

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUR OCCIDENTE
INGENIERÍA EN ALIMENTOS**



**“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE
FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE
CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE
OPERACIÓN”**

**PRESENTADO A LAS AUTORIDADES DEL CENTRO
UNIVERSITARIO DEL SUROCCIDENTE DE LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR:

JULIO HERÁCLITO FLORES LÓPEZ

**EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO:
INGENIERO EN ALIMENTOS
EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO**

MAZATENANGO, MAYO DE 2014.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUR OCCIDENTE
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
MAZATENANGO, SUCHITEPÉQUEZ**



**“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE
FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE
CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE
OPERACIÓN”**

JULIO HERÁCLITO FLORES LÓPEZ

CARNÉ: 200640827

MAZATENANGO, MAYO DE 2014.

COORDINACIÓN ACADÉMICA

Coordinador Académico

Dr. Luis Gregorio San Juan Estrada

Coordinador Carrera Administración de Empresas

MSc. Rafael Armando Fonseca Ralda

Coordinador Área Social Humanista

Lic. José Felipe Martínez Domínguez

Coordinador Carrera Trabajo Social

Dr. Ralfi Obdulio Pappa Santos

Coordinador Carreras de Pedagogía

MSc. Nery Edgar Saquimux Canastuj

Coordinadora Carrera Ingeniería en Alimentos

MSc. Gladys Floriselda Calderón Castilla

Coordinador Carrera Agronomía

MSc. Erick Alexander España Miranda

Encargada Carrera Ciencias Jurídicas y Sociales, Abogado y Notario

Licda. Tania María Cabrera Ovalle

Encargado Carrera Gestión Ambiental Local

MSc. Celso González Morales

CARRERAS PLAN FIN DE SEMANA DEL CUNSUROC

Encargado de las carreras de Pedagogía

Lic. Manuel Antonio Gamboa Gutiérrez

Encargada Carrera Periodista Profesional y Licenciatura en Ciencias de la Comunicación

MSc. Paola Marisol Rabanales

**Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Suroccidente**

Dr. Carlos Estuardo Gálvez Barrios

Rector

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

Secretario General

Miembros del Consejo Directivo del Centro Universitario del Suroccidente

Lic. José Alberto Chuga Escobar

Presidente

Representantes Docentes

Dra. Alba Ruth Maldonado de León

Secretaria

Ing. Agr. Luis Alfredo Tobar Piril

Vocal

Representante Graduado del CUNSUROC

Licda. Mildred Gricelda Hidalgo Mazariegos

Vocal

Representantes Estudiantiles

Br. Cristian Ernesto Castillo Sandoval

Vocal

PEM. Carlos Enrique Jalel de los Santos

Vocal

DEDICATORIA

A DIOS:

Por ser mi fortaleza y guiarme con sabiduría ante las distintas circunstancias de la vida.

A MIS PADRES:

Byrón René Flores (Q.E.P.D.)

Luz Antonieta López

Por el gran coraje y perseverancia que demostraron al pelear contra las adversidades de la vida, logrando que éste triunfo sea posible.

A MI TÍA MARY (Q.E.P.D.):

Como un homenaje a esa persona especial que tanto amor me brindó y que dejó en mí una infinidad de enseñanzas.

A MIS HERMANOS:

Por el apoyo y cariño brindado.

AGRADECIMIENTOS

A: LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA Y EL CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUROCCIDENTE

Por alimentarme el conocimiento para poder abordar con mejor criterio el sendero de la vida.

**A: Licda. Gladys Calderón Castilla
Dr. Marco Antonio Del Cid Flores**

Por la orientación y asesoría brindada durante el desarrollo de la presente investigación.

A: DOCENTES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Por los excelentes conocimientos compartidos.

A: FAMILIARES Y AMIGOS

Por su cariño y apoyo, y además por ser parte fundamental en las páginas de oro de mi vida

ÍNDICE

1. RESUMEN	01
2. ABSTRAC	03
3. INTRODUCCIÓN	05
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	06
5. JUSTIFICACIÓN	07
6. MARCO TEÓRICO	08
6.1. Cerveza	08
6.2. Materia prima utilizada para la cerveza	08
6.2.1. Malta	08
6.2.1.1. Composición de la malta	09
6.2.2. Adjuntos	10
6.2.3. Agua	11
6.2.4. Levadura	11
6.2.5. Lúpulo	11
6.3. Proceso de elaboración de cerveza	11
6.3.1. Entrada de materia prima	11
6.3.2. Molienda de malta	12
6.3.3. Mezcla de malta y grits	12
6.3.4. Filtración del mosto	12
6.3.5. Cocción del mosto	12
6.3.6. Clarificación del mosto	12
6.3.7. Enfriamiento del mosto	13
6.3.8. Fermentación y maduración	13
6.3.9. Filtración de cerveza y llenado de tanques	14
6.4. Filtración	15
6.4.1. Fundamentos de filtración	16
6.4.2. Ley de Darcy	19
6.5. Filtración en el proceso de elaboración de cerveza	20
6.5.1. Filtración del mosto cervecero	20
6.5.2. Objetivos de la filtración del mosto	22
6.6. Tipos de filtros utilizados en la filtración del mosto cervecero	23
6.6.1. Filtros lauter	23
6.6.1.1. Partes de un filtro lauter	24
6.6.2. Filtros prensa o de placas y marcos	26
6.7. Diseños de evaluación	29
6.7.1. Diseño trifactorial interactivo	30
6.7.2. Evaluación o análisis factorial	31

7. OBJETIVOS	35
7.1.General	35
7.2.Específicos	35
8. HIPÓTESIS	36
9. METODOLOGÍA	37
9.1.Recursos Humanos	37
9.2.Recursos Institucionales	37
9.3.Equipo Industrial	37
9.4.Materiales	37
9.5.Métodos	38
9.5.1. Identificación y jerarquización del problema	38
9.5.2. Establecer variantes de operación	39
9.5.3. Aplicación de variantes de operación	39
9.5.4. Evaluación de variantes de operación	40
9.5.4.1. Diseño trifactorial interactivo	40
9.5.4.2. Determinación del rendimiento de filtración	42
9.5.4.3. Análisis factorial	42
9.6.Calendarización de Investigación	43
10.RESULTADOS	44
11.DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
12.CONCLUSIONES	54
13.RECOMENDACIONES	56
14.BIBLIOGRAFÍA	57
15.ANEXOS	59
16.GLOSARIO	61

1. RESUMEN

La cerveza es una bebida carbonatada con sabor amargo, la cual se obtiene como producto de la fermentación anaerobia que llevan a cabo ciertas levaduras (*sacharomyces cereviceae* o *sacharomyces ovarum*) al utilizar como sustrato el mosto de cereales. Siendo los cereales (malta, maíz, arroz, etc.) la materia prima principal para la elaboración de cerveza, ya que en la composición química de los cereales está contenido el extracto, el cual es considerado el componente de mayor importancia para el proceso cervecero. Por lo que la industria cervecera en Guatemala constantemente busca medidas para aprovechar al máximo dicho componente.

Con la finalidad de optimizar la filtración lauter, que es la etapa donde se genera la mayor pérdida de extracto dentro del proceso cervecero, se identificaron las principales causas que originan la disminución en el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto que está contenido en el mosto cervecero; a partir de ello se establecieron tres variantes de operación (cantidad de agua de riego para afrecho, posición de cuchillas y velocidad de succión del mosto filtrado). Para cada variante de operación se establecieron tres modificaciones, las cuales fueron combinadas por medio de un diseño trifactorial interactivo del cual se obtuvo veintisiete tratamientos distintos para aplicar en la filtración. Evaluando el rendimiento de cada tratamiento aplicado se determinó que si se puede optimizar la filtración lauter al aplicar variantes de operación, ya que el rendimiento promedio con base al extracto obtenido previo a la presente investigación era de 93,5% y el tratamiento 2 alcanzó un rendimiento promedio de 97,2%. El tratamiento que presentó este valor de 97,2% de recuperación de extracto fue nominado A₁B₁C₂, cuyas especificaciones fueron 200 hL de agua de riego para afrecho, 40° en la posición de cuchillas y 90 hL/hora en la velocidad de succión del mosto.

Al desarrollar el análisis de varianza para el diseño trifactorial interactivo, pudo constatarse diferencia estadística entre los veintisiete tratamientos, diferencia

estadística interna en el factor A (agua de riego expresada en hectolitros); diferencia estadística en el efecto interactivo Bc referente a posición de las cuchillas y velocidad de succión del mosto, medidos respectivamente como grados sexagesimales y hL/hora. Al medir el efecto interactivo entre las tres variables se estableció que no existe significancia, lo cual, es un indicador que pueden realizar diversas interacciones sin que se modifique de manera significativa, la dispersión entre los valores expresados como rendimiento de recuperación de mosto.

Con base en lo antes expresado cabe indicar que se acepta la hipótesis planteada en la presente investigación, puesto que, se logró un porcentaje de recuperación superior al habitual en el proceso de filtración; de manera específica cabe indicar que el valor de optimización es evidente, ya que se tiene un valor de 97,2% en comparación con el 93,5% que se recupera en el procedimiento tradicional de filtración de la cerveza.

Por lo anterior, se recomienda utilizar el tratamiento $A_1B_1C_2$, con las especificaciones antes mencionadas.

2. ABSTRACT

The beer is a carbonated beverage with a bitter taste, which is obtained as a product of anaerobic fermentation holding certain yeasts (*sacharomyces cereviceae* or *sacharomyces ovarum*) as substrate using wort of cereals. Being cereals (malt, corn, rice, etc.) the main raw material for brewing, since the chemical composition of the grains contained the extract, which is considered the most important component for the brewing process. As the beer industry in Guatemala is constantly seeking measures to maximize the component.

In order to optimize the lauter filtration, which is the stage where the greatest loss of extract in the brewing process is generated, the main causes of decline in filtration yield based on obtaining the extract content is identified in the beer wort, from three variants of this operation were established (amount of irrigation water to bran, position of blades and speed suction filter wort). For each variant of operation three modifications were established, were combined by means of interactive three-factor design which twenty seven different treatments was obtained to apply filtering settled. When evaluating the yield of each treatment applied was determined that if the leak can be optimized by applying variants lauter operation, since the average yield based on the extract obtained prior to the present investigation was 93,5% and it reached treatment 2 an average yield of 97,2%. The treatment provided this value of 97,2% recovery of extract was nominated A₁B₁C₂ whose specifications were 200 hL of irrigation water to bran, 40 ° in the position of blades and 90 hL/hour speed suction of the wort.

In developing the analysis of variance for interactive three-factor design, it could be seen statistical difference between twenty seven treatments, internal statistical difference in the factor A (irrigation water expressed in hectoliters); statistical difference in the interaction effect B_c as position of the blades and speed suction of the wort, measured respectively as sexagesimal degrees and hL / hour. By measuring the interactive effect between the three variables was established that there is no significance, which is an indicator that can perform various interactions

without changing significantly the scatter between the values expressed as a yield of recovery of wort.

Based on the previously stated should be noted that the hypothesis in this research is accepted, since, a higher percentage of recovery was achieved than usual in the filtration process, specifically it should be noted that the value of optimization is evident since it has a value of 97,2% compared with 93,5% which is recovered in the traditional procedure beer filtration.

Therefore, it is recommended the treatment $A_1B_1C_2$ with the above specifications.

3. INTRODUCCIÓN

Los maestros cerveceros consideran al extracto de cereales como la “esencia” de la cerveza. Debido a que éste representa la parte soluble del cereal y está compuesto por una mezcla de hidratos de carbono de cadena larga, almidón principalmente, por lo que constituye la principal fuente de sustrato para la obtención de alcohol y dióxido de carbono (CO₂) al ser transformado por las levaduras cerveceras, además brinda el color y le da el cuerpo característico a la cerveza.

El extracto es extraído del cereal por medio de las siguientes etapas: molienda, maceración, filtración, cocción y clarificación. Al lugar donde se llevan a cabo dichas operaciones en una cervecería se le conoce como “casa de cocimientos”.

La eficiencia con la que se trabaja en cada una de las operaciones de la elaboración del mosto debe ser óptima, por lo que la presente investigación planteó tres variantes de operación para un sistema de filtración lauter, las cuales tienen la finalidad de optimizar el rendimiento en la etapa de filtración de la masa de maceración a partir de la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero. Las variantes presentaron tres modificaciones en su funcionamiento por lo que se utilizó un diseño trifactorial interactivo para evaluar las diversas combinaciones entre las variantes de operación, con la finalidad de determinar el tratamiento con mayor recuperación del extracto de cereales en la filtración lauter, dicha investigación se llevó a cabo entre los meses de Octubre a Diciembre del año 2013, tiempo que permitió evaluar veintisiete diferentes tratamientos cada uno con una réplica.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cereales utilizados como materia prima en el proceso de elaboración de cerveza deben ser ricos en almidón ya que es la sustancia que da origen al extracto, cuyo componente es la suma de todos los azúcares que pueden ser aprovechados por las levaduras durante la fermentación del mosto, es por ello que se considera el componente más importante del cereal utilizado para la elaboración de cerveza, por lo que el aprovechamiento del extracto en el proceso influye de manera directa en el rendimiento que despliega cada etapa del mismo.

En la sala de casa de cocimientos del mosto de una industria cervecera se mide la eficiencia en base al extracto de entrada y salida de cada etapa implicada, tratando de extraer todo el extracto que contenga el cereal utilizado como materia prima. Sin embargo, se ha determinado que la eficiencia ha disminuido en el área de filtración del mosto por la pérdida de extracto que se origina; lo cual genera una baja en el rendimiento de la etapa de filtración del mosto, limita el volumen de producción y además representa una pérdida económica para la empresa.

Aún no se han realizado estudios que ayuden a mejorar la eficiencia en la sala de filtración, motivo por el que se buscó encontrar las causas principales del problema y proporcionar la mejor solución a través del monitoreo y evaluación de las diversas variantes de operación que puedan aplicarse en el filtro. Por lo anterior, se planteó la siguiente interrogante; previo al desarrollo de la investigación.

¿Se optimizará el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero mediante la aplicación de una combinación de variantes de operación?

5. JUSTIFICACIÓN

A nivel industrial, en la producción de cerveza se debe manejar un alto grado de eficiencia en cada operación unitaria que conforma el proceso aprovechando al máximo los recursos con que se cuenta, siendo uno de ellos la calidad de la materia prima utilizada.

La relación entre la cantidad de azúcares fermentables (extracto) entrantes y salientes, contenidos en los cereales que ingresan como materia prima define la eficiencia de ciertas etapas del proceso, como ocurre en el área de filtración de la masa de maceración, puesto que al disminuir el rendimiento de esta etapa afecta en forma directa el volumen de producción.

Actualmente la industria cervecera en Guatemala es afectada por pérdidas importantes que se dan en la casa de cocimientos del mosto cervecero, específicamente en el sistema de filtración, ya que es la etapa que permite la separación entre el sólido agotado denominado afrecho y el mosto elaborado y cargado con el extracto obtenido en la maceración; este proceso se realiza a través de filtros lauter, que trabajan con base en la fuerza gravitacional para pasar el líquido por una precapa de afrecho y luego por un falso fondo conformado por una serie de tamices. Dicha precapa depositada sobre el falso fondo atrapa entre las partículas de afrecho una parte de mosto y al no ser agotado estos sólidos, se origina una pérdida de extracto y por tanto, una disminución en la eficiencia que ocasiona un menor volumen de producción y una baja económica para la industria. Al detectarse una disminución del rendimiento, entre 4% a 5%, es necesario desarrollar e implementar medidas que optimicen la extracción de dicho componente en el sistema de filtrado mediante la aplicación de tres variantes de operación, por lo que el presente estudio es importante para mejorar la eficiencia de la etapa de filtración donde se obtiene el mosto utilizado para la elaboración de cerveza a nivel industrial.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Cerveza

Es una bebida alcohólica, no destilada, de sabor amargo que se fabrica con granos de cebada u otros cereales cuyo almidón es fermentado en agua con levadura y con frecuencia aromatizado con lúpulo, entre otras plantas.

De ella se conocen múltiples variantes con una amplia gama de matices, debidos a las diferentes formas de elaboración y a los ingredientes utilizados. Por lo general presenta un color ambarino con tonos que van del amarillo oro al negro pasando por los marrones rojizos. Se le considera gaseosa (contiene CO₂ disuelto en saturación que se manifiesta en forma de burbujas a la presión ambiente) y suele estar coronada de una espuma más o menos persistente. Su aspecto puede ser cristalino o turbio. Su graduación alcohólica puede alcanzar hasta cerca de 30%, aunque principalmente se encuentra entre los 3% y 9%.

(<http://es.wikipedia.org/wiki/Cerveza>, 2013)

6.2. Materia prima utilizada para la cerveza

A continuación se definen las principales materias primas que se utilizan en la elaboración de cerveza.

6.2.1. Malta

Se obtiene de la cebada mediante un proceso controlado de germinación denominado malteo. Éste se seca y en ocasiones se tuesta, lo cual incide en el color de la cerveza. Sin importar su procedencia (importada o nacional), la malta es sometida a rigurosos análisis para verificar su calidad (Alaniz, 2008).

6.2.1.1. Composición de la malta

La malta es un cereal en etapa temprana de germinación, cuyo proceso de germinación ha sido controlado y detenido mediante la aplicación de secado. Aunque existen maltas de diferentes cereales, el término normalmente se refiere a la malta de cebada. La malta contiene las enzimas necesarias para hidrolizar los hidratos de carbono complejos, proceso necesario para la obtención del mosto (López, 2004; Vincent, 2006).

La malta es una materia prima necesaria para la fabricación de cerveza ya que confiere características de color, sabor y espuma, por lo cual, su elaboración exige controles rigurosos de tiempo y temperatura, el malteado constituye toda una industria que en la mayoría de los casos es independiente de la industria cervecera (Alaniz, 2008).

En la figura 1 se muestra el proceso de malteado:

Figura 1. Proceso de malteado de la cebada



Fuente: www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/7522/maltade.htm.

En general, la malta presenta la composición química media mostrada en la tabla 1; en la cual, los nutrientes mostrados se encuentran expresados en base seca, es decir que no se está incluyendo el contenido de humedad en el cereal que aproximadamente es de 14% (Callejo, 2003).

Tabla 1. Composición química del grano de malta sin humedad.

Nutriente	Contenido (%)
Carbohidratos	70 – 80
Proteínas	11 – 12
Lípidos	1,5 – 3
Minerales	2 – 4
Otros constituyentes	1 – 2

Fuente: Callejo, 2003.

6.2.2. Adjuntos

Son cereales utilizados como complemento a la malta, siendo los principales el arroz y grits (fécula de maíz refinada). Sus propiedades colaboran con la malta y ayudan a la brillantez y estabilidad coloidal de la cerveza (Alaniz, 2008).

El grits es el cereal que más se utiliza como adjunto. En la tabla 2 se describe la composición química del grits en 100 gramos. (<http://www.sni.org.pe%2FHARINA%2DE%2MAIZ.doc.>, 2013)

Tabla 2. Composición química del grits.

Nutriente	Contenido
Agua (g)	12
Proteínas (g)	8,3
Grasas (g)	2,8
Hidratos de carbono (g)	75,7
Fibra (g)	0
Magnesio (mg)	47
Sodio (mg)	52
Potasio (mg)	120
Vitamina B ₁ (mg)	0,4
Vitamina B ₂ (mg)	0,13

Fuente: <https://www.sni.org.pe%2FHARINA%2DE%2MAIZ.doc.>

6.2.3. Agua

El agua es una de las materias primas fundamentales y su calidad es de vital importancia ya que constituye de 90 % al 96 % de la cerveza. Generalmente se extrae de pozos profundos y debe ser apropiada para consumo humano (potable), además de contener algunos minerales que favorecen las reacciones llevadas a cabo en el proceso de elaboración (Alaniz, 2008).

6.2.4. Levadura

La levadura de cerveza es un producto obtenido de la fermentación anaerobia de la cerveza formado, entre otros ingredientes, por hongos tipo *sacharomyces cereviceae* o *sacharomyces ovarum*. Tiene un elevado contenido en proteína de alto valor biológico y digestibilidad (mayor a 85%) y vitaminas del complejo B. Produce el alcohol y gas carbónico, jugando un papel muy importante en la mayor parte del sabor característico de la cerveza (Alaniz, 2008).

6.2.5. Lúpulo

Es una planta perenne tipo enredadera, similar a la vid, de la cual se utiliza en cantidades reducidas extraídas del racimo de flor femenina, lo que otorga el sabor amargo y aroma característicos de la cerveza (Alaniz, 2008).

6.3. Proceso de elaboración de cerveza

A continuación se explican las generalidades de las etapas del proceso de elaboración de cerveza:

6.3.1. Entrada de materia prima

Ingresa la materia prima requerida para la producción de cerveza (ver inciso 6.2. en página 8).

6.3.2. Molienda de malta

Se ingresa la malta a un molino de rodos, la cual debe ser humectada previo a la molienda para evitar originar mucho polvo. En esta etapa se manejan tamices e imanes que eliminan partículas indeseables para el proceso.

6.3.3. Mezcla de malta y grits (maceración)

El grits ingresa molido al centro de procesos y lleva una previa cocción antes de juntarse con la malta molida. En una olla o paila de mezcla sucede la unión de los cereales y aquí también ocurre la maceración, la cual consiste en someter la mezcla a temperaturas determinadas para que las enzimas actúen y logren desdoblar las cadenas de almidón para convertirlas en azúcares de cadena corta que sean solubles.

6.3.4. Filtración del mosto

De la paila de mezcla se bombea hacia la cuba de filtración donde se separa, mediante un filtro lauter (ver inciso 6.6.1. en página 23), el afrecho de la malta restándole turbidez al mosto. El afrecho se vende como subproducto.

6.3.5. Cocción del mosto

Se lleva el mosto a ebullición para eliminar microorganismos no deseados en el mosto, además también se desea concentrar más el mosto. Se utiliza una olla de cocción donde se agrega el lúpulo.

6.3.6. Clarificación del mosto

Se utiliza una olla denominada Whirlpool, la cual funciona con el principio de la fuerza centrífuga para eliminar proteínas coaguladas (trub) y otras partículas formadas por el calor.

6.3.7. Enfriamiento del mosto

El enfriamiento del mosto se realiza en un intercambiador de calor de placas de acero inoxidable. Las conexiones y pasajes son tales que el mosto y el medio refrigerante pasan juntos en un contra flujo turbulento en capas poco profundas entre placas adyacentes.

Los objetivos del enfriamiento son: la reducción de la temperatura del mosto hasta la temperatura de siembra de 9°C a 10°C y la aireación adecuada del mosto para permitir que opere debidamente la levadura. Para lograr el enfriamiento se utiliza agua con una temperatura de 2°C a 5°C. Por intercambio de calor el agua fría se calienta hasta una temperatura de 80°C. Esta agua caliente es enviada a un tanque para ser utilizada en los riegos y en otras áreas del proceso.

Al salir del intercambiador de calor, el mosto pasa por un sistema de aireación (aire estéril para evitar contaminación) para permitir una vigorosa y rápida fermentación por acción de la levadura.

6.3.8. Fermentación y maduración

Las levaduras convierten en extracto de la malta y los otros cereales en gas carbónico (CO₂) y etanol durante la fermentación. La maduración se realiza con la finalidad de estabilizar la cerveza y que la levadura se pueda depositar en el fondo del tanque al haber logrado la fermentación requerida. Esta operación se hace a bajas temperaturas.

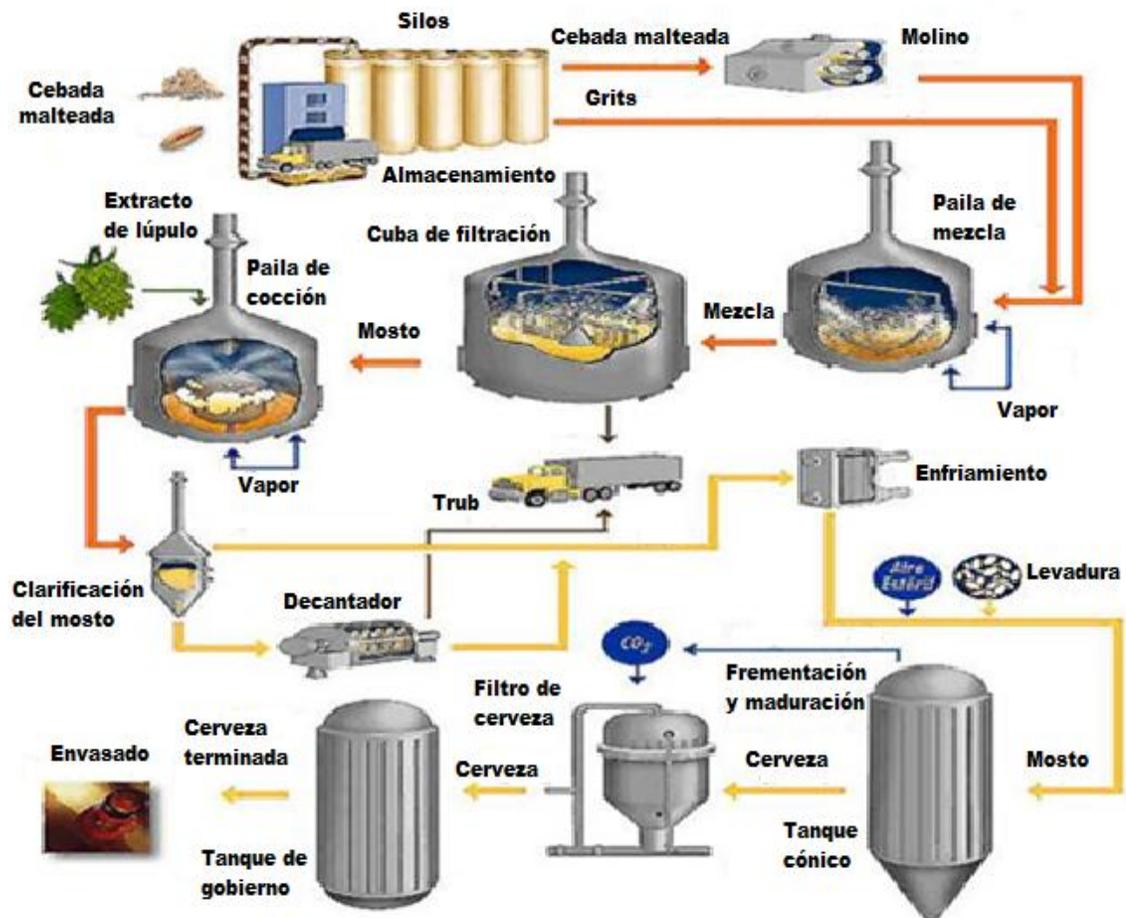
Los tanques fermentadores que por lo general se utilizan, son tanques verticales de fondo cónico, su forma y el sistema de refrigeración que poseen les permite realizar la fermentación y maduración.

6.3.9. Filtración de cerveza y llenado de tanques

En esta etapa se inyecta gas carbónico (CO_2) y se realiza a bajas temperaturas para evitar que el gas se escape fácilmente de la cerveza. Se utilizan varios tipos de coadyuvantes que por afinidad de cargas atraen a los restos de levadura. La cerveza filtrada y cumpliendo con los estándares de calidad física, química, microbiológica y sensorial es enviada a los tanques de gobierno que mantienen la cerveza fría.

El proceso explicado en los incisos anteriores se resume en la siguiente figura:

Figura 2. Proceso de elaboración de cerveza.



Fuente: http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervecerero.jsp

6.4. Filtración

La filtración es una de las principales operaciones utilizadas en la industria para separar partículas sólidas contenidas en una suspensión ya sea líquida o gaseosa (Kunze, 1999). La filtración consiste en hacer pasar una mezcla o suspensión a través de un material poroso o algún otro medio filtrante para lograr que las partículas sólidas queden atrapadas en la superficie de éste o en el interior de los poros, mientras que el líquido lo atraviesa totalmente y es colectado en otro recipiente por separado (McCabe et al., 2007).

Es un procedimiento que tiene gran aplicación en industrias de alimentos y bebidas, como consecuencia de esto, existen una amplia variedad de equipos para filtración así como también medios filtrantes, es decir, uno para cada necesidad. A nivel industrial se puede observar procesos de filtración muy simples que esencialmente son una sencilla acción de tamizado así como también otros que presentan una complejidad más alta, donde es necesario el control de todas las variables y variantes que afecten la operación de filtrado como: velocidad del flujo de entrada, temperatura del líquido y/o gas, presión de filtrado, estabilidad química de la mezcla a filtrar, adición de coadyuvantes, etc (Callejo, 2003).

La composición de sólidos en la mezcla y el tamaño de partícula que estos tengan son dos factores muy importantes a considerar al momento de diseñar un proceso de filtrado. La cantidad de sólidos contenidos en la mezcla puede ser desde unas diminutas trazas de algunas sustancias hasta altos porcentajes de sólidos, de igual manera el tamaño de partícula puede oscilar desde micras hasta varios milímetros. De los aspectos mencionados depende la selección del sistema de filtros, uso de colaboradores de filtración, material y diámetro de orificio del conducto filtrante (Callejo, 2003).

6.4.1. Fundamentos de la filtración

Según Darcy H., el fenómeno de filtración se desarrolla siguiendo alguno de los mecanismos que se mencionan a continuación o por una combinación de los mismos.

- a) **Retención superficial:** En este caso, las partículas más grandes que los poros quedan atrapadas en la superficie del filtro formando lo que se denomina una torta.

- b) **Retención profunda:** Se produce cuando las partículas de menor tamaño al diámetro de los poros del medio filtrante, son retenidas a lo largo de los canales capilares del mismo. Estos canales en ocasiones son de mucho mayor tamaño que las partículas por separar y en el transcurso de la filtración van reduciendo su diámetro lo cual disminuye el flujo del líquido.

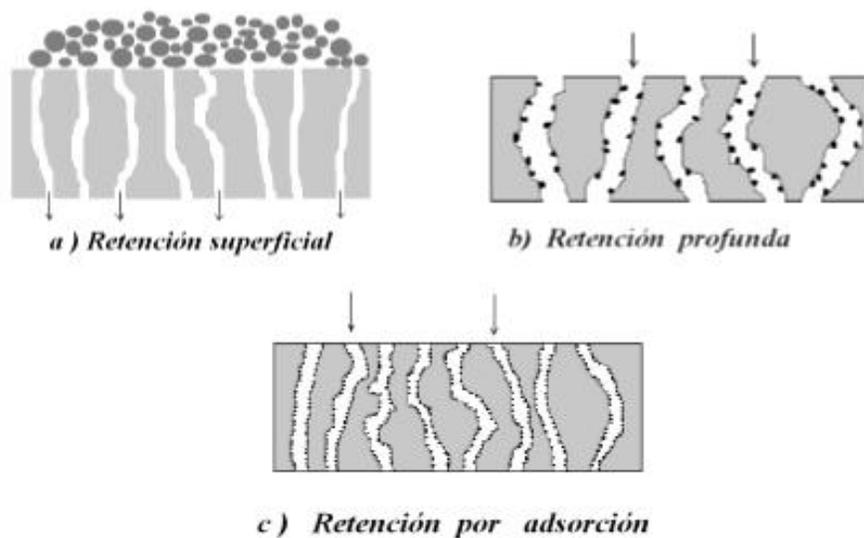
- c) **Retención por adsorción:** Es la retención de partículas finas en el interior de los canales del medio filtrante debida a la atracción electrostática entre las moléculas que constituyen el filtro y las moléculas de las partículas mezcladas con el fluido. Por lo general el tamaño de los poros del filtro es mayor que el tamaño de las partículas. También sustancias disueltas en un líquido pueden ser adsorbidas dentro de los conductos de un material filtrante como consecuencia de su naturaleza eléctrica, logrando con esto su separación. Es conocido que algunas bacterias y levaduras cuya carga es negativa son retenidas por filtros que contienen fibras de cargas positivas (Cadena, 2008).

Cuando una solución se hace pasar por un equipo filtrante, al inicio de esta operación algunas partículas pequeñas quedan atrapadas en el interior de los poros y otras partículas mayores tapan algunos de

ellos, depositándose también estas últimas sobre la superficie del medio filtrante y al acumularse constituyen una torta de espesor considerable, al continuar la filtración, las partículas que forman la cama se van comprimiendo dándose a la vez la formación de canales capilares de forma y tamaño irregular por donde el líquido puede transitar. Después de la etapa inicial la retención de partículas es realizada principalmente por la torta filtrante y no por el filtro (Cadena, 2008).

La figura 3 ilustra los tres mecanismos de filtración explicados.

Figura 3. Mecanismos de filtración.



Fuente: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/CADENA%20RIOS.pdf>

Para lograr que un líquido pase a través de un material filtrante, se requiere de una presión que lo impulse y logre superar la resistencia que oponen las partículas del material poroso, más la resistencia de las partículas colocadas en la superficie de entrada del filtro, que forman lo que se denomina torta filtrante. Debido a esto hay un gradiente de presión entre la superficie de la torta filtrante y la

superficie de salida del filtro, cuya magnitud depende de la presión inicial, tamaño del poro, espesor del medio filtrante y viscosidad del líquido. La caída de la presión se explica por la pérdida de energía cinética que sufre el fluido por el rozamiento con las partículas que forman los canales capilares de la torta y del filtro. Estos canales son de forma irregular, intrincados, de diferente longitud y tamaño, muy interconectados entre sí (Cadena, 2008).

Hagen-Poiseuille estableció una ecuación para el cálculo de la caída de presión al pasar un líquido por un medio filtrante, considerando los canales capilares rectos y con flujo laminar. A partir de dicho trabajo otros científicos han introducido factores de corrección o constantes empíricas a dicha ecuación, con el fin de aplicarla al cálculo del flujo en canales capilares irregulares, llegando a la siguiente expresión:

$$V / t = A (P_1 - P_2) / \mu (R_1 + R_2) L$$

Donde:

V = Volumen del líquido filtrado

t = Tiempo de filtrado

A = Área total de la superficie de filtración

P₁ = Presión sobre la torta filtrante

P₂ = Presión en la descarga del medio filtrante

μ = Viscosidad del líquido a filtrar

R₁ = Resistencia del filtro

R₂ = Resistencia de la torta

L = Espesor de la torta

La fórmula matemática anterior indica que el caudal de filtración depende del descenso de presión entre los puntos de entrada y

salida del filtro incluyendo la torta filtrante, de las resistencias de la torta y el filtro, de la viscosidad y del espesor de la torta.

Entre los científicos dedicados al estudio del flujo de líquidos a través de materiales porosos se encuentra Henry Darcy, quien emitió la ley que lleva su nombre (Cadena, 2008).

6.4.2. Ley de Darcy

El término “permeabilidad del poro de los medios filtrantes” fue implantado y llevado a investigación por Darcy, considerando que la capacidad de filtración es una función directa de un factor de permeabilidad del coadyuvante utilizado en la filtración. Existen en la actualidad metodologías de laboratorio para calcular la permeabilidad de los distintos coadyuvante (<http://web.usual.es/xavisan/hidro>, 2013).

La permeabilidad se expresa en unidades denominadas Darcies. Un Darcy se define como: la permeabilidad que tiene un medio filtrante cuando pasa por él un líquido con una viscosidad de 1 centipoise y el flujo es de 1 mL/s. Siendo la superficie de 1 cm², el espesor de 1 cm y el gradiente de presión de 1 Kg/cm².

La ecuación de Darcy es la siguiente:

$$V = \rho [A (P_1 - P_2)] / (\mu) (L)$$

Donde:

V = Volumen del líquido filtrado

ρ = Factor de porosidad

A = Área total de la superficie de filtración

P₁ = Presión sobre la torta filtrante

P_2 = Presión en la descarga del medio filtrante

μ = Viscosidad del líquido a filtrar

L = Espesor de la torta

Las ecuaciones mencionadas con anterioridad, son de utilidad para efectuar e interpretar pruebas a nivel de laboratorio, encaminadas a lograr la determinación de las mejores condiciones para llevar a cabo una filtración o para observar la variación en el flujo al cambiar algunas de las condiciones de forma intencional. Sin embargo, para el diseño de equipos de filtración a nivel industrial el líquido en particular a filtrar deberá tener siempre las mismas condiciones (presión, temperatura, porcentaje de sólidos, velocidad de alimentación, etc.) de lo contrario las consideraciones teóricas de Darcy quedarían rebasadas en su totalidad.

(<http://web.usual.es/xavisan/hidro>, 2013)

6.5. Filtración en el proceso de elaboración de cerveza

Entre las aplicaciones de la operación de filtración está la elaboración de cerveza. Por lo general, la filtración es fundamental en dos etapas del proceso de elaboración de cerveza, surtiendo gran efecto en la calidad de la misma. Las etapas son: 1) filtración del mosto cervecero y 2) clarificación de la cerveza (ver inciso 6.3.9 en página 14).

6.5.1. Filtración del mosto cervecero

El mosto es el extracto líquido obtenido en el proceso de maceración donde se trata una mezcla de agua malta y otros cereales adjuntos (maíz, arroz, sorgo, etc.), sometiéndola a ciclos de calentamiento y pausas a diferentes temperaturas, con el fin de disolver las sustancias solubles presentes en los granos por medio de la acción enzimática y transformar la estructura química de otras sustancias.

Ejemplo de esto es la degradación de los almidones convirtiéndolos en azúcares fermentables solubles por medio de las enzimas α -amilasa y β -amilasa. El agua utilizada en la maceración absorbe todas las sustancias solubles provenientes de la malta y de los adjuntos, ya enriquecida constituye lo que se conoce como “mosto dulce”. Este mosto contiene aminoácidos y péptidos para nutrición de la levadura, proteínas para la espuma, carbohidratos fermentables para el alcohol y carbohidratos no fermentables que le dan el cuerpo y sabor, o sea, su composición es lo que determina las propiedades que tendrá la cerveza como producto terminado.

(http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervezero.jsp)

El mosto tiene aspecto de un líquido de color que va desde amarillo blanquecino hasta una tonalidad oscura, dependiendo de las maltas utilizadas en su elaboración, que le imparte el característico sabor dulce y a malta. Contiene también partículas sólidas en suspensión que son partes insolubles de los granos, donde la mayor proporción es la cascarilla de la malta. El mosto debe ser filtrado para separar los sólidos presentes en él, ya que la presencia de proteínas y carbohidratos insolubles produce turbidez y problemas de estabilidad coloidal en la cerveza. Los sólidos separados del mosto reciben el nombre de afrecho cervecero, siendo un subproducto de la filtración, que generalmente se vende seco o húmedo para la producción de alimento destinado al ganado.

(http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervezero.jsp)

La separación del mosto es llevada a cabo a una temperatura entre 75°C y 78°C, porque en este rango, la viscosidad del mosto permite hacerla más rápido y con buena eficiencia. La eficiencia de la separación se mide por la relación entre el volumen del mosto filtrado, el grado plato y el peso de la malta más los adjuntos

involucrados en la fórmula; el agua empleada para enjuagar el lecho filtrante (formado por la cascarilla y el mosto) y extraer de ellos la mayor cantidad del mosto residual, es acidulada para lograr un pH de 5,6 a 6,5 ya que entre más alcalina sea el agua, disolverá sustancias no deseables de la cascarilla de la malta, lo cual tendrá efectos negativos en el sabor y en el enturbiamiento a baja temperatura (Hardwick, 1995).

El tamaño de las partículas de malta y de los ingredientes utilizados en la maceración influyen de manera importante en la velocidad de filtración del mosto, sólidos muy finos permiten una mayor acción enzimática sobre los almidones, en consecuencia un aprovechamiento mejor de los mismos, pero la velocidad de filtración se hace muy lenta. Se debe determinar un tamaño de partícula que permita un buen aprovechamiento de los constituyentes de los granos, pero también una velocidad de filtración rápida y costeable (Hardwick, 1995). Los equipos con los que en la actualidad se efectúa la separación del mosto, son los filtros lauter y los filtros prensa. Ambos tienen características de funcionamiento que los hacen apropiados para procesos de fabricación de cerveza específicos en distintas plantas.

(http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervezero.jsp)

6.5.2. Objetivos de la filtración del mosto

Los principales objetivos que se persiguen al filtrar el mosto cervecero, previo a la fermentación, son:

- a) Clarificar el mosto.
- b) Separar el afrecho.
- c) Separar una porción de proteínas contenidas en el mosto.
- d) Extraer el mayor porcentaje posible de extracto de los cereales utilizados.
- e) Preparar el mosto para la cocción.

6.6. Tipos de filtros utilizados en la filtración del mosto cervecero

6.6.1. Filtros lauter

El funcionamiento de este tipo de filtros se puede dividir en tres etapas, que son las siguientes:

- 1) Sedimentación y separación del afrecho del primer mosto.
- 2) Remoción y clarificación del primer mosto, utilizando el mismo lecho filtrante formado por la cascarilla de la malta como ayuda al filtro.
- 3) Lavado del afrecho utilizando rociadores de agua para extraer todo el mosto líquido mezclado con la capa de sólidos.

Los filtros lauter son recipientes cilíndricos de acero inoxidable. En el fondo tienen una lámina o placa ranurada que se conoce como falso fondo, este sirve de soporte a las partículas de afrecho, formándose por acumulación de las mismas una cama filtrante cuyo espesor típicamente es de 10" a 14". La alimentación de la suspensión al filtro lauter debe ser lo más suave posible, sin turbulencias, para evitar la oxidación del mosto. En los primeros diez minutos de la filtración el mosto obtenido es turbio debido a que la cama filtrante al principio es muy delgada, por lo que resulta necesario recircularlo hasta lograr la claridad y brillantez especificada.

El mosto clarificado pasa por las ranuras del falso fondo y es captado en el fondo real del recipiente. En este último existen salidas y ductos que llevan el mosto a un depósito llamado tanque buffer. El parámetro de control que más interesa en este proceso, es la velocidad con la que se incrementa el diferencial de presión a través

de la cama. En la parte superior el recipiente es cerrado y tiene la forma de un domo para retener los vapores y disminuir las pérdidas de calor, en la parte central hay una chimenea para conducir los vapores de agua a la atmósfera. Para ayudar a la transferencia y distribución de la suspensión en el interior del filtro lauter, se cuenta con unos brazos giratorios con hojas verticales que nivelan la cama filtrante, facilitando así la filtración del líquido (Kunze, 1999).

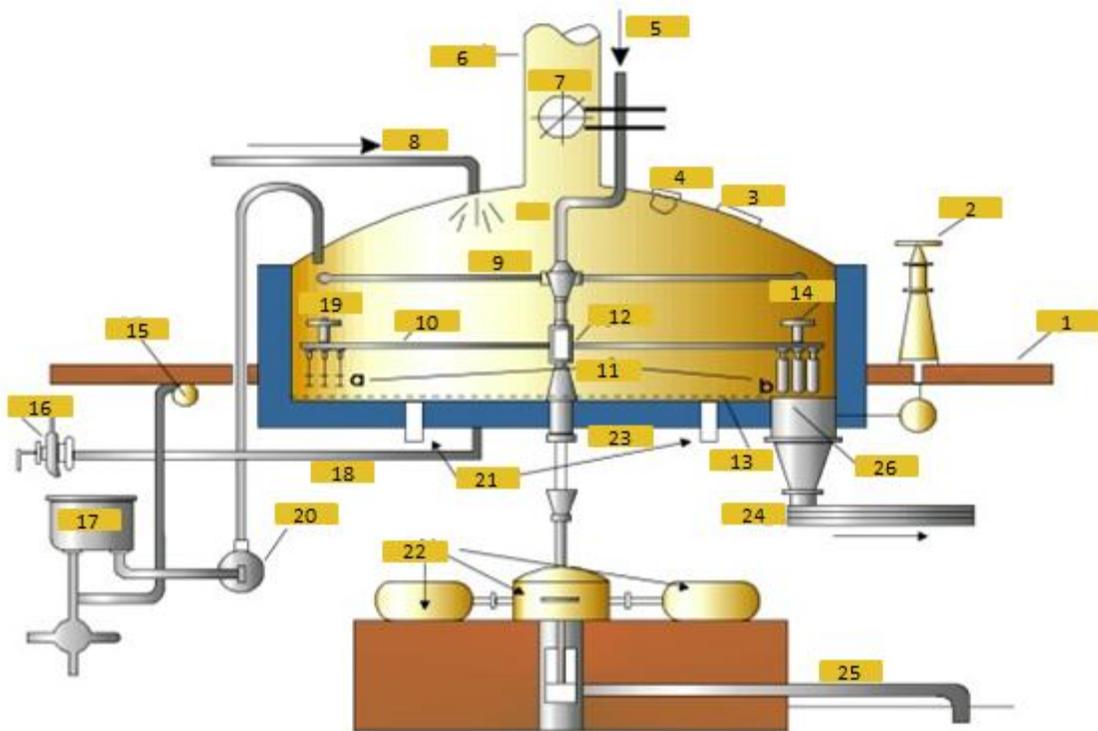
El lavado del afrecho se hace mediante un sistema de rociadores colocados en la parte superior del equipo, del cual sale agua caliente para lavar y recuperar todo el mosto residual contenido en la cama filtrante. Una vez que termina la filtración el afrecho es desalojado del falso fondo y colectado en un recipiente para su posterior disposición, el agua residual es enviada a un sistema de drenajes (Kunze, 1999).

Del filtro lauter se obtiene un mosto claro y brillante, además los ciclos deben ser económicos y con buena eficiencia en la recuperación del mosto, aunque la operación del mismo requiere muchos cuidados y mantenimiento constante, por lo que actualmente la mayoría son automáticos (Broderick, 2002).

6.6.1.1. Partes de un filtro lauter

Se realiza un mayor énfasis en este tipo de filtro porque es el que se utilizará en la investigación, por lo que en la figura 4 se muestra el sistema de filtración lauter indicando las partes del mismo y en la figura 5 se ilustra el filtro desde una vista externa.

Figura 4. Partes de un sistema de filtración.



Fuente: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313301/313301_ee.htm#Filtracion

- 1) Piso.
- 2) Volante para la compuerta de salida de afrecho.
- 3) Ventana de observación.
- 4) Lámpara.
- 5) Entrada de agua de riego de afrecho.
- 6) Chimenea.
- 7) Compuerta de la chimenea.
- 8) Entrada de la masa proveniente del macerador.
- 9) Hélice que distribuye uniformemente la masa en la olla.
- 10) Molinete.
- 11) Eje transversal del dispositivo para las cuchillas.
- 12) Eje vertical de las cuchillas.
- 13) Falso fondo (placa filtrante).
- 14) Cuchillas en posición para empujar el afrecho.
- 15) Tubo colector para visores del mosto.

- 16) Válvula de salida del mosto.
- 17) Tanque buffer (recepción del mosto).
- 18) Salida del mosto hacia la olla de cocción.
- 19) Cuchillas en posición de corte.
- 20) Instalación de recirculación de mosto turbio.
- 21) Fondo verdadero.
- 22) Reductor y motor de las velocidades de las cuchillas.
- 23) Forro de aislamiento.
- 24) Tornillo sinfín para empujar el afrecho hacia un tanque.
- 25) Dispositivo hidráulico para subir y bajar cuchillas.
- 26) Salida de afrecho.

Figura 5. Vista externa de un filtro lauter.



Fuente: http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cerveceros.jsp

6.6.2. Filtros prensa o de placas y marcos

El filtro tipo “placas y marcos” usado también para la separación del mosto, consiste en un grupo de placas o bastidores sobre las cuales

están montadas telas filtrantes y de otro grupo de armazones abiertos denominados “marcos” cuya función es proporcionar espacios vacíos para recibir la suspensión a filtrar y la captación de sólidos. Ambos están colocados de manera intercalada sobre una estructura metálica, se ensamblan mediante una prensa hidráulica y quedan sellados para evitar alguna fuga de mosto durante la filtración.

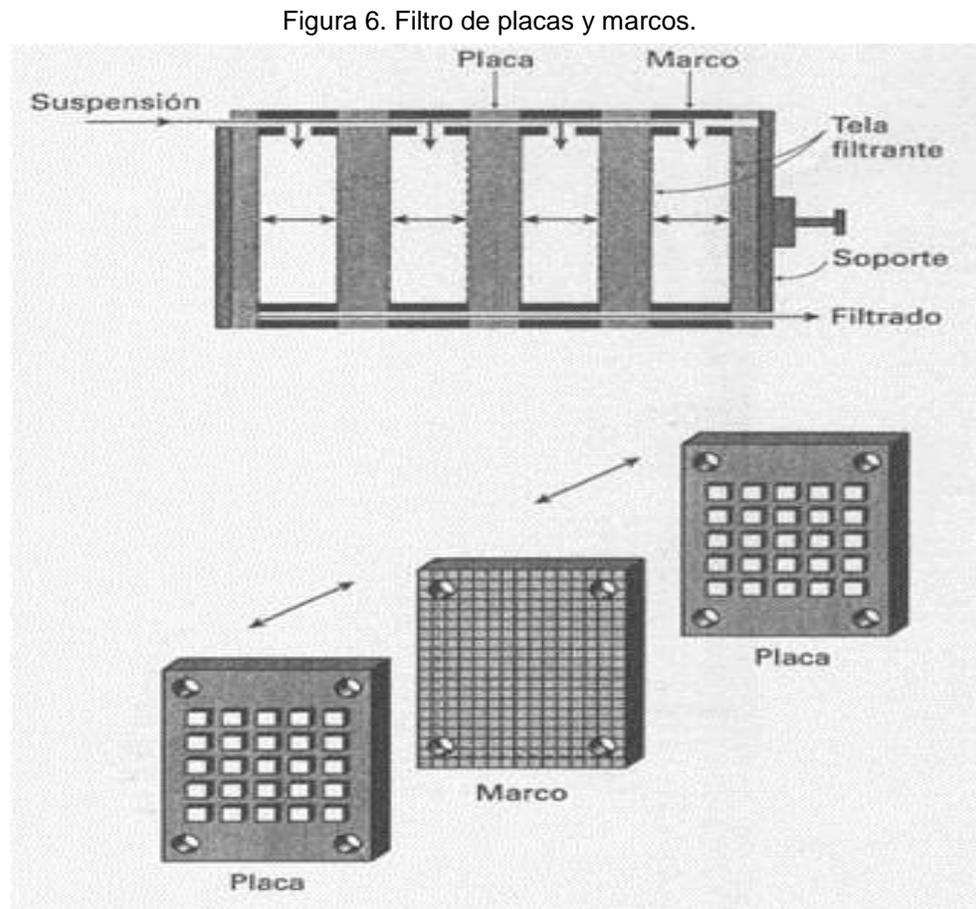
La introducción de la suspensión se hace por medio de bombeo, dirigiéndola hacia un ducto situado en un extremo y a todo lo largo del conjunto de placas y marcos, después por ramificaciones conectadas al mismo, la suspensión llega a cada uno de los marcos. Los sólidos son retenidos en la tela filtrante de las placas, el tamaño de abertura de la tela debe seleccionarse cuidadosamente porque tiene gran influencia en la eficiencia del proceso. El líquido pasa través de la tela filtrante y sale por los canales de desalojo de cada placa. (http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervezero.jsp)

La filtración se realiza de forma continua hasta que ya no salga líquido por la descarga, en este momento también se observa una elevación brusca de la presión, lo que indica que los marcos están llenos de bagazo. Enseguida se hace pasar agua caliente a una temperatura determinada para lavar la cama de sólidos, luego el contenido de humedad del afrecho puede ser disminuido inyectando aire. Para finalizar, el afrecho se extrae del medio filtrante y se almacena en un depósito.

El espesor de la cama de afrecho varía de dos a tres pulgadas, resultado del uso de malta de molienda más fina. Con malta más fina se tiene un aprovechamiento mayor de los almidones, lo que viene a dar un mosto con rendimiento (Broderick, 2002).

La principal ventaja del filtro prensa es su corto ciclo de operación entre 1,5 a 2 horas, esto permite hacer más cocimientos por día, lo cual da mayor versatilidad a la producción (Broderick, 2002).

La figura 6 muestra el filtro de placas y marcos.



Fuente:http://ocwus.us.es/arquitectura/operacionesbasicas/tema6/pagina_08.htm.

6.7. Diseños de evaluación

Existe una gran variedad de diseños de evaluación que definen la certeza de estudios de investigación, sin embargo, solo se describen los de interés para la naturaleza de la investigación.

6.7.1. Diseño trifactorial interactivo

Los modelos trifactoriales interactivos son aquellos en los que se estudia en forma simultánea tres factores, y donde los tratamientos se forman por la combinación de los diferentes niveles de cada uno de los factores.

Los experimentos factoriales constituyen un diseño de tratamiento, es decir un arreglo de tratamiento en una disposición geométrica de ellos ya sea en el espacio o en el tiempo y que deben ser llevados en cualquiera de los diseños experimentales clásicos tal como el diseño completamente al azar o el diseño en cuadro latino por ejemplo, son empleados en todos los campos de la investigación, ya que resultan muy útiles en investigaciones exploratorias en las que poco se sabe de muchos factores, muy frecuentemente usados en investigaciones comparativas.

(<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r77661.PDF>)

Así, por ejemplo, si el diseño experimental es bloques al azar, el modelo es:

$$y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + Q_{ij}$$

Respuesta = media general + efecto de tratamiento + efecto de bloque + error

Si se trata de un diseño factorial, los tratamientos se forman combinando los niveles de los factores en estudio, de manera que el efecto del tratamiento T_i se considera a su vez compuesto de los efectos de los factores y sus interacciones.

La necesidad de estudiar conjuntamente varios factores obedece a la posibilidad de que el efecto de un factor cambie según los niveles de

otros factores, esto es, que los factores interactúen, o exista interacción. También se utilizan los arreglos factoriales cuando se quiere optimizar la respuesta o variable dependiente, esto es, se quiere encontrar la combinación de niveles de los factores que producen un valor óptimo de la variable dependiente (superficie de respuesta).

Las ventajas de los modelos factoriales son:

- Permiten estudiar los efectos principales, efectos de interacción de factores, efectos simples y efectos cruzados.
- Todas las unidades experimentales intervienen en la determinación de los efectos principales y de los efectos de interacción de los factores, por lo que el número de repeticiones es elevado para estos casos.
- El número de grados de libertad para el error experimental es alto, comparándolo con los grados de libertad de los experimentos simples de los mismos factores, lo que contribuye a disminuir la varianza del error experimental, aumentando por este motivo la precisión del experimento. (<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r77661.PDF>)

Los tipos de factores que existen son de dos naturalezas distintas y se dividen de la siguiente manera:

- **Factores cuantitativos**
Son aquellos factores cuyos niveles son cantidades numéricas.

- **Factores cualitativos**

Son aquellos factores cuyos niveles son procedimientos, o cualidades o atributos.

En la información de factoriales, se debe tener presente lo siguiente:

- a) Qué factores deben incluirse.
- b) Qué factores son fijos y qué factores son al azar.
- c) Cuántos niveles se tiene por factor.
- d) Si son factores cuantitativos, cuál debe ser el espaciamiento entre los niveles del factor.

(<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r77661.PDF>)

6.7.2. Evaluación o análisis factorial

Para realizar un análisis factorial se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Determinar los datos a evaluar (X), individualmente, para los distintos tratamientos establecidos por el diseño factorial.
- b) Calcular el promedio de los datos obtenidos con la experimentación, esto depende del número de pruebas (n) que se realice para cada tratamiento.
- c) Para un diseño trifactorial interactivo, se debe elegir una de las tres variables o variantes para utilizarla como guía para las filas de la tabla de sumatorias. Las otras dos variantes interaccionadas entre sí guiarán las columnas con la finalidad de interaccionar las tres variantes en la tabla, en donde se utilizarán únicamente los promedios de las pruebas realizadas.
- d) Realizar las sumatorias en cada fila (X_i).
- e) Realizar las sumatorias en cada columna (X_j).

f) Calcular el factor de corrección.

$$FC = \frac{\sum(X_i)^2}{\text{No. de tratamientos}}$$

g) Calcular los grados de libertad (GL) utilizando las fórmulas de la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de grados de libertad en análisis factorial.

Causas	Grados de libertad
Tratamientos	$ab - 1$
Factor A	$b - 1$
Interacción B _c	$a - 1$
Interacción AB _c	$(a - 1)(b - 1)$
Error	$ab(n - 1)$
Total	$abn - 1$

Fuente: Reyes Castañeda, P.

Donde:

a = número columnas

b = número de filas

c = número de pruebas

h) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) total.

$$SC_{\text{Total}} = \sum X_{ij}^2 - FC$$

i) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) de tratamientos.

$$SC_{\text{Tratamientos}} = \left(\frac{\sum X^2}{n} \right) - FC$$

j) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) para el factor A.

$$SC_A = \left(\frac{\sum X_i^2}{a} \right) - FC$$

- k) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) para la interacción de B_c.

$$SC_{B_c} = (\sum X_j^2 / b) - FC$$

- l) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) para la interacción AB_c.

$$SC_{AB_c} = SC_{Tratamientos} - SC_A - SC_{B_c}$$

- m) Calcular la sumatoria de cuadrados (SC) para el error.

$$SC_{Error} = SC_{Total} - SC_{Tratamientos}$$

- n) Calcular los cuadrados medios (C_μ) para tratamientos, factor A, interacción B_c, interacción AB_c y error.

$$C_{\mu} = SC / GL$$

- o) Determinar el factor calculado (fc) para tratamientos, factor A, interacción B_c e interacción AB_c.

$$fc = C_{\mu} / C_{\mu \text{ Error}}$$

Por ejemplo, para determinar el factor calculado de tratamientos se utilizaría la siguiente fórmula:

$$fc_{\text{ Tratamientos}} = C_{\mu \text{ Tratamientos}} / C_{\mu \text{ Error}}$$

- p) Utilizar las tablas de grados de libertad (anexo 2), para determinar el factor tabulado al combinar los grados de

libertad y el nivel de significancia con el que se quieran obtener los resultados de la investigación.

- q) Realizar las conclusiones del análisis factorial por medio del siguiente criterio:

Si $f_c > f_t$, entonces, existe diferencia estadística significativa

Si $f_c < f_t$, entonces, la diferencia estadística no es significativa

(Reyes, 1980).

7. OBJETIVOS

7.1. General

7.1.1. Optimizar el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero mediante la aplicación de una combinación de variantes de operación.

7.2. Específicos

7.2.1. Determinar las variantes de operación que optimicen el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero.

7.2.2. Establecer los tratamientos que combinen las modificaciones de cada variante de operación mediante un diseño trifactorial interactivo.

7.2.3. Determinar el rendimiento con base en el extracto obtenido de los tratamientos aplicados en la etapa de filtración.

7.2.4. Comparar el tratamiento de filtración actual con el tratamiento que presente mejor rendimiento al aplicar las variantes de operación y desarrollar un análisis descriptivo.

7.2.5. Establecer mediante un análisis factorial con arreglo completamente al azar si existe diferencia estadística entre las variantes de operación sujetas a evaluación (cantidad de agua de riego para afrecho, posición de cuchillas y velocidad de succión del mosto filtrado).

8. HIPÓTESIS

Se optimizará el rendimiento de la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero, al aplicar una combinación de variantes de operación en dicha etapa.

9. METODOLOGÍA

9.1. Recursos humanos

- T.U. Julio Heráclito Flores López
- Q.B. Gladys Calderón Castilla (Asesor Principal)
- Dr. Marco Antonio Del Cid Flores (Asesor Adjunto)
- Personal de Casa de Cocimientos de una Industria Cervecera Nacional.
- Personal del Laboratorio de Aseguramiento de Calidad de una Industria Cervecera Nacional.

9.2. Recursos institucionales

- Casa de Cocimientos de una Industria Cervecera Nacional.
- Laboratorio de Aseguramiento de Calidad de una Industria Cervecera Nacional.

9.3. Equipo industrial

- Filtro lauter
- Macerador
- Molino de rodos
- Olla de cocción de mosto
- Clarificador

9.4. Materiales

- Potenciómetro
- Hidrómetro
- Beacker de 100 mL y de 500 mL
- Determinador de extractos
- Balanza analítica
- Medidores de volumen
- Soluciones certificadas para calibración de potenciómetro

9.5. Métodos

9.5.1. Identificación y jerarquización del problema

A partir de un estudio cualitativo se identificaron y jerarquizaron los aspectos físicos y/o químicos que afectan la eficiencia de la operación de filtración del mosto en una industria cervecera. Dividiéndose en las siguientes actividades:

- **Observación del funcionamiento de un filtro lauter**

Con la finalidad de profundizar en el conocimiento sobre el funcionamiento de un filtro lauter. Siendo los siguientes los principales aspectos observados:

- a) Partes del filtro lauter (figura 4, página 25).
- b) Parámetros de filtración: volumen de entrada, velocidad de flujo, velocidad de filtración, temperatura, presión, velocidad de succión del mosto filtrado, volumen de mosto obtenido, turbidez del mosto, tiempo de filtración, cantidad de agua de riego para afrecho y posición de cuchillas (ver anexo 1, página 59).

- **Entrenamiento en la programación del sistema de filtración**

Técnicos especializados en el funcionamiento y programación del sistema de filtración lauter de una industria cervecera Nacional, brindaron la asesoría necesaria para identificar las causas de la pérdida de extracto de cereales en la etapa de filtración (entre 4% a 5% con respecto al extracto entrante al filtro). Además se trazaron conjuntamente las posibles variantes de operación que optimicen la extracción del extracto de cereales contenidos en el mosto en la etapa de filtración.

- **Identificación de causas que originan la disminución en el rendimiento del filtro lauter.**

A continuación se encuentran en orden jerárquico las causas principales de la pérdida de extracto en la filtración del mosto:

- a) Retención del mosto en la precapa filtrante, formada por el afrecho de la malta.
- b) Dificultad en el paso del mosto líquido a través de la precapa filtrante.
- c) Velocidad de filtración menor a velocidad de succión.
- d) Regreso de mosto filtrado al filtro para ayudar a elevar el nivel del líquido en el fondo real (nivel de extracción de mosto).

9.5.2. Establecer variantes de operación

Basándose en el componente anterior y teniendo ya identificados los aspectos que afectan la eficiencia del filtro lauter se procedió a establecer tres variantes de operación con el propósito de optimizar el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales. Dichas variantes de operación se describen en los resultados de la investigación.

9.5.3. Aplicación de variantes de operación

Habiendo establecido las variantes de operación se llevó a cabo la aplicación de las mismas; para el efecto, se procedió a evaluar diversas modificaciones en las variantes de operación y se estableció especificaciones en aquellas en donde se obtuvieron mejores resultados.

9.5.4. Evaluación de variantes de operación

Para evaluar las variantes de operación se utilizaron los siguientes diseños específicos para la investigación.

9.5.4.1. Diseño trifactorial interactivo

De acuerdo a la naturaleza de la investigación se aplicó un diseño trifactorial para evaluar las distintas combinaciones de las variantes de operación. El diseño se basó en una distribución completamente al azar y utilizó una réplica para cada tratamiento. Para darle validez a los resultados se evaluaron tres modificaciones para cada variante de operación formulada, quedando establecido de la siguiente manera:

Tabla 4. Modificaciones en las variantes de operación.

Variante de operación	Modificaciones
A	A ₁
	A ₂
	A ₃
B	B ₁
	B ₂
	B ₃
C	C ₁
	C ₂
	C ₃

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4, hay tres modificaciones en cada variante por lo que obtiene lo siguiente:

Total de tratamientos = (# de variantes)^(# de modificaciones)

Entonces,

Total de tratamientos = $3^3 = 27$

El resultado anterior indica que por la aplicación del diseño trifactorial interactivo se pueden aplicar veintisiete

combinaciones posibles entre los niveles de cada variante de operación.

Tabla 5. Combinaciones posibles entre las variantes de operación.

No. de Tratamiento	Combinación
1	A ₁ B ₁ C ₁
2	A ₁ B ₁ C ₂
3	A ₁ B ₁ C ₃
4	A ₁ B ₂ C ₁
5	A ₁ B ₂ C ₂
6	A ₁ B ₂ C ₃
7	A ₁ B ₃ C ₁
8	A ₁ B ₃ C ₂
9	A ₁ B ₃ C ₃
10	A ₂ B ₁ C ₁
11	A ₂ B ₁ C ₂
12	A ₂ B ₁ C ₃
13	A ₂ B ₂ C ₁
14	A ₂ B ₂ C ₂
15	A ₂ B ₂ C ₃
16	A ₂ B ₃ C ₁
17	A ₂ B ₃ C ₂
18	A ₂ B ₃ C ₃
19	A ₃ B ₁ C ₁
20	A ₃ B ₁ C ₂
21	A ₃ B ₁ C ₃
22	A ₃ B ₂ C ₁
23	A ₃ B ₂ C ₂
24	A ₃ B ₂ C ₃
25	A ₃ B ₃ C ₁
26	A ₃ B ₃ C ₂
27	A ₃ B ₃ C ₃

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 5 muestra cómo se realizaron las combinaciones para los veintisiete tratamientos.

Para evaluar cada una de las combinaciones mostradas en la tabla 5, la variable respuesta fué el rendimiento en el proceso de recuperación del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero comparado con la combinación que se aplica actualmente o combinación testigo.

9.5.4.2. Determinación del rendimiento de filtración

A través de la revisión de los registros de la “Casa de Cocimientos” se determinó el rendimiento de la operación de filtrado en la industria cervecera al utilizar un filtro tipo lauter. El rendimiento se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$RF = (\text{kg de extracto de salida} / \text{kg de extracto entrante}) (100)$$

Donde:

RF = rendimiento del filtro con base al extracto de cereales

La cantidad de extracto de salida y de entrada a la etapa de filtración fue medida por técnicos del laboratorio de Aseguramiento de Calidad de la industria cervecera, utilizando un equipo especial para dicho análisis (hidrómetro/luminómetro).

La misma fórmula se utilizó para evaluar el rendimiento de los diversos tratamientos establecidos en el diseño trifactorial para el filtro.

9.5.4.3. Análisis factorial

Por medio de la evaluación factorial, propia del diseño trifactorial interactivo, se establecerá si existe diferencia

significativa al interaccionar las variantes de operación entre sí en cuanto al rendimiento del extracto obtenido en la filtración lauter.

9.6. Calendarización de investigación

La investigación se desarrolló en un periodo aproximado de tres meses, como lo indica la tabla 6:

Tabla 6. Cronograma de investigación.

No.	Actividad	Mes 1					Mes 2				Mes 3			
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Conocimiento del proceso de filtración	■	■											
2	Identificación y jerarquización del problema			■										
3	Formulación de variantes de operación				■									
4	Ejecución de variantes de operación					■	■	■	■	■	■			
5	Evaluación de variantes de operación											■		
6	Estandarización de variantes de operación												■	
9	Finalización de estudio de investigación												■	

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Debido a que hubo veintisiete tratamientos y cada uno tuvo una repetición, entonces se necesitaron cincuenta y cuatro filtraciones de mosto para poder ejecutar cada tratamiento con una repetición. Semanalmente la industria cervecera realiza un aproximado de diez filtraciones de mosto, por lo que en seis semanas se pudo ejecutar los tratamientos con su respectiva réplica.

10.RESULTADOS

10.1.Establecimiento de variantes de operación

Con base en las principales causas que originan la pérdida de extracto en la etapa de filtración, descritas en el inciso 9.5.1. de la página 38, se establecieron tres variantes de operación. Las cuales son descritas a continuación:

- **Cantidad de agua de riego para afrecho**

El agua de riego sirve para lavar el afrecho que está sobre la placa filtrante y así poder extraer el mayor porcentaje posible de extracto que está contenido en la cascarilla del cereal. Debido a que el afrecho sale como subproducto del proceso y al arrastrar mosto se genera una pérdida de extracto de cereales. Actualmente se agregan 188 hectolitros de agua de riego pero esta cantidad se puede aumentar o disminuir con tal de recuperar el extracto contenido en el afrecho.

- **Posición de cuchillas**

Las cuchillas juegan un papel importante en la operación realizada por filtros lauter, estas giran y van creando espacio entre la precapa de afrecho para que la parte líquida pueda penetrarla con mayor accesibilidad. Las cuchillas normalmente se abren a 20° por lo que crean una abertura relativamente pequeña. Al abrir las cuchillas un poco más (menos de 50°) el líquido pasaría más fácilmente y tendría un menor contacto con la precapa de afrecho.

- **Velocidad de succión del mosto filtrado**

Cuando la velocidad de succión del mosto filtrado supera a la velocidad de filtración, entonces automáticamente el programa del filtro comienza a recircular el líquido filtrado para llegar al nivel que requiere para empezar la succión nuevamente. Al haber

recirculación el extracto cae sobre el afrecho y la operación de recuperación del líquido resulta más difícil.

Si se disminuye la velocidad con la que succiona la bomba que extrae el mosto filtrado y se nivela a la velocidad de filtración, entonces se evitaría la recirculación. La velocidad con la que la bomba de extracción del mosto filtrado funciona es de 100 hectolitros por hora.

10.2. Modificaciones establecidas para las variantes de operación

De acuerdo a lo establecido en el inciso anterior, se elaboró una tabla resumen que indica las especificaciones actuales de cada variante de operación.

Tabla 7. Especificaciones utilizadas en el filtro lauter actualmente.

Código	Variante de operación	Especificación actual
A	Cantidad de agua de riego para afrecho	188 hL
B	Posición de cuchillas	20°
C	Velocidad de succión del mosto filtrado	100 hL / hora

Fuente: Industria cervecera Nacional.

Se utilizaron tres modificaciones para cada variante de operación, como muestra la tabla 8:

Tabla 8. Descripción de las modificaciones en las variantes de operación.

Variante de operación	Código	Especificación
Cantidad de agua de riego para afrecho	A ₁	200 hL
	A ₂ (actual)	188 hL
	A ₃	176 hL
Posición de cuchillas	B ₁	40°
	B ₂	30°
	B ₃ (actual)	20°
Velocidad de succión del mosto filtrado	C ₁ (actual)	100 hL / hora
	C ₂	90 hL / hora
	C ₃	80 hL / hora

Fuente: Industria cervecera Nacional.

10.3.Tratamientos

El diseño trifactorial generó veintisiete combinaciones posibles por la cantidad de variantes de operación y de modificaciones en cada una de estas. La tabla 9 muestra cómo quedan establecidas las combinaciones o tratamientos.

Tabla 9. Combinaciones posibles entre las variantes de operación.

No. de Tratamiento	Combinación	Especificaciones (A, B, C)
1	A ₁ B ₁ C ₁	200 hL, 40 ⁰ , 100 hL / hora
2	A ₁ B ₁ C ₂	200 hL, 40 ⁰ , 90 hL / hora
3	A ₁ B ₁ C ₃	200 hL, 40 ⁰ , 80 hL / hora
4	A ₁ B ₂ C ₁	200 hL, 30 ⁰ , 100 hL / hora
5	A ₁ B ₂ C ₂	200 hL, 30 ⁰ , 90 hL / hora
6	A ₁ B ₂ C ₃	200 hL, 30 ⁰ , 80 hL / hora
7	A ₁ B ₃ C ₁	200 hL, 20 ⁰ , 100 hL / hora
8	A ₁ B ₃ C ₂	200 hL, 20 ⁰ , 90 hL / hora
9	A ₁ B ₃ C ₃	200 hL, 20 ⁰ , 80 hL / hora
10	A ₂ B ₁ C ₁	188 hL, 40 ⁰ , 100 hL / hora
11	A ₂ B ₁ C ₂	188 hL, 40 ⁰ , 90 hL / hora
12	A ₂ B ₁ C ₃	188 hL, 40 ⁰ , 80 hL / hora
13	A ₂ B ₂ C ₁	188 hL, 30 ⁰ , 100 hL / hora
14	A ₂ B ₂ C ₂	188 hL, 30 ⁰ , 90 hL / hora
15	A ₂ B ₂ C ₃	188 hL, 30 ⁰ , 80 hL / hora
16	A ₂ B ₃ C ₁ (actual)	188 hL, 20 ⁰ , 100 hL / hora
17	A ₂ B ₃ C ₂	188 hL, 20 ⁰ , 90 hL / hora
18	A ₂ B ₃ C ₃	188 hL, 20 ⁰ , 80 hL / hora
19	A ₃ B ₁ C ₁	176 hL, 40 ⁰ , 100 hL / hora
20	A ₃ B ₁ C ₂	176 hL, 40 ⁰ , 90 hL / hora
21	A ₃ B ₁ C ₃	176 hL, 40 ⁰ , 80 hL / hora
22	A ₃ B ₂ C ₁	176 hL, 30 ⁰ , 100 hL / hora
23	A ₃ B ₂ C ₂	176 hL, 30 ⁰ , 90 hL / hora
24	A ₃ B ₂ C ₃	176 hL, 30 ⁰ , 80 hL / hora
25	A ₃ B ₃ C ₁	176 hL, 20 ⁰ , 100 hL / hora
26	A ₃ B ₃ C ₂	176 hL, 20 ⁰ , 90 hL / hora
27	A ₃ B ₃ C ₃	176 hL, 20 ⁰ , 80 hL / hora

Fuente: Elaboración propia.

10.4. Evaluación del rendimiento obtenido en los tratamientos aplicados

Se aplicó cada uno de los tratamientos en la filtración lauter, después se calculó el rendimiento obtenido en los veintisiete tratamientos utilizando la fórmula dada en el inciso 9.5.4.2. de la página 42. Cabe mencionar que el rendimiento es con base al extracto obtenido en el mosto y su relación con el extracto de entrada en la masa de maceración.

Tabla 10. Rendimiento obtenido en los tratamientos aplicados.

No. de Tratamiento	Combinación	Rendimiento Prueba 1 (%)	Rendimiento Prueba 2 (%)	Rendimiento Promedio (%)
1	A ₁ B ₁ C ₁	96,0	96,2	96,1
2	A ₁ B ₁ C ₂	97,2	97,2	97,2
3	A ₁ B ₁ C ₃	96,9	97,1	97,0
4	A ₁ B ₂ C ₁	93,5	94,2	93,9
5	A ₁ B ₂ C ₂	94,3	94,2	94,3
6	A ₁ B ₂ C ₃	93,8	94,3	94,1
7	A ₁ B ₃ C ₁	93,7	93,7	93,7
8	A ₁ B ₃ C ₂	93,8	94,2	94,0
9	A ₁ B ₃ C ₃	93,7	93,8	93,8
10	A ₂ B ₁ C ₁	93,6	93,8	93,7
11	A ₂ B ₁ C ₂	94,0	94,0	94,0
12	A ₂ B ₁ C ₃	93,7	93,8	93,8
13	A ₂ B ₂ C ₁	93,6	93,5	93,6
14	A ₂ B ₂ C ₂	93,8	93,6	93,7
15	A ₂ B ₂ C ₃	93,5	93,8	93,7
16 (actual)	A ₂ B ₃ C ₁	93,4	93,5	93,5
17	A ₂ B ₃ C ₂	93,6	93,5	93,6
18	A ₂ B ₃ C ₃	93,7	93,4	93,6
19	A ₃ B ₁ C ₁	93,0	92,8	92,9
20	A ₃ B ₁ C ₂	93,1	93,8	93,5
21	A ₃ B ₁ C ₃	92,9	93,0	93,0
22	A ₃ B ₂ C ₁	92,0	92,1	92,1
23	A ₃ B ₂ C ₂	92,1	92,6	92,4
24	A ₃ B ₂ C ₃	92,2	92,2	92,2
25	A ₃ B ₃ C ₁	89,8	89,4	89,6
26	A ₃ B ₃ C ₂	90,4	90,4	90,4
27	A ₃ B ₃ C ₃	90,3	90,2	90,3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se hace la comparación directa entre el tratamiento con mejor resultado y el tratamiento que se aplicaba antes de la investigación.

Tabla 11. Comparación Antes-Después.

No. de Tratamiento	Combinación	Especificaciones (A, B, C)	Rendimiento Promedio (%)
2	A ₁ B ₁ C ₂	200 hL, 40 ⁰ , 90 hL / hora	97,2
16	A ₂ B ₃ C ₁	188 hL, 20 ⁰ , 100 hL / hora	93,5

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el tratamiento 2 mejora la recuperación de extracto de cereales en 3,7% con respecto al tratamiento 16.

10.5. Análisis Factorial

Utilizando los rendimientos promedios que se observan en la tabla 10, se realizó la tabla 12 que realiza la sumatoria de dichos datos obtenidos de la interacción que se dio entre las variantes de operación.

Tabla 12. Sumatorias de rendimientos promedios.

Variante A	Interacción entre las variantes B y C									Total
	B ₁ C ₁	B ₁ C ₂	B ₁ C ₃	B ₂ C ₁	B ₂ C ₂	B ₂ C ₃	B ₃ C ₁	B ₃ C ₂	B ₃ C ₃	
A ₁	96,1	97,2	97,0	93,9	94,3	94,1	93,7	94,0	93,8	854,1
A ₂	93,7	94,0	93,8	93,6	93,7	93,7	93,5	93,6	93,6	843,2
A ₃	92,9	93,5	93,0	92,1	92,4	92,2	89,6	90,4	90,3	826,4
Total	282,7	284,7	283,8	279,6	280,4	280,0	276,8	278,0	277,7	2523,7

Fuente: Elaboración propia.

Calculando el factor de corrección (FC) para realizar el análisis factorial, se obtuvo lo siguiente:

$$FC = (\text{Sumatoria total})^2 / \text{No. de tratamientos}$$

Entonces,

$$FC = (2\ 523,7)^2 / 27$$

$$FC = 235\ 891,17$$

A partir de la tabla 12 y el factor correctivo se realizó el análisis factorial, el cual se observa en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis factorial.

CV	SC	GL	$C\mu$	fc	ft (0,05)	ft (0,01)	Conclusión
Tratamiento	64,08	26	2,46	6	1,71	2,48	**
A	43,28	2	21,64	52,78	2,92	6,97	**
Interacción B _C	20,72	8	2,59	6,32	1,86	2,90	**
Interacción AB _C	0,08	16	0,005	0,012	1,75	2,58	NS
Error	11,16	27	0,41				
Total	75,24	53					

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

CV = causas de variación

SC = sumatoria de cuadrados

GL = grados de libertad

$C\mu$ = cuadrado medio

fc = factor calculado

ft (0,05) = factor tabulado con nivel de significancia de 95%

ft (0,01) = factor tabulado con nivel de significancia de 99%

** = significativo

NS = no significativo

En la tabla 13 se observa que se realiza una comparación entre los factores calculados y los tabulados, estos últimos son obtenidos de la tabla de grados de libertad del anexo 2 en la página 60, al ser fc mayor que ft existe una diferencia estadística significativa entre los resultados. En caso contrario se dice que no existe dicha diferencia por lo que el resultado no es significativo (NS). En las conclusiones de la tabla 13 el primer asterisco

indica que el resultado es significativo con un nivel de significancia del 95%, el segundo asterisco representa lo mismo pero con un nivel de significancia del 99%.

11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las tres variantes de operación empleadas y aplicadas al sistema de filtración lauter estudiado, fueron seleccionadas de acuerdo con las principales causas que originan la pérdida de extracto en el proceso de filtración donde se obtiene el mosto cervecero. De esta manera se buscó optimizar el rendimiento con base en el extracto de cereales obtenido.

Mediante el diseño trifactorial interactivo se logró aplicar todas las combinaciones posibles entre las variantes de operación, lo cual está indicado en la tabla 9, para que posteriormente se procediera a evaluar el rendimiento alcanzado por cada uno de los veintisiete tratamientos.

En la tabla 10 se muestran los resultados del rendimiento obtenido en los tratamientos aplicados, indicando que el tratamiento 2 ($A_1B_1C_2$) con 97,2% fue el que mayor rendimiento presentó. Caso contrario representó el tratamiento 25 ($A_3B_3C_1$), que fue el de menor rendimiento con 89,6% debido a que la cantidad de agua de riego (176 hL) utilizada es muy baja para lavar el afrecho adecuadamente, también la posición de cuchillas (20°) es la que admite mayor contacto entre el líquido y la precapa de afrecho por lo que hay una mayor retención de extracto, además la velocidad de succión del tratamiento 25 (100 hL/h) es la que permite que exista mayor recirculación del mosto filtrado porque es mayor que la velocidad de filtración (entre 89 hL/h a 90 hL/h).

La tabla 11 realiza la comparación directa entre el tratamiento que era utilizado previo a la presente investigación y el tratamiento en donde mejores resultados se lograron. Dicha tabla expresa en sus resultados que al aplicar el tratamiento que combina las variantes A_1 , B_1 y C_2 aumenta la recuperación del extracto de cereales en 3,7% con respecto al utilizado anteriormente ($A_2B_3C_1$). Comprobando de esta manera que las variantes de operación influyeron directamente en el rendimiento de la filtración lauter al recuperar 3,7% más de extracto, porque entre los tratamientos comparados no se repiten valores de las variantes de operación. Es

decir, que en uno se utilizaron 200 hL (A₁) para agua de riego y en el otro 188 hL (A₃). Por lo que es conveniente para optimizar el rendimiento del proceso utilizar 200 hL de agua de riego ya que se logra lavar mejor el afrecho y con ello recuperar mayor cantidad de extracto del cereal utilizado como materia prima por arrastre del agua de riego.

La posición de cuchillas entre los tratamientos 2 y 16 también difiere, ya que comúnmente eran abiertas las cuchillas a 20° (B₃) y comprobando con el estudio que una abertura a 40° (B₁) funciona mejor para la filtración lauter. Ya que al girar las cuchillas 40° se evita que el líquido que contiene el extracto del cereal tenga un mínimo contacto con la precapa de afrecho que es donde se queda atrapado parte del extracto entrante a la etapa de filtración. Entonces se demuestra que las cuchillas en posición de 40° es lo ideal para la filtración, puesto que aberturas mayores barrerían totalmente con la precapa del afrecho colocada sobre el falso fondo del filtro y elevaría la turbidez en el mosto cervecero que se obtiene como producto en esta operación, alterando el objetivo principal de las cuchillas que es únicamente arar el afrecho para que penetre mejor el líquido.

A la velocidad de succión con la que trabaja la bomba que transporta el mosto filtrado a un tanque buffer también se le aplicaron variantes, siendo normalmente el valor con el que trabajaba de 100 hL/h (C₁) y los valores variantes de 90 hL/h (C₂) y 80 hL/h (C₃). Teniendo mejores resultados al aplicar la variante C₂, ya que la velocidad de filtración se mantiene en un rango de entre 89 hL/h a 90 hL/h por lo que al aplicar una velocidad de succión de 90 hL/h no existe una gran diferencia entre las velocidades de filtración y succión, evitando con ello la recirculación del mosto filtrado que el sistema del filtro lauter realiza automáticamente para equilibrar las velocidades como se da en el caso de utilizar una velocidad de succión de 100 hL/h.

De acuerdo a lo expuesto se determina que las variantes A₁, B₁ y C₂ son las recomendadas para aplicar si se quiere optimizar el rendimiento en la etapa de

filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero.

La tabla 13 resume el análisis factorial y en las conclusiones que brinda permite determinar que existe una diferencia estadística significativa al interaccionar las tres variantes de operación, por lo que al aplicar los tratamientos se obtienen cambios en el rendimiento de la filtración lauter con respecto al extracto obtenido. Un ejemplo de ello se da al aplicar el tratamiento 2 que recupera mejor el extracto que el resto de tratamientos, incluso que el tratamiento utilizado habitualmente previo a la investigación.

El agua de riego de manera individual demostró estadísticamente que influye en el rendimiento del extracto obtenido en la filtración. Al realizar la interacción directa entre la posición de cuchillas y la velocidad de succión del mosto filtrado, también se demuestra diferencia estadística significativa en cuanto al extracto obtenido. Por lo que se le da importancia a las tres variantes de operación utilizadas, todas presentan injerencia en el rendimiento de la etapa de filtración.

12. CONCLUSIONES

- 12.1. De acuerdo a los resultados obtenidos se acepta la hipótesis de la presente investigación, porque se optimizó el rendimiento de la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero al aplicar variantes de operación en dicha etapa.
- 12.2. Se optimizó el rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero, alcanzando un 97,2% mediante la aplicación de variantes de operación.
- 12.3. Las variantes de operación recomendadas para optimizar el rendimiento en la filtración son: 200 hL de agua de riego para afrecho, 40° en la posición de las cuchillas y 90 hL/hora en la velocidad de succión del mosto filtrado.
- 12.4. Mediante el diseño trifactorial interactivo se establecieron veintisiete tratamientos que combinan las modificaciones de las tres variantes de operación establecidas en la investigación.
- 12.5. El tratamiento 2 (A₁B₁C₂) fue el que mejor rindió al extraer el 97,2% del extracto de cereales entrante al proceso de filtración, aumentando en 3,7% de rendimiento con respecto al tratamiento que se aplica regularmente (A₂B₃C₁) que presenta un rendimiento promedio de 93,5%.
- 12.6. De acuerdo a los resultados obtenidos cabe indicar que existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos aplicados con respecto al rendimiento del extracto obtenido en la etapa de filtración.

- 12.7.** El agua de riego como variante de operación individual demuestra influir directamente en el rendimiento de la filtración lauter con base en el extracto obtenido.
- 12.8.** La interacción entre la posición de las cuchillas y la velocidad de succión del mosto filtrado demuestra que existe diferencia significativa en lo referente al rendimiento del extracto en la filtración lauter.

13.RECOMENDACIONES

- 13.1.** Aplicar en la filtración lauter el tratamiento A₁B₁C₂ que comprobó extraer el mayor porcentaje de extracto de cereales y que presenta como especificaciones del proceso de filtración lauter; 200 hL para agua de riego, girar cuchillas a 40° y que la bomba que succiona el mosto filtrado trabaje con una velocidad de 90 hL/hora.

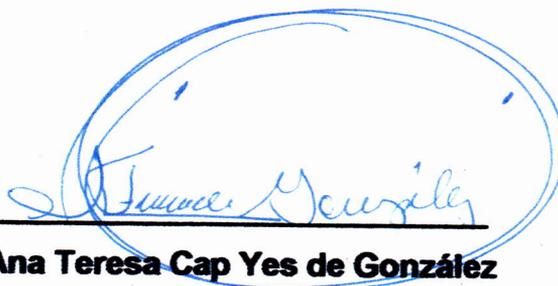
- 13.2.** Evaluar periódicamente el rendimiento con base al extracto obtenido del tratamiento aplicado en el proceso de filtración lauter.

14. BIBLIOGRAFÍA

- 14.1. Alaniz Villanueva, O. G. 2008. Residuos de la Industria Cervecera. Tesis para Maestría en Gestión Ambiental. Durango, México. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Durango. p. 17-19.
- 14.2. Análisis Factorial. 2013. (En línea). usa. Consultado: 18/10/13. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Distribucion_análisis_factorial.
- 14.3. Broderick, H. M. 2002. El Cervecerero en la práctica. Masters Brewers Association of the Americas. Madison Wisconsin, USA. p. 549-570.
- 14.4. Cadena Ríos, A. 2008. Selección de un filtro para clarificar y abrillantar cerveza. Tesis para Ingeniería Química Industrial. Distrito Federal, México. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. p. 6-11.
- 14.5. Callejo González, M. J. 2003. Industria de cereales y derivados. Colección Tecnología de Alimentos. Zaragoza, España. AMV Ediciones. p. 169-185.
- 14.6. Cerveza. 2013. (En línea). usa. Consultado: 13/11/13. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Cerveza>
- 14.7. Composición de malta. 2013. (En línea). usa. Consultado: 05/10/13. Disponible: http://www.cl/sw_educ/cultivos/cereales/cebada.htm.
- 14.8. Diseños Factoriales. 2013. (En línea). mx. Consultado: 18/10/13. Disponible: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/recursos/.PDF>
- 14.9. Filtro Cervecerero. 2013. (En línea). ar. Consultado: 9/10/13. Disponible: http://www.mumci.org/permanentes/proceso_cervecerero.jsp

- 14.10. Filtro Lauter. 2013. (En línea). per. Consultado: 7/10/13. Disponible: <http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central.htm>.Filtros.
- 14.11. Hardwick, W. A. 1995. Handbook of Brewing. Masters Brewers Association of the Americas. Madison Wisconsin, USA. p. 124-128.
- 14.12. Kunze, W. 1999. Technology Brewing and Malting (International Edition). Berlín, Alemania. p. 89-97.
- 14.13. López, A. et al. 2002. Biotecnología Alimentaria. Distrito Federal, México. Edit. Limusa. p. 263-312.
- 14.14. McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriot, P. 2007. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Distrito Federal, México. McGraw Hill/ Interamericana Editores, S.A.
- 14.15. Reyes Castañeda, P. 1980. Diseño de Experimentos Aplicados. Distrito Federal, México. Edit. Trillas. p. 180-183.
- 14.16. Sánchez, X. 2005. Ley de Darcy. (En línea). Consultado: 9/10/13. Disponible: <http://web.usual.es/xavisan/hidro>.
- 14.17. Vincent, V.M.C.; Álvarez, B.S.; Zaragozá, C.J.L. 2006. Química industrial orgánica. España. Edit. Universidad Politécnica de Valencia. p. 67-93.

Vo. Bo. _____



Licda. Ana Teresa Cap Yes de González
Bibliotecaria CUNSUROC



15. ANEXOS

Anexo 1. Parámetros con los que opera el filtro lauter estudiado.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Velocidad de flujo de entrada	220	hL/h
Temperatura interna	78	°C
Turbidez del mosto filtrado	40	EBC
Presión	0,7	Bar
Velocidad de succión	100	hL/h
Tiempo de filtrado	4.33	h
Velocidad de filtración	89 a 90	hL/h
Cantidad de agua de riego	188	hL
Posición de cuchillas	20	Grados sexagesimales
Volumen de entrada	280	hL
Volumen de mosto filtrado	385	hL
Elevación de cuchillas	10	mm

Fuente: Industria Cervecera Nacional, 2013.

Anexo 2. Tabla de grados de libertad.

Grados de libertad	0.75	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.683	1.311	1.609	2.045	2.462	2.756
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617

Fuente: Reyes Castañeda, P.

16. GLOSARIO

- **Adsorción:** es un proceso por el cual un contaminante soluble es eliminado del agua u otro líquido por contacto con una superficie sólida.
- **Alfa – amilasa:** es una enzima proteica que cataliza la degradación del almidón convirtiéndolo en azúcares más simples.
- **Almidón:** es un polisacárido de reserva energética predominante en las plantas y cereales, constituido por la unión de grandes cantidades de partículas de glucosa.
- **Aminoácidos:** son las unidades elementales constitutivas de las moléculas denominadas proteínas.
- **Batch:** es una palabra escrita en inglés que significa lote, usada en plantas industriales para referirse al tamaño de cierto lote de producción.
- **Beta – amilasa:** es una enzima que ayuda a convertir el almidón en azúcares de cadena corta, es utilizada en la industria cervecera.
- **Caída de presión:** disminución de la presión de un fluido, dentro de un conducto, que tiene lugar cada vez que dicho fluido atraviesa un estrangulamiento o un elemento de utilización.
- **Centipoise:** es una unidad de medida de la viscosidad y equivale a la fuerza desarrollada por 0,01 gramos sobre una superficie de 1 cm² a una velocidad de 1 cm/segundo.
- **Coadyuvantes de filtración:** son ayudantes de filtración, siendo compuestos que permiten mejorar la eficiencia de filtración porque presentan una alta porosidad.

- **Cuadro latino:** es una matriz de $n \times n$ elementos en la que cada casilla está ocupada por uno de los n símbolos de tal modo que cada uno de ellos aparece exactamente una vez en cada columna y en cada fila.
- **Enzimas:** son proteínas especializadas, muy específicas y de alto poder catalítico; esto quiere decir, que permiten que reacciones que tienen lugar a velocidades muy bajas se realicen a mayor velocidad a las temperaturas más convenientes.
- **Extracto de cereales:** es una mezcla de hidratos de carbono de cadena larga contenida en los cereales, y es un elemento importante para la elaboración de cerveza por ser la principal fuente de sustrato para la obtención de alcohol además de brindarle otras características específicas de la cerveza.
- **Fermentación anaerobia:** es la reacción fermentativa que se produce sin presencia de oxígeno.
- **Flujo laminar:** es el movimiento ordenado y estratificado de un fluido, es decir que se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula del fluido sigue una trayectoria suave.
- **Gas carbónico:** es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono, su fórmula química es CO_2 . En el proceso de elaboración de cerveza se origina durante la etapa de fermentación.
- **Grados de libertad:** son los que de un conjunto de observaciones, 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 automático, producto de establecerse las que son libres con el fin de compensar e igualar un resultado el cual se ha conocido previamente.

- **Grado plato:** son los gramos de extracto por 100 gramos de solución.
- **Grado sexagesimal:** es el ángulo central subtendido por un arco cuya longitud es igual a $1/360$ de la circunferencia.
- **Hectolitro:** es una unidad de volumen equivalente a cien litros, representado por el símbolo hL.
- **Hidrólisis:** es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.
- **Hidrómetro:** es un instrumento desarrollado para el uso de medir la densidad relativa o gravedad específica de varios líquidos. Es decir, que mide la densidad en relación a su radio, comparado contra la densidad del agua.
- **Optimizar:** buscar la mejor manera de realizar una actividad.
- **Péptidos:** son un tipo de moléculas formadas por la unión de varios aminoácidos mediante enlaces peptídicos.
- **Porosidad:** es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total.
- **Potenciómetro:** es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución.
- **Tanque de gobierno:** término que se utiliza para describir, en una industria cervecera, al tanque frío que almacena la cerveza previo a envasarse.
- **Turbidez:** es la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión.

- **Trub:** proteína coagulada que se obtiene en la etapa de clarificación del mosto cervecero.
- **Varianza:** La varianza es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística.
- **Viscosidad:** es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, sólo se manifiesta en líquidos en movimiento.



Mazatenango, 13 de Marzo de 2014.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUROCCIDENTE
INGENIERIA EN ALIMENTOS

Señores Miembros
Comisión de Trabajo de Graduación
Ingeniería en Alimentos
Centro Universitario del Sur Occidente

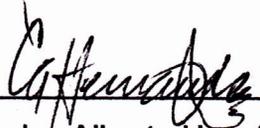
Respetables Señores:

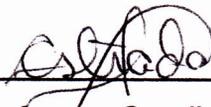
Cordialmente nos dirigimos a ustedes para informarles que como terna evaluadora de la investigación de tesis titulada: **“Optimización del rendimiento en la etapa de filtración con base en la obtención del extracto de cereales contenido en el mosto cervecero mediante la aplicación de una combinación de variantes de operación”**, realizada por el estudiante Julio Heráclito Flores López, carné 200640827; a través de la presente hacemos constar que hemos revisado el informe que corresponde al Seminario II, quedando conformes con las correcciones hechas a dicho documento.

Sin otro particular, nos suscribimos de ustedes muy atentamente,


ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Víctor Manuel Nájera


Ing. Carlos Alberto Hernández


Inga. Aurora Carolina Estrada



Mazatenango, 20 de Marzo de 2014

MSc. Gladys Calderón Castilla
Coordinadora, Carrera de Ingeniería en Alimentos
Centro Universitario del Suroccidente

Por este medio solicito reciba un cordial saludo, deseándole éxitos en sus labores cotidianas.

Por este medio le informo que se ha recibido el informe de los asesores nombrados para examinar en seminario II al estudiante Julio Heráclito Flores López, carné 200640827 con el tema del trabajo de graduación titulado: **“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE OPERACIÓN”**.

Luego de haber sido constatado que fueron hechas todas las correcciones que la terna evaluadora emitió, hacemos entrega de dicho informe.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



MSc. Sammy Ramírez
Secretario de la Comisión de Trabajo de Graduación



Mazatenango, 20 de Marzo de 2014

Señores:
Comité de Trabajo de Graduación
Ingeniería en Alimentos
CUNSUROC-USAC

Respetables profesionales:

De manera atenta nos dirigimos a ustedes, deseándoles éxitos al frente de tan prestigiado comité.

El objeto de la presente es para informarles que hemos revisado el informe final del trabajo de Graduación titulado **“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE OPERACIÓN”** presentado por el T.U. Julio Heráclito Flores López, Carné 200640827.

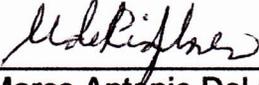
Hemos constatado que el estudiante ha realizado las respectivas correcciones sugeridas por la terna evaluadora. En virtud de lo anterior trasladamos a ustedes el documento de informe final de Trabajo de Graduación para las consideraciones pertinentes de acuerdo al normativo vigente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


MSc. Gladys Calderón Castilla
Asesor Principal

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CUNUROC
CALLE 10-13


Dr. Marco Antonio Del Cid Flores
Asesor Adjunto



Mazatenango, 21 de Marzo de 2014

Lic. José Alberto Chuga Escobar
Director
Centro Universitario del Suroccidente
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Director:

Por este medio le saludo muy cordialmente, deseándole éxitos en sus labores profesionales.

A través de la presente hago constar que he revisado el informe final de Tesis cuyo tema de investigación se titula: **“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCIÓN DEL EXTRACTO DE CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE OPERACIÓN”**, realizado por el T.U. Julio Heráclito Flores López, carné 200640827; dicho trabajo llena los requisitos para optar al título de Ingeniero en Alimentos, por lo que solicito la autorización para el Imprímase.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


MSc. Gladys Calderón Castilla
Coordinadora de Carrera
Ingeniería en Alimentos





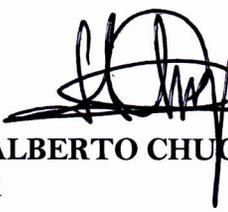
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

CUNSUROC/USAC-I-16-2014

DIRECCIÓN DEL CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUROCCIDENTE,
Mazatenango, Suchitepéquez, tres de abril de dos mil catorce. _____

Encontrándose agregados al expediente los dictámenes de la Comisión de Tesis y del Secretario del comité de Tesis, SE AUTORIZA LA IMPRESIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN TITULADO: **“OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE FILTRACIÓN CON BASE EN LA OBTENCION DEL EXTRACTO DE CEREALES CONTENIDO EN EL MOSTO CERVECERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA COMBINACIÓN DE VARIANTES DE OPERACIÓN”**, del estudiante: **Julio Heráclito Flores López**, carné **200640827** de la carrera Ingeniería en Alimentos.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



LIC. JOSÉ ALBERTO CHUGA ESCOBAR
DIRECTOR

/gris