



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

**SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR
EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO,
OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA
CERVEZA ENVASADA**

Francia Stephanie Madeleine Castillo Alfaro

Asesorado por la Inga. Claudia Carolina Ronquillo Blau

Guatemala, julio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR
EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO,
OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA
CERVEZA ENVASADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANCIA STEPHANIE MADELEINE CASTILLO ALFARO
ASESORADO POR LA INGA. CLAUDIA CAROLINA RONQUILLO BLAU

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, JULIO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO, OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA CERVEZA ENVASADA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de mayo de 2014.

Francia Stephanie Madeleine Castillo Alfaro

Guatemala, 15 de marzo de 2017

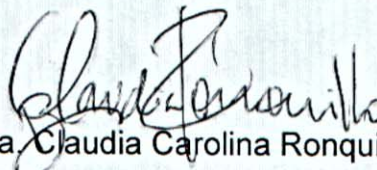
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Por este medio le envío mi dictamen de aprobación del informe final de Trabajo de Graduación titulado: **"SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO, OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA CERVEZA ENVASADA"** realizado por **FRANCIA STEPHANIE MADELEINE CASTILLO ALFARO**, estudiante de la carrera de Ingeniería Química, quien se identifica con carnet No. **2009-15243** y documento personal de identificación No. **1710017100101**, y es asesorado por mi persona.

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su fina atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,


Inga Claudia Carolina Ronquillo Blau

Colegiada No. 986

Asesora

Claudia Carolina Ronquillo Blau
Ingeniera Química
Col. No. 986



Guatemala, 19 de junio de 2017.
 Ref. EI-Q.TG-IF.025.2017.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EI-Q-PRO-REG-007 correlativo **026-2014** 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 la estudiante universitaria: **Francia Stephanie Madeleine Castillo Alfaro**.
 Identificada con número de carné: **2009-15243**.
 Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.


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:

SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO, OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA CERVEZA ENVASADA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Claudia Carolina Ronquillo Blau**.

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. Mercedes Esther Roquel Chávez
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.036.2017

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 de la estudiante, **FRANCIA STEPHANIE MADELEINE CASTILLO ALFARO** titulado: **"SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO, OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA CERVEZA ENVASADA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davila
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

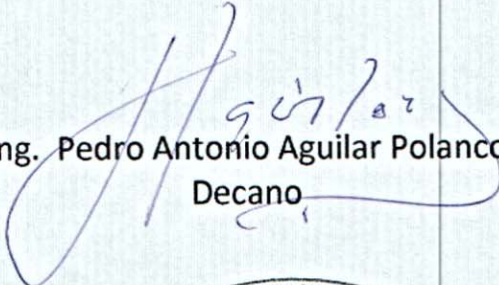


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 311.2017

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: **SUSTITUCIÓN DE LOS MÉTODOS ZAHM Y NAGEL, EMBUDO SUMERGIDO Y DIGOX POR EL MEDIDOR AUTOMÁTICO TPO/CO₂ PARA LA DETERMINACIÓN DE GAS CARBÓNICO, OXÍGENO EN LA CABEZA DEL ENVASE Y OXÍGENO DISUELTO CONTENIDO EN LA CERVEZA ENVASADA,** presentado por la estudiante universitaria: **Francia Stephanie Madeleine Castillo Alfaro,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el centro de mi vida y mi fortaleza en todo tiempo, porque me dio la sabiduría para culminar esta meta. Sin Él este logro no hubiera sido posible.
- Mi padre** Cornelio Castillo, porque desde pequeña sembraste en mí el valor de la superación, me enseñaste a ser una mujer independiente, has sido mi inspiración en todo momento.
- Mi madre** Aura Alfaro, porque tu apoyo ha sido fundamental durante toda mi vida, por tu cariño, por siempre haber confiado en mí y motivarme a seguir siempre adelante.
- Mis hermanos** Allizon, Velvet, Marlon y Diana, porque son mi ejemplo de superación y perseverancia, los amo y los admiro.
- Mis abuelas** Azucena y Angelita, porque en diferentes etapas de este proceso estuvieron presentes, este logro también es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me formó como profesional.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos necesarios para los retos que ya han iniciado y los que están por venir.

Mis amigos

Ana Rufina, Alejandra, Maria José, Mary Astrid y Aaron, porque fueron parte importante de este proceso y con su amistad hicieron que el camino fuera más fácil.

Inga. Claudia Ronquillo

Por su asesoría, apoyo, tiempo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Definición de cerveza y malta.....	3
2.2. Tipos de cerveza	3
2.2.1. Cerveza de fermentación alta	3
2.2.2. Cerveza de fermentación baja	4
2.3. Proceso general de fabricación de la cerveza	4
2.3.1. Malteado de la cebada	4
2.3.2. Producción del mosto	5
2.3.2.1. Molienda	5
2.3.2.2. Maceración	6
2.3.2.3. Filtración	6
2.3.2.4. Cocción del mosto	7
2.3.2.5. Eliminación del turbio caliente	7
2.3.2.6. Enfriamiento del mosto	8
2.3.3. Producción de la cerveza	8

	2.3.3.1.	Fermentación y maduración	8
	2.3.4.	Envasado y pasteurización de la cerveza	9
	2.3.4.1.	Envasado	9
	2.3.4.2.	Pasteurización.....	10
2.4.		Gas carbónico (CO ₂)	10
2.5.		Oxígeno.....	11
2.6.		Métodos de medición de gas carbónico y oxígeno en cerveza envasada	11
	2.6.1.	Gas carbónico en cerveza envasada según Zahm y Nagel	11
	2.6.2.	Medición de oxígeno disuelto según Tödt y Teske, medidor Digox	13
	2.6.3.	Oxígeno en la cabeza del envase, método de embudo sumergido.....	14
	2.6.4.	Medidor automático de oxígeno total y gas carbónico en el envase (TPO/CO ₂)	15
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
	3.1.	Variables	17
	3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	17
	3.3.	Recursos humanos disponibles	18
	3.4.	Recursos materiales disponibles.....	18
	3.4.1.	Cristalería, insumos y reactivos.....	18
	3.4.2.	Equipo	18
	3.5.	Técnica cuantitativa.....	18
	3.5.1.	Número de muestras.....	19
	3.5.2.	Procedimiento experimental	19
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	20
	3.7.	Análisis estadístico.....	21

3.7.1.	Grados de libertad y valor crítico	22
3.7.2.	Cálculos para la tabla ANOVA.....	22
3.8.	Interpretación de la tabla ANOVA.....	24
4.	RESULTADOS	25
4.1.	Resultados de la medición de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto	25
4.2.	Resultados análisis de varianza	30
5.	INTREPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	33
	CONCLUSIONES	35
	RECOMENDACIONES.....	37
	BIBLIOGRAFÍA.....	39
	APÉNDICES	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Equipo de medición Zahm y Nagel	12
2.	Medidor Digox	13
3.	Equipo de medición método de embudo sumergido	14
4.	Medidor automático TPO/CO ₂	15
5.	Diagrama de flujo del análisis de la investigación	19
6.	Determinación de gas carbónico por el método del medidor Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO ₂	29
7.	Determinación de oxígeno en la cabeza del envase por el método del embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO ₂	29
8.	Determinación de oxígeno disuelto por el método del medidor Digox y el medidor automático TPO/CO ₂	30

TABLAS

I.	Variables de estudio en el análisis de la medición de gas carbónico y oxígeno total contenido en la cerveza envasada.....	17
II.	Tabla de análisis de ANOVA.....	23
III.	Determinación de gas carbónico obtenido por el método del medidor Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO ₂	25
IV.	Determinación de oxígeno en la cabeza del envase por el método del embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO ₂	27
V.	Determinación de oxígeno disuelto por el método del medidor Digox y el medidor automático TPO/CO ₂	28

VI.	Análisis de varianza ANOVA para el gas carbónico determinado con los métodos Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO ₂	30
VII.	Análisis de varianza ANOVA para el oxígeno en la cabeza del envase con los métodos embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO ₂	31
VIII.	Análisis de varianza ANOVA para el oxígeno disuelto con los métodos medidor Digox y el medidor automático TPO/CO ₂	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
% m/m	Concentración porcentual masa en masa
°C	Grados Celsius
g	Gramo
NaOH	Hidróxido de sodio
KOH	Hidróxido de potasio
l	Litro
ml	Mililitro
N₂	Nitrógeno
O₂	Oxígeno
μ₂	Resultados obtenidos en la determinación de los parámetros analizados por el método nuevo
μ₁	Resultados obtenidos en la determinación de los parámetros analizados por los métodos actuales

GLOSARIO

Amiláceo	Que contiene almidón o es semejante a él.
Cátodo	Electrodo con carga negativa.
Cuerpo	Característica de la cerveza que refleja la densidad final y se refiere a las propiedades de llenado en la boca.
Electrodo	Conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.
Electrodo polarizado	Electrodo en el cual no se produce cambio alguno en el valor de la corriente eléctrica a pesar de existir un intercambio de cargas.
Electroquímica	Rama de la química que estudia los fenómenos químicos que provocan la electricidad.
Extracto	Conjunto de ingredientes orgánicos disueltos que componen el mosto o la cerveza.
Gas carbónico	Dióxido de carbono (CO ₂).

<i>Head space</i>	Del inglés, espacio de cabeza. Espacio que se encuentra en la cabeza del envase entre el líquido contenido y la tapa del envase.
Luminiscencia	Propiedad que tienen ciertos cuerpos de emitir luz tras haber absorbido energía de otra radiación, principalmente ultravioleta, sin aumentar su temperatura.
Luminóforo	Compuesto orgánico o sustancia química que emite luz.
Lúpulo	Planta trepadora, perenne, perteneciente al grupo de las urticáceas y la familia cannabaceae. En la fábrica de cerveza se utiliza únicamente las inflorescencias de las plantas femeninas. Estas contienen las resinas amargas y los aceites etéreos que le suministran a la cerveza los componentes amargantes y aromáticos.
Organoléptico	Refiriéndose al término propiedades organolépticas, descripciones de las características físicas que tiene la materia en general y que se pueden percibir a través de los sentidos.

RESUMEN

El presente trabajo compara y evalúa la factibilidad de la sustitución de tres métodos de laboratorio. Los parámetros a evaluar son: el contenido de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto de la cerveza envasada en presentación botella de vidrio retornable. Actualmente, el laboratorio en donde se realizaron las pruebas cuenta con tres métodos para evaluar los tres parámetros: el método del medidor de gas carbónico Zahm y Nagel, el método de embudo sumergido para la determinación de oxígeno en la cabeza del envase y el método del medidor Digox para la medición de oxígeno disuelto. Se está interesado en la sustitución de los métodos mencionados por el método del medidor automático TPO/CO₂ que representa un ahorro en recursos: insumos, personal y tiempo, además, de mejorar la calidad de los resultados de los parámetros analizados.

Se analizaron 160 muestras, en un lapso de cuatro semanas, donde se realizaron comparaciones con los cuatro métodos descritos. De la línea de producción se tomaron, de un mismo lote de llenado, siete cajas de 24 unidades de cerveza, cada una de la misma marca. Primero se realizó el procedimiento para la determinación de gas carbónico con el medidor Zamh y Nagel a 40 botellas de las muestras seleccionadas; luego, se realizó el procedimiento para la determinación del oxígeno en la cabeza del envase, con el método del embudo sumergido, a 40 botellas de las muestras seleccionadas; después se realizó el procedimiento para la determinación de oxígeno disuelto con el medidor Digox a 40 botellas de las muestras seleccionadas; por último, se realizó el procedimiento para la determinación de los tres parámetros con el medidor automático TPO/CO₂ a 40 botellas de las muestras seleccionadas.

El estudio comprobaría si existen o no diferencias estadísticas significativas en las mediciones respecto de las mismas muestras con un análisis de varianza a los resultados. Se utilizó el análisis estadístico de varianza para procesar los datos en una tabla ANOVA con el uso de la distribución F de Sedoner, con un nivel de confianza del 95 %.

Luego del análisis estadístico, se determinó que los métodos no presentan diferencias significativas en las mediciones de los tres parámetros concluyendo así que sí es factible sustituir los métodos: del medidor de gas carbónico Zahm y Nagel, de embudo sumergido para la determinación de oxígeno en la cabeza del envase y del medidor Digox para la medición de oxígeno disuelto, por el método del medidor automático TPO/CO₂.

OBJETIVOS

General

Realizar la comparación del método con el medidor automático TPO/CO₂ como sustituto de los métodos Zahm y Nagel, embudo sumergido y Digox para la determinación de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto contenido en la cerveza envasada.

Específicos

1. Determinar la cantidad de gas carbónico en la cerveza por el método del medidor Zahm y Nagel en comparación con el método del medidor automático TPO/CO₂.
2. Determinar la cantidad de oxígeno en la cabeza del envase por el método del embudo sumergido en comparación con el método del medidor automático TPO/CO₂.
3. Determinar la cantidad de oxígeno disuelto en la cerveza por el método del medidor Digox en comparación con el método del medidor automático TPO/CO₂.
4. Establecer la existencia de las diferencias significativas entre los resultados para los tres parámetros por los métodos utilizados, a través de un análisis estadístico de varianza.

Hipótesis

Es posible la sustitución de los métodos Zahm y Nagel, embudo sumergido y Digox por el método del medidor automático TPO/CO₂ para la determinación de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto contenidos en la cerveza envasada.

Hipótesis nula (H₀)

No existen diferencias significativas en la medición de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto contenidos en la cerveza envasada por medio de los métodos Zahm y Nagel, embudo sumergido y Digox en comparación con el método del medidor automático TPO/CO₂.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternativa

Existen diferencias significativas en la medición de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto contenidos en la cerveza envasada por medio de los métodos Zahm y Nagel, embudo sumergido y Digox en comparación con el método del medidor automático TPO/CO₂.

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

La cerveza es un producto que sus consumidores seleccionan por sus características gustativas: sabor, olor y cuerpo. El contenido de gas carbónico y oxígeno total en los envases de cerveza son estándares de calidad importantes de medir y controlar, ya que ambos parámetros afectan directamente la estabilidad del producto en aspectos de sentido organoléptico. El gas carbónico afecta directamente en el cuerpo de la cerveza, una cerveza con un contenido de gas carbónico deficiente adquiere un gusto vacío. El oxígeno total, combinación de oxígeno presente en la cabeza del envase y oxígeno disuelto en la cerveza, es un parámetro que puede afectar en el sabor el olor de la cerveza modificando su estabilidad con respecto a la vida del producto. El oxígeno se puede introducir durante la filtración de la cerveza aún turbia después de la fermentación o durante el llenado. Una cerveza con una cantidad de oxígeno alto tiende a oxidarse y adquiere sabores y olores indeseables en el producto lo que reduce su tiempo de vida.

Actualmente, la industria cervecera, que permitió realizar el estudio de investigación en sus instalaciones, cuenta con tres métodos para evaluar los parámetros de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto: método del medidor de gas carbónico Zahm y Nagel, método de embudo sumergido para la determinación de oxígeno en la cabeza del envase y método del medidor Digox para la medición de oxígeno disuelto. Sin embargo, recientemente se presentó la oportunidad de adquirir un nuevo equipo, el medidor automático TPO/CO₂ que realiza las mediciones en un solo paso, lo que representa un ahorro en recursos como insumos, personal y tiempo, además de mejorar la calidad de los resultados de los parámetros analizados.

Se analizaron muestras de la presentación del envase retornable de vidrio de cerveza para determinar si existe diferencia significativa, por medio de un análisis estadístico de varianza, entre los parámetros medidos por los cuatro métodos, con el fin de realizar la sustitución de los métodos actuales por el medidor automático TPO/CO₂.

1. ANTECEDENTES

Yolanda Eugenia Estrada Lau, en 1985, presentó su tesis en el grado de técnico en procesamiento de alimentos vegetales, en la Universidad de San Carlos de Guatemala titulada: *Revisión de los métodos de análisis fisicoquímicos de cerveza en el laboratorio de Cervecería Nacional*. El objetivo de la investigación fue realizar una revisión bibliográfica de los métodos de análisis fisicoquímicos utilizados en el laboratorio de aseguramiento de calidad de la industria cervecera; concluye que se habían extraído de las fuentes bibliográficas de la Convención Europea de Cervecería y la Asociación Química Americana de Cerveza. También, se realizó una evaluación y estandarización de los métodos para el análisis de extracto aparente, extracto real, extracto original, alcohol en porcentaje en peso, unidades de amargor, alfa amino nitrógenos, color, pH, azufre total, proteínas, gas carbónico, contenido de aire, espuma y polifenoles.

Jailin Pájaro, en 2012, presentó su tesis en grado de licenciatura en ingeniería química, en la Universidad Central de Venezuela titulada: *Mejoramiento de la metodología de preparación de muestras homogéneas y estables para estudios interlaboratorios del método de medición de oxígeno en cerveza*. El objetivo de la investigación fue mejorar la metodología de preparación de muestras; logró obtener muestras homogéneas y estables para la utilización en los estudios interlaboratorios del método de medición de oxígeno en cerveza, con la finalidad de garantizar que cualquier variación obtenida se debiera al sistema de medición y no a la muestra.

Mettler-Toledo Intl. Inc, en 2012, publicó en Francia un ensayo titulado: *Para obtener una cerveza óptima, es necesario un CO₂ de alta calidad*. El ensayo plantea que un alto contenido de oxígeno residual en el gas carbónico afecta negativamente al sabor de la cerveza y su periodo de conservación. Por ello, es fundamental mantener el oxígeno en niveles mínimos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de cerveza y malta

La cerveza es la bebida resultante de fermentar, mediante levaduras seleccionadas, el mosto procedente de malta de cebada, solo o mezclado con otros productos amiláceos transformables en azúcares por digestión enzimática, cocción y adición de lúpulo, sus extractos y/o concentrados.

La malta es el grano de la cebada sometidos a germinación y posterior desecación y tostado. El mosto de malta es el líquido obtenido por tratamiento de malta con agua potable para extraer sus ingredientes solubles.

2.2. Tipos de cerveza

La cerveza puede dividirse en dos grupos: según la levadura utilizada y el proceso de fermentación resultante de ello. Los grupos resultantes son: cerveza de fermentación alta y cerveza de fermentación baja.

2.2.1. Cerveza de fermentación alta

Es la forma original de la fabricación de la cerveza. Las cervezas de fermentación alta difieren de las de fermentación baja debido a importantes diferencias en la levadura, así como en los productos de metabolismo de esta, los cuales otorgan un carácter muy propio a la cerveza.

La levadura de fermentación alta se caracteriza por conjuntos de células que se van separando entre sí, estos conjuntos se deshacen recién luego de la fermentación, arrastrados hacia arriba por el dióxido de carbono producido durante la reacción, de manera que la levadura se concentra en la superficie y puede ser cosechada allí. De ahí el nombre de este tipo de levadura.

2.2.2. Cerveza de fermentación baja

La levadura de fermentación baja se caracteriza por descender hasta depositarse en el fondo de los tanques de fermentación, de ahí su nombre.

Entre otra de las características notables de este tipo de levadura es la temperatura de fermentación, que se da a temperaturas menores en comparación con las levaduras de fermentación alta.

La levadura de fermentación baja aprovecha de forma total a metabolizar los azúcares, mientras que las de fermentación alta únicamente pueden hacerlo en un tercio. También, las levaduras de fermentación baja presentan una menor cantidad de productos secundarios de fermentación en comparación con las levaduras de fermentación alta.

2.3. Proceso general de fabricación de la cerveza

2.3.1. Malteado de la cebada

La cebada no se puede utilizar directamente para la producción de cerveza ya que no tiene desarrollado el sistema enzimático encargado de transformar el almidón en azúcares.

El proceso inicia con una limpieza preliminar para eliminar polvo, trozos de granos, piedras pequeñas. Seguida de una clasificación de los granos, por medio de tamices y separadores, se seleccionan los granos de las mismas dimensiones. Luego se preparan los granos para la germinación, se sumergen en agua durante cuarenta a sesenta horas, después los granos son aireados, la cebada consume el oxígeno y produce anhídrido carbónico. Durante la germinación se esparcen los granos mojados y se mezclan regularmente. En esta fase las proteínas, el almidón y otras sustancias se hacen accesibles, lo cual facilita el trabajo posterior de las levaduras. Asimismo, el complejo enzimático encargado de atacar el almidón se desarrolla. La germinación se detiene al calentar los granos en hornos, reduciendo la humedad de 42 % - 45 % a 3 % - 5 %. En este último proceso de calentamiento, el malteado, se producen reacciones entre azúcares y proteínas, con formación de ciertas sustancias que influirán en el color, sabor y aroma finales de la cerveza.

Luego de la germinación la cebada es llamada malta.

2.3.2. Producción del mosto

Las siguientes son las etapas de la producción de mosto.

2.3.2.1. Molienda

La malta es triturada para obtener los fragmentos de grano y separarlos de la cáscara. La cáscara de la malta puede servir posteriormente como lecho filtrante.

El proceso de trituración es llevado a cabo en molinos; según el tipo de proceso se pueden diferenciar molinos trituradores de malta en seco y molinos trituradores de malta húmeda.

2.3.2.2. Maceración

La maceración es el proceso más importante en la fabricación del mosto. En la maceración, la malta molida y el agua son mezclados entre sí, convirtiéndose ahora en una solución.

Todas las sustancias que entran en solución se denominan extracto. Solo una parte de los componentes de la molienda es soluble, pero a la cerveza sólo pueden pasar sustancias solubles, es por ello que durante el proceso de la maceración las sustancias insolubles se vuelven solubles.

El propósito de la maceración es la degradación completa del almidón (sustancia insoluble) para la obtención de azúcares fermentables (sustancias solubles), a través de la actividad enzimática; cuya actividad depende de varios factores, dentro de ellos la temperatura y el pH.

2.3.2.3. Filtración

Al final del proceso de maceración se obtiene una mezcla acuosa de sustancias disueltas y no disueltas. La solución acuosa se llama mosto, las partes no disueltas se denominan afrecho.

Para la fabricación de la cerveza se utiliza solamente el mosto, por lo cual debe ser separado en lo posible totalmente del afrecho. Al proceso de separación se le llama filtración.

En la filtración del mosto, el extracto debe ser recuperado, en lo posible de forma total. En este proceso el afrecho cumple el papel de material filtrante, el cual ocurre en dos fases: la descarga del primer mosto y el lavado del afrecho para la extracción del extracto soluble.

2.3.2.4. Cocción del mosto

En esta etapa se calienta el mosto hasta la ebullición. Etapa en la cual se lleva a cabo la adición del lúpulo. Los compuestos amargos son los componentes más importantes del lúpulo para la fabricación de la cerveza, porque le otorgan el sabor amargo.

Durante la cocción del mosto se lleva a cabo la formación y precipitación de compuestos formados por proteínas, evaporación de agua, esterilización del mosto, destrucción de todas las enzimas, formación de sustancias reductoras y evaporación de sustancias aromáticas indeseadas.

2.3.2.5. Eliminación del turbio caliente

En la ebullición del mosto las proteínas sensibles al calor precipitan, causando la aparición de partículas más pesadas que el mosto que pueden sedimentarse si se les da el tiempo necesario.

Este turbio debe ser extraído porque carece de valor para la fabricación de la cerveza y porque es perjudicial para la calidad. La extracción se puede llevar a cabo por medios mecánicos o centrífugas.

2.3.2.6. Enfriamiento del mosto

Debido a que la levadura solo puede fermentarse a temperaturas bajas se debe de enfriar el mosto a la temperatura adecuada según el tipo de levadura a utilizar.

Durante el proceso de enfriamiento el mosto se enturbia, por la precipitación de partículas debido a la disminución de temperatura, a este se le llama turbio frío, el cual debe ser extraído, más no en su totalidad, ya que es requerido un porcentaje de él que dará características a la cerveza final.

El mosto debe ser aireado, preparándolo para la siguiente etapa, que es la reproducción de la levadura (proceso con oxígeno), para luego dar lugar a la fermentación (proceso sin oxígeno).

2.3.3. Producción de la cerveza

Las siguientes son las etapas de la producción de la cerveza.

2.3.3.1. Fermentación y maduración

La transformación del mosto a cerveza se lleva a cabo cuando los azúcares contenidos en el mosto son consumidos por la levadura y transformados en etanol y dióxido de carbono en su mayor parte.

Las reacciones de la fermentación se pueden dividir en reacciones de fermentación principal y reacciones de maduración, pero ambas consecutivas. Durante la maduración se acentúan algunas propiedades organolépticas.

2.3.4. Envasado y pasteurización de la cerveza

La finalización de la cerveza conlleva dos etapas más: la pasteurización y el envasado. Dependiendo del tipo de proceso que se elija en la industria cervecera, la pasteurización puede ser antes o después del envasado.

2.3.4.1. Envasado

La cerveza puede ser envasada en botellas de vidrio retornables, botellas de vidrio no retornables, latas, barriles y botellas plásticas.

Durante el envasado se debe cuidar que los parámetros de calidad se mantengan y debe evitarse cualquier ingreso de aire.

En el caso de las botellas de vidrio retornables se debe realizar un tratamiento y preparación de las botellas para que estas sean aptas para el llenado de la cerveza. Lo que se busca con esto es eliminar cualquier tipo de residuo y microorganismo que afecte tanto la calidad de la cerveza como al consumidor.

El tratamiento inicia cuando las botellas son clasificadas ya que las que presenten fisuras o daños en el vidrio no pueden ser utilizadas. De ser seleccionada la botella para su reutilización, se inspecciona ahora, con el fin de eliminar cualquier cuerpo extraño en su interior. Después se realiza un lavado con un agente de limpieza, por lo general son utilizados agentes alcalinos con efecto germicida a altas temperaturas; se realiza posteriormente un enjuague profundo para evitar residuos del agente de limpieza en el producto final.

Con el fin de evitar la adición de aire a la cerveza, se agrega a las botellas gas carbónico, lo que desplaza el aire dentro del envase y luego se procede al llenado. Rápidamente, se agregan unas gotas de agua desairada a la cerveza para que cree espuma y desplace el aire entre la cabeza del envase y la tapa, por último, se procede a la coronación de la botella con la tapa.

2.3.4.2. Pasteurización

La pasteurización es el exterminio o disminución de microorganismos en soluciones acuosas por medio del calentamiento.

En el proceso de elaboración de cerveza se distinguen dos tipos de pasteurización. La pasteurización que se da antes del embotellado, es mejor conocida como pasteurización flash, esta se realiza en un equipo intercambiador de calor de placas, haciendo pasar la cerveza, usualmente, en contracorriente con otro líquido de mayor temperatura que le transfiere su calor hasta llegar a la temperatura deseada para la pasteurización, el proceso termina cuando la cerveza es enfriada a temperatura de llenado. La pasteurización luego del envasado se lleva a cabo en un pasteurizador tipo túnel, la cerveza ya embotellada pasa por este equipo hasta llegar a la temperatura deseada y luego nuevamente es enfriada para realizar el empaque secundario final.

2.4. Gas carbónico (CO₂)

El contenido de gas carbónico disuelto en la cerveza es una característica de calidad importante. “Un contenido adecuado de gas carbónico puede considerarse entre 0,45 a 0,60 g/l en el caso de cervezas de fermentación baja

y 0,40 a 1,00 g/l en el caso de cervezas de fermentación alta”.¹ Las cervezas con bajo contenido de gas carbónico, tienen gusto vacío. Además, el gas carbónico en la cerveza puede cambiar la detección del umbral organoléptico de algunos compuestos de sabor y olor.

2.5. Oxígeno

El oxígeno es uno de los controles más importantes en la fabricación de la cerveza. Ya que contenidos altos de oxígeno tienen una influencia negativa en la calidad de la cerveza afectando principalmente la estabilidad del sabor.

Se realizan mediciones para el oxígeno contenido en el aire que se encuentra en la cabeza del envase, que es el espacio que hay entre el líquido y la tapa; también del oxígeno disuelto dentro de la cerveza.

2.6. Métodos de medición de gas carbónico y oxígeno en cerveza envasada

2.6.1. Gas carbónico en cerveza envasada según Zahm y Nagel

La medición de gas carbónico es realizada con el uso de un método manométrico, que se basa en la ley de Henry-Dalton.

$$c_s = K_s * dp \quad \text{[Ec. 1]}$$

Donde:

- c_s = concentración de una sustancia disuelta

¹ KUNZE, Wolfgang. *Tecnología para cerveceros y malteros*. p. 355.

- K_s = coeficiente de solubilidad
- dp = presión parcial de la sustancia

La ecuación describe matemáticamente que la relación entre la concentración de una sustancia disuelta en una fase líquida y su presión parcial en la fase gaseosa es correspondiente, siempre y cuando la fase líquida y la fase gaseosa se encuentren en equilibrio.

El coeficiente de solubilidad es dependiente de la temperatura, si se conoce la temperatura además de la presión total y se sabe que el sistema es de un solo componente gaseoso, en este caso el gas carbónico, se puede determinar su concentración.

En el caso del método, el equilibrio entre ambas fases, sólido y líquido, se puede lograr agitando la muestra antes de la medición de la presión con el equipo Zahm y Nagel.

Figura 1. **Equipo de medición Zahm y Nagel**



Fuente: *Equipo para medición de gas carbónico en botellas de vidrio y plástico.*
<https://www.airbornelabs.com/zn-6001-piercing-device>. Consulta: 31 de octubre de 2016.

2.6.2. Medición de oxígeno disuelto según Tödt y Teske, medidor Digox

El procedimiento de medición con el analizador Digox ocurre electroquímicamente.

El oxígeno es reducido en el cátodo de una celda de medición a una determinada tensión. La corriente así generada es medida, esta es directamente proporcional a la presión parcial del oxígeno y con ello al contenido de oxígeno.

La reducción del oxígeno ocurre en un electropolarizado. Se utiliza este principio de medición electroquímico por medio de un ordenamiento de tres electrodos, donde se regula la potencia constantemente.

Figura 2. Medidor Digox



Fuente: *Medición de oxígeno disuelto*. http://www.thiedig.com/contenido/cms/front_content.php?idcat=124&lang=2&client=1. Consulta: 31 de octubre de 2016.

2.6.3. Oxígeno en la cabeza del envase, método de embudo sumergido

El gas presente en el espacio vacío o *head space* en un envase es atrapado en un embudo lleno de agua y es trasladado lentamente a través de una columna líquida, llena de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio, donde se fija el gas carbónico también presente en la cabeza de envase. El gas restante, que consiste prácticamente en nitrógeno y oxígeno, es colectado en una bureta, en la cual se lee su volumen. El valor encontrado es designado como aire en la cabeza del envase.

Figura 3. **Equipo de medición método de embudo sumergido**



Fuente: elaboración propia.

2.6.4. Medidor automático de oxígeno total y gas carbónico en el envase (TPO/CO₂)

El medidor TPO/CO₂ realiza la medición de gas carbónico de acuerdo a la ley de Henry-Dalton al igual que el método Zahm y Nagel.

La determinación de oxígeno se basa en la medición de la luminiscencia del oxígeno. El principio de la medición está basado en el fenómeno físico de la luminiscencia, que se define como la propiedad de algunos materiales de emitir luz cuando son excitados por un estímulo diferente del calor; en este caso, el estímulo es la luz. Si se escoge una combinación adecuada de material sensible a la luz y longitud de onda de la luz de excitación, tanto la intensidad de la luminiscencia como el tiempo que esta tarda en desvanecerse, dependerán de la concentración de oxígeno que rodea el material.

Figura 4. Medidor automático TPO/CO₂



Fuente: *Medidor automático TPO/CO₂*. <https://foodandbeverage.pentair.com/en/products/haffmans-automatic-inpack-tpo-co2-meter-c-tpo>. Consulta: 31 de octubre de 2016.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla I. **Variables de estudio en el análisis de la medición de gas carbónico y oxígeno total contenido en la cerveza envasada**

Núm.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño	
			Independiente	Dependiente
1	Temperatura	°C	X	
2	Presión	Bar		X
3	CO ₂	% m/m		X
4	Aire	ml		X
5	Oxígeno disuelto (DO)	g/l		X
6	Oxígeno en la cabeza del envase (HSO)	g/l		X
7	Oxígeno total (TPO)	g/l		X
8	Concentración NaOH o KOH	mol/l	X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El análisis se llevó a cabo en el laboratorio de aseguramiento de calidad de una industria cervecera guatemalteca.

Así mismo, el presente estudio solo se limitó al análisis de medición de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto contenido en cerveza envasada, no así de otros parámetros de calidad asociados.

En cuanto a la temporalidad del estudio, las evaluaciones y el análisis se realizaron durante 4 semanas del mes de julio de 2014.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Francia Stephanie Madeleine Castillo Alfaro
- Asesor de investigación: Inga. Claudia Carolina Ronquillo Blau
- Coordinador del laboratorio de investigación: Licda. Ana Cecilia Lucero

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Cristalería, insumos y reactivos

- Bureta especial de Kipphan incluyendo embudo
- Hidróxido de sodio al 25 %
- Suministro de CO₂
- Trípode
- Olla o cubeta con aprox. 35 cm de altura y 42 cm de diámetro

3.4.2. Equipo

- Equipo para la determinación de CO₂, Zahm y Nagel
- Equipo de medición Digox 6.1
- Medidor automático TPO/CO₂ en el envase, tipo c-TPO, Haffmans

3.5. Técnica cuantitativa

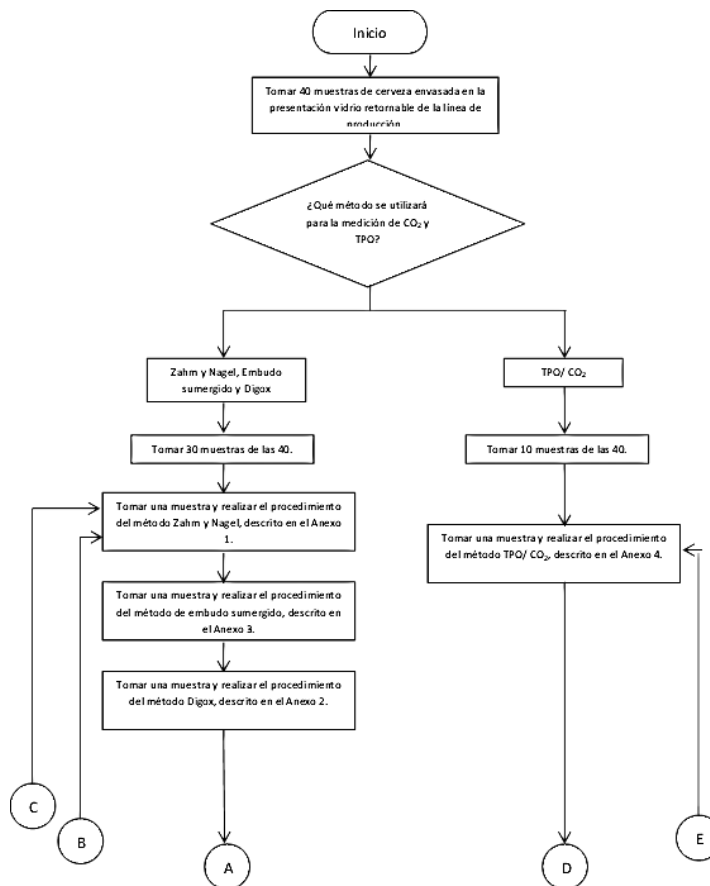
El estudio tuvo un enfoque estrictamente cuantitativo ya que se basa en la medición del gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto en cerveza envasada. El propósito de la investigación fue evaluar la existencia o ausencia de una diferencia significativa entre los métodos para determinar la viabilidad de sustituir uno por los otros.

3.5.1. Número de muestras

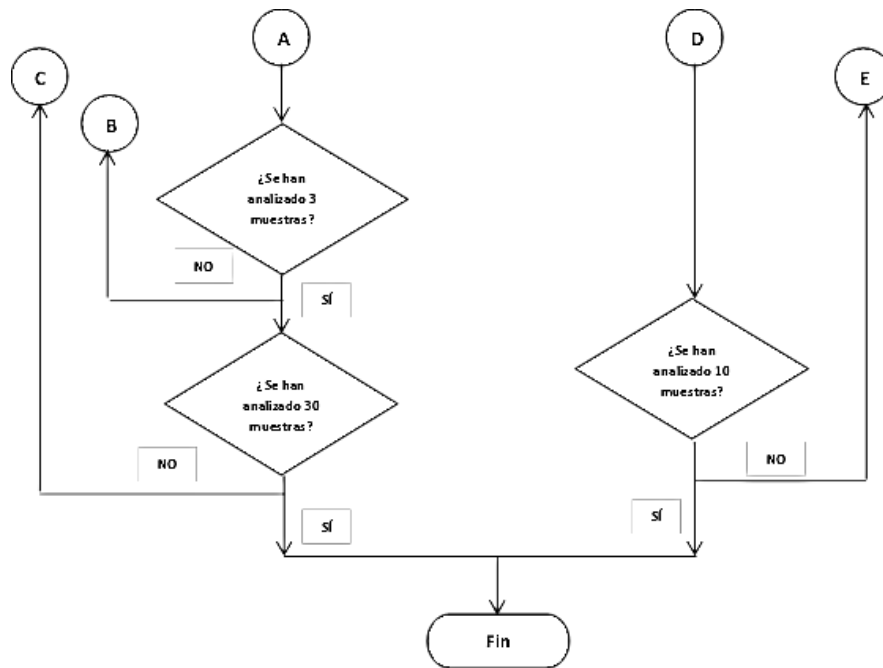
La cantidad de muestras a tomar para la elaboración de la investigación fueron, 10 muestras de cerveza en la presentación de botella retornable de vidrio, para el análisis con medidor TPO/CO₂. Y 30 muestras para los demás métodos, haciendo un total de 40 muestras semanales. Durante el mes de desarrollo experimental de la investigación se analizaron un total de 160 muestras.

3.5.2. Procedimiento experimental

Figura 5. Diagrama de flujo del análisis de la investigación



Continuación de la figura 5.



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Microsoft Office Word 2010.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La información que se recolectó en los análisis con el método de medición de gas carbónico Zahm y Nagel fueron: presión, temperatura y concentración de gas carbónico.

La información que se recolectó en los análisis con el método de medición de oxígeno disuelto con aparato Digox fue temperatura y concentración de oxígeno disuelto.

La información que se recolectó en los análisis con el método de embudo sumergido para la medición de oxígeno en la cabeza del envase fue volumen desplazado de aire y concentración de oxígeno en la cabeza del envase.

La información que se recolectó con el método con el medidor TPO/CO₂ fue oxígeno total, oxígeno en la cabeza del envase, oxígeno disuelto (DO), presión, temperatura y concentración de gas carbónico.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos de la medición de gas carbónico, oxígeno disuelto y oxígeno en la cabeza del envase, se llevó a cabo por medio de un análisis de varianza, el cual se utilizó para verificar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias cuando se tienen más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

La técnica fundamental consiste en la separación de la suma de cuadrados (SS) en componentes relativos a los factores contemplados en el modelo. En la prueba ANOVA se reúne evidencia de cada población bajo estudio y se usan datos para calcular un estadístico muestral. Después se consulta la distribución muestral apropiada para determinar si el estadístico contradice la suposición de que la hipótesis nula es cierta.

3.7.1. Grados de libertad y valor crítico

Los grados de libertad están dados por el número de valores que pueden ser asignados de forma arbitraria, antes de que el resto de las variables tomen un valor producto de establecerse las que son libres, esto, con el fin de compensar e igualar un resultado el cual se ha conocido previamente.

$$\frac{(k-1)}{(n-k)} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

- k = número de las filas o tratamientos
- n = número total de datos

El valor crítico se localiza en la tabla F según los grados de libertad del denominador y del numerador y con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

3.7.2. Cálculos para la tabla ANOVA

El análisis de varianza lleva a la realización de pruebas de significación estadística usando la denominada distribución F de Snedecor. Una vez que se han calculado las sumas de cuadrados, las medias cuadráticas, los grados de libertad y la F, se proceden a elaborar una tabla que reúna la información, denominada tabla de análisis de varianza o ANOVA.

Tabla II. **Tabla de análisis de ANOVA**

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F calculado	F teórico
Tratamientos	k - 1	SST	$\frac{SST}{(k - 1)} = MST$	$\frac{MST}{MSE}$	Tabla de Fisher
Error	n - K	SSE	$\frac{SSE}{(n - k)} = MSE$		
Total	n - 1	SSTotal			

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 417.

Donde:

$$F_{n_1, n_2} = \frac{\frac{SST}{k-1}}{\frac{SSE}{n-k}} = \frac{MST}{MSE} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Suma de cuadrados:

$$SSTotal = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Suma de cuadrados debido al tratamiento:

$$SST = \sum \left(\frac{T_c^2}{n_c} \right) - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad [\text{Ec. 5}]$$

Suma del cuadrado del error:

$$SSE = SSTotal - SST \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

- x = cada una de las observaciones
- n = número total de las observaciones

- T_c = total de la columna de cada tratamiento
- n_c = número de observaciones de cada tratamiento

3.8. Interpretación de la tabla ANOVA

El paso final de ANOVA, se realizó el cálculo de un cociente con la estimación del método entre el numerador y la estimación del método dentro del denominador. Si la hipótesis nula de que las poblaciones tienen la misma media es cierta, esta razón consiste en dos estimaciones separadas de la misma varianza poblacional y se puede obtener la distribución F si las medias poblacionales no son iguales. La estimación en el numerador está inflada y el resultado será un cociente muy grande. Al consultar la distribución F, no es probable que un cociente tan grande haya sido obtenido de esta distribución y la hipótesis nula será rechazada.

La prueba de hipótesis en ANOVA es de una cola, con un nivel de confianza del 95 %, un estadístico F grande llevará al rechazo de la hipótesis nula y un valor pequeño hará que no se rechace.

Si $F_{\text{calculada}} \leq F_{\text{teórica}}$, entonces, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa. Y si $F_{\text{calculada}} > F_{\text{teórica}}$, entonces, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Para comprobar la hipótesis se utilizó Microsoft Excel en la opción de análisis de datos para el análisis de varianza con un factor.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de los análisis para la determinación de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y el oxígeno disuelto en la cerveza envasada con los tres métodos utilizados actualmente en el laboratorio y con el método nuevo propuesto para la implementación. Además, se muestran los resultados obtenidos en el análisis estadístico de varianza pauta para la aceptación o rechazo de la hipótesis.

4.1. Resultados de la medición de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto

Las siguientes tablas muestran el trabajo realizado durante las cuatro semanas que duró el proceso de investigación.

Tabla III. **Determinación de gas carbónico obtenido por el método del medidor Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO₂**

Núm.	Medidor Zahm y Nagel	Medidor automático TPO/CO ₂
	CO ₂ (%m/m)	CO ₂ (%m/m)
1	0,56	0,52
2	0,57	0,52
3	0,57	0,52
4	0,57	0,51
5	0,60	0,51
6	0,59	0,52
7	0,56	0,52
8	0,57	0,52
9	0,55	0,53
10	0,56	0,52
11	0,56	0,52
12	0,55	0,53

Continuación de la tabla III.

13	0,57	0,52
14	0,57	0,52
15	0,55	0,52
16	0,56	0,52
17	0,57	0,51
18	0,57	0,51
19	0,56	0,50
20	0,58	0,52
21	0,56	0,53
22	0,57	0,53
23	0,56	0,54
24	0,56	0,53
25	0,56	0,54
26	0,57	0,53
27	0,56	0,54
28	0,55	0,54
29	0,58	0,54
30	0,57	0,54
31	0,56	0,52
32	0,56	0,52
33	0,56	0,52
34	0,58	0,52
35	0,56	0,52
36	0,55	0,52
37	0,58	0,52
38	0,58	0,52
39	0,57	0,51
40	0,56	0,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación de oxígeno en la cabeza del envase por el método del embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO₂**

Núm.	Embudo sumergido	Medidor automático TPO/CO ₂
	HSO (g/ml)	HSO (g/ml)
1	0,12	0,11
2	0,09	0,28
3	0,15	0,14
4	0,09	0,14
5	0,09	0,15
6	0,09	0,08
7	0,09	0,13
8	0,09	0,15
9	0,09	0,08
10	0,12	0,08
11	0,12	0,13
12	0,12	0,22
13	0,12	0,07
14	0,09	0,21
15	0,09	0,21
16	0,12	0,15
17	0,12	0,24
18	0,12	0,07
19	0,12	0,07
20	0,12	0,15
21	0,12	0,21
22	0,09	0,19
23	0,12	0,12
24	0,09	0,17
25	0,09	0,12
26	0,12	0,02
27	0,12	0,10
28	0,12	0,11
29	0,12	0,14
30	0,12	0,14
31	0,12	0,30
32	0,09	0,12
33	0,12	0,12
34	0,90	0,15
35	0,12	0,14
36	0,09	0,14
37	0,12	0,15
38	0,12	0,27
39	0,09	0,40
40	0,09	0,23

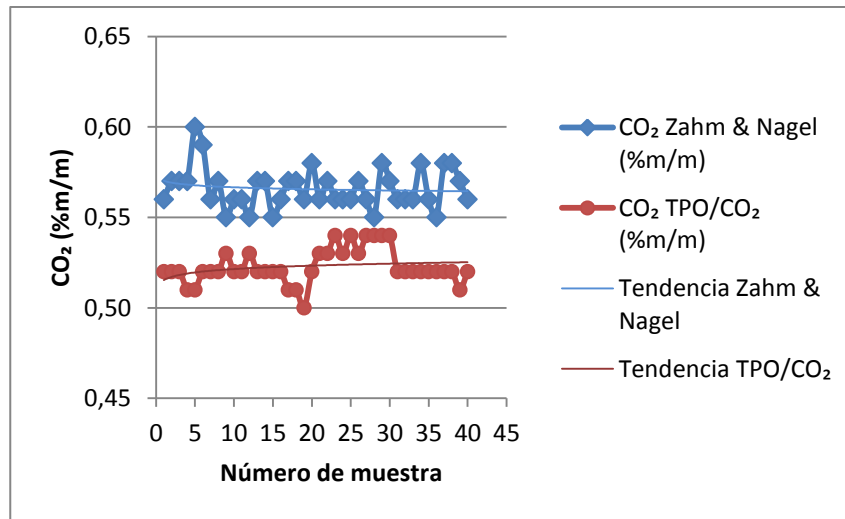
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Determinación de oxígeno disuelto por el método del medidor Digox y el medidor automático TPO/CO₂**

No.	Medidor Digox		Medidor automático TPO/CO ₂
	OD (g/ml)		OD (g/ml)
1	0,05		0,02
2	0,04		0,02
3	0,05		0,01
4	0,04		0,01
5	0,03		0,01
6	0,04		0,01
7	0,04		0,02
8	0,05		0,01
9	0,04		0,01
10	0,04		0,01
11	0,01		0,06
12	0,01		0,06
13	0,01		0,04
14	0,01		0,06
15	0,01		0,07
16	0,01		0,05
17	0,01		0,05
18	0,01		0,10
19	0,01		0,02
20	10/06/2014	0,01	0,06
21	17/06/2014	0,02	0,01
22	17/06/2014	0,02	0,02
23	17/06/2014	0,02	0,02
24	17/06/2014	0,03	0,03
25	17/06/2014	0,02	0,02
26	17/06/2014	0,02	0,03
27	17/06/2014	0,02	0,03
28	17/06/2014	0,02	0,02
29	17/06/2014	0,02	0,03
30	17/06/2014	0,02	0,03
31	24/06/2014	0,03	0,02
32	24/06/2014	0,02	0,01
33	24/06/2014	0,02	0,02
34	24/06/2014	0,02	0,02
35	24/06/2014	0,02	0,02
36	24/06/2014	0,02	0,03
37	24/06/2014	0,02	0,03
38	24/06/2014	0,02	0,05
39	24/06/2014	0,02	0,05
40	24/06/2014	0,02	0,08

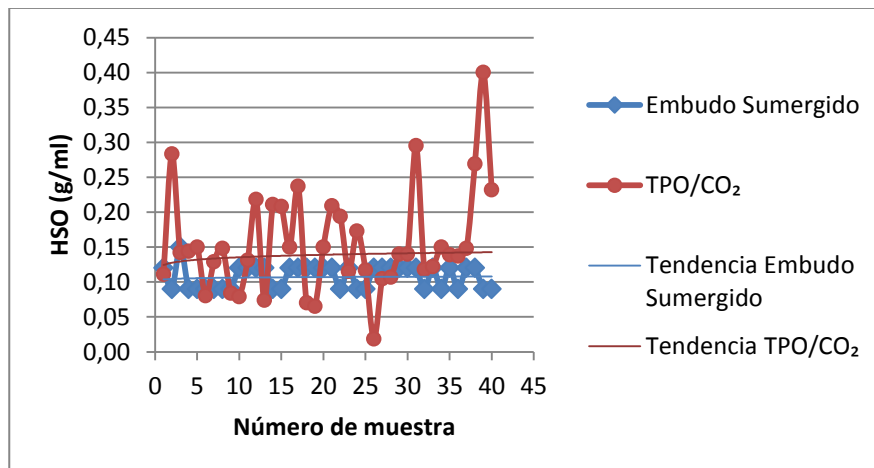
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Determinación de gas carbónico por el método del medidor Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO₂**



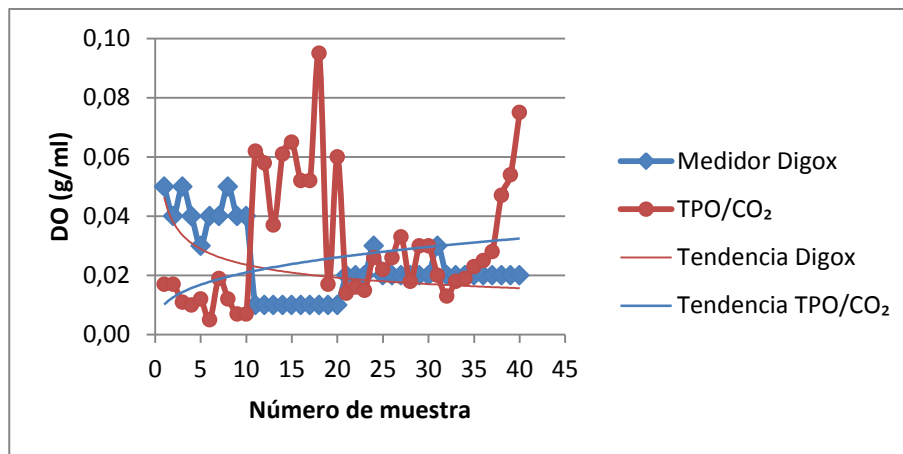
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Determinación de oxígeno en la cabeza del envase por el método del embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO₂**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Determinación de oxígeno disuelto por el método del medidor Digox y el medidor automático TPO/CO₂**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Resultados análisis de varianza

Las siguientes tablas muestran los resultados del análisis estadístico realizado, reunido en una tabla ANOVA para cada parámetro determinado.

Tabla VI. **Análisis de varianza ANOVA para el gas carbónico determinado con los métodos Zahm y Nagel y el medidor automático TPO/CO₂**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	F _{teórico}
Entre grupos	0,04	1	0,04	3,49	3,96
Dentro de los grupos	0,01	78	1,07E-04		
Total	0,05	79	0,04		

Fuente: elaboración propia.

Debido a que $F_{\text{calculado}} \leq F_{\text{teórico}}$ se acepta la hipótesis nula (H_0) con un nivel de significancia del 95 %.

Tabla VII. **Análisis de varianza ANOVA para el oxígeno en la cabeza del envase con los métodos embudo sumergido y el medidor automático TPO/CO₂**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	F _{teórico}
Entre grupos	0,01	1	0,01	1,32	3,96
Dentro de los grupos	0,83	78	0,01		
Total	0,84	79	0,02		

Fuente: elaboración propia.

Debido a que $F_{\text{calculado}} \leq F_{\text{teórico}}$ se acepta la hipótesis nula (H_0) con un nivel de significancia del 95 %.

Tabla VIII. **Análisis de varianza ANOVA para el oxígeno disuelto con los métodos medidor Digox y el medidor automático TPO/CO₂**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	F _{teórico}
Entre grupos	1,04E-03	1	1,04E-03	3,33	3,96
Dentro de los grupos	0,02	78	3,11E-04		
Total	0,03	79	1,35E-03		

Fuente: elaboración propia.

Debido a que $F_{\text{calculado}} \leq F_{\text{teórico}}$ se acepta la hipótesis nula (H_0) con un nivel de significancia del 95 %.

5. INTREPRETACIÓN DE RESULTADOS

La investigación se realizó con el objetivo de evaluar la posibilidad de la sustitución de los métodos utilizados actualmente para medir gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto en la cerveza envasada en vidrio por el método con el uso del medidor automático TPO/CO₂. Cabe recordar que el medidor utilizado en el nuevo método es un equipo que con una misma botella de cerveza realiza las mediciones de los tres parámetros a evaluar. Mientras que con los métodos anteriores se necesita una botella por cada parámetro evaluado.

En las figuras de la 6 a la 8 se puede observar gráficamente los resultados de los tres parámetros determinados; se compara cada método anterior con el método actual.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de la determinación de gas carbónico en las cuarenta muestras analizadas. Se observa que hay diferencias en las mediciones realizadas entre los dos métodos utilizados, sin embargo, se observa también que los resultados tienen la misma tendencia.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para la determinación de oxígeno en la cabeza del envase. Como se puede observar, estos resultados, además de mostrar diferencias entre las mediciones realizadas, presentan tendencias opuestas.

En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos para la determinación de oxígeno disuelto. Los resultados muestran diferencias, sin embargo, la tendencia es la misma.

Para determinar la factibilidad de la sustitución de los métodos anteriores por el método nuevo se respaldó la investigación con un análisis estadístico de los resultados obtenidos. Se realizó un análisis de varianza con la prueba ANOVA que evalúa si existen diferencias significativas entre las medias de los resultados de los métodos comparados. En el análisis estadístico mencionado se calculó primero la varianza de los resultados de las corridas realizadas dentro del mismo método y luego la varianza de los resultados entre el método anterior y el método actual para cada parámetro analizado. Con los resultados de las varianzas dentro de cada método y entre los dos métodos se estimó la varianza poblacional la cual mostró si los resultados obtenidos para ambos métodos provenían de la misma población de resultados.

Los resultados del análisis de varianza se reunieron en las tablas ANOVA, tablas VI a VII, una por cada parámetro evaluado. Debajo de cada tabla se encuentra la conclusión de la prueba. Para los tres parámetros, gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto, el valor calculado de la F de Fisher menor que el valor teórico, por lo cual la hipótesis nula fue aceptada, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las poblaciones o resultados evaluados. Con lo cual se puede decir que es factible la sustitución de los métodos anteriores, medidor Zahm y Nagel, embudo sumergido y medidor Digox por el método actual, utilizando el medidor automático TPO/CO₂ para la determinación de gas carbónico, oxígeno en la cabeza del envase y oxígeno disuelto en la cerveza envasada.

CONCLUSIONES

1. El análisis estadístico validó que es factible la sustitución de los métodos actuales por el método nuevo utilizando el medidor automático TPO/CO₂.
2. Los resultados obtenidos en la determinación de gas carbónico de ambos métodos, graficados en la figura 6, muestran la misma tendencia.
3. Los resultados obtenidos en la determinación de oxígeno en la cabeza del envase de ambos métodos, graficados en la figura 7, muestran la misma tendencia.
4. Los resultados obtenidos en la determinación de oxígeno disuelto de ambos métodos, graficados en la figura 8, muestran tendencias opuestas.
5. No existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos por los tres métodos actuales comparados con los resultados del método nuevo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la investigación utilizando otras presentaciones de cerveza envasada, debido a que esta investigación únicamente se realizó en envase de vidrio de 12 onzas o 350 ml retornable.
2. Realizar la implementación del método con el medidor automático TPO/CO₂ debido a que esta investigación respalda que es factible la sustitución de los métodos actuales por el método propuesto.
3. Realizar la investigación con otras bebidas carbonatadas que utilizan los mismos métodos para medir los parámetros de gas carbónico y oxígeno en la cabeza del envase, considerando la sustitución de los métodos también para estas otras bebidas.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENZANO, Javier. *Nuevo manual de industrias alimentarias*. 3a ed. Madrid, España: Mundi-Prensa Libros, S. A., 1993. 665 p.
2. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 6a ed. México: Thomson, 2005. 809 p.
3. ESTRADA LAU, Yolanda Eugenia. *Revisión de los métodos de análisis físico-químicos de cerveza en el laboratorio de Cervecería Nacional*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1985. 109 p.
4. GUMP, Barry. *Beer and wine production: analysis, characterization and technological advances*. Estados Unidos: ACS, 1993. 455 p.
5. MEBAK. *Métodos de análisis cerveceros*. 2a ed. Alemania: Funke Gerber, 2000. 8 p.
6. METTLER-TOLEDO INTL. INC. *Para obtener una cerveza óptima, es necesario un CO₂ de alta calidad*. [En línea]. <http://gt.mt.com/lac/es/home/supportive_content/specials/eNews_CO2.html>. [Consulta: 27 de abril de 2014].
7. PÁJARO, Jailin. *Mejoramiento de la metodología de preparación de muestras homogéneas y estables para estudios interlaboratorios del método de medición de oxígeno en cerveza*. Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2012. 102 p.

8. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond. *Probabilidad y estadística*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1992. 754 p.
9. WOLFGANG, Kunze. *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlín, Alemania: VLB Berlín, 2006. 1074 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Determinación de oxígeno en la cabeza del envase, método embudo sumergido**



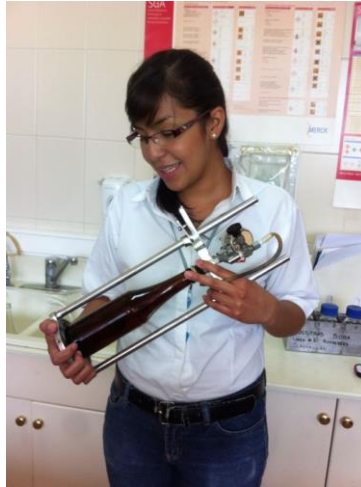
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Determinación de oxígeno disuelto, método Digox**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Determinación de gas carbónico, método Zahm y Nagel**



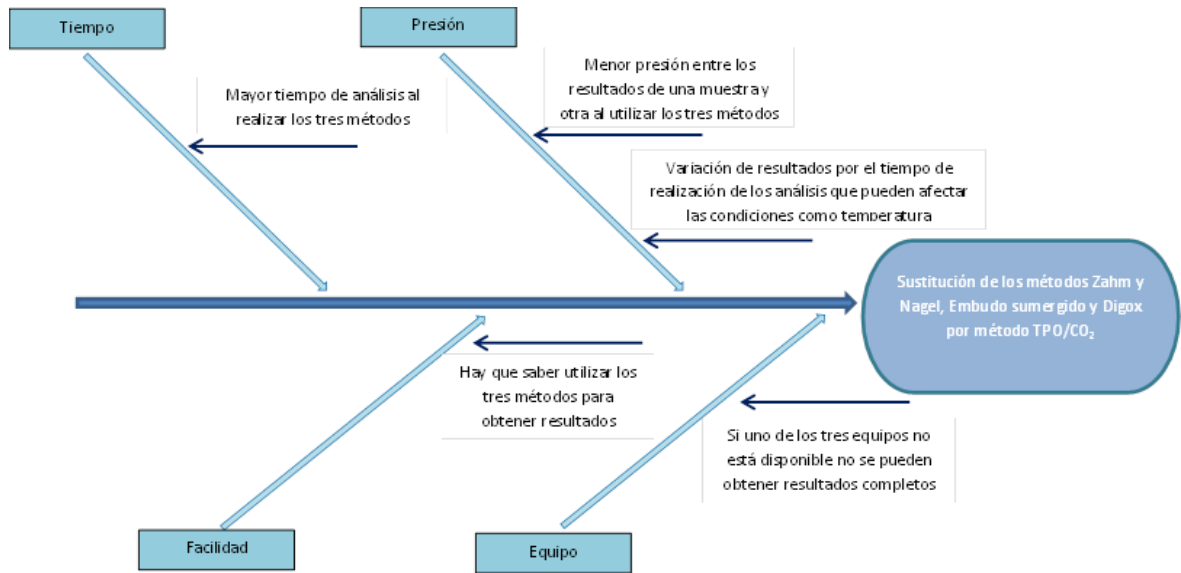
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Determinación de gas carbónico, oxígeno disuelto y oxígeno en la cabeza del envase, método TPO/CO₂**



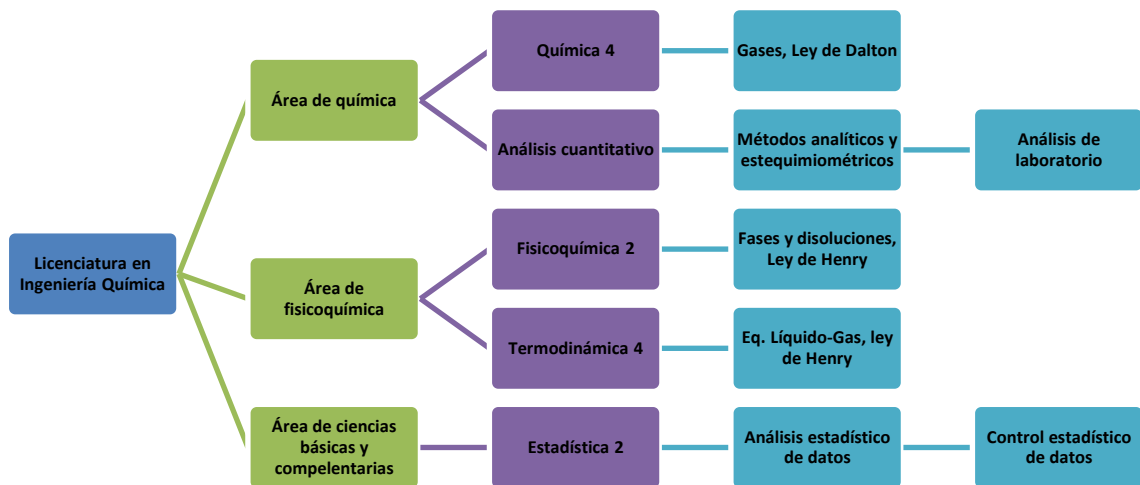
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama Ishikawa del objetivo de la investigación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Procedimiento para la medición de gas carbónico con el método Zahm y Nagel**

- Equipo
 - Equipo para medición de gas carbónico Zahm y Nagel
 - Termómetro

- Procedimiento
 - Verificar que la válvula de alivio esté cerrada.

 - Levantar el cabezal y colocar la muestra que se desee evaluar. (Si la muestra es en lata se coloca la tapa hacia abajo y si es botella se coloca la tapa hacia arriba).

 - Utilizando el fijador del cabezal bajar el aguijón a la altura de la muestra.

 - Con un movimiento firme y seguro, tomar el fijador del cabezal y aplicarle fuerza hacia abajo para poder perforar la muestra con el aguijón del cabezal.

 - Agitar la muestra agarrando el equipo desde la base hasta la parte superior. Esta agitación debe durar 30 segundos como mínimo.

 - Anotar la presión indicada por el manómetro.

 - Colocar el equipo en el lavadero y abrir la válvula de alivio.

Continuación del apéndice 7.

- Levantar el cabezal y retirar la muestra.
- Insertar el termómetro en la perforación de la muestra y esperar que se establezca térmicamente. Anotar la temperatura indicada en el termómetro.
- Con los datos obtenidos, utilizar las tablas y buscar en la columna de la izquierda el valor de la presión, en la columna siguiente el valor de la temperatura; la columna siguiente proporciona el porcentaje en volumen de gas carbónico y la última el porcentaje en masa de gas carbónico.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Procedimiento para la medición de oxígeno disuelto por el método Digox**

- Equipo
 - Equipo de medición Digox 6.1
- Procedimiento
 - Presionar el botón ON/OFF ubicado en el tablero.
 - Si en el menú la condición de la batería está debajo de 30 % conectar al cargador.

Continuación del apéndice 8.

- Conectar la manguera de entrada a la toma de muestra y la de salida ubicarla cerca de un desagüe.
- Abrir la válvula de regulación de flujo del equipo Digox completamente.
- Si la muestra es una lata colocarla boca abajo y si es una botella colocarla boca arriba.
- Poner la muestra en la base de la perforadora.
- Verificar que la válvula de succión de la perforadora esté cerrada.
- Colocar el cabezal a la altura de la muestra.
- Se coloca la mano en el cabezal y ejerciendo fuerza hacia abajo, luego bajar la palanca con fuerza para perforar la muestra.
- Bajar el aguijón de succión y abrir la válvula de succión.
- Dejar que el líquido fluya durante 3 a 5 minutos, para estabilizar térmicamente.
- Regular el flujo con la válvula reguladora del equipo.
- Esperar a que estabilice la lectura y tomar nota de la misma.

Continuación del apéndice 8.

- Terminando el muestreo cerrar completamente la válvula perforadora.
- Drenar los residuos de cerveza al finalizar el uso del equipo.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Procedimiento para la medición de oxígeno en la cabeza del envase con el método del embudo sumergido

- Reactivos
 - Solución de hidróxido de sodio al 25 %
- Equipo
 - Bureta especial Kipphan incluyendo embudo
 - Trípode
 - Olla o cubeta con aprox. 35 cm de altura y 42 cm de diámetro
- Procedimiento
 - Llenar la bureta por sobre el recipiente nivelador con NaOH o KOH.
 - Llenar la cubeta de agua y colocarla debajo de la bureta (antes de iniciar la medición, el agua tiene que estar libre de burbujas).

- Continuación del apéndice 9.
 - Colocar la bureta de tal modo que el embudo quede sumergido aprox. 25 mm en el agua.
 - Retirar el aire que se encuentra entre la superficie del agua y la válvula inferior de la bureta; para esto se lleva el recipiente de nivelación a una posición por debajo del nivel del agua y se abre la válvula inferior. Extraer el aire conduciéndolo hacia la bureta levantando el recipiente de nivelación y abriendo la válvula superior de la bureta.
 - Sostener la botella con la corona, primero hacia abajo en el agua, para retirar fuera del diámetro del embudo, las burbujas de aire atrapadas en las orillas de la corona.
 - Poner atención en latas, ya que no deben quedar burbujas de aire en el fondo externo de la lata, ni en el área de la tapadera.
 - Usar destapadores de mando largo para abrir las botellas y abrir la corona en el lado opuesto a la mano que está abriendo la botella.
 - Tomar la botella de tal modo al abrir, que el destapador esté colocado de la mano hacia abajo, para que el gas que esté saliendo de la botella no pase por la mano sino hacia el embudo.
 - Girar varias veces la lata después de abrirla (abre fácil) para que no quede gas en los espacios vacíos.

Continuación del apéndice 9.

- Al colectarse el gas en la entrada del embudo, abrir cuidadosamente la válvula inferior de la bureta para que el gas pase lentamente, burbujeando, a través de la bureta (bajar el recipiente de nivelación bajo el nivel del agua antes de abrir la válvula de la bureta), cerrar la válvula hasta que el agua alcance la apertura de la válvula inferior de la bureta.
- Leer el contenido de aire tras subir el recipiente de nivelación a la altura del nivel superior del hidróxido.
- Llenar otra vez la bureta al abrir la llave superior y subir el recipiente de nivelación.
- Observaciones:
 - La determinación debe ser realizada inmediatamente después del llenado (esperar colapso de la espuma) porque después ocurre un intercambio de los gases disueltos y se obtienen datos erróneos.
 - El agua debe ser cambiada constantemente, para evitar el crecimiento de microorganismos. Adicionalmente se aconseja el uso de agua caliente, porque contiene menos gases disueltos.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Procedimiento para la medición de gas carbónico, oxígeno disuelto y oxígeno en la cabeza del envase, método TPO/CO₂**

- Reactivos
 - Suministro de CO₂ o N₂.
- Equipo
 - Medidor automático TPO/CO₂, tipo c-TPO, Haffmans trípode
- Procedimiento
 - Encender el equipo TPO/CO₂.
 - Abrir las válvulas de suministro de agua y CO₂ o N₂.
 - Agitar la muestra con un suave movimiento de arriba hacia debajo de 5 a 10 veces.
 - Abrir la cámara del equipo y colocar la muestra sobre el soporte, levantando la barra superior.
 - Ajustar la barra superior al envase. Para las botellas ajustarla en el centro de la corona. Para las latas ajustarla a un lado entre el abre fácil el borde de la tapa.
 - Cerrar la puerta de la cámara del equipo.

Continuación del apéndice 10.

- Llenar la cámara del equipo con una presión aproximada a 3 bar con N₂ o CO₂.
- Seleccionar en el equipo el producto a realizar la medición, lata o botella de vidrio y la cantidad de producto.
- Presionar el botón de inicio de la medición y esperar a que aparezcan los resultados en la pantalla.
- Anotar los resultados obtenidos.

Fuente: elaboración propia.

