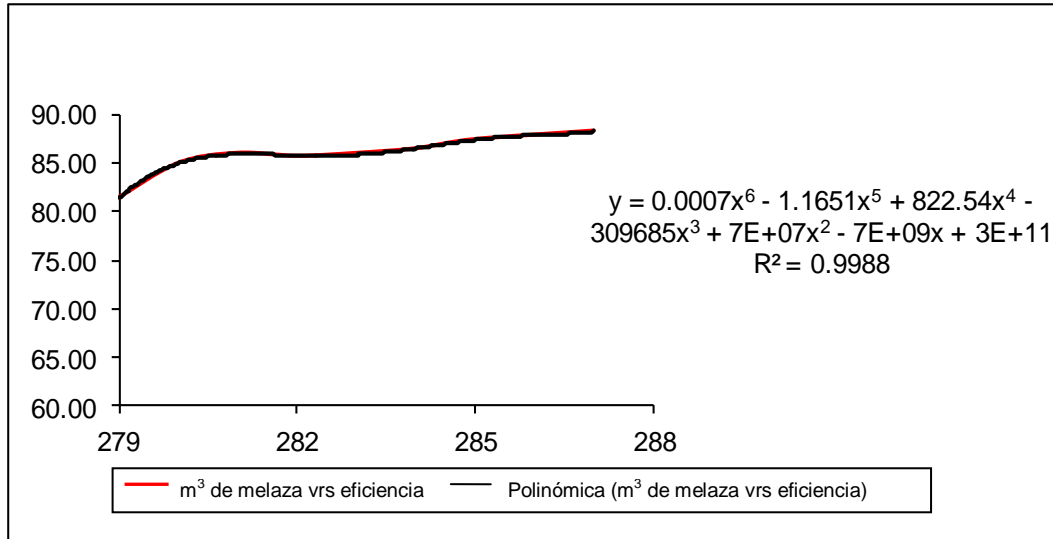
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XVI.

Figura 6. Grados alcohólicos de fermentador 2



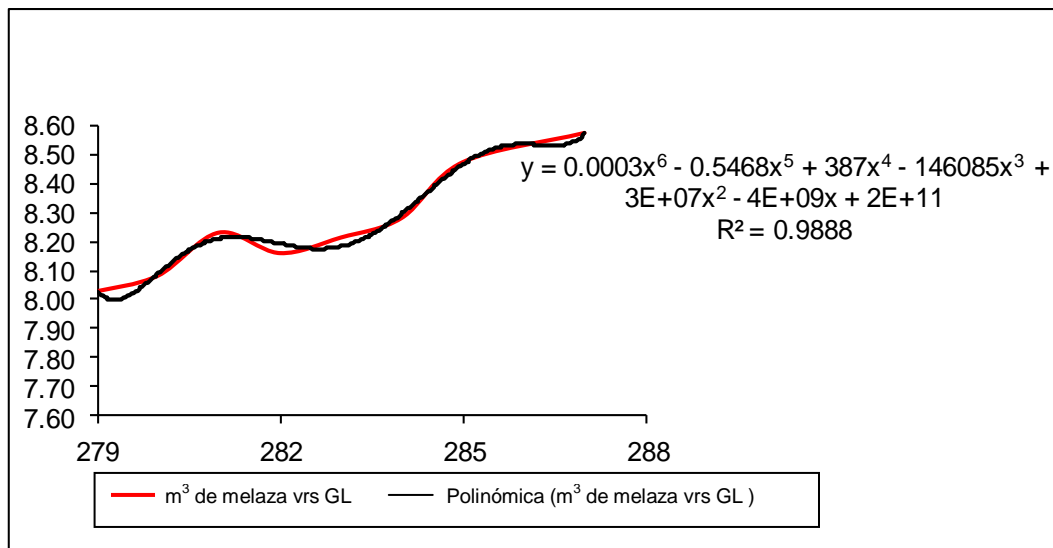
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla VIII.

Figura 7. **Eficiencias de fermentador 3**



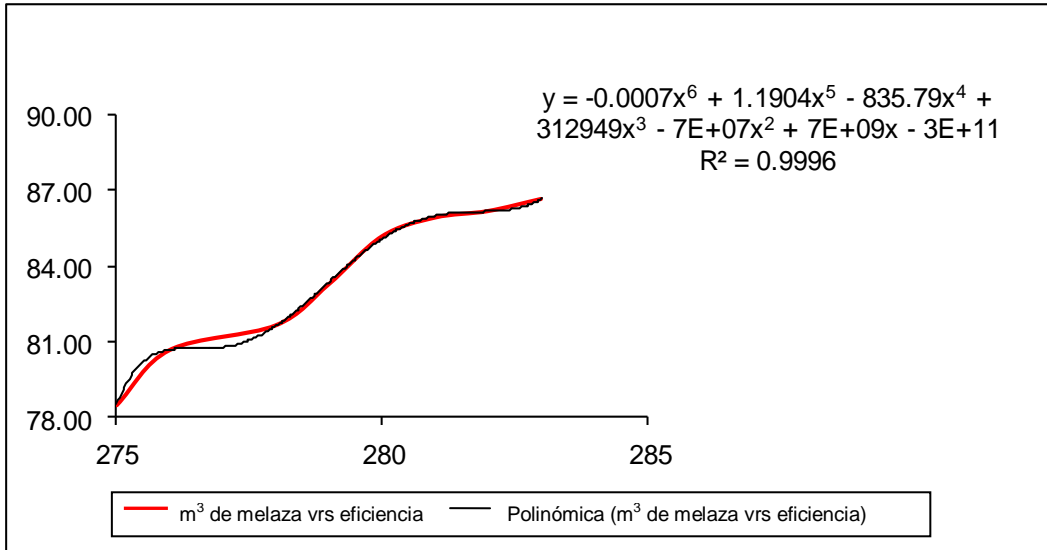
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XVII.

Figura 8. **Grados alcohólicos de fermentador 3**



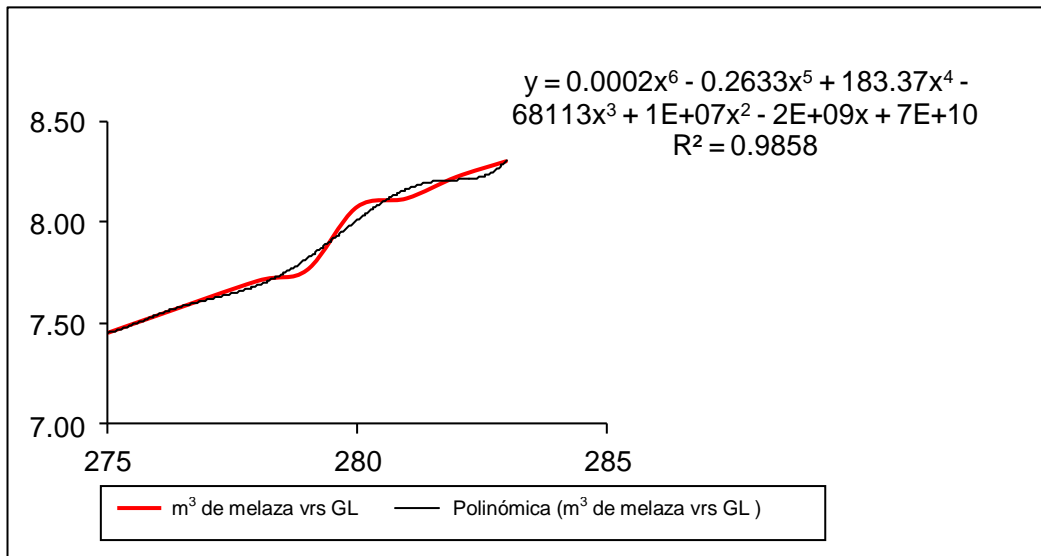
Fuente: elaboración propia, con datos de tabla IX.

Figura 9. **Eficiencias de fermentador 4**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XVIII.

Figura 10. **Grados alcohólicos de fermentador 4**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla X.



Tabla XXIV. **Rango de eficiencias para fermentador 1**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>% AR</b>	<b>Rango de eficiencia</b>	<b>Promedio de eficiencia</b>	<b>Azúcares fermentables</b>
270,0 – 273,2	1,18-1,23	79,75 – 80,29	80,02	48,98-52,52
273,2 – 276,4	1,20-1,21	81,04 – 81,93	81,56	49,78-51,24
276,4 – 279,4	1,22	81,45	81,45	50,37
279,4 – 282,8	1,26-1,46	82,00- 84,82	83,60	48,34 - 52,,62
282,8 – 286,0	1,41-1,57	82,10 – 87,79	85,90	48,34 – 52,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Rango de eficiencias para fermentador 2**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>% AR</b>	<b>Rango de eficiencia</b>	<b>Promedio de eficiencia</b>	<b>Azúcares fermentables</b>
275,0 - 277,6	1,20 -1,24	74,64 - 78,83	76,78	50,42 - 51,26
277,6 - 280,2	1,25 -1,45	82,13 - 85,68	83,77	48,63 - 52,20
280,2 - 282,8	1,35 -1,46	84,71 - 86,70	86,08	49,85 - 52,63
282,8 - 285,4	1,44 -1,51	85,93 - 86,80	86,49	48,42 - 51,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Rango de eficiencias para fermentador 3**

<b>m<sup>3</sup> de melaza</b>	<b>% AR</b>	<b>Rango de eficiencia</b>	<b>Promedio de eficiencia</b>	<b>Azúcares fermentables</b>
275,0-277,6	1,12 -1,22	75,05 – 78,07	76,47	49,08 - 52,33
277,6 - 280,2	1,24 – 1,37	81,11 – 86,26	84,63	48,86 - 52,63
280,2 - 282,8	1,34 – 1,45	85,68	85,68	49,07 - 50,78
282,8 - 285,4	1,31 – 1,56	84,55 – 87,68	86,31	48,46 - 52,56

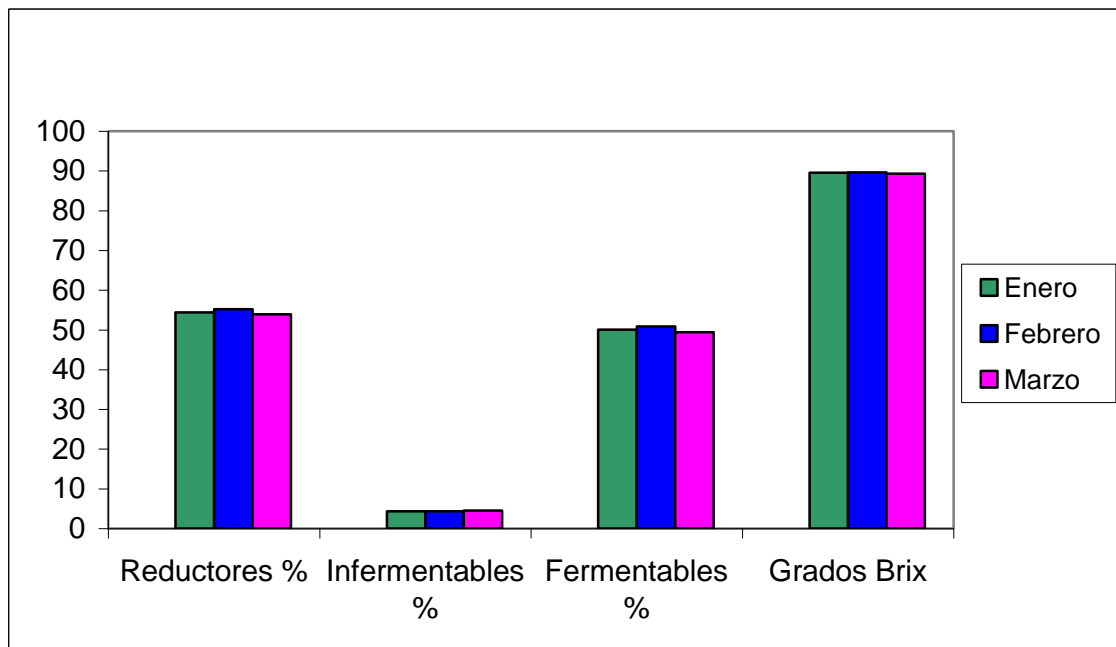
Fuente: elaboración propia,

Tabla XXVII. Rango de eficiencias para fermentador 4

m <sup>3</sup> de melaza	% AR	Rango de eficiencia	Promedio de eficiencia	Azúcares fermentables
275,0 – 276,6	1,12 - 1,22	76,35 – 81,73	79,35	49,08 - 52,33
276,6 – 278,2	1,24	81,64	81,64	51,25
278,2 – 279,8	1,34 - 1,45	85,68	83,29	49,07 - 50,78
279,8 – 281,4	1,35 - 1,42	84,13 – 85,98	85,25	48,72 – 51,38
281,4 – 283,0	1,39 - 1,49	85,69 – 87,58	86,55	48,34 – 52,56

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Azúcares en melaza



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XXIII.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se observó que la eficiencia de fermentación referida a los azúcares fermentables tiene una tendencia a incrementarse respecto de la cantidad de  $\text{m}^3$  de melaza o miel final que se utilizó en los cuatro fermentadores, como se presenta en las figuras 3, 5, 7 y 9.

Se mostró que el grado alcohólico (grados Gay Lussac  $^{\circ}\text{GL}$ ) tiende a incrementarse respecto del aumento de  $\text{m}^3$  de melaza con que se llenaron los cuatro fermentadores.

Para el fermentador 1, se mostró que de 270 a 281  $\text{m}^3$  de melaza fue menor a 8,00  $^{\circ}\text{GL}$  y la eficiencia menor a 84%; por lo que arriba de los 281  $\text{m}^3$  de melaza, la eficiencia y el grado alcohólico aumenta.

La tendencia para el fermentador 2 muestra que de 275 a 279  $\text{m}^3$  de melaza fue menor a 8,00  $^{\circ}\text{GL}$  y la eficiencia menor a 84%; mientras que arriba de los 280  $\text{m}^3$  de melaza el grado y la eficiencia, aumenta hasta un 87% la eficiencia de fermentación.

En el fermentador 3, se muestra que el grado alcohólico se incrementó a 8,00  $^{\circ}\text{GL}$  desde los 279  $\text{m}^3$  de melaza y la eficiencia aumenta desde un 81% hasta un 88%.

La tendencia para el fermentador 4, muestra que el grado alcohólico es mayor a 8,00  $^{\circ}\text{GL}$ , desde los 280  $\text{m}^3$  hasta los 283  $\text{m}^3$ ; sin embargo los grados fueron menores que los fermentadores 1,2 y 3.

El análisis de azúcares reductores y los resultados de azúcares fermentables obtenidos muestran que durante los tres meses de análisis de melaza, los grados brix permanecieron sin mayor cambio siendo estos muy parecidos; mientras que hubo un leve descenso en los azúcares reductores en el último mes del análisis, como se muestra en la figura 11, afectando en la disminución de los azúcares fermentables en 1,47%.

Los azúcares reductores fueron mayores durante el mes de febrero con un promedio de 55,19%, con azúcares infermentables del 4,31% y con 50,87% de azúcares fermentables y un promedio de 89,64 grados brix en la melaza.

La eficiencia referida a los azúcares fermentables mostró que en promedio fue mayor en el fermentador 4, con una eficiencia promedio de 87,25%, un llenado de 280,21 m<sup>3</sup> de melaza, un grado alcohólico de 8,03 °GL y un nivel de llenado de 77,88 %.

La eficiencia para el fermentador 1 fue menor a la de los demás fermentadores, en la cual también se registró que en promedio se llenó con menos melaza que los demás fermentadores.

En el fermentador 3 se obtuvo la mayor eficiencia con un 89,01 %, conteniendo en la melaza azúcares reductores de 53,30% y azúcares fermentables del 48,92%, con un grado alcohólico de 8,40 °GL, un nivel de llenado 80,5%, 288 m<sup>3</sup> de melaza y 1,58% de azúcares residuales.

Los metros cúbicos de melaza por fermentador fueron mayores para el fermentador 3 con un promedio de 281,14 m<sup>3</sup>; sin embargo, la eficiencia fue menor que la del fermentador 4, que se llenó con un promedio de 280,21 m<sup>3</sup> de melaza.

El porcentaje de azúcares residuales que son esos azúcares que no se convierten en alcohol que dependen del tiempo de fermentación y otros parámetros y factores que no se consideran en la presente investigación, aumentan en relación con la cantidad de melaza ( $m^3$ ) con que se llenan los fermentadores; con el incremento de los grados alcohólicos, también aumentan los azúcares residuales.

Los azúcares residuales fueron mayores para el fermentador 2, y la cantidad de  $m^3$  para el fermentador 2 fue de 281,03  $m^3$ ; mientras que para el fermentador 4, los residuales fueron de 1,45%, un 0,3% menos que el fermentador 2.



## CONCLUSIONES

1. La eficiencia promedio de fermentación referida a los azúcares fermentables para el fermentador 1 fue de 83,83%; los azúcares fermentables contenidos en la melaza para la fermentación del fermentador 1 corresponden al 50,37%; el grado alcohólico para el fermentador 1 fue de 8,02 GL.
2. La eficiencia promedio de fermentación referida a los azúcares fermentables para el fermentador 2 fue de 84,45%; el porcentaje de los azúcares fermentables contenidos en la melaza para la fermentación del fermentador 2 fue de 50,05%; el grado alcohólico para el fermentador 2 fue de 8,11 GL.
3. La eficiencia promedio de fermentación referida a los azúcares fermentables para el fermentador 3 fue de 84,18%; los azúcares fermentables contenidos en la melaza para la fermentación del fermentador 3 corresponden al 49,95%; el grado alcohólico para el fermentador 3 fue de 8,03 GL.
4. La eficiencia promedio de fermentación referida a los azúcares fermentables para el fermentador 4 fue de 84,58%; los azúcares fermentables contenidos en la melaza para la fermentación del fermentador 4 corresponden al 50,11%; el grado alcohólico para el fermentador 4 fue de 8,03 GL.

5. El aumento de la eficiencia de fermentación tiende a aumentar en relación con la cantidad de metros cúbicos de melaza que se adicionan a los fermentadores.



## RECOMENDACIONES

1. Es necesario calibrar los medidores de nivel y de flujo de melaza de los fermentadores, realizando un programa semanal de ajuste de instrumentos.
2. Es conveniente efectuar una estricta supervisión del personal de operación; los procedimientos en los cuales se deben presentar una mayor observación del personal son los siguientes: limpieza y llenado de fermentadores, manejo de crema de levadura, procedimientos de trasiego inicial al tanque e interpretación de resultados en proceso.
3. Los procedimientos de limpieza y saneamiento tanto en fermentadores e intercambiadores de calor, como para las líneas de proceso, deben realizarse antes y después del llenado, para evitar contaminación de bacterias.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (ARC). *Etanol en Guatemala*. [en línea]. <<http://www.acrguatemala.com/etanol.shtml>> [Consulta: enero de 2012].
2. BADUI, Salvador. *Química de los alimentos*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2006. 285 p. ISBN: 970-26-0670.
3. BARTENS, Sweet. *Métodos ICUMSA: azúcares reductores totales en melaza y jarabes refinados después de hidrólisis por el procedimiento de Luff Schoorl (polarización), brix y fibra en caña y bagazo, por el método de desintegración húmeda con acetato básico de plomo*. 2a ed. en español. Berlín: Bartens 2007. 130 p. ISBN 978-3-87040-582-3.
4. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. 2a ed. México; Limusa, 2003. 450 p.
5. ESPINAR, R. *Instruction manual for use and maintenance: Oenologic distiller: Type alcotest*. Spain: 2010. 8 p.
6. FRAZIER W.; WESTHOFF, D. *Microbiología de los alimentos*. Zaragoza: Acribia, 1978. 150 p.

7. KARASCH, T., et al. Etanol production by *Zymomonas* and *Saccharomyces*, advantages and disadvantages. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol* 18, 1983. 86 p.
8. LYONS, Jacques; KELSALL, T.P. *Alcohol text book*. 4a ed. Estados Unidos: NUP, 2003. 350 p.
9. PALLETONI, N.J. *Principios generales de Microbiología*. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico Departamento de Asuntos Científicos. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos 1970. Monografía N° 7. 60 p.
10. PAAR, Anton. *Manual del usuario de densímetro DMA 500*. Alemania: 2003. 25 p.
11. PRAJ INDUSTRIES. *Analytical methods for cane feedstock based fermentation and distillation process*. 4th ed. USA: Pvt. Ltd. 2004. 199 p.
12. VIANNA DE AMORÍN, Henrique. *Fermentación alcohólica: ciencia y tecnología*. Brasil: FERMENTEC, 2005. 160 p.

## APENDICE

### Apéndice 1. Procedimiento de ART en mieles

- Pesar 10 gramos de miel final (miel C) en un *beaker* de 250 mL. Diluir con un volumen aproximado de 100 mL de agua desmineralizada y transferir cuantitativamente a un balón de 200 mL, aforando con agua desmineralizada.
- Tomar una alícuota de 25 mL de la dilución anterior y trasladarlo a un balón de 250 mL. Agregar 25 mL de agua desmineralizada y 5 mL de ácido clorhídrico 6.34 N.
- Transferir a un *beaker* de 250 mL. Introducir el termómetro y calentar por 20 minutos a 65° C. Enfriar a temperatura ambiente.
- Agregar 100 mL de agua desmineralizada y neutralizar a pH 7, ya sea con hidróxido de sodio 1 N, o ácido clorhídrico.
- Trasladar nuevamente al balón de 250 mL y aforar con agua desmineralizada. Enjuagar una bureta de 50 mL con la disolución anterior antes de llenarla. Luego llenar la bureta hasta el enrase.
- Tomar 5 mL de solución Fehling A y 5 mL de solución Fehling B en un *erlenmeyer* de 250 mL. Introducir una barra magnética, agregar 25 mL de agua desmineralizada y 10 mL de la solución de la bureta en el *erlenmeyer*.

- Colocar el *erlenmeyer* sobre el plato de calentamiento y llevar rápidamente a ebullición, manteniendo esta condición por dos minutos.
- Si después de diez a quince segundos de ebullición del líquido, el color de la muestra no se torna de color café o verdosa<sup>1</sup>, hacer adiciones de 1.0 mL de muestra, dejando ebullición un poco después de cada adición, hasta llegar a este color.
- Adicionar tres o cuatro gotas de azul de metileno y la solución deberá mantener un color ligeramente azul.
- Continuar la adición de solución hasta que el indicador se decolore completamente, tomando un color rojo ladrillo.
- La titulación se debe completar en tres minutos una vez iniciada la ebullición y durante este tiempo la muestra debe permanecer en ebullición continua.
- Tomar la lectura de mL consumidos en la bureta.

Calcular los azúcares totales como sigue:

% azúcares totales (% w/w) = 1040/mL gastados en bureta

- Documentos relacionados: Manual de ICUMSA, 1994.  
Valores esperados:
  - Miel B, 60 % w/w mínimo
  - Miel C, 48 % w/w mínimo

---

<sup>1</sup> Esto significa que aún queda mucha solución de Fehling sin reducir.

Apéndice 2. **Procedimiento de azúcar residual en mieles (AR)**

- Transferir 10 mL de muestra del fermentador a un matraz volumétrico de 100 ml, aforando con agua destilada.
- Tomar 50 mL de esta dilución en una bureta.
- En un matraz *erlenmeyer* de 250 mL agregar 5 ml de solución de Fehling A, 5 mL de solución de Fehling B y 30 mL de agua desmineralizada.
- Dejar caer 15 mL de la dilución que está en la bureta en el *erlenmeyer*.
- Colocar el *erlenmeyer* sobre una superficie de calentamiento y llevar a ebullición controlada hasta que la muestra se torne de color rojo ladrillo brillante. Agregar 4-5 gotas de azul de metileno.
- Titular en condiciones de ebullición controlada, con la adición de pequeños volúmenes de la dilución en la bureta (2-3 mL).
- Al acercarse el punto final, continuar la titulación agregando la dilución gota a gota, para alcanzar un punto final preciso. El punto final es el cambio de color azul a color rojo ladrillo.

### Apéndice 3. **Determinación de brix hidrométrico en melazas**

- En el *beaker* de 1,000 mL pesar cantidades iguales de miel y agua destilada a temperatura ambiente (dilución previa = 2).
- Agitar hasta diluir completamente la solución. Esperar unos minutos a que se disuelva la espuma formada.
- Llenar la probeta con la muestra preparada hasta rebasar. Dejarla en reposo por unos minutos, hasta que desaloje el aire contenido y se sedimenten los sólidos en suspensión. Se recomienda de 3 a 5 minutos.
- Introducir el hidrómetro brix limpio y seco en la probeta, asegurándose de su libre flotación y dejar por unos minutos hasta que equilibre su temperatura con la de la muestra.
- Tomar la lectura de brix, leyendo en su escala sin tocar el hidrómetro.
- Leer la temperatura sacando parcialmente el hidrómetro, dejando el bulbo del termómetro en contacto con la muestra.
- Documentos relacionados: Method GS4-15. Manual de ICUMSA (1994)
- Valores esperados: concentración de sólidos 80-90° brix



#### Apéndice 4. **Determinación de azúcares infermentables en mieles**

- Pesar con precisión 20 g de miel en un *beaker* de 250 mL;
- Transferir cuantitativamente a un *erlenmeyer* de 500 mL, utilizando varias porciones de agua destilada; el volumen total de agua para la transferencia debe ser de alrededor de 125 mL;
- Agregar 20 g de levadura seca. Colocar un tapón de algodón en el *erlenmeyer* e incubar a 32° C durante 20-24 h;
- Transferir cuantitativamente el material fermentado del *erlenmeyer* hacia un matraz volumétrico de 250 mL. Agregar 25 mL de solución de subacetato de plomo 10 % w/v, aforar con agua destilada. Mezclar bien y filtrar en un *erlenmeyer* seco. Descartar el precipitado;
- Transferir 125 mL de filtrado en un matraz volumétrico de 250 mL. Agregar 10 mL de solución de oxalato, mezclar bien y aforar con agua destilada;
- Filtrar la solución en un *erlenmeyer* seco. Descartar el precipitado y transferir el filtrado a una bureta de 50 mL;
- Mezclar 5 mL de solución de Fehling A y 5 mL de solución de Fehling B en un *erlenmeyer*. Agregar 30 mL de agua y alrededor de 18 mL de solución de la bureta. Calentar a ebullición y completar la titulación como en el ensayo de ART. El punto final es el cambio de color azul a rojo ladrillo;

- Los azúcares fermentables presentes en la materia prima se calculan como sigue:

$$\text{Azúcares fermentables} = \frac{5,127}{A \times F.F \times D.F}$$

Donde:

F. F. = Factor Fehling (a partir de la estandarización de la solución de Fehling)

A = Volumen consumido de filtrado (mL)

D. F. = Factor de dilución =  $(20/250) \times (125/250) = 0.04$

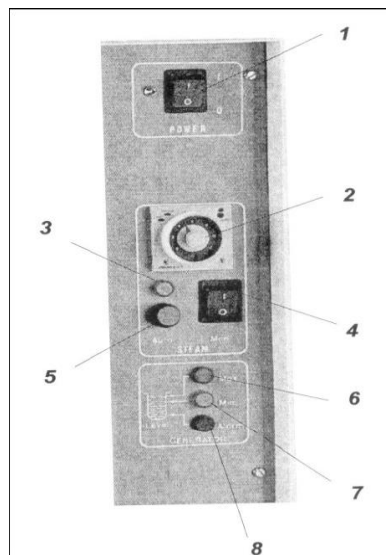
Nota: todas las titulaciones que involucran a las soluciones de Fehling deben hacerse únicamente en condiciones de ebullición. La ebullición no debe detenerse durante la titulación. La titulación debe completarse dentro de aproximadamente 3 minutos tras el inicio de la ebullición.

- Documentos relacionados: Praj standar methods.
- Valores esperados: azúcares fermentables en la materia prima = 3-5 % w/w.

## Apéndice 5. Medición de grado alcohólico

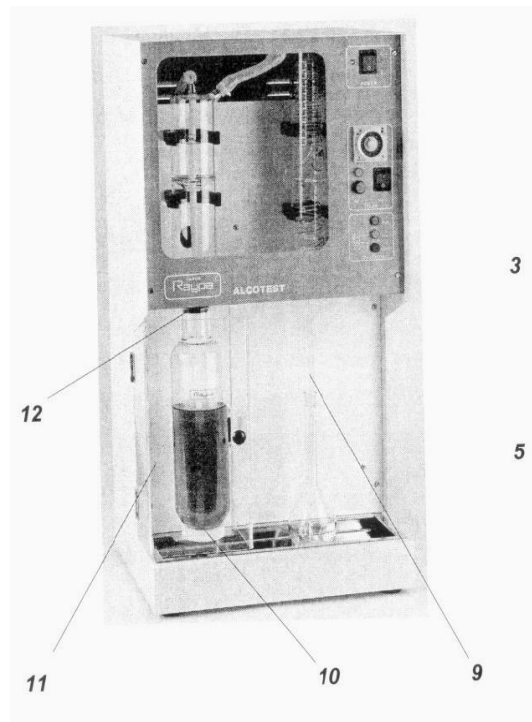
- Tomar una muestra de 50 mL, con la probeta de 50 mL, luego transferir a un *beaker* de 250 mL.
- Agregar 10 mL de agua desmineralizada a la muestra del *beaker* transferir la muestra al tubo del destilador enológico (ver apéndice 5a) y cerrar la tapa de protección (ver apéndice 5b, numeral 11).
- Encender el destilador enológico, siguiendo los siguientes pasos: Verificar que el equipo se encuentra conectado a una fuente de alimentación eléctrica y agua de alimentación para su correcto funcionamiento. Revisar que el interruptor del ciclo manual se encuentre encendido (ver apéndice 5a, numeral 4). Presionar el interruptor general de encendido (apéndice 5a, numeral 1).

### Apéndice 5a. Partes de destilador



Fuente: ESPINAR, R. *Instruction manual for use and maintenance*. Oenologic distiller. 3 p.

## Apéndice 5b. Serpentín

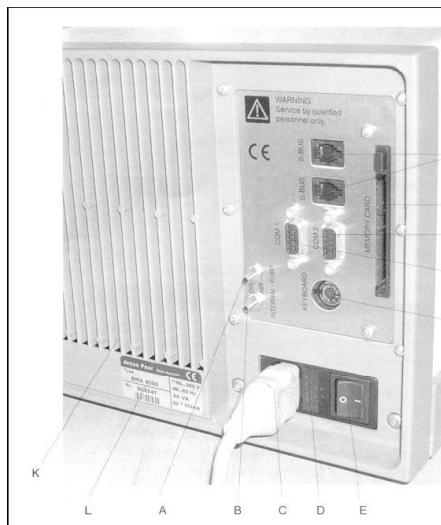


Fuente: ESPINAR, R. *Instruction manual for use and maintenance*. Oenologic distiller. 2p.

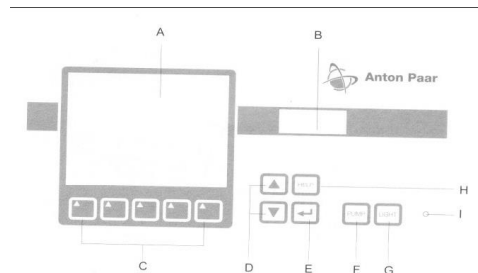
- Recuperar 50 mL del destilado en una probeta de 100 mL colocada en el tubo de salida de destilado (ver apéndice 5b, numeral 9) y luego presionar nuevamente el interruptor general para apagar el equipo.
- Encender el densímetro digital, siguiendo los siguientes pasos. Verificar que el equipo se encuentre conectado a una fuente de alimentación de energía eléctrica, a través de un regulador de voltaje. Presionar el interruptor de alimentación eléctrica (ver figura apéndice 5c) y esperar que el equipo se ajuste automáticamente. Limpiar el densímetro inyectando, por medio de la jeringa utilizando agua desmineralizada hervida. Transferir la muestra de 50 mL de alcohol de la probeta en un *beacker* de 250 mL.

Inyectar la muestra de alcohol de 50 mL en el densímetro y tomar directamente la medición del grado alcohólico de la muestra que aparece en la pantalla LC de cristal líquido (ver apéndice 5d, A)

Apéndice 5c. **Conexión**



Apéndice 5d. **Pantalla de densímetro**



Fuente: PAAR ANTON. *Manual del usuario de densímetro DMA 500*. 5 p.

Fuente: PAAR ANTON. *Manual del usuario de densímetro DMA 500*. 4 p.

- Valores esperados  
Fermentadores > 7.0° G

## Anexo 7. Llenado de fermentadores

- Realizar limpieza al fermentador con soda cáustica diluida al 2.5-3.0% w/w.
- Empezar a llenar el fermentador 1 con agua a un nivel de 12%.
- Agregar melaza a 22 m<sup>3</sup>/h del tanque diario de melaza mediante la bomba P 122 A/B y nutrientes mediante la bomba P 343 A/B.
- Llevando 10 m<sup>3</sup> de melaza en el fermentador 1 ya está listo para recibir el corte de la semillera A.
- Realizar el corte de semillera A dejando un 30% del 80% de la misma hacia el fermentador 1.
- Luego de realizado el corte de semillera A al fermentador 1, trasegar un porcentaje del reactor 4 dejándolo a un 20%, llenar nuevamente la semillera con melaza y agua a un nivel de 80% agregando sus respectivos nutrientes y bach de ácido, para poder realizar un nuevo corte.
- Seguir alimentado el fermentador 1 con agua y melaza a 26 m<sup>3</sup>/h hasta que tenga un nivel de 30%, agregar 3 bach de ácido, controlando la temperatura (30-33°C) y seguir alimentado con agua y melaza hasta un nivel de 80 % y brix entre 14-16, luego de 12 horas de llenado. Agregar antiespumante si fuera necesario mediante la bomba P-341 A/B.
- Al estar fermentado el fermentador 1, luego de 22-24 horas teniendo un azúcar residual menor o igual a 1.50 y el mosto fermentado con grado

alcohólico de 7.5 o superior, se empieza a trasegar hacia el *beerwell* mediante la bomba P-311 A/B.

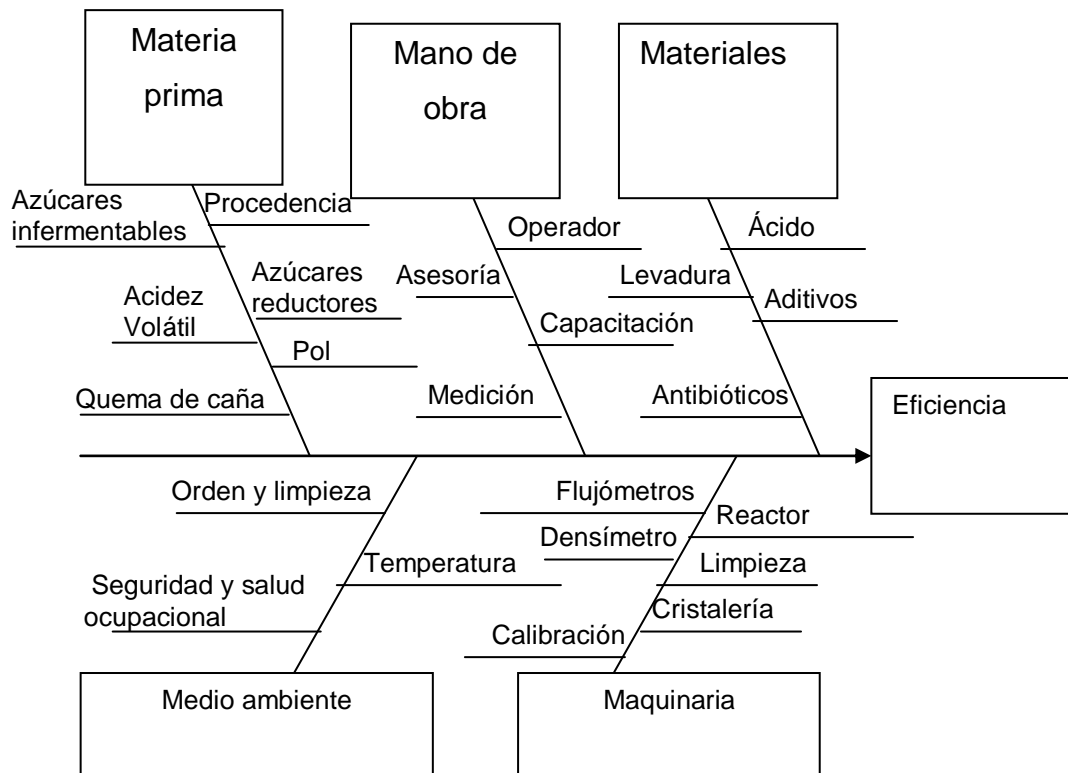
- Mantener la semillera B con su respectiva temperatura durante su reacción, hasta que tenga un brix de 6-6.6 y un recuento de 200 millones de células/ml o más, el fermentador 2 debe estar limpio (CIP) y empezar a agregar agua a un nivel de 12% del volumen total del fermentador.
- Empezar a llenar el fermentador 2 con agua a un nivel de 12%.
- Realizar los pasos del 19 al 26 y así sucesivamente para el fermentador dos, tres y cuatro.
- Trasegar del tanque *beerwell* hacia el tanque pulmón de vino.
- Empezar a enviar vino hacia destilación.





# ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia

## Anexo 2. **Partes del fermentador**

- Dos agitadores
- Bomba centrífuga de recirculación
- Intercambiador de placas
- Válvula de seguridad
- Válvula de venteo de CO<sub>2</sub>
- Tubería de entrada de agua
- Tubería de entrada de melaza
- Drenajes
- Lamina de acero inoxidable