

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



ADAPTACIÓN DEL SISTEMA DE MACERACIÓN,  
COCCIÓN, FERMENTACIÓN Y MADURACIÓN PARA  
PRODUCIR CERVEZA ARTESANAL TIPO LAGER EN LA  
PLANTA DE CERVEZA DEL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL  
VALLE DE GUATEMALA

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Axel Estiven Avalos García  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala  
2021



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



ADAPTACIÓN DEL SISTEMA DE MACERACIÓN,  
COCCIÓN, FERMENTACIÓN Y MADURACIÓN PARA  
PRODUCIR CERVEZA ARTESANAL TIPO LAGER EN LA  
PLANTA DE CERVEZA DEL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL  
VALLE DE GUATEMALA

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Axel Estiven Avalos García  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala  
2021

Vo. Bo. :

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Tribunal Examinador:

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)

Ing. Luis Ernesto Nuñez González

(f)

Ing. Ana Regina Cruz Serré

Fecha de aprobación: Guatemala 26 de febrero de 2021

# ÍNDICE

LISTA DE TABLAS .....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN .....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	4
IV. MARCO TEÓRICO.....	5
A. Cerveza .....	5
B. Color .....	6
C. Turbidez .....	6
D. Proceso de elaboración de cerveza .....	7
E. Molienda .....	8
F. Maceración.....	8
G. Cocción .....	8
H. Fermentación.....	9
I. Maduración .....	9
J. Carbonatación .....	10
K. Agitadores .....	10
L. Enfriadores .....	12
M. Tuberías y accesorios .....	13
N. Válvulas .....	14
O. Bombas .....	16
V. ANTECEDENTES .....	18
VI. METODOLOGÍA.....	19
A. Pruebas de enfriamiento.....	19
B. Pruebas de calentamiento.....	20
C. Pruebas de agitación .....	20
D. Instalación de agitador .....	21
E. Instalación de tanque de recepción .....	22
F. Instalación de tubería y accesorios .....	22
G. Trituración de granos .....	22

H.	Maceración.....	23
I.	Lavado de granos .....	23
J.	Cocción .....	23
K.	Azúcares fermentables .....	24
L.	Fermentación.....	24
M.	Maduración .....	25
N.	Formación de microorganismos durante fermentación.....	25
O.	Concentración de alcohol.....	26
P.	Cálculos.....	26
VII.	RESULTADOS.....	27
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	49
IX.	CONCLUSIONES .....	59
X.	RECOMENDACIONES.....	60
XI.	BIBLIOGRAFÍA .....	61
XII.	ANEXOS .....	63
A.	Datos originales .....	63
B.	Cálculos de muestra .....	67
C.	Datos calculados .....	77
D.	Análisis de error.....	78
E.	Especificaciones técnicas del equipo .....	79
F.	Registro gráfico de experimentación .....	94
XIII.	GLOSARIO .....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de enfriamiento usando el chiller Tempstar y agua glicolada en la chaqueta del reactor .	28
Tabla 2. Capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar .....	29
Tabla 3. Tiempos de calentamiento utilizando vapor en la chaqueta del reactor .....	29
Tabla 4. Capacidad de calentamiento de la chaqueta del reactor .....	29
Tabla 5. Equipo analizado para agitación durante maceración, cocción y enfriamiento de mosto y razonamiento para evaluación de posible uso .....	30
Tabla 6. Descripción de equipos en el diagrama de planta piloto .....	34
Tabla 7. Concentración de azúcares presentes en el mosto inicial analizados en HPLC.....	34
Tabla 8. Concentración de alcohol final en la cerveza analizado en HPLC .....	35
Tabla 9. Formación de microorganismos durante fermentación .....	35
Tabla 10. Amargor de la cerveza utilizando método Rager .....	35
Tabla 11. Color final de cerveza reportado en escala Lovibond .....	35
Tabla 12. Masa de levadura seca inicial y muestra de levadura final .....	65
Tabla 13. Volumen de cerveza con asiento de levadura final .....	66
Tabla 14. Cálculo de masa de levadura seca final .....	77
Tabla 15. Cálculo de concentración de azúcares y etanol presente en muestras en g/L .....	77
Tabla 16. Cálculo de número de Reynolds para los 3 sistemas de agitación.....	77
Tabla 17. Datos técnicos del secador de rodillos.....	82
Tabla 18. Datos técnicos de bomba centrífuga.....	83
Tabla 19. Datos técnicos de reactor.....	84
Tabla 20. Datos técnicos de agitador WEG.....	85
Tabla 21. Datos técnicos de agitador Servodyne.....	86
Tabla 22. Datos técnicos de balanza analítica .....	87
Tabla 23. Datos técnicos de balanza móvil .....	88
Tabla 24. Datos técnicos del densímetro .....	89
Tabla 25. Datos técnicos de la cinta métrica .....	91
Tabla 26. Datos técnicos de vernier .....	92
Tabla 27. Datos técnicos de termocupla.....	92
Tabla 28. Datos técnicos de probeta de 2 L.....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tabla de características de la cerveza Pilsner alemana .....	6
Figura 2. Paleta de colores de cerveza en escala SRM o Lovibond, con su respectivo tipo de cerveza .....	6
Figura 3. Diagrama de proceso de producción de cerveza .....	7
Figura 4. Tanque de agitación estándar .....	11
Figura 5. Tipos de impulsores .....	12
Figura 6. Tipos de válvulas .....	15
Figura 7. Balance de masa y energía de molienda y maceración de cerveza Lager .....	27
Figura 8. Balance de masa y energía de lavado de granos y cocción de cerveza Lager .....	27
Figura 9. Balance de masa y energía de separación de lúpulo y enfriamiento de mosto de cerveza Lager .....	27
Figura 10. Balance de masa y energía del proceso de fermentación .....	28
Figura 11. Balance de masa y energía de la separación de levadura y maduración de cerveza Lager .....	28
Figura 12. Vista de planta de instalación de sistema de agitación para reactor .....	31
Figura 13. Vista de perfil de instalación de sistema de agitación para reactor .....	31
Figura 14. Vista de elevación de instalación de sistema de agitación para reactor .....	32
Figura 15. Vista de planta de instalación de tanque de recepción .....	32
Figura 16. Vista de perfil de instalación de tanque de recepción .....	33
Figura 17. Vista de elevación de instalación de tanque de recepción .....	33
Figura 18. Diagrama de planta piloto con equipos disponibles .....	34
Figura 19. Consumo de azúcares fermentables y producción de etanol durante fermentación .....	35
Figura 20. Manual de operación de equipos instalados .....	36
Figura 21. Enfriamiento de agua glicolada con chiller Tempstar .....	63
Figura 22. Enfriamiento de mosto con agua glicolada .....	64
Figura 23. Enfriamiento de cerveza para maduración con agua glicolada .....	64
Figura 24. Temperatura de mosto durante maceración .....	65
Figura 25. Temperatura de mosto durante cocción .....	65
Figura 26. Concentración de azúcares y alcohol presente en las muestras analizadas en HPLC .....	66
Figura 27. Cromatograma de azúcares fermentables y etanol en las muestras tomadas durante la fermentación .....	66
Figura 28. Hoja de especificaciones de agitador Leeson instalado en la planta .....	79
Figura 29. Hoja de especificaciones de tanque de recepción instalado .....	80
Figura 30. Hoja de especificaciones de Chiller Tempstar .....	81
Figura 31. Secador de rodillos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	82
Figura 32. Bomba centrífuga Aquastrong EJm61C del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	83



Figura 33. Reactor de la planta piloto de cerveza del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	84
Figura 34. Agitador con motor WEG del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	85
Figura 35. Agitador con motor Servodyne del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	86
Figura 36. Balanza analítica OHAUS del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	87
Figura 37. Balanza móvil del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	88
Figura 38. Densímetro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	89
Figura 39. Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) de la Universidad del Valle de Guatemala.....	89
Figura 40. Especificaciones del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) .....	90
Figura 41. Columna Aminex HPX-87K utilizada en el HPLC.....	90
Figura 42. Especificaciones de la columna Aminex HPX-87K del HPLC.....	91
Figura 43. Cinta métrica .....	91
Figura 44. Vernier .....	92
Figura 45. Termocupla Extech .....	92
Figura 46. Centrifugadora por lotes del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	93
Figura 47. Probeta de 2 L .....	93
Figura 48. Representación visual de planta piloto de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	94
Figura 49. Medidas de espacio en planta piloto .....	94
Figura 50. Ajuste de secador de rodillos con estándar de referencia.....	95
Figura 51. Comparativa de estándar de distancia entre rodillos y grano de malta típico .....	95
Figura 52. Molienda de malta en secador de rodillos .....	96
Figura 53. Lúpulo Hallertau Tradition .....	96
Figura 54. Cerveza Lager producida .....	96

## RESUMEN

En el presente Trabajo de Graduación se presentan las adaptaciones realizadas en el sistema de maceración, cocción, fermentación y maduración de la planta piloto de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para producir cerveza Lager.

Se evaluó la capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar del Laboratorio utilizando agua glicolada, una mezcla de agua y propilenglicol con un punto de fusión más bajo que el del agua, para llevar el mosto a la temperatura adecuada para que la levadura inicie el proceso de fermentación y maduración, se adaptó un sistema de recirculación de agua glicolada para llevar a cabo el enfriamiento. Se evaluó la capacidad de calentamiento de la chaqueta del macerador utilizando vapor para calentar el mosto en las condiciones adecuadas para la conversión de azúcares fermentables durante la maceración y cocción, también se adaptó un agitador al macerador para mejorar la velocidad de transferencia de calor tanto en calentamiento como en enfriamiento. Luego de las pruebas y adaptaciones en los diferentes equipos de la planta, se logró de forma satisfactorio la producción de un lote de  $30 \pm 0.1$  L de cerveza Lager con una concentración de alcohol final de 28.200 g/L, un amargor de 42.9 IBU y un color de 7 SRM. Finalmente se elaboraron los procedimientos para el uso adecuado de los equipos propuestos en este trabajo para elaborar cerveza Lager.

# I. INTRODUCCIÓN

La producción de cerveza es una industria que está presente en la mayoría de los países y, junto con el vino, es la bebida alcohólica más consumida en el mundo. La elaboración de cerveza es un conjunto de procesos que requieren un control de parámetros en cada operación. Los ingredientes principales de la producción de cerveza son agua, lúpulo, malta y levadura. El tipo y calidad de cada una de estas materias primas, junto con una correcta operación aseguran la producción de una cerveza característica. El presente Trabajo de Graduación presenta las adaptaciones realizadas a diferentes equipos de la planta de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para producir cerveza Lager, así como los procedimientos adecuados para el uso de los equipos propuestos.

Una de las características que diferencia a la cerveza Lager de las cervezas tipo Ale es la baja temperatura de fermentación, este proceso requiere de un sistema complementario de enfriamiento que mantenga el reactor a la temperatura adecuada durante todo el proceso de fermentación, este equipo de enfriamiento se conoce en la industria cervecera como “chiller”. Para lograr producir cerveza Lager en la planta del Laboratorio, se hicieron pruebas de enfriamiento utilizando el chiller Tempstar y agua glicolada como fluido refrigerante y se instaló un sistema de recirculación entre el chiller y el reactor de la planta. Se programó el termostato del equipo para operar a diferentes temperaturas y se determinó que tiene la capacidad adecuada para el enfriamiento de cerveza Lager tanto para fermentación como para maduración.

La malta de cerveza debe ser calentada junto con agua a una temperatura entre 60°C y 75°C para que se lleve a cabo el proceso enzimático conocido como maceración donde se da una conversión de almidones a azúcares fermentables. La segunda etapa de calentamiento se llama cocción y en esta se lleva el mosto de cerveza a temperatura de ebullición. Para calentar la malta y posteriormente cocer el mosto se utilizan diferentes fuentes de calor en la industria como gas propano, resistencias eléctricas o vapor. Para lograr calentar la malta y cocer el mosto en la planta del Laboratorio se hicieron pruebas utilizando vapor proveniente de la caldera del Laboratorio y el enchaquetado del reactor de la planta como intercambiador de calor. Se instalaron manómetros y válvulas de globo en el equipo para lograr variar el flujo de vapor en la chaqueta según la etapa de calentamiento requerida, se logró calentar y mantener la temperatura estable de forma satisfactoria en ambos procesos.

Para mejorar la transferencia de calor y la eficiencia de la actividad enzimática durante el proceso de maceración, los reactores industriales de cerveza usualmente cuentan con un sistema de agitación que mantiene la malta en constante movimiento de forma turbulenta dentro del reactor. Para lograr mejorar la eficiencia del reactor de la planta de cerveza se evaluaron 3 sistemas de agitación disponibles en el

Laboratorio considerando su potencia, dimensiones, tipo de propela y factibilidad de instalación en el reactor. Se escogió el sistema de agitación con motor marca Leeson dado que este logró generar una agitación turbulenta con un número de Reynolds de 34,122 a 1,200 rpm en la malta y, con un eje de 0.9 m de largo y 2 propelas marinas de 0.08 m de diámetro, tiene las dimensiones y características adecuadas para el tamaño del reactor. El sistema de agitación tiene un peso de 25.9 kg, por lo que se instaló una estructura metálica de soporte complementado con un sello mecánico en el eje para lograr instalar el equipo en el reactor de la planta.

## II. OBJETIVOS

### A. General

Evaluar y adaptar el sistema de maceración, cocción, fermentación y maduración de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para producir cerveza tipo Lager según normas BJCP, haciendo pruebas, cálculos e instalaciones necesarias.

### B. Específicos

1. Evaluar la capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar, usando agua glicolada por recirculación a la chaqueta del fermentador del Laboratorio de Operaciones Unitarias para determinar su posible uso para producir cerveza Lager.
2. Evaluar la capacidad de calentamiento de la chaqueta del macerador haciendo pruebas de calentamiento con vapor para determinar si puede llevar el mosto a las temperaturas adecuadas para producir cerveza Lager.
3. Evaluar y adaptar el agitador de la planta de cerveza artesanal en el macerador a las condiciones de maceración y cocción para producir cerveza Lager.
4. Determinar la metodología para la operación de los equipos propuestos de transferencia de calor y agitación para producir cerveza artesanal tipo Lager.

### III. JUSTIFICACIÓN

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala se realizó un Megaproyecto titulado “Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias” donde se implementó una planta piloto con capacidad para lotes de  $35 \pm 0.1$  L para la elaboración de cerveza artesanal Indian Pale Ale (IPA). Esta cerveza tiene un alto contenido de alcohol (5% - 12%), sabores y aromas fuertes, y un proceso de fermentación alta ( $15\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Sin embargo, la planta no cuenta con un macerador ni agitador adecuado para el proceso y no está equipada para producir cerveza Lager, ya que esta necesita de condiciones de temperatura y filtración específicas, por lo que es necesario hacer adaptaciones a la planta actual para así lograr producir cerveza de forma satisfactoria y concluir con el proyecto iniciado en el 2019 (Álvarez, *et al.* 2019).

La cerveza Lager es la más consumida a nivel mundial y en Guatemala abarca más del 90% del mercado de cerveza debido a las diferentes marcas locales y extranjeras que la producen en grandes volúmenes. La cerveza artesanal en Guatemala tuvo una producción que superó los 300,000 L en 2019 y se ha demostrado que dicha cifra tiende al alza año con año por lo que modificar la planta para que produzca cerveza Lager es de relevancia para el aprendizaje de un proceso industrial de gran impacto a nivel nacional y mundial (Forbes Centroamérica, 2019).

Actualmente hay 169 estudiantes inscritos en la carrera de Ingeniería Química, 106 en Ingeniería Química-Industrial y 55 en Ingeniería en Biotecnología Industrial, todos estos usuarios del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad carecen de un equipo apropiado para llevar a cabo la producción de cerveza cuya elaboración involucra muchos procesos químicos industriales que tienen muchas aplicaciones en otras industrias a parte de la cervecera y que son de alto impacto para cada una de las carreras antes mencionadas. Por esta razón, en el presente trabajo se presenta lo realizado para adaptar e instalar en la planta de cerveza del Laboratorio los equipos necesarios para la producción de cerveza Lager, por lo que todos estos usuarios tendrán acceso a realizar prácticas e investigaciones en varios cursos tales como: laboratorio de operaciones unitarias 1 y 2, flujo de fluidos, transferencia de calor, bioingeniería, balance de masa y energía, microbiología industrial, procesos biológicos industriales, procesos químicos industriales, diseño de reactores, entre otros.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Cerveza

Es la bebida alcohólica más consumidas a nivel mundial. Se originó en Egipto hace más de 5,000 años. Se produce con la fermentación alcohólica de cebada usando levadura. Esta bebida tradicionalmente requiere de cuatro ingredientes para su producción: agua, cebada, lúpulo y levadura (Gonzáles, 2017).

La cerveza artesanal tiene sus inicios en Estados Unidos en la década de 1970, inspirada por las tradiciones cerveceras europeas y la prohibición del alcohol en 1920. En la actualidad, se estima que existen más de 10,000 cervecerías artesanales, cuya gran mayoría se encuentra en Estados Unidos y Europa. En Latinoamérica, Brasil, Argentina y México lideran la producción de cerveza artesanal (Gonzáles, 2017).

Las cervezas tienen una clasificación extensa debido a la complejidad en su formulación y su proceso. Esta bebida puede clasificarse por su aspecto, su método de elaboración, sus ingredientes, su procedencia o según su tipo de fermentación. Esta última es la clasificación más general dividiendo los tipos de cerveza en dos grandes ramas: cervezas de fermentación alta o “Ales” y cervezas de fermentación baja o “Lagers” (Jackson, 1994).

Las cervezas de tipo Ale fermentan con levaduras de superficie a altas temperaturas, es decir entre los 18 y los 24 grados aproximadamente. Son cervezas más complejas desde el punto de vista aromático ya que durante la fermentación se producen más compuestos aromáticos. Esta familia de cervezas tiene un origen muy antiguo, por lo que existe una gran variedad de sub-estilos como Pale Ale, Indian Pale Ale, Bitter, Stout, Barley Wine, Altbier, entre otras. Su elaboración es muy común en el viejo continente, principalmente en Centroeuropa (Jackson, 1994).

Las cervezas Lager son de baja fermentación; es decir, la levadura trabaja a baja temperatura (7° - 13°C) en la parte baja del tanque a la que luego de la fermentación se deja madurar a una temperatura cercana a los cero grados durante un periodo de uno a seis meses. Además del tiempo, del tipo de fermentación y maduración, otras características como la densidad del mosto, las mezclas de malta, el lúpulo utilizado y formas específicas de elaboración determinan las características de los distintos estilos de Lager, como las Pilsner, Munich, Viena, Dotmunder, Bock, Doppelbock y Märzen. Actualmente es la forma más común de elaborar cerveza en todo el mundo, siendo el estilo Pilsner el más conocido (Jackson, 1994).

Figura 1. Tabla de características de la cerveza Pilsner alemana

<b>Estadísticas Vitales:</b>	OG: 1.044 – 1.050
IBUs: 22 – 40	FG: 1.008 – 1.013
SRM: 2 – 5	ABV: 4.4 – 5.2%

Fuente: BJCP. 2015

## B. Color

El color es otra de las características principales de la cerveza. Aunque proviene principalmente del grano, todos los procesos al que este es sometido influyen en el color final que tendrá la cerveza. El factor principal que afecta el color de la cerveza es el grado de tostado que tiene la malta con la que se está trabajando. Es por esto que existen cervezas que tienen una apariencia desde un amarillo pálido hasta unas que son casi negras. El color no debe utilizarse como una medición de la calidad, edad o para detectar fallos en el proceso de producción. Muchas de las denominaciones comúnmente utilizadas para describir el color de las cervezas como ámbar o rubio son clasificaciones empíricas. Existen dos escalas que utilizan la tecnología de un espectrofotómetro para dar una mejor clasificación a las cervezas en cuanto a su color, estas son la SRM (Standard Reference Method) y la EBC (European Brewers Convention) (González, 2017).

Figura 2. Paleta de colores de cerveza en escala SRM o Lovibond, con su respectivo tipo de cerveza

# Value	Color	Beer Style
2		light lager
3		pilsner
4		hefeweizen
6		american pale ale
7		gueze
10		extra special bitter
13		english strong ale
17		red ale
22		dunkel
24		porter
30		stout
38+		imperial stout

Fuente: West Coast Brewer. 2019

## C. Turbidez

La turbidez es otra característica sumamente importante en la cerveza, especialmente porque le concede estabilidad al producto final. En el caso que los sólidos suspendidos no sean removidos previos al proceso de

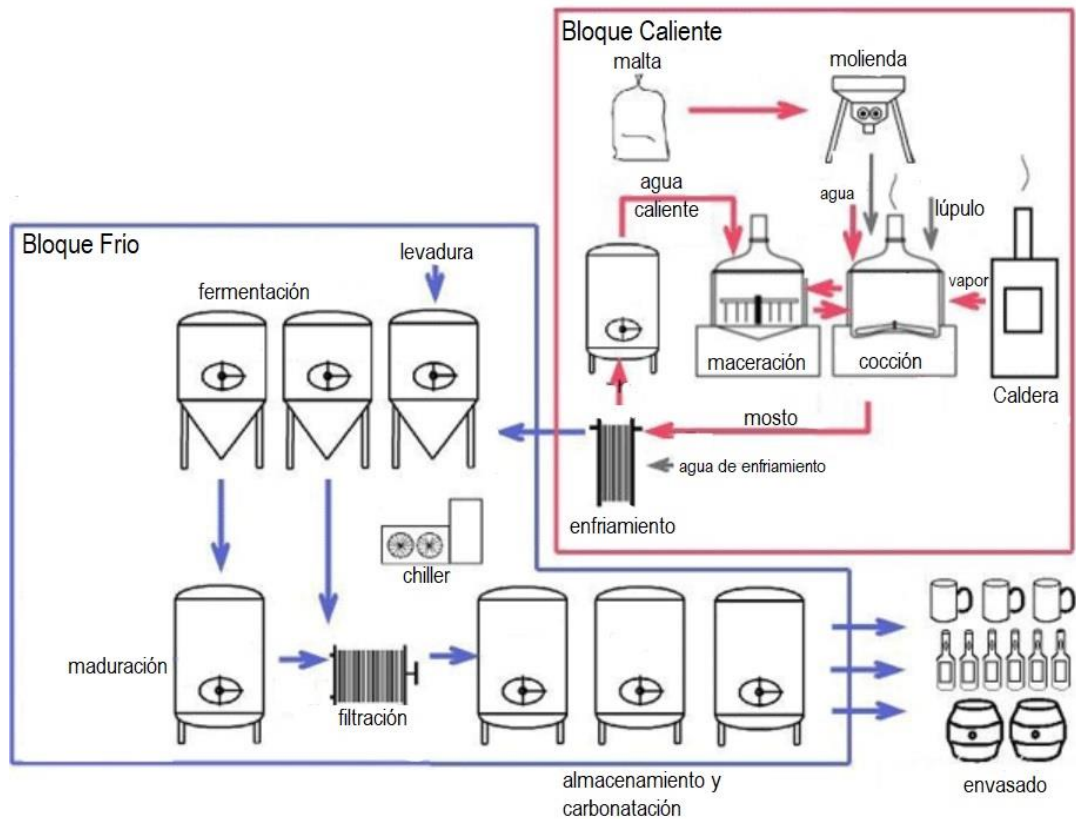


embotellado, la turbidez puede generar consecuencias negativas para la cerveza. Principalmente se puede encontrar que la cerveza experimente una pérdida de brillo, se genere un descenso en la transparencia y el grado de enturbiamiento se incremente. Visualmente, se puede observar como precipitación, floculación y sedimentación dentro del envase, reduciendo la estabilidad del producto. La turbidez u opacidad de una cerveza puede tener tres principales motivos: biológica, coloidal o química (Rodríguez, 2003).

## D. Proceso de elaboración de cerveza

El proceso general de elaboración de cerveza consta de las siguientes etapas principales: malteado del grano de cebada, molienda, maceración, filtración post maceración, cocción, fermentación, maduración, filtración final, carbonatación y envasado. A continuación, se describe brevemente cada una de estas etapas:

Figura 3. Diagrama de proceso de producción de cerveza



Fuente: Czech Brewery System s. r. o. 2020

En esta parte del proceso se toman en cuenta las etapas de germinación, secado y tostado de la cebada. Esto es necesario para que se desarrolle el sistema enzimático que provocará la hidrolización del almidón, un polisacárido que no es fermentable. (González, 2017).

## E. Molienda

Una vez secados y tostados los granos, se procede a molerlo de modo que se pueda extraer la mayor cantidad de azúcares contenidos en la malta. Este proceso no es 100% eficiente por lo que es necesario llevar toda la mezcla de cáscara de cebada y azúcares al siguiente paso para el máximo aprovechamiento de la materia prima. (González, 2017).

## F. Maceración

La maceración es un proceso en el cual se pone en contacto la malta molida con el agua, lo que permite que las enzimas degraden los constituyentes de la malta (carbohidratos y proteínas) a azúcares fermentables, con esto se origina el líquido que se va a fermentar, denominado mosto. Una relación común es aplicar 3 L de agua por cada kilogramo de malta a macerar. La mezcla de agua y malta se somete a un calentamiento gradual en el macerador, nombre que se le asigna al tanque donde se lleva a cabo el proceso de maceración. La temperatura empleada varía en función del estilo de cerveza, pues depende de aspectos como la naturaleza del cereal utilizado, las características del producto deseado, el tipo y la capacidad del equipo (Hernández, 2003).

En la maceración existen reacciones enzimáticas que provocan la degradación del almidón. El almidón es hidrolizado por la acción de dos enzimas (la alfa amilasa y la beta amilasa). La alfa amilasa lo degrada a dextrinas, sustancias que contribuyen al cuerpo y la estabilidad de la espuma del producto final. La beta amilasa desdobla el almidón en azúcares fermentables (maltosa), que la levadura transforma en alcohol durante la fermentación. Las condiciones de temperatura durante la maceración determinan las características del cuerpo y contenido alcohólico de la cerveza. Si se favorece la temperatura de la beta amilasa, se tienen muchas azúcares fermentables que aportarán a la formación de alcohol. Mientras que la alfa amilasa convierte azúcares no fermentables provocando que la cerveza final tenga mucho cuerpo, pero no tanto volumen de alcohol (Hernández, 2003).

## G. Cocción

La cocción es un proceso de calentamiento posterior a la maceración donde el mosto se lleva a temperatura de ebullición. En este proceso se añade el lúpulo, que agrega amargor, sabor y aroma al mosto y al mismo tiempo se precipitan sustancias albuminoideas. Durante la cocción, ocurre la disolución y transformación de componentes del lúpulo, la formación y precipitación de compuestos formados por proteínas y polifenoles, evaporación de agua, esterilización del mosto, desnaturalización de todas las enzimas, reducción del pH del mosto, formación de sustancias reductoras y evaporación de sustancias aromáticas indeseadas (principalmente DMS) (Kunze, 2006).

## H. Fermentación

La fermentación es un proceso de oxidación incompleta, que no requiere de oxígeno para tener lugar, y que genera una sustancia orgánica como resultado. Es un proceso de tipo catabólico, es decir, de transformación de moléculas complejas a moléculas sencillas y generación de energía química en forma de ATP (Adenosín Trifosfato). La fermentación consiste en un proceso de glucólisis (ruptura de la molécula de glucosa) que produce piruvato (ácido pirúvico) y que al carecer de oxígeno como receptor de los electrones sobrantes del NADH (nicotin adenin dinucleótido) producido, emplea para ello una sustancia orgánica que deberá reducirse para así reoxidar el NADH a NAD<sup>+</sup>, obteniendo finalmente un derivado del sustrato inicial que se oxida. Dependiendo de dicha sustancia final, habrá diversos tipos de fermentación como la alcohólica, acética, láctica, butírica, butanodiólica y propiónica. Entre estas una de las más utilizadas en la industria mundial es la fermentación alcohólica (Lee, 2009).

La fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en ausencia de oxígeno, originado por la actividad de una levadura que procesa los hidratos de carbono (azúcares como la glucosa, fructosa, sacarosa, etc.) para obtener como productos finales: etanol, dióxido de carbono y unas moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico. El etanol resultante de la fermentación alcohólica se emplea en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas como el vino, la cerveza, el whiskey, etc (Lee, 2009).

La fermentación de cerveza Lager utiliza levadura de fermentación baja *Saccaromyces pastorianus*. Esta levadura es capaz de fermentar a bajas temperaturas en comparación con las levaduras de fermentación alta (*Saccaromyces Cervesiae*). El resultado de la fermentación bajo estas condiciones de temperatura (7°C – 15°C) es una cerveza con un perfil de sabor y aroma más ligero (menos esteres y otros alcoholes), una apariencia más translúcida y brillante (menor turbidez) y también la hace una cerveza más estable con mayor vida de anaquel que su contraparte de fermentación alta (Ales) (Lee, 2009).

## I. Maduración

La maduración (conocida también como fermentación secundaria o “lagering”) es el período posterior a la fermentación primaria, durante el cual se mantiene la cerveza en reposo, a temperaturas bajas (0°C – 4°C), con el fin de mejorar las condiciones organolépticas de la misma antes de ser finalmente consumida. En esta fase, la levadura reduce lentamente los fermentables remanentes generando CO<sub>2</sub> que suma carbonatación a la cerveza, y reprocesa ciertos subproductos perjudiciales de la fermentación como diacetilo, 2,3 pentanodiona, acetaldehído, entre otros. La maduración debe cumplir tres objetivos principales: Desarrollo del sabor, Clarificación y Carbonatación. El desarrollo del sabor es el proceso en el que evolucionan los sabores deseados y se reducen aquellos indeseables como diacetilo, acetaldehído y sulfuro de hidrógeno. La

clarificación es la eliminación de la levadura y los subproductos que causan turbidez. La carbonatación es el proceso de disolución del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la cerveza (González, 2017).

## J. Carbonatación

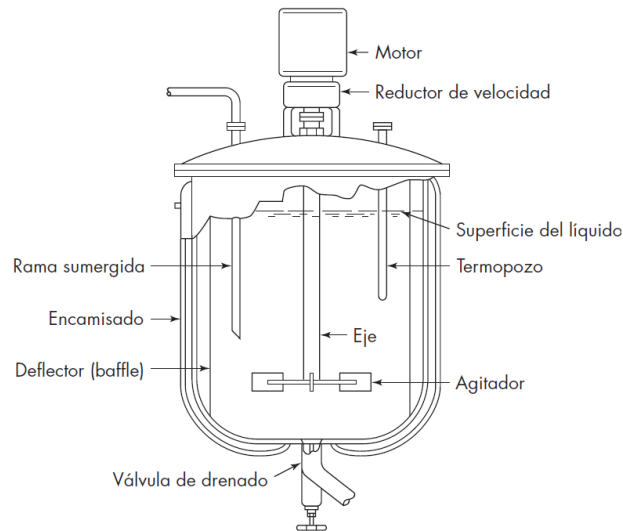
La cerveza se satura con dióxido de carbono antes del envasado; parte del gas proviene del producto de la fermentación. Dado que el oxígeno degrada la cerveza, el dióxido de carbono actúa como un agente protector y le da un sabor particular a la bebida. (González, 2017).

## K. Agitadores

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la efectiva agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia se les confunde, la agitación y mezcla no son sinónimos. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una manera específica, normalmente en un patrón circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. Los líquidos se agitan con numerosos propósitos, dependiendo de los objetivos de la etapa del proceso. Dichos propósitos incluyen suspensión de partículas sólidas, mezclado de líquidos miscibles, dispersión de un gas a través de un líquido, promoción de la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado, etc. (McCabe, 2007).

Los líquidos se agitan con más frecuencia en algún tipo de tanque o recipiente, por lo general de forma cilíndrica y provisto de un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar abierta al aire; pero generalmente está cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. El fondo del tanque es redondeado, no plano, para eliminar las esquinas o regiones agudas en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La profundidad (o altura) del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Un agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje sostenido en la parte superior. El eje es accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero es más común que se encuentre conectado a este, a través de una caja reductora de velocidad. Por lo general también lleva incorporados accesorios tales como líneas de entrada y salida, serpentines, encamisados y pozos para termómetros u otros equipos de medición de la temperatura (McCabe, 2007).

Figura 4. Tanque de agitación estándar



Fuente: McCabe, 2007

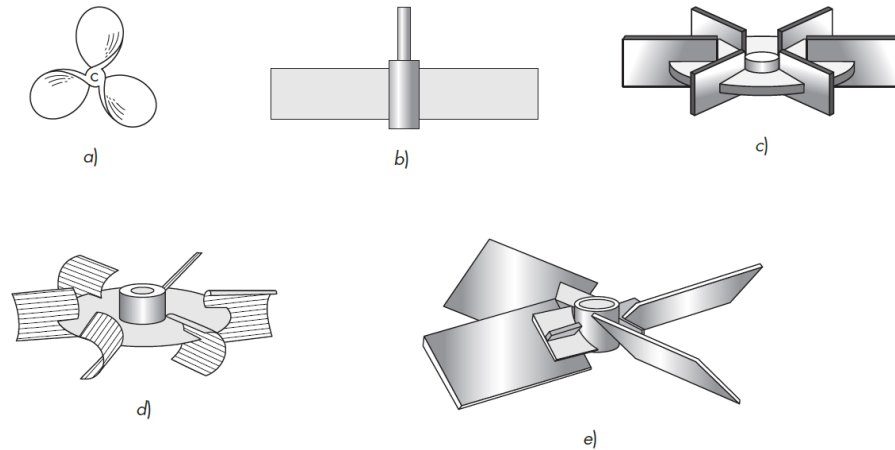
Los agitadores se dividen en dos clases. Los que generan corrientes paralelas al eje del impulsor se llaman impulsores de flujo axial; y aquellos que generan corrientes en dirección radial o tangencial se llaman impulsores de flujo radial. Los tres principales tipos de impulsores para líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia. Cada uno de ellos comprende muchas variantes y subtipos. Para líquidos muy viscosos, los impulsores más adecuados son los de hélice y agitadores de anclaje (McCabe, 2007).

Una hélice es un impulsor de flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. La dirección de la rotación se elige generalmente para impulsar el líquido a descender, y las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo del tanque. La columna altamente turbulenta de remolinos de líquido que abandona el agitador arrastra el líquido estancado. Las palas de la hélice cortan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces en tanques muy grandes. Las más comunes son las hélices marinas de tres palas con paso cuadrado; para propósitos especiales a veces se emplean hélices de cuatro palas, dentadas y otros diseños. Las hélices rara vez superan las 18 pulgadas de diámetro, independiente del tamaño del tanque. En tanque profundo es posible instalar dos o más hélices en el mismo eje, generalmente dirigiendo el líquido en la misma dirección (McCabe, 2007).

La turbina sencilla de palas rectas empuja al líquido en forma radial y tangencial, casi sin movimiento vertical al agitador. Las corrientes que genera se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y entonces fluyen hacia arriba o hacia abajo. Tales agitadores son llamados a veces paletas. En los tanques de proceso, los agitadores industriales típicos de paletas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm. La turbina

de disco, con palas múltiples rectas instaladas en un disco horizontal, como el agitador de pala recta, crea zonas de alta velocidad de corte. Esta turbina es especialmente útil para la dispersión de un gas en un líquido. La turbina de disco de pala cóncava también se utiliza con frecuencia para la dispersión de gas. Una turbina de pala inclinada se emplea cuando la circulación global es importante (McCabe, 2007).

Figura 5. Tipos de impulsores



**FIGURA 9.2**

Agitadores para líquidos de viscosidad moderada: *a)* agitador marino de tres palas; *b)* turbina simple de pala recta; *c)* turbina de disco; *d)* agitador de pala cóncava CD-6 (*Chemineer, Inc.*); *e)* turbina de pala inclinada.

Fuente: McCabe, 2007

## L. Enfriadores

La palabra “chiller” proviene de la palabra en inglés “chill” que significa helar, un chiller es un enfriador industrial de agua, anticongelante o salmuera la cual se usa en procesos de enfriamiento posteriores. La idea principal es extraer al calor generado en un proceso determinado por medio de contacto con el fluido frío, el cual retorna al “chiller” para reducir su temperatura y ser enviada nuevamente al proceso. Los “chillers” son usados en muchas áreas como la industria de alimentos, plásticos, impresión, HVAC, etc. (Coad, 1988).

Existen dos tipos de “chiller”: los que son enfriados por aire y los enfriados por agua, en los primeros, la transferencia de calor ocurre en un evaporador y un condensador es el que disipa el calor por medio de un ventilador que fuerza el aire por el mismo mientras que los que son enfriados por agua necesitan una torre de enfriamiento o un recurso de agua natural como un lago o un río. A su vez, para los dos casos existe también los que obtienen el acceso a sus respectivos fluidos por medio de otro elemento mecanizado como un ventilador o una bomba de suministro (Coad, 1988).

Un sistema completo de refrigeración incluye un condensador, un evaporador, un compresor, una válvula de expansión (evaporación), un agente refrigerante, una bomba de impulsión del agente refrigerante, tuberías y accesorios (Cengel, 2011).

En la fase de compresión, el compresor toma el refrigerante en forma de vapor a baja presión y lo comprime aumentando su presión y su temperatura. Por el aumento de presión, el vapor caliente es bombeado fuera del compresor a través de una válvula de descarga hacia el condensador (Cengel, 2011).

La función del condensador es sub-enfriar el líquido en una pequeña cantidad, lo realiza mediante disipadores de calor en forma de serpentín con pequeñas varillas y generalmente aletas para aumentar su transferencia de calor con el medio ambiente, para aumentar su eficiencia también algunos vienen equipados con un ventilador de gran capacidad o también para sistemas con agua de enfriamiento, el refrigerante se licúa a alta presión y temperatura (Cengel, 2011).

En el proceso de expansión, el refrigerante pasa de un lado de alta presión a un lado de baja presión por medio de un orificio muy pequeño, la reducción de presión en el refrigerante líquido provoca que este se vaporice hasta que el refrigerante alcanza la temperatura de saturación correspondiente a la de su presión, de esta forma absorbe calor dentro del evaporador que le sigue en el ciclo (Cengel, 2011).

En el proceso de evaporación, el calor fluye a través de las paredes o tuberías del evaporador hacia el refrigerante, convirtiéndolo nuevamente en vapor saturado, la válvula de expansión es quien regula el flujo de refrigerante a través del evaporador conforme sea necesario para mantener una diferencia de temperatura determinada, el bulbo de la válvula de expansión censa la variación y actúa sobre la válvula (Cengel, 2011).

## M. Tuberías y accesorios

Los fluidos se transportan por lo general en tuberías o tubos, los cuales tienen una sección transversal disponible en una variedad de tamaños, espesores de pared y materiales de construcción. En general, las tuberías tienen pared gruesa, diámetros relativamente grandes y una longitud relativamente corta; el tubo tiene una pared delgada, diámetro pequeño y una longitud larga. Las paredes de las tuberías son por lo general ligeramente rugosas; los tubos tienen paredes muy lisas. Los tramos de las tuberías se unen por collarines (bridas), tornillos, roscas o accesorios soldados; las piezas de los tubos están conectadas por accesorios de compresión, accesorios avellanados o soldados. Por último, los tubos se fabrican por extrusión o laminación en frío, mientras que las tuberías metálicas se hacen por soldadura, fundición, o mediante molduras o prensas (McCabe, 2007).

Las tuberías y los tubos están hechos de diversos materiales, incluyendo metales y aleaciones, madera, cerámica, vidrio y plásticos variados. El cloruro de polivinilo, o PVC, es ampliamente utilizado como tubería en las conducciones de agua residual. En las plantas de proceso, el material más común es el acero de bajo

contenido de carbono, con el que se fabrica la llamada tubería de hierro negro. Con frecuencia se utilizan también las tuberías de hierro forjado y de fundición para propósitos especiales. (McCabe, 2007).

Los métodos utilizados para unir las piezas de tuberías o tubos dependen en parte de las propiedades del material, pero sobre todo del espesor de la pared. Los productos tubulares de pared gruesa se conectan generalmente por medio de accesorios de rosca, por collarines o por soldadura. Las piezas de tubo de pared delgada se unen por soldadura o compresión o accesorios flameados. Las tuberías hechas de materiales frágiles tales como vidrio, carbono o hierro fundido se conectan por medio de bridas (o collarines) o uniones de enchufe y campana (McCabe, 2007).

Casi todas las tuberías están sometidas a variaciones de temperatura, provocando que la tubería se expanda o se contraiga. Si la tubería está fijada de manera rígida a sus soportes, puede desprenderse, doblarse o hasta romperse. No se deben emplear soportes fijos; en vez de eso, la tubería debe descansar libremente sobre rodillos o colgar de cadenas. También se toman precauciones en todas las conducciones de altas temperaturas para permitir la expansión, de esta manera los accesorios y las válvulas no son sometidos a tensiones. Esto se hace por medio de las curvas en la tubería, por uniones de expansión y por mangos de metal flexible (McCabe, 2007).

En muchos tipos de equipos es necesario que una parte del equipo se mueva en relación con otra, sin que existan fugas excesivas de fluido alrededor de la pieza móvil. Esto ocurre en uniones de expansión empacadas y en válvulas donde el vástago debe entrar en el cuerpo de la válvula y tener libertad de giro sin permitir escapes de fluido en la válvula. Esto también ocurre cuando el eje de una bomba o compresor penetra en la coraza, donde el eje de un agitador pasa a través de la pared del recipiente de presión, y en otros lugares similares. Los dispositivos más comunes para minimizar las fugas, al mismo tiempo que permiten el movimiento, son los prensaestopas y los sellos mecánicos. El movimiento de la pieza móvil puede ser recíprocante o rotacional, o ambos a la vez; puede ser pequeño y ocasional, como en una unión de expansión empacada, o virtualmente continuo, como un proceso de bombeo (McCabe, 2007).

## N. Válvulas

Las válvulas son accesorios que cumplen el propósito de disminuir o detener el flujo de un fluido. Algunas válvulas funcionan mejor en servicio de cerrado-abierto, es decir, abiertas o cerradas por completo. Otras están diseñadas para suprimir o reducir la presión y la velocidad de flujo de un fluido. Existen otras que permiten el flujo solo en una dirección o bajo ciertas condiciones de temperatura y presión. Finalmente, mediante el uso de sensores y sistemas de control automático para ajustar la posición de la válvula y por

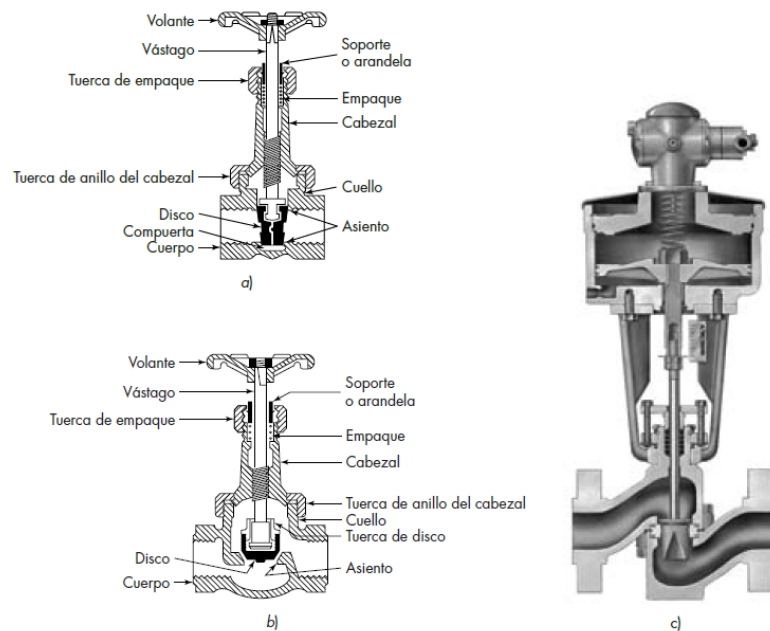


consiguiente el flujo a través de la válvula, es posible controlar desde puntos remotos, la temperatura, la presión, el nivel del líquido y otras propiedades del fluido. (McCabe, 2007).

Los tipos de válvulas más comunes son: de compuerta, de globo, de pistón, de bola y de retención. En una válvula de compuerta, el diámetro de la abertura a través de la cual pasa el fluido es casi el mismo que el de la tubería, y la dirección del flujo no cambia. Como resultado, una válvula de compuerta completamente abierta conlleva una pequeña caída de presión. No son recomendables para el control del flujo y, en general, se dejan abiertas o cerradas por completo (McCabe, 2007).

Las válvulas de globo se utilizan con frecuencia para controlar la velocidad de flujo de un fluido. Además, la abertura aumenta en forma lineal con respecto a la posición del vástago, y su uso es uniformemente distribuido alrededor del disco. Como resultado, la caída de presión en este tipo de válvula es importante. La mayoría de las válvulas de control automático son similares a las válvulas de globo, pero el volante manual es reemplazado por un activador neumático de resorte de diafragma o un motor eléctrico, y la posición de la válvula depende de una señal del controlador (McCabe, 2007).

Figura 6. Tipos de válvulas



**FIGURA 8.3**  
Válvulas comunes: a) válvula de compuerta; b) válvula de globo; c) válvula de control con activador neumático.

Fuente: McCabe, 2007

Las válvulas metálicas de pistón son útiles en las tuberías de procesos químicos, para temperaturas inferiores a 250 °C. Un cuarto de giro del vástago hace que la válvula pase de estar abierta en su totalidad a

un cerrado total; y cuando está por completo abierta, la caída de presión es mínima. En una válvula de bola, el elemento del sello es esférico, y los problemas de alineamiento y “congelación” del elemento son menores que con una válvula de pistón. En ambos tipos, el área de contacto entre el elemento móvil y el sello es grande, y por consiguiente, ambas pueden usarse como válvulas de regulación. Una válvula de retención permite el flujo solo en una dirección. Se abre debido a la presión del fluido en una determinada dirección; cuando el flujo se detiene o tiende a invertirse, la válvula se cierra automáticamente por la gravedad o por medio de un resorte que hace presión de nuevo sobre el disco (McCabe, 2007).

## O. Bombas

Las bombas incrementan la energía mecánica del líquido, aumentando su velocidad, presión o elevación, o las tres anteriores con el fin de transportar un fluido a través de tuberías o canales de conducción. Las dos clases principales de bombas son desplazamiento positivo y centrífugas. Las unidades de desplazamiento positivo aplican presión directamente al líquido por un pistón reciprocante, o por miembros rotatorios, los cuales forman cámaras alternadamente llenas o vacías del líquido. Las bombas centrífugas generan altas velocidades de rotación, entonces convierten la energía cinética resultante del líquido en energía de presión (McCabe, 2007).

En las bombas de desplazamiento positivo, un volumen determinado de líquido es encerrado en una cámara, la cual se llena alternativamente desde la entrada y se vacía a una presión más alta a través de la descarga. Existen dos subclases de bombas de desplazamiento positivo, las bombas reciprocantes y las rotatorias (McCabe, 2007).

Las bombas de pistón, de émbolo y de diafragma son ejemplos de bombas reciprocantes. En una bomba de pistón, el líquido pasa a través de una válvula de retención de entrada al interior del cilindro mediante la acción de un pistón y entonces es forzado hacia afuera a través de una válvula de retención de descarga en el recorrido de regreso. La mayoría son de doble acción. Para presiones más elevadas se utilizan bombas de émbolo. Un cilindro de pared gruesa y diámetro pequeño contiene un émbolo reciprocante perfectamente ajustado. Al final del recorrido el émbolo llena prácticamente todo el espacio en el cilindro. Las bombas de émbolo son de simple efecto y por lo general son accionadas por un motor. Pueden descargarse a presiones de 1,500 atm o más. En una bomba de diafragma, el elemento reciprocante es un diafragma flexible de metal, plástico o hule. Esto elimina la necesidad de empaques expuestos al líquido bombeado. Manejan de pequeñas a moderadas cantidades de líquido, hasta alrededor de 100 gal/min, y pueden desarrollar presiones superiores a 100 atm (McCabe, 2007).

La eficiencia mecánica de las bombas reciprocantes varía entre 40 y 50% para bombas pequeñas y de 70 a 90% para las grandes. La relación entre el volumen del fluido descargado y el volumen barrido por el pistón

o émbolo se llama eficiencia volumétrica. En las bombas de desplazamiento positivo la eficiencia volumétrica se mantiene casi constante al aumentar la presión de descarga. Debido a la constancia del flujo de volumen, las bombas de émbolo y diafragma son ampliamente utilizadas como “bombas de medición”, que inyectan líquido en un sistema de proceso con velocidades de flujo volumétrico controlado y ajustable (McCabe, 2007).

En las bombas rotatorias la cámara se mueve desde la entrada hasta la descarga y regresa de nuevo a la entrada. Existe una gran variedad como las bombas de engranaje, de lóbulo, de tornillo, de leva y de aspa. A diferencia de las bombas reciprocantes, las bombas rotatorias no contienen válvulas de retención. Cuanto menor sea la tolerancia entre las partes móviles y las estacionarias, las fugas se minimizan desde el espacio de la descarga hacia el espacio de la succión. Las bombas rotatorias operan mejor en fluidos limpios y moderadamente viscosos, tales como el aceite lubricante ligero. Se operan con presiones de descarga superiores a 200 atm (McCabe, 2007).

## V. ANTECEDENTES

En el año 2019 se realizó una investigación en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala en la modalidad de Megaproyecto titulado: *Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias*. En este proyecto se investigó la viabilidad de implementar una planta piloto para elaborar cerveza y se hizo una propuesta de los equipos necesarios, así como las características de operación para producir cerveza artesanal tipo Indian Pale Ale (IPA). En esta investigación se lograron instalar equipos del proceso productivo como la cámara de germinación de malta y el fermentador, también se determinaron las condiciones idóneas de operación para producir cerveza IPA (Álvarez *et al.* 2019).

En el año 2015 se realizó una investigación en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Politécnica de Cataluña en la modalidad de tesis titulado: “Diseño de Una Micro-Planta de Fabricación de Cerveza y Estudio de Técnicas y Procesos de Producción”. En este proyecto se realizó un estudio económico y tecnológico para la implantación de una fábrica de cerveza artesanal con una capacidad de producción inicial de 360 hl/año. La planta está situada en Albelda (Huesca). Además, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de todos los aspectos que influyen en la elaboración de la cerveza, identificando los puntos críticos del proceso que finalmente determinarán la calidad del producto final. En este trabajo se determina que las condiciones adecuadas para la maceración de malta Lager es de 66°C durante 60 minutos; la adición de lúpulo tradicional Lager debe ser en el minuto 0, 30 y 50 de la cocción de una hora; fermentar a 12°C durante 1 semana y madurar a 1°C por 2 semanas (Sancho, 2015).

El mercado de cerveza artesanal ha crecido en los últimos años en la región centroamericana, en cuanto a producción, Costa Rica fabrica 944,000 L anuales de cerveza artesanal (datos de ACACR), Panamá un aproximado de 600,000 L (Rana Dorada), El Salvador entre 600,000 y 700,000 L (Cadejo Brewing Company), República Dominicana de 450,000 a 500,000 L (Asociación de Cervecerías Artesanales Dominicanas, ACAD), Guatemala 360,000 L y Nicaragua 316,18 L (Grupo Cerveceros Artesanal de Centroamérica en Guatemala y la Cámara de Cerveceros Artesanales de Nicaragua) (López, 2019).

En Panamá la cerveza aporta 77% del consumo de bebidas alcohólicas, en Costa Rica 64% y en Guatemala 56%, puntualiza el Reporte Global del Estado del Alcohol 2018, realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Ante estos números, los empresarios artesanales están enfocados en aumentar el consumo de esta bebida (López, 2019).

## VI. METODOLOGÍA

### A. Pruebas de enfriamiento

#### Prueba de capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar

1. Se limpió por completo el tanque de almacenamiento de la torre de adsorción, las tuberías, la bomba y el chiller Tempstar del Laboratorio utilizando agua, jabón y una esponja.
2. Se preparó una solución de 20 L de propilenglicol-agua al 50% de concentración, midiendo con una probeta de 2 L.
3. Se programó el termostato del chiller Tempstar del Laboratorio a  $-5^{\circ}\text{C}$ .
4. Se agregó el agua glicolada al tanque de almacenamiento de la torre de adsorción.
5. Se arrancó la bomba y el chiller Tempstar para recircular el agua glicolada en el sistema.
6. Se midió la temperatura del agua glicolada cada minuto utilizando una termocupla digital hasta que alcanzó  $-5^{\circ}\text{C}$ .

#### Toma de tiempo de enfriamiento de agua en el reactor

1. Se limpió y vació la chaqueta del reactor utilizando agua y jabón.
2. Se instalaron mangueras cubiertas con aislante térmico para recircular el agua glicolada del chiller Tempstar hacia la chaqueta del reactor.
3. Se agregaron 35 L de agua a temperatura ambiente al reactor, medidos con probeta de 2 L.
4. Se arrancó la bomba y el chiller Tempstar para recircular el agua glicolada en la chaqueta del reactor.
5. Se midió la temperatura del agua dentro del reactor cada minuto utilizando una termocupla digital hasta que alcanzó  $1^{\circ}\text{C}$ .

#### Toma de tiempo de enfriamiento de mosto caliente en el reactor

1. Se calentaron 35 L (medidos con probeta de 2 L) de agua hasta el punto de ebullición utilizando vapor en la chaqueta del reactor.
2. Se enfrió el reactor haciendo circular agua de la calle a temperatura ambiente hasta que este alcanzó los  $50^{\circ}\text{C}$ , medidos con termocupla digital.
3. Se arrancó la bomba y el chiller Tempstar para recircular el agua glicolada en la chaqueta del reactor.
4. Se midió la temperatura del mosto dentro del reactor cada minuto hasta que alcanzó  $12^{\circ}\text{C}$ , medidos con termocupla digital.

## B. Pruebas de calentamiento

1. Se comprobó el buen estado de la trampa de vapor, las válvulas de ingreso y el manómetro acoplados a la entrada y salida de vapor de la chaqueta del reactor.
2. Se agregaron 35 L de agua (medidos con probeta de 2 L) a temperatura ambiente al reactor.
3. Se abrió el ingreso de vapor a la chaqueta del reactor y se estabilizó a una presión de 15 psi, medidos con manómetro de Bourdon.
4. Se midió la temperatura cada minuto hasta que el agua alcanzó 65°C, medidos con termocupla digital.
5. Se ajustó la válvula de ingreso de vapor manualmente para que la temperatura se estabilizara a 65°C por 10 minutos en el reactor.
6. Se abrió la válvula de ingreso de vapor hasta llegar a una presión de vapor de 15 psi, medidos con manómetro de Bourdon.
7. Se midió la temperatura cada minuto hasta que agua alcanzó 75°C, medidos con termocupla digital.
8. Se ajustó la válvula de ingreso de vapor manualmente para que la temperatura se estabilizara a 75°C por 10 minutos en el reactor.
9. Se abrió la válvula de ingreso hasta llegar a una presión de vapor de 15 psi, medidos con manómetro de Bourdon.
10. Se midió la temperatura cada minuto utilizando termocupla digital hasta que el agua llego al punto de ebullición.
11. Se cerraron las válvulas de ingreso de vapor y se comenzó con la prueba de enfriamiento de agua.

## C. Pruebas de agitación

### Prueba de agitación con motor WEG

1. Se comprobó el buen funcionamiento del agitador con variador y motor marca WEG ubicado en el Laboratorio, conectándolo a la corriente eléctrica y haciéndolo funcionar a diferentes frecuencias de oscilación.
2. Se preparó un mosto simulado utilizando 35 L de agua y 8 kg de granos de maíz en un contenedor de 40 L de volumen.
3. Se ajustó manualmente la altura del agitador para que entrara en el contenedor con la malta simulada.
4. Se arrancó el motor y se varió la frecuencia de este hasta que se creó una agitación turbulenta de la malta dentro del contenedor.

5. Se observó la frecuencia del variador del motor y el grado de agitación de la malta simulada dentro del contenedor.

#### Prueba de agitación con motor Servodyne

1. Se comprobó el buen funcionamiento del agitador con variador y motor marca Servodyne ubicado en el Laboratorio, conectándolo a la corriente eléctrica y haciéndolo funcionar a diferentes frecuencias de oscilación.
2. Se preparó un mosto simulado utilizando 35 L de agua y 8 kg de granos de maíz en un contenedor de 40 L de volumen.
3. Se ajustó la altura del agitador manualmente para que entrara en el contenedor con la malta simulada.
4. Se arrancó el motor y se varió la frecuencia de este hasta que llegó a su capacidad máxima.
5. Se observó la frecuencia del variador del motor y el grado de agitación de la malta simulada dentro del contenedor.

#### Prueba de agitación con motor Leeson

1. Se comprobó el buen funcionamiento del agitador con variador y motor marca Leeson ubicado en el Laboratorio, conectándolo a la corriente eléctrica y haciéndolo funcionar a diferentes frecuencias de oscilación.
2. Se preparó un mosto simulado utilizando 35 L de agua y 8 kg de granos de maíz en un contenedor de 40 L de volumen.
3. Se ajustó la altura del agitador manualmente para que entrara en el contenedor con la malta simulada.
4. Se arrancó el motor y se varió la frecuencia de este hasta que se creó una agitación turbulenta dentro del contenedor.
5. Se observó la frecuencia del variador del motor y el grado de agitación del mosto simulado en el contenedor.

### D. Instalación de agitador

1. Se compararon los 3 agitadores probados en el laboratorio y se seleccionó el más adecuado para el proceso de agitación durante la maceración y cocción de mosto en el reactor.
2. Se analizó la tapadera del reactor y se determinó el sitio más adecuado para que ingrese el eje del agitador en función del espacio disponible y el ángulo de entrada del eje.
3. Se determinó el tipo de propela más adecuado para la agitación y se calcularon las dimensiones de esta.
4. Se fabricó la propela calculada en un taller utilizando acero inoxidable.

5. Se midieron las dimensiones internas del reactor utilizando un metro y se calculó la altura adecuada para instalar el agitador en función del largo del eje.
6. Se desmontó la tapadera del reactor y se llevó a un taller para hacer una perforación por la cual entra el eje del agitador.
7. Se instaló un sello mecánico entre la tapadera del reactor y el eje del agitador para que este oscile sin tener fricción y sin permitir que haya fugas en el reactor.
8. Se instaló una estructura metálica de soporte para el motor del agitador utilizando tubos de metal cuadrado y una pinza de sujeción.
9. Se instaló la tapadera del reactor junto con el eje, la propela y el sello mecánico del agitador.
10. Se instaló el motor en el soporte y se acopló al eje comprobando que estuvieran perfectamente alineados y que el eje oscilara sin fricción.
11. Se instaló el variador de frecuencia a un costado del reactor sobre la estructura de soporte.
12. Se agregaron 35 L de agua (medidos con probeta de 2 L) al reactor y se hicieron pruebas de agitación a diferentes frecuencias comprobando que no hubiera vibraciones en el eje.

## E. Instalación de tanque de recepción

1. Se diseñaron las dimensiones y características del tanque en función del volumen del reactor principal y el espacio disponible en la planta.
2. Se fabricó el tanque en un taller especializado utilizando acero inoxidable.
3. Se instaló el tanque en la planta acoplándolo a la descarga del reactor y a la entrada de la bomba utilizando un niple y un “clamp” de acero inoxidable.
4. Se hicieron pruebas de descarga y recirculación con agua asegurándose que no hubiera fugas en las uniones del tanque con el reactor y con la bomba centrífuga.

## F. Instalación de tubería y accesorios

1. Se midió el largo de tubería necesario para lograr tener una recirculación entre el reactor, el tanque receptor y la bomba, utilizando un metro.
2. Se instalaron los tramos de tubería junto con niples, codos y válvulas de paso.
3. Se hicieron pruebas de recirculación con agua en el sistema para comprobar que no hubiera fugas en las uniones.

## G. Trituración de granos

1. Se limpió el secador de rodillos del Laboratorio utilizando un trapo húmedo.



2. Se ajustó la separación de los rodillos girando los volantes manualmente hasta llegar a una distancia de 2 mm.
3. Se encendió el equipo y se configuró el variador de frecuencia a una velocidad de 3 rpm.
4. Se agregaron 8.18 kg de malta en la tolva superior del equipo de forma gradual.
5. Se analizó la malta triturada para asegurar que los granos estuvieran quebrados.

## H. Maceración

1. Se cargó el reactor con 38 L de agua, medidos con probeta de 2 L.
2. Se encendió el agitador del reactor.
3. Se abrió la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta del reactor y se estabilizó a una presión de 15 psi, medidos con manómetro de Bourdon.
4. Se calentó el agua hasta llegar a 66 °C, medidos con termocupla digital.
5. Se agregaron 7.85 kg de malta Pilsen triturada al reactor, medidos con balanza móvil.
6. Se mantuvo la temperatura a 66 °C y la agitación en el reactor por 50 min, medido con termocupla digital y cronómetro.
7. Se incrementó la temperatura a 75 °C y se mantuvo por 10 min, medido con termocupla digital y cronómetro.
8. Se cerró la válvula de ingreso de vapor y se descargó el mosto en el tanque receptor.
9. Se retuvo el bagazo de malta en una bolsa y el mosto líquido se regresó al reactor por medio de la bomba.

## I. Lavado de granos

1. Se agregó 2 L de agua a la bolsa de bagazo de malta para recuperar el mosto retenido, medido con probeta de 2 L.
2. Se escurrió la bolsa de bagazo dentro del tanque receptor y se bombeó el mosto faltante al reactor.
3. Se retiró la bolsa con bagazo del tanque receptor y se desechó todo el afrecho de malta en un contenedor.
4. Se lavó la bolsa receptora con agua y jabón y se colocó nuevamente dentro del tanque receptor.

## J. Cocción

1. Se abrió la válvula de entrada de vapor de la chaqueta y se encendió el agitador.

2. Se calentó el mosto hasta llegar a ebullición y se comenzó la cuenta regresiva de 1 hora para la cocción.
3. Se agregaron 2 oz de lúpulo Hallertau Tradition 5.2 % AA en el minuto 60 de la cocción, medido con balanza analítica.
4. Se agregó 1 oz de lúpulo Hallertau Tradition 5.2 % AA en el minuto 30 de la cocción, medido con balanza analítica.
5. Se agregó 1 oz de lúpulo Hallertau Tradition 5.2 % AA en el minuto 10 de la cocción, medido con balanza analítica.
6. Al terminar la cocción, se cerró la válvula de ingreso de vapor y se descargó el mosto al tanque receptor.
7. Se filtró el lúpulo remanente en la bolsa y se regresó el mosto filtrado al reactor.
8. Se abrió la válvula de agua de la calle de la chaqueta del reactor y se comenzó con el proceso de enfriamiento del mosto.
9. Se retiró la bolsa del tanque, se desechó el lúpulo, se lavó la bolsa y se volvió a colocar en el tanque de recepción.
10. Se calculó el amargor de la cerveza utilizando el método Rager en base a las adiciones de lúpulo.

## K. Azúcares fermentables

1. Se tomó una muestra de  $10 \pm 0.05$  ml del mosto luego de la cocción, medido con pipeta de 10 ml.
2. Se hizo una solución de 10 ml al 10% de mosto con agua destilada, utilizando pipeta de 10 ml.
3. Se caracterizaron los azúcares fermentables iniciales utilizando un cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) marca Agilent serie 1100 con un detector marca Agilent serie 1200 (Ver Figura 29). Se utilizó una solución patrón de fructosa, glucosa y sacarosa a diferentes concentraciones para realizar una gráfica estándar y calcular una regresión lineal con la cual poder calcular la concentración de cada azúcar presente en la muestra de mosto.

## L. Fermentación

1. Se instaló una manguera en la tapadera del reactor y se sumergió el otro extremo dentro de una cubeta con agua para simular una trampa de CO<sub>2</sub>.
2. Se encendió el chiller Tempstar y se comenzó a recircular agua glicolada en la chaqueta del reactor para enfriar el mosto.
3. Se sacó una muestra de mosto y se sirvió en un erlenmeyer de 500 ml.

4. Se enfrió el mosto hasta llegar a 18 °C, medido con termómetro de bulbo.
5. Se agregaron 3 sobres de 11.5 g de levadura Fermentis Saflager W 34/70 en el erlenmeyer y se agito levemente para mezclar con el mosto.
6. Se esperó a que la levadura se activara y que el mosto en el reactor enfriara hasta llegar a 12 °C, medidos con termómetro analógico del reactor.
7. Se agregó la levadura en el reactor.
8. Se cerró la ventana de la tapadera del reactor y se aseguró con tornillos.
9. Se verificó que no hubiera fugas en el reactor y se inició con el proceso de fermentación por 1 semana.
10. Se tomaron muestras del mosto en tubos de ensayo cada día durante la fermentación para analizar concentración de azúcares y alcohol en el mosto.

## M. Maduración

1. Se programó el termostato del chiller Tempstar para subir la temperatura del agua glicolada y dejar que el reactor llegue hasta 20°C.
2. Se inició con el proceso de “descanso de diacetilo” y se mantuvo bajo las mismas condiciones por 2 días.
3. Se abrió la válvula de descarga del reactor para retirar el asiento de levadura de la parte baja del tanque y se volvió a cerrar para dejar la cerveza dentro del reactor.
4. Se programó el termostato del chiller Tempstar para bajar la temperatura del agua glicolada y enfriar el reactor hasta una temperatura de 0 °C.
5. Se inició el proceso de maduración y se mantuvo bajo las mismas condiciones por 5 días.

## N. Formación de microorganismos durante fermentación

1. Se pesó la levadura seca inicial antes de fermentación utilizando balanza analítica.
2. Se retiró el asiento de levadura del reactor abriendo la válvula de descarga y se colectó en una cubeta
3. Se pesó la cerveza con el asiento de levadura final después de fermentación, utilizando balanza móvil.
4. Se tomaron 8 muestras de 50 mL en tubos de ensayo plásticos, medidos con pipeta de 10 ml y se sedimentó la levadura usando la centrifugadora por lotes del Laboratorio.
5. Se retiró la cerveza excedente de los tubos de ensayo y se colectó la levadura sedimentada en un beaker de 600 mL.
6. Se pesó la levadura sedimentada húmeda usando balanza analítica OHAUS.

7. Se secó la levadura usando horno secador del Laboratorio de Biotecnología a 60 °C durante 3 días.
8. Se pesó la levadura seca usando balanza analítica OHAUS.
9. Se calculó el peso total de la levadura seca final después de fermentación haciendo balance de masa a partir de la muestra analizada.
10. Se calculó la masa de microorganismos formados durante la fermentación haciendo resta del peso inicial y final de la levadura.

## O. Concentración de alcohol

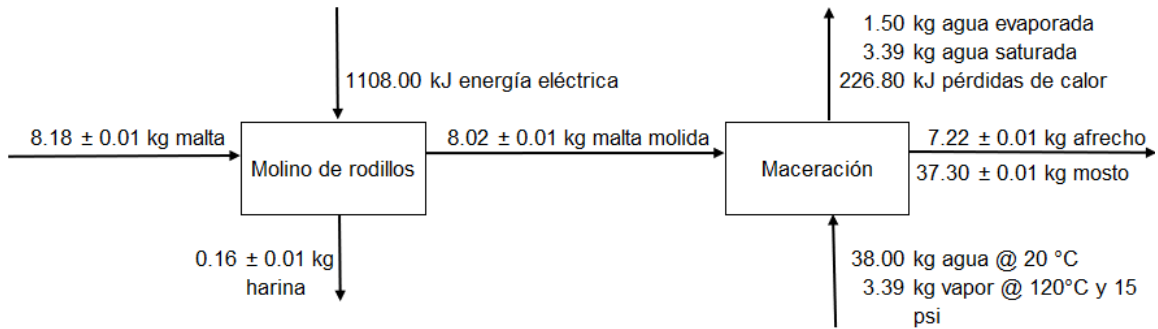
1. Se tomó una muestra de la cerveza final en un tubo de ensayo.
2. Se preparó una solución de 10 ml al 10% de cerveza con agua destilada, medido con pipeta de 10 ml.
3. Se midió la concentración de alcohol final de la cerveza utilizando un cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) marca Agilent serie 1100. Se utilizó una solución patrón de etanol a diferentes concentraciones para crear una gráfica y se calculó la regresión lineal de la misma para calcular la concentración en la muestra.

## P. Cálculos

1. Se hizo un balance de masa general utilizando los datos medidos de materias primas y desechos en todo el proceso de elaboración de cerveza.
2. Se hizo un cálculo de energía del agua de enfriamiento necesaria durante la fermentación y maduración utilizando la capacidad calorífica del agua glicolada, la temperatura del chiller y las fuentes de calor que interactúan con el sistema.
3. Se hizo un cálculo de energía del vapor necesario para llevar a cabo el proceso de maceración y cocción tomando en cuenta las condiciones del vapor de la caldera del Laboratorio, la capacidad calorífica de la malta y el agua dentro del reactor, la velocidad de transferencia de calor de la chaqueta y las pérdidas de calor en el ambiente.
4. Se calculó el número de Reynolds de la malta dentro del reactor durante el proceso de agitación en base a las dimensiones del reactor, las medidas y tipo de propela, la viscosidad de la malta y la velocidad de agitación del motor.

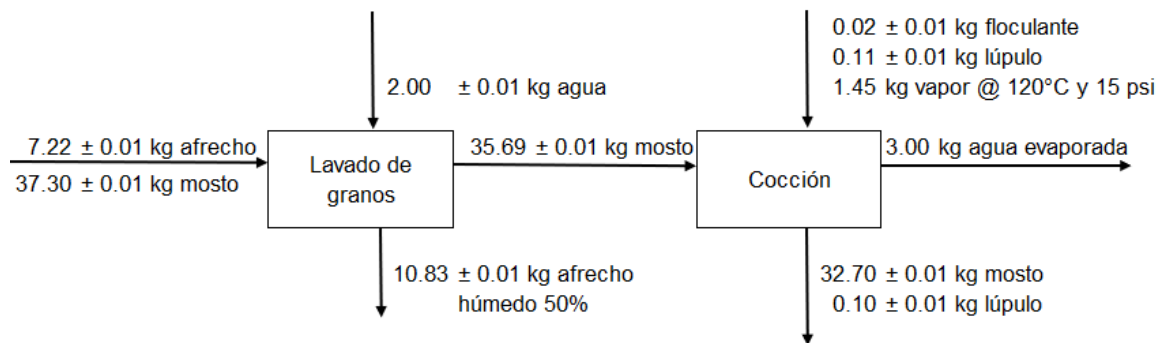
## VII. RESULTADOS

Figura 7. Balance de masa y energía de molienda y maceración de cerveza Lager



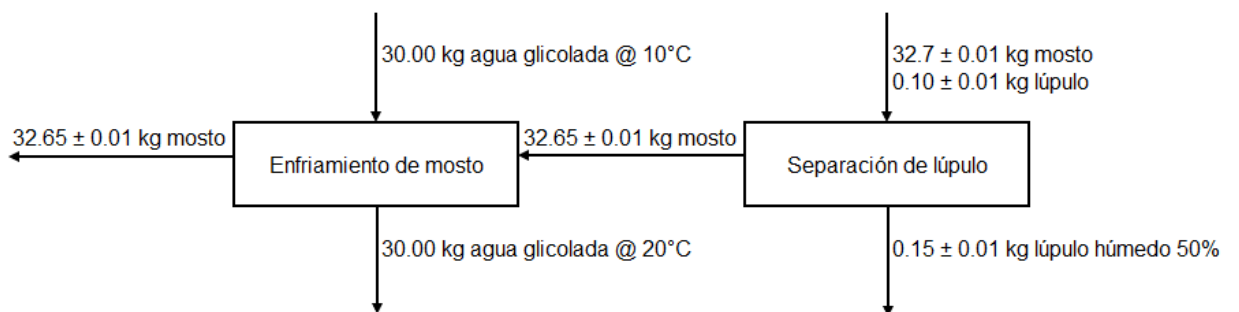
Balance de masa y energía para producción de 35 L de mosto. Ver cálculos 2, 3 y 4 en anexos.

Figura 8. Balance de masa y energía de lavado de granos y cocción de cerveza Lager



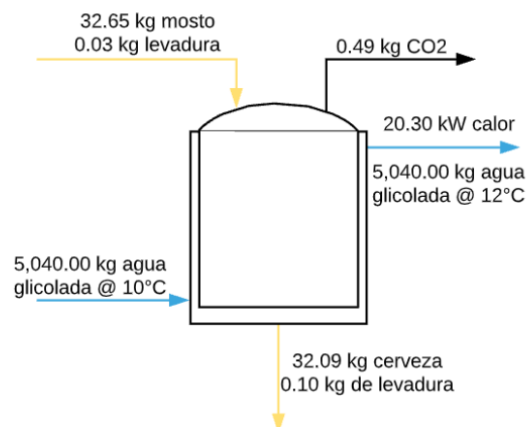
Balance de masa y energía para producción de 35 L de mosto. Ver cálculos 4 y 5 en anexos.

Figura 9. Balance de masa y energía de separación de lúpulo y enfriamiento de mosto de cerveza Lager



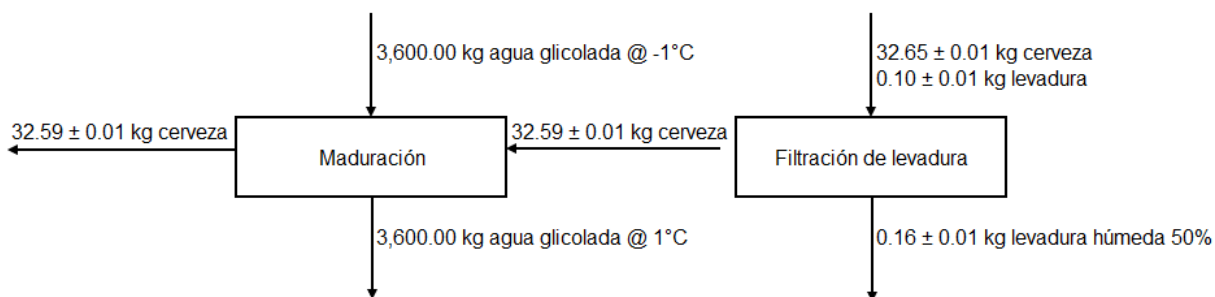
Balance de masa y energía para producción de 35 L de mosto. Ver cálculos 6 y 7 en anexos.

Figura 10. Balance de masa y energía del proceso de fermentación



Balance de masa y energía para producción de 32.09 L de cerveza. Ver cálculo 7 en anexos.

Figura 11. Balance de masa y energía de la separación de levadura y maduración de cerveza Lager



Balance de masa y energía para producción de 32.09 L de cerveza. Ver cálculo 7 en anexos.

Tabla 1. Tiempos de enfriamiento usando el chiller Tempstar y agua glicolada en la chaqueta del reactor

Proceso	Set point en el chiller Tempstar (°C)	Temperatura inicial dentro del reactor (°C)	Temperatura final dentro del reactor (°C)	Tiempo de para llevar a cabo el proceso (min)
Enfriamiento del agua glicolada	-5.0	22.0 ± 0.1	-5.0 ± 0.1	32.00 ± 0.01
Enfriamiento de mosto para fermentación	10.0	60.0 ± 0.1	12.0 ± 0.1	114.00 ± 0.01
Enfriamiento de cerveza para maduración	-1.0	12.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	202.00 ± 0.01

Medido con termocupla Extech y cronómetro Casio. Ver Figura 47 en anexos.

Tabla 2. Capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar

Proceso	Capacidad de enfriamiento (kW/h)
Enfriamiento de mosto para fermentación	0.47 ± 0.1
Enfriamiento de cerveza para maduración	0.04 ± 0.1

Ver cálculo 11 en anexos.

Tabla 3. Tiempos de calentamiento utilizando vapor en la chaqueta del reactor

Proceso	Presión de vapor relativa (psi)	Temperatura inicial dentro del reactor (°C)	Temperatura final dentro del reactor (°C)	Tiempo de calentamiento para llevar a cabo el proceso (min)	Pérdidas de calor al ambiente en el proceso (kJ)
Calentamiento del mosto para maceración	15.0 ± 0.5	22.0 ± 0.1	66.0 ± 0.1	9.00 ± 0.01	512.69
Calentamiento de mosto para cocción	15.0 ± 0.5	66.0 ± 0.1	96.0 ± 0.1	8.00 ± 0.01	373.91

Medido con termocupla Extech y cronómetro Casio. Ver Figura 4 en anexos.

Tabla 4. Capacidad de calentamiento de la chaqueta del reactor

Proceso	Capacidad de calentamiento (kW/h)
Calentamiento de mosto para cocción	67.92 ± 0.1

Ver cálculo 12 en anexos.

Tabla 5. Equipo analizado para agitación durante maceración, cocción y enfriamiento de mosto y razonamiento para evaluación de posible uso

<b>Equipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
Agitador con motor WEG	Eje: 1.2 m de largo Potencia: 3 hp Tipo de propela: marina Diámetro de propela: 0.12 m Re a 500 rpm: 32,000 Peso: 42.8 kg	Generó una agitación turbulenta en el tanque con malta a un bajo régimen de frecuencia en el variador. Se puede utilizar para lotes de producción más grandes o estilos de cerveza con mayor cuerpo.	El motor es muy grande y pesado para instalarlo sobre el reactor por lo que sería necesario una estructura robusta para sostenerlo.  Se puede deteriorar al usarlo siempre con el mínimo de su potencia máxima.
Agitador con motor Servodyne	Eje: 0.5 m de largo Potencia: 0.25 hp Tipo de propela: marina Diámetro de propela: 0.04 m Re a 500 rpm: 3,555 Peso: 11.2 kg	El motor es muy fácil de instalar en la estructura superior del reactor y se puede ajustar la posición del eje.	El motor no tiene la potencia suficiente para alcanzar una agitación turbulenta en el tanque dado que el número de Reynolds es inferior al régimen turbulento.  Se puede quemar el motor al someterlo siempre a esfuerzos de torque que superan su capacidad máxima.
Agitador con motor Leeson*	Eje: 0.9 m de largo Potencia: 1.5 hp Tipo de propela: marina Diámetro de propela: 0.08 m Re a 1,200 rpm: 34,133 Peso: 25.9 kg	El motor tiene la potencia suficiente para generar una agitación turbulenta a un régimen medio de frecuencia en el variador.	Es necesario instalar una estructura metálica de soporte adicional sobre el reactor para lograr colocar el motor y el eje en la posición correcta.

Ver especificaciones técnicas de los equipos en la sección de anexos.

\*Equipo seleccionado para instalación en la planta



Figura 12. Vista de planta de instalación de sistema de agitación para reactor

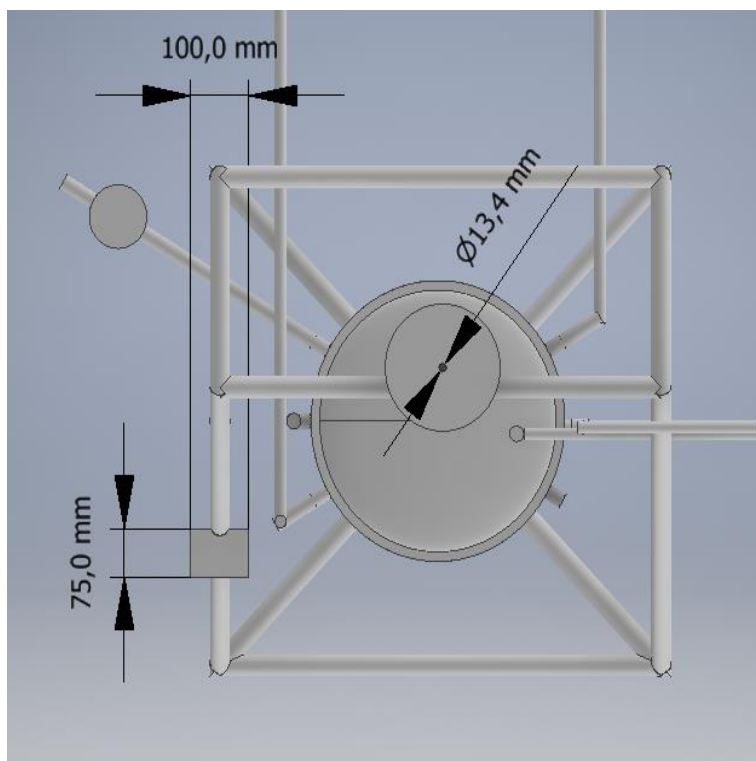


Figura 13. Vista de perfil de instalación de sistema de agitación para reactor

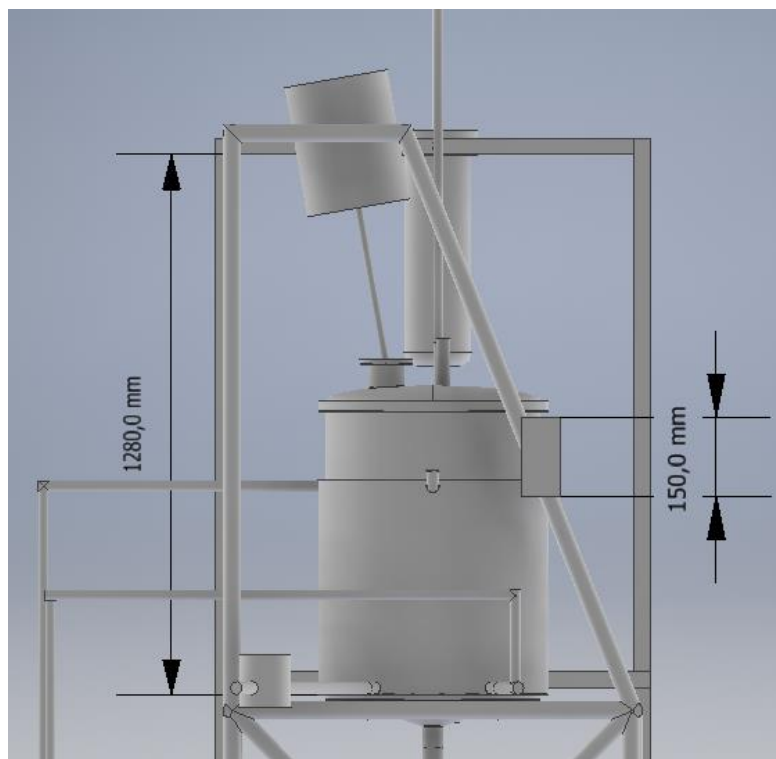


Figura 14. Vista de elevación de instalación de sistema de agitación para reactor

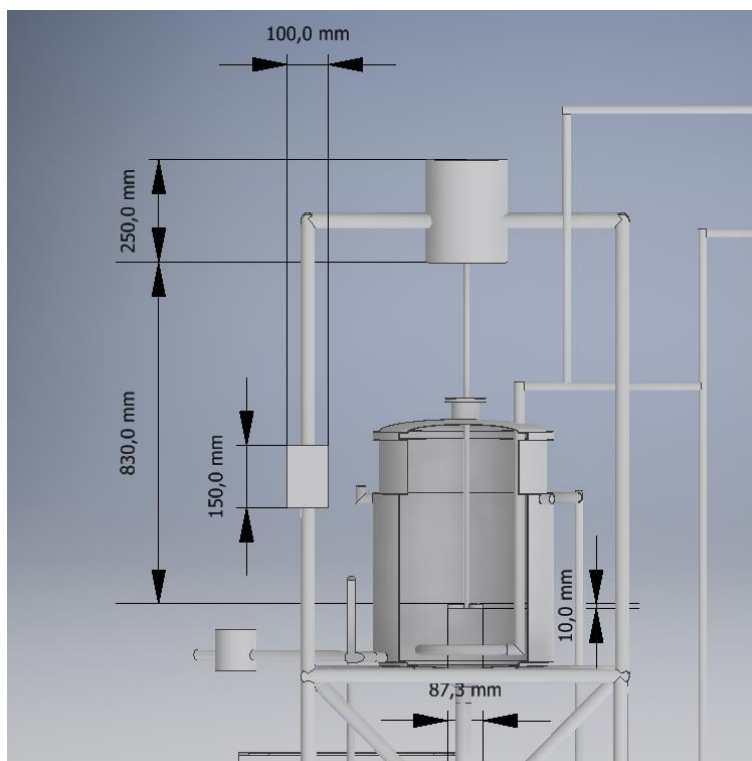


Figura 15. Vista de planta de instalación de tanque de recepción

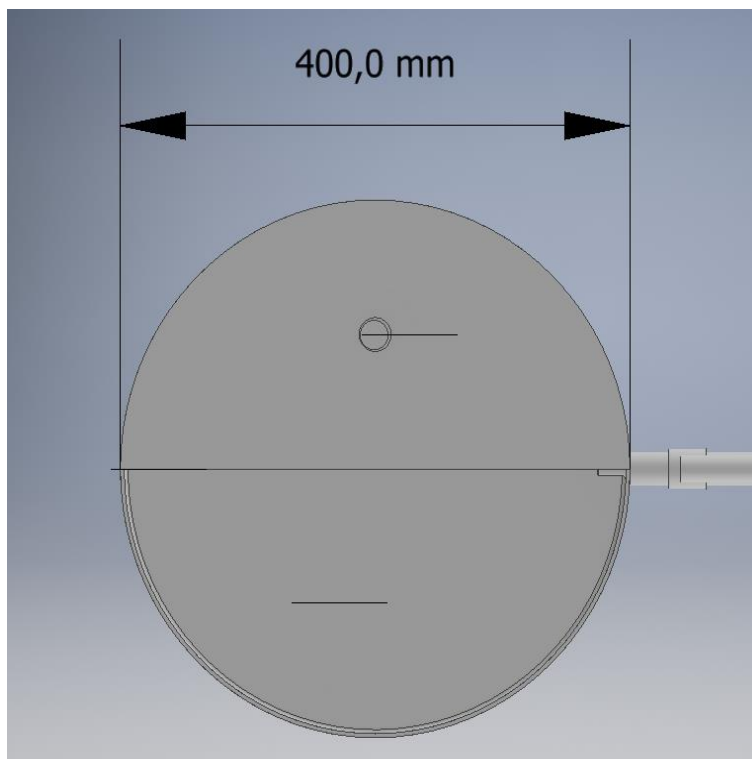


Figura 16. Vista de perfil de instalación de tanque de recepción

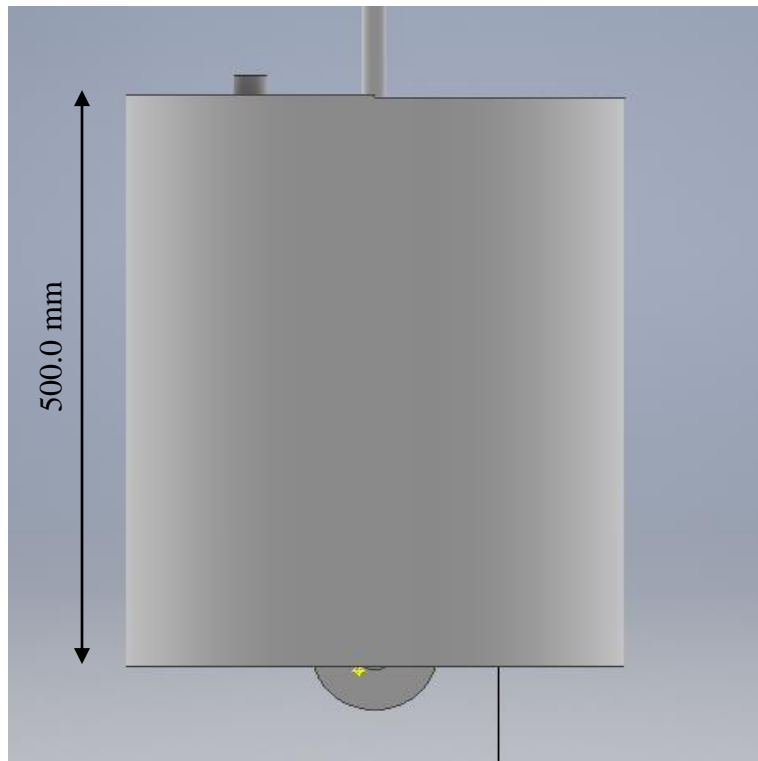


Figura 17. Vista de elevación de instalación de tanque de recepción

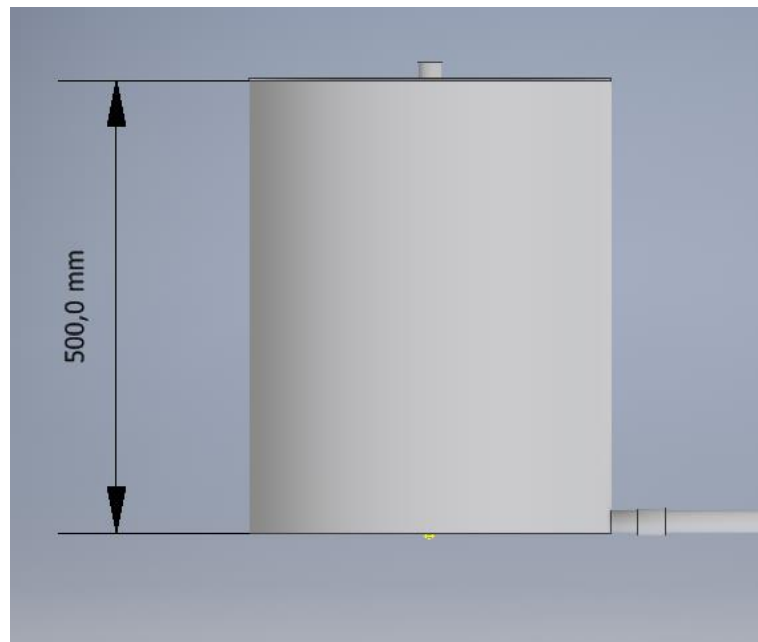


Figura 18. Diagrama de planta piloto con equipos disponibles

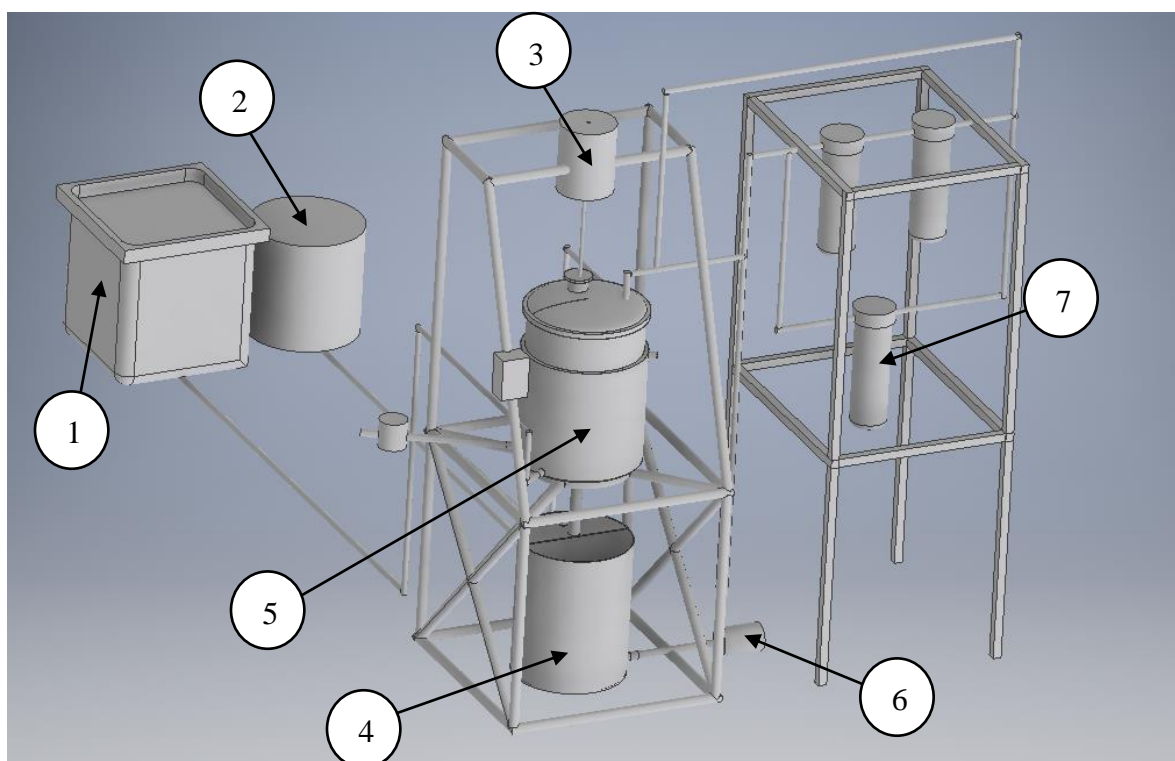


Tabla 6. Descripción de equipos en el diagrama de planta piloto

1	Chiller Tempstar
2	Tanque de almacenamiento de agua glicolada
3	Sistema de agitación con motor Leeson
4	Tanque receptor
5	Reactor
6	Bomba centrífuga
7	Sistema de filtración

Tabla 7. Concentración de azúcares presentes en el mosto inicial analizados en HPLC

	Sacarosa	Fructosa	Glucosa
Concentración (g/L)	45.533	3.467	3.400

Ver figuras 28 y 29 en los anexos.

Tabla 8. Concentración de alcohol final en la cerveza analizado en HPLC

	Etanol	Metanol
Concentración (g/L)	28.200	-

Ver figuras 28 y 29 en los anexos.

Figura 19. Consumo de azúcares fermentables y producción de etanol durante fermentación

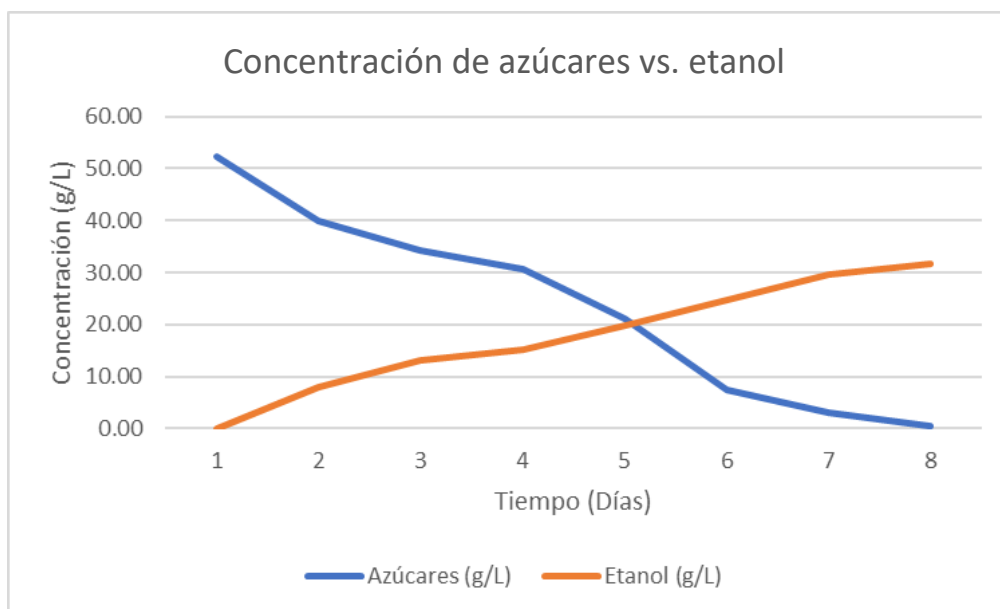


Tabla 9. Formación de microorganismos durante fermentación

Masa de levadura formada durante fermentación (g)	278.89 ± 0.005
---	----------------

Ver Tabla 10 en la sección de anexos.

Tabla 10. Amargor de la cerveza utilizando método Rager

Amargor de cerveza (IBU)	42.9
--------------------------	------

Ver cálculo 8 en la sección de anexos

Tabla 11. Color final de cerveza reportado en escala Lovibond

Color de cerveza promedio (SRM)	7
---------------------------------	---

Colores ubicados en escala colorimétrica Lovibond. Ver Figura 1.

Figura 20. Manual de operación de equipos instalados

	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 1 de 13
	<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	<b>Última modificación</b> marzo 2021

Objetivo:

Establecer un sistema de trabajo que garantice la calidad de la cerveza producida, utilizando los equipos instalados en la planta de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. En el manual se describen los procedimientos que se deben realizar en el proceso de maceración, cocción, fermentación y maduración para producir cerveza Lager.

El manual consta de 8 partes:


1. Prácticas de higiene
2. Agitación
3. Maceración
4. Lavado de granos
5. Cocción
6. Fermentación
7. Maduración
8. Limpieza del equipo

El manual debe ser sometido a una revisión periódica buscando mejoras en el proceso o actualizaciones.







## 1. Prácticas de higiene


Toda persona en el área de producción y que se encuentre en contacto directo con las materias primas, producto terminado, botellas, equipos y/o utensilios, debe practicar y observar las medidas de higiene que se describen a continuación:



- Mantener sus manos limpias en todo momento.
- Evitar el uso de perfumes, desodorantes o cualquier otro cosmético que posea olor fuerte al momento de estar operando el sistema de embotellado para evitar que se impregne en el producto.
- No utilizar accesorios que puedan caer sobre el producto contaminándolo.
- Limpiar el sudor y secar las manos con toallas limpias o pañuelos desechables cuando se esté operando en la planta.
- Utilizar guantes de látex para la manipulación del equipo.
- Ninguna persona que sufra heridas o lesiones deberá seguir manipulando productos ni superficies en contacto con la materia prima o productos del proceso, mientras la herida no haya sido completamente protegida.
- Toda persona que sufra de algún padecimiento respiratorio o gastrointestinal deberá retirarse del proceso para evitar el contacto con la materia prima, producto, botellas o superficies en contacto con la cerveza, hasta su total recuperación.
- El lavado de manos es obligatorio antes y después de entrar en contacto con la materia prima o los equipos de la planta.

		<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>		Página: 2 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021


## 2. Agitación

No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Asegurar que todos los tornillos del sistema estén apretados.	
2	Asegurar el motor este ajustado al soporte.	
3	Asegurar que el eje no tenga fricción haciéndolo girar de forma manual.	
4	Asegurar que el variador de frecuencia este conectado al motor.	
5	Conectar el variador de frecuencia a la corriente eléctrica de 220 V.	
6	Girar la perilla del variador hasta la posición inicial y oprimir el botón de arranque.	
7	Girar la perilla del variador incrementando la velocidad de forma gradual hasta llegar a 1,200 rpm	






		<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>		Página: 3 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021


8	Verificar que no existan vibraciones o sonidos anómalos en el funcionamiento del equipo. De lo contrario detener la operación y regresar al paso 1, 2 y 3.	
9	Verificar de forma visual que la agitación dentro del tanque sea suficiente para levantar los granos de malta del fondo del tanque y moverlos junto con el mosto. De lo contrario, aumentar la velocidad de agitación.	
10	Realizar los pasos 8 y 9 durante todo el proceso de agitación.	
11	Girar la perilla del variador hasta el punto inicial y una vez detenido el equipo, oprimir el botón de apagado del variador.	
12	Desconectar el variador de frecuencia de la corriente eléctrica.	









		<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>		Página: 4 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

### 3. Maceración







No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Agregar agua al reactor por la tapadera superior utilizando un embudo.	
2	Revisar que la tubería y los accesorios de la entrada de vapor a la chaqueta del reactor estén debidamente ajustados.	
3	Asegurar que la válvula de entrada de vapor a la chaqueta esté cerrada.	
4	Asegurar que la válvula de salida de la chaqueta hacia la trampa de vapor esté abierta.	
5	Asegurar que las válvulas de entrada y salida de agua glicolada a la chaqueta estén cerradas.	
6	Abrir la válvula de ingreso general de vapor a la planta de cerveza.	
7	Abrir de forma gradual la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta del reactor.	
8	Verificar de forma visual que salga agua condensada de la trampa de vapor.	


	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 5 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021




9	Encender el sistema de agitación.	
10	Verificar constantemente la presión de vapor asegurando que se mantenga en 15 psi durante todo el calentamiento. De lo contrario manipular la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta según sea necesario para mantener la presión en 15 psi.	
11	Monitorear la temperatura interna del reactor hasta que alcance los 66°C.	
12	Agregar malta molida al reactor por la tapadera superior utilizando un embudo.	
13	Mantener el mosto a 66°C manipulando la válvula de entrada de vapor según sea necesario por 1 hora.	
14	Cerrar la válvula de ingreso de vapor por completo y detener la agitación.	


	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 6 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

#### 4. Lavado de granos




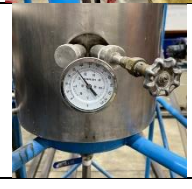

No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Asegurar que la tapadera del tanque receptor este debidamente asegurada.	
2	Verificar que la bolsa de recepción dentro del tanque este bien colocada.	
3	Abrir la válvula de descarga del reactor y esperar a que se vacíe completamente.	
4	Cerrar la válvula de descarga del reactor.	
5	Conectar la bomba a la corriente eléctrica.	
6	Abrir la válvula de salida del tanque receptor.	


	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 7 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021



7	Cerrar la válvula de paso hacia los filtros.	
8	Abrir la válvula de paso de retorno al reactor.	
9	Encender la bomba hasta que se vacíe el tanque receptor.	
10	Abrir la tapadera abatible y agregar agua sobre el afrecho de malta.	
11	Encender la bomba hasta que se vacíe el tanque receptor.	
12	Extraer la bolsa de recepción y desechar el afrecho.	
13	Lavar la bolsa de recepción y volver a colocarla.	


		<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>		Página: 8 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

## 5. Cocción




No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Abrir la válvula de ingreso general de vapor a la planta de cerveza.	
2	Abrir de forma gradual la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta del reactor.	
3	Verificar de forma visual que salga agua condensada de la trampa de vapor.	
4	Encender el sistema de agitación.	
5	Verificar constantemente la presión de vapor asegurando que se mantenga en 15 psi durante todo el calentamiento. De lo contrario manipular la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta según sea necesario para mantener la presión en 15 psi.	
6	Monitorear la temperatura interna del reactor hasta que alcance los 96°C.	
7	Mantener el mosto a 96°C manipulando la válvula de entrada de vapor según sea necesario por 1 hora.	
8	Agregar lúpulo al reactor por la tapadera superior según las cantidades y los tiempos de la receta utilizada.	
9	Cerrar la válvula de ingreso de vapor por completo y detener la agitación.	
10	Abrir la válvula de descarga del reactor y esperar a que se vacíe completamente.	









	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 9 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

11	Cerrar la válvula de descarga del reactor.	
12	Encender la bomba hasta que se vacíe el tanque receptor.	
13	Extraer la bolsa de recepción y desechar el lúpulo agotado.	
14	Lavar la bolsa de recepción y volver a colocarla.	


	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 10 de 13
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

## 6. Fermentación





No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Revisar que las mangueras flexibles se encuentren en buen estado, sin fugas y debidamente recubiertas con aislante térmico.	
2	Asegurar cada extremo de las mangueras con la entrada y salida de la chaqueta del reactor y la entrada y salida del chiller Tempstar para completar el circuito de recirculación de agua glicolada.	
3	Cargar el tanque de almacenamiento de la torre de adsorción con 20 L de agua glicolada.	
4	Asegurar que todas las válvulas de la torre de adsorción estén cerradas, excepto la válvula de ingreso al chiller.	
5	Conectar a la corriente eléctrica el PLC, el chiller y la computadora de la torre de adsorción.	
6	Encender la computadora, iniciar sesión y abrir el programa de control del PLC.	
7	En el programa, hacer clic sobre las válvulas 1 y 2 para abrirlas; y sobre el chiller y la bomba para encenderlos.	
8	Mantener oprimido el botón MENU en la pantalla del termostato del chiller hasta que comience a parpadear.	
9	Oprimir nuevamente el botón MENU y revisar que en la pantalla de muestre el set point actual.	
10	Ajustar el set point del chiller usando los botones de incremento o decremento según sea necesario.	


11	Oprimir nuevamente el botón MENU y revisar que la pantalla vuelva a mostrar la temperatura actual del fluido.	
12	Esperar que el chiller enfríe el fluido hasta la temperatura programada en el termostato.	
13	Asegurar que la válvula de entrada de vapor a la chaqueta del reactor y la de salida a la trampa de vapor estén completamente cerradas.	
14	Abrir la válvula manual de color amarillo en la salida de la bomba de la torre de adsorción.	
15	Verificar que exista una recirculación adecuada de agua glicolada entre el chiller y la chaqueta del reactor.	
16	Encender el sistema de agitación.	
17	Monitorear la temperatura interna del reactor hasta que descienda a 12°C.	
18	Apagar el sistema de agitación.	
19	Agregar la levadura por la tapadera superior del reactor.	
20	Sellar el reactor con la tapadera de vidrio.	
21	Asegurar que la manguera de salida de CO2 esté sumergida en agua.	
22	Monitorear que la temperatura interna del reactor se mantenga en 12°C durante toda la fermentación. De lo contrario, modificar el set point del chiller según sea necesario.	








	<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>			Página: 12 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

## 7. Maduración

No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Abrir la tapadera abatible del tanque receptor.	
2	Abrir la válvula de descarga del reactor y esperar a que salga todo el asiento de levadura del fondo del reactor, luego cerrar la válvula.	
3	Modificar el set point del chiller a -1°C para enfriar la cerveza a la temperatura de maduración.	
4	Monitorear la temperatura interna del reactor para que se mantenga en 1°C durante toda la maduración. De lo contrario, cambiar el set point del chiller según sea necesario.	

		<b>Manual de operación de equipos en la planta de cerveza</b>		Página: 13 de 13
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Autorizado por:</b>	<b>Fecha de implementación:</b>	<b>Última modificación</b>
Axel Avalos	Gamaliel Zambrano	Gamaliel Zambrano	marzo 2021	marzo 2021

## 8. Limpieza de equipos

No.	Descripción del procedimiento	Imágenes del equipo
1	Abrir la válvula de descarga del reactor y vaciar el equipo por completo.	
2	Abrir la tapadera del reactor y lavar el interior del equipo utilizando agua a presión con una manguera.	
3	Lavar el tanque receptor utilizando agua a presión con una manguera y recircular agua limpia a través del sistema de filtración hasta retirar toda la suciedad presente dentro de las tuberías del equipo.	
4	Preparar una solución de 50 L de yodopovidona al 5%	
5	Cargar la solución de yodopovidona al tanque receptor y encender la bomba para iniciar la recirculación de la solución a través del sistema de filtración y del reactor durante 15 min.	
6	Retirar la solución del equipo y desecharla.	
7	Repetir el procedimiento en cada nuevo lote de producción.	

## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El primer análisis involucrado en el Trabajo de Graduación es el enfriamiento de agua glicolada usando el chiller Tempstar del Laboratorio. La elaboración de cerveza Lager requiere de condiciones de temperatura controlada, es especial en el proceso de maduración, donde es necesario mantener la temperatura de la cerveza hasta 1°C y por ende el fluido refrigerante dentro del chiller Tempstar debe estar entre -3°C y -1°C para compensar el calor ganado por el sistema tanto del ambiente al tener contacto con la superficie externa de la chaqueta del reactor como de la propia cerveza en el interior del tanque. Por esta razón, se evaluó el uso de agua glicolada como fluido refrigerante en el chiller Tempstar dado que el agua potable presenta el riesgo de congelarse a temperaturas bajo cero y dañar la bomba y las tuberías del equipo. En muchos procesos de enfriamiento industrial se acostumbra a utilizar una mezcla de etilenglicol y agua como fluido refrigerante, sin embargo, se escogió propilenglicol para preparar la solución de agua glicolada dado que este compuesto no es tóxico para la salud en caso de entrar en contacto accidental con el producto dentro del reactor. Se observó que una proporción de propilenglicol-agua del 20% es suficiente para que la solución permanezca en estado líquido hasta una temperatura de -3°C; sin embargo, se recomienda operar el equipo siempre con una concentración no menor al 30% para evitar el riesgo de que la solución se congele y dañe el equipo. Se determinó que la cantidad mínima de agua glicolada en recirculación que requiere el sistema de enfriamiento para que la bomba trabaje sin riesgo de cavitación es de 20 L; sin embargo, se recomienda operar el equipo con un nivel de 30 a 40 L para evitar el riesgo de que la bomba llegue a cavitación a causa de fugas en la tubería o en los accesorios instalados. Se determinó que el chiller Tempstar tiene la capacidad de enfriar 30 L de agua glicolada a temperatura ambiente (22°C) hasta -5°C en un tiempo de 32 min, esto demostró que el equipo tiene la capacidad de enfriamiento adecuada para el proceso de elaboración de cerveza Lager. En comparación, un refrigerador convencional puede tardar hasta 3.5 h para enfriar la misma cantidad de líquido a las mismas condiciones.

Para completar el circuito de recirculación de agua glicolada entre el chiller Tempstar y la chaqueta del reactor fue necesario instalar mangueras flexibles entre la entrada y salida de la chaqueta del reactor y la entrada y salida del sistema de enfriamiento, se agregó un recubrimiento de aislante térmico a todo lo largo de las mangueras para así minimizar el intercambio de calor entre el sistema y el ambiente, con esta adaptación se consiguió que la diferencia de temperatura entre el agua glicolada que sale del chiller Tempstar y la que entra a la chaqueta se mantenga en un rango entre 1°C y 2°C lo cual es bastante bajo tomando en cuenta que las mangueras recorren una distancia de más de 15 metros a lo largo del Laboratorio. Esto también justifica el uso de manguera flexible en vez de tubería metálica ya que es más fácil de instalar, manipular y su costo es considerablemente menor sin dejar de cumplir con los requerimientos del proceso. Se utilizaron abrazaderas de metal en los extremos de las mangueras para asegurar que no haya fugas en las uniones con la chaqueta o el chiller Tempstar y también para que sean fáciles de quitar cuando no esté en operación el sistema de enfriamiento de la planta piloto de cerveza.

En las pruebas de enfriamiento de mosto se determinó que el chiller Tempstar es capaz de enfriar 35 L de mosto desde 60°C hasta 12°C (que es la temperatura de fermentación) en un tiempo de 1 hora y 54 minutos. Este tiempo de enfriamiento está por encima de lo recomendado para la elaboración de cerveza ya que mientras más tiempo pase el reactor abierto al ambiente, más probable es que haya contaminación de algún microorganismo en el mosto previo a iniciar el proceso de fermentación. Esto puede resultar en variaciones en la calidad de la cerveza final, desde sabores no deseados hasta patógenos desarrollados dañinos para la salud del consumidor final. El largo tiempo de enfriamiento se debió a que la misma chaqueta donde se recircula agua glicolada para enfriar es la misma donde se introduce vapor para calentar el mosto durante la maceración y cocción por lo que justo después de estar calentado el mosto con vapor saturado en la chaqueta, se debe introducir agua de enfriamiento en la misma y reducir la temperatura lo más rápido posible. El choque térmico entre la chaqueta que viene de estar a más de 100°C y el agua glicolada que viene del chiller Tempstar a 5°C podría ser demasiado abrupto y la misma chaqueta se podría agrietar por lo que antes de recircular agua glicolada se introdujo agua de la calle a temperatura ambiente en la chaqueta de forma gradual para condensar el vapor de forma segura e iniciar el proceso de enfriamiento de forma menos violenta desde que el mosto está en ebullición hasta que alcanza los 60°C, donde se determinó que ya es seguro iniciar con la recirculación de agua glicolada. Dado que el largo tiempo de enfriamiento no se debe a la falta de capacidad del chiller Tempstar sino a la posible fragilidad de la chaqueta se determinó que el chiller Tempstar del Laboratorio sigue siendo adecuado para el proceso de enfriamiento de mosto, pero se recomienda implementar un método auxiliar de enfriamiento que actúe directamente en el mosto sin comprometer la integridad de la chaqueta para ayudar a enfriarlo más rápido. Una alternativa podría ser llevar a cabo el proceso de maceración y cocción con menos agua inicial y luego en el proceso de enfriamiento agregar agua fría al mosto para que llegue a la gravedad específica adecuada al mismo tiempo que lo enfría.

Se determinó que el chiller Tempstar es capaz de enfriar 35 L de cerveza desde la temperatura de fermentación (12°C) hasta la temperatura de maduración (1°C) en un tiempo de 3 horas y 22 minutos. A pesar que el cambio de temperatura inicial y final en este proceso es menor que en el enfriamiento de mosto, el tiempo de enfriamiento es considerablemente mayor debido a que el set point del chiller Tempstar se programó a -2°C y a medida que la cerveza se enfría, el diferencial de temperatura entre el agua glicolada y la cerveza se vuelve cada vez menor por lo que la velocidad de transferencia de calor también disminuye y aunado a esto el agitador permanece apagado durante este proceso por lo que la distribución de calor en la cerveza también es más lenta en comparación con el proceso de enfriamiento de mosto. Sin embargo, el tiempo de enfriamiento durante este proceso no es tan crítico como lo es en el enfriamiento de mosto ya que en esta etapa el reactor se encuentra totalmente sellado por lo que no hay riesgo de una contaminación y también porque el cambio de temperatura gradual ayuda a que la actividad de la levadura se ralentice de forma adecuada y se inicie el proceso de maduración en la cerveza. Se observó que durante el proceso de enfriamiento de maduración la superficie exterior del reactor y los tramos de tubería sin recubrimiento de aislante térmico presentaron un goteo constante de agua durante todo el proceso debido a la humedad del aire

condensada debido a la baja temperatura de la superficie del metal. Esto no solo trae problemas técnicos debido a la constante condensación de agua, sino que también implica que existe una deficiencia energética en el sistema debido al intercambio de calor entre el ambiente y las superficies metálicas expuestas, lo cual hace que el chiller Tempstar deba activarse con mayor frecuencia en su ciclo de encendido y apagado para mantener la temperatura del agua glicolada estable. Se recomienda recubrir los tramos de tubería expuestos con aislante térmico de espuma de poliuretano dado su bajo costo y fácil instalación, pero para la chaqueta del reactor se recomienda un material aislante que también soporte las altas temperaturas alcanzadas en el proceso de maceración y cocción.

Para realizar los cálculos de balance de energía del sistema de enfriamiento se utilizó la fórmula general de calor específico para calcular la energía que es necesaria retirar del mosto para enfriarlo y llevarlo a la temperatura deseada en función del proceso. La capacidad calorífica del mosto se calculó en base a la composición porcentual de agua y azúcares disueltos. La masa del mosto se calculó en base al volumen dentro del reactor y la densidad medida del mosto. El diferencial de temperatura es de 48°C en el enfriamiento para fermentación y de 11°C en el enfriamiento para maduración. La capacidad calorífica del fluido refrigerante también se calculó en base a su composición de agua y propilenglicol. La velocidad de transferencia de calor se calculó según el área superficial total de contacto entre el agua glicolada y el mosto, al diferencial de temperatura, al grosor de la pared del reactor y a la constante de transferencia de calor específica para el acero inoxidable del cual está hecho el reactor. Se consideraron las pérdidas de energía por contacto con el ambiente y se determinó que el flujo adecuado de agua glicolada en recirculación a 5°C para enfriar el mosto para fermentación es de  $1.438 \times 10^{-3}$  kg/s.

Para el proceso de maceración y cocción se utilizó vapor de la caldera del Laboratorio como fuente de calor dado que el reactor contaba con una chaqueta y accesorios adecuados para el manejo de vapor como lo es una trampa de vapor, válvulas de globo para regular flujo, manómetro y regulador de presión. Se determinó que la chaqueta del reactor operando con el agitador encendido y utilizando vapor saturado a 15 psi, tiene la capacidad de calentar 35 L de mosto desde temperatura ambiente (22°C) hasta la temperatura de maceración (66°C) en 9 minutos. Este tiempo de calentamiento es aceptable para el proceso de maceración ya que en la mayoría de los métodos de calentamiento alternos (como el uso de resistencias eléctricas o gas propano) se tardan más de 30 minutos en llegar a la temperatura de maceración bajo las mismas condiciones iniciales. Se determinó que la chaqueta del reactor es capaz de operar a una presión de vapor de hasta 20 psi; sin embargo, se ajustó el regulador de presión para que admita una presión de vapor máxima de 15 psi en la chaqueta del reactor dado que este no cuenta con una válvula de alivio instalada y la chaqueta podría llegar a sufrir daños si la presión de vapor llegase a ser muy grande.

El calentamiento del mosto desde la temperatura de maceración (66°C) hasta la temperatura de cocción (96°C) bajo las mismas condiciones de presión de vapor y agitación tardó 8 minutos. Nuevamente este tiempo

de calentamiento es aceptable para el proceso de cocción y es mucho menor que el habitual que tardan otros métodos de calentamiento. El proceso de cocción requiere que el mosto se encuentre a temperatura de ebullición; sin embargo, se debe cuidar que la ebullición no sea muy vigorosa para evitar que se evapore mucha agua del mosto durante el proceso. Para lograr estabilizar la temperatura del mosto tanto para la maceración como la cocción, fue necesario abrir y cerrar la válvula de ingreso de vapor a la chaqueta de forma intermitente y, a pesar de ser un método completamente manual, se observó que la temperatura del mosto no varió más de 2°C por encima o por debajo del valor de operación ideal por lo que no se consideró como una fuente de error significativa en el proceso.

Se calculó que las pérdidas de calor por convección de la superficie externa de la chaqueta del reactor hacia el ambiente durante el proceso de maceración fueron de 512.69 kJ y durante el proceso de cocción de 373.91 kJ. Aunque estas pérdidas representan menos del 5% de la energía total requerida para el calentamiento del mosto en cada etapa, las pérdidas de energía al ambiente se pueden reducir de manera significativa si se cubre todo el reactor y la chaqueta con un aislante térmico que sea eficiente tanto para evitar las pérdidas de calor a altas temperaturas durante la maceración y cocción así como evitar intercambio de calor con el ambiente a bajas temperaturas durante la fermentación y maduración de la cerveza, se recomienda instalar un recubrimiento de lana de roca.

Para seleccionar el agitador adecuado para instalar en el reactor de la planta de cerveza se hicieron pruebas con 3 diferentes sistemas de agitación disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Debido al alto costo de la materia prima, se simuló la malta con granos de maíz disponibles en el laboratorio para hacer las 3 pruebas de agitación. Se consideró que los resultados de hacer esta simulación son aplicables a la malta ya que los granos de maíz son más grandes y pesados que los granos de cebada. El primer agitador analizado fue el motor Weg de 3 caballos de potencia. Se observó que este motor fue capaz de generar una agitación turbulenta con un número de Reynolds de 32,000 en la malta con facilidad, incluso a bajos regímenes de frecuencia en el variador por lo que sí cumplió con los requerimientos para usarse en la planta de cerveza. Sin embargo, el motor es muy grande y pesado por lo que instalarlo sobre el reactor requiere de una estructura metálica de soporte muy grande y por ende muy difícil de ajustar su inclinación para que el eje entre con el mismo ángulo de inclinación presente en la tapadera del reactor. También se determinó que operar el motor siempre con el mínimo de su potencia podría acabar deteriorándolo a largo plazo por lo que se descartó su uso en la planta de cerveza. El segundo sistema de agitación analizado fue el motor Servodyne de 0.25 caballos de potencia. Este motor cuenta con una estructura metálica de soporte que permite que el motor se pueda ajustar en inclinación en 2 ejes y es fácil de desmontar y montar dado que es un motor relativamente pequeño y ligero por lo que se podía adaptar al reactor de la planta sin necesidad de soportes adicionales. Al realizar la prueba de agitación con este motor se determinó que el número de Reynolds fue de 3,555 por lo que no logró generar una agitación turbulenta en la malta simulada incluso operando a su capacidad máxima por lo que se descartó para su uso en la planta. El tercer sistema de agitación analizado fue el motor Leeson

de 1.5 caballos potencia. Se determinó que el número de Reynolds para este sistema fue de 34,133 por lo que este agitador mostro tener la suficiente potencia para generar una agitación turbulenta en la malta simulada a un régimen intermedio de frecuencia en el variador a la vez que su tamaño y peso eran aún manejables para lograr manipularlo y montarlo sobre una estructura metálica sobre el reactor por lo que cumplió con el requerimiento para su uso en la planta y fue el motor seleccionado para ser instalado en el reactor.

La tapadera del reactor tiene una superficie curva excepto por la tapa de una brida que sobresale de la tapadera de forma inclinada por lo que se decidió que era el punto más viable para que el eje del agitador entre al reactor. Se instaló un sello mecánico entre la tapa de la brida perforada y el eje del agitador para permitir que este oscile con poca fricción y que mantenga hermético el interior del reactor. Se fabricó una estructura de soporte metálica para sostener el motor sobre el reactor y se soldó a la base metálica del reactor, fue necesario adaptar un juego de pinzas que permiten aflojar o apretar el motor para lograr ajustarlo en inclinación hasta que no haya fricción en la rotación de su eje. Se instaló el sistema de agitación completo: soporte, motor, eje, propela y variador de frecuencia; se operó a 1,200 rpm durante el proceso de maceración, cocción y enfriamiento de mosto manteniendo una agitación turbulenta constante dentro del reactor por lo que la instalación fue satisfactoria. Sin embargo, se recomienda instalar un soporte adicional que sostenga al motor desde abajo para que se reduzcan las vibraciones de este durante su operación.

Luego del proceso de maceración es necesario retirar el afrecho de malta del mosto y realizar un lavado de granos para recuperar azúcares fermentables retenidos en el afrecho húmedo. Dado que la maceración en la planta se lleva a cabo dentro del reactor y este tiene una tapadera permanente salvo por una pequeña ventana donde se agregan las materias primas, fue necesario diseñar, fabricar e instalar un tanque receptor de mosto y malta en la descarga del reactor. La función principal de este tanque es retener, por medio de una bolsa hecha de malla microperforada, el afrecho sólido después de maceración y el lúpulo agotado después de cocción para dejar fluir únicamente el mosto líquido hacia la bomba para ser recirculado al reactor en ambas etapas. El tanque se diseñó de forma cilíndrica, con un diámetro de 0.4 m y una altura de 0.5 m, lo cual equivale a un volumen interno de 62 L. Se escogió esta capacidad en función de la capacidad máxima de almacenamiento del reactor, de manera que se pueda descargar por completo en el tanque receptor y aún tener espacio para la manipulación de la bolsa de retención. El fondo del tanque tiene una inclinación de 5° para evitar estancamientos de mosto. También se diseñó con una tapadera abatible y una estructura de soporte desmontable para la bolsa de retención con el fin de poder manipularla, retirarla y limpiarla en cada etapa del proceso. Toda la tapadera del tanque se puede desmontar con facilidad aflojando un clamp para que el interior del tanque sea de fácil acceso para su limpieza entre cada lote de producción. Se retuvieron 7.85 kg de afrecho de malta húmedo y 113.40 g de lúpulo agotado en la bolsa mientras que el resto mosto líquido se recirculó por medio la bomba al reactor por lo que la instalación y operación del tanque se considera satisfactoria.

Se instalaron 2 metros de tubería, 3 válvulas de bola, 4 niples, 2 uniones T y 1 codo de acero inoxidable de 3/4 de diámetro para completar el circuito de recirculación de mosto y cerveza entre el reactor, el tanque receptor y la bomba centrífuga de la planta. Se hicieron pruebas de recirculación continua con agua a diferentes temperaturas y se logró recircular 35 L de mosto y 30 L de cerveza sin tener fugas en el circuito por lo que la instalación de la tubería y los accesorios se considera satisfactoria. Se recomienda instalar una derivación en la salida de la bomba para facilitar la extracción de agua de limpieza del tanque receptor.

Usualmente una planta de producción de cerveza cuenta con una casa de cocimiento independiente del reactor para fermentación. Esto con el fin de optimizar las condiciones de operación en ambas etapas, mejorando el rendimiento y diversificando la productividad de la planta dado que el proceso de fermentación y maduración demoran muchos días en lo que el proceso de maceración y cocción solo dura unas horas. Sin embargo, se tomó la decisión de utilizar el mismo reactor tanto para los procesos de maceración y cocción como para los procesos de fermentación y maduración. En el Megaproyecto titulado: “Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias” realizado en 2019 se evaluó el uso de un tanque de 255 L disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala como tanque de maceración y cocción, sin embargo, este tanque no cuenta con un sistema de calentamiento de ningún tipo por lo que es necesario instalar un serpentín de gran magnitud para lograr llevar a cabo los procesos de calentamiento requeridos. Se determinó que era más factible en términos económicos y de viabilidad utilizar el mismo reactor para los diferentes procesos de calentamiento, enfriamiento y fermentación que adecuar el tanque antes mencionado para calentar el mosto. También se descartó el uso del tanque de 255 L dado que el volumen del reactor es de tan solo 50 L por lo que se consideró que la diferencia entre capacidad de ambos equipos no era compatible ni eficiente de operar. Se decidió distribuir los equipos de la planta como se observa en la figura 15 con el fin de minimizar el espacio ocupado por la planta en el Laboratorio, así como el uso de tubería y accesorios dado que el mosto puede ser recirculado de forma inmediata al reactor luego de ser descargado al tanque receptor.

Se utilizaron 8 kg de malta tipo Pilsen para la producción del lote de cerveza ya que este tipo de malta es el más adecuado para la elaboración de cerveza Lager alemana tradicional dado el color amarillo brillante y cuerpo ligero que aporta a la cerveza, también se usaron 113.40 gramos de lúpulo Hallertau Tradition dado que este tipo de lúpulo es el característico para alcanzar el amargor intermedio, sabor ligero y aroma de una cerveza Lager. Se utilizaron 38 L de agua filtrada por ósmosis inversa acondicionada con sales minerales para llegar a los parámetros adecuados de sales disueltas para la producción de cerveza Lager. La cantidad de materia prima que se utilizó para la producción del lote de cerveza se calculó en base a las características finales deseadas en la cerveza de contenido alcohólico, gravedad específica, amargor, color, sabor y aroma. Se utilizó la herramienta virtual Brewer’s Friend para simular el lote de producción con las cantidades y características de las materias primas utilizadas como apoyo en la formulación de la receta del lote cerveza.



Se obtuvo en el simulador que la cerveza tendrá 4.9 % de contenido alcohólico, una gravedad específica de 1.013, amargor de 42.88 IBU y color de 3.19 SRM (escala Lovibond).

Durante el proceso de molienda de los granos de malta se observó que, al cargar toda la tolva de alimentación del secador de rodillos, el peso ejercido por los granos hacía que los rodillos se separaran más de la distancia configurada, haciendo que el proceso de molienda no fuera efectivo y que salieran granos aún enteros en la descarga del equipo. Por esta razón se procedió a alimentar los granos en la tolva de forma gradual y se logró que todos los granos se molieran de manera uniforme. Se recomienda que se ajuste el sistema de graduación de separación entre rodillos para que no haya variaciones durante el proceso. A medida que se continuó con el proceso de molienda se observó que los rodillos perdían tracción con los granos y estos solo se deslizaban sobre la superficie de los rodillos sin ser molidos. Esto ocurrió porque los granos de malta son muy secos y absorben humedad con facilidad y a medida que se molió la malta, los polvos finos producidos fueron formando una capa que recubrió por completo la superficie de los rodillos haciéndolos girar con muy poca fricción. Para resolver el problema se decidió humedecer la superficie de los rodillos utilizando una servilleta con agua y se observó que los rodillos recuperaron la tracción y se logró continuar y terminar el proceso de molienda. Se recomienda utilizar un tamiz luego de la molienda para lograr separar los polvos finos generados durante el proceso ya que las harinas muy finas son difíciles de filtrar cuando se encuentran disueltas en el mosto y generan turbidez en la apariencia de la cerveza final. Se obtuvieron 7.85 kg de malta molida después de la molienda.

Se agregaron 38 L de agua acondicionada medidos con probeta de 2 L al reactor y se inició con el proceso de calentamiento para maceración de la malta, se esperó hasta que el agua llegara a 66 °C para agregar la malta al reactor con el fin de evitar que se pierdan propiedades de esta durante el proceso de calentamiento y que se inicie el proceso de conversión de almidones en azúcares fermentables a la temperatura adecuada. Durante todo el proceso de calentamiento y maceración se mantuvo una agitación turbulenta dentro del reactor para mejorar la transferencia de calor y propiciar la actividad enzimática de conversión de azúcares. Se observó que a mitad del proceso de maceración se forma una espuma densa en la superficie del mosto y esta espuma es muy sensible al aumento de temperatura cuando se abre la llave de ingreso de vapor a la chaqueta ya que crece y si no se controla puede llegar a desbordarse del reactor, por esto se recomienda abrir la válvula de vapor de forma gradual e intermitente en función de la lectura de la temperatura interna del reactor. Se maceró la malta durante 1 hora a 66°C ya que es el tiempo y temperatura adecuada para alcanzar un equilibrio entre la conversión de la mayoría de los almidones a azúcares fermentables y la formación de azúcares no fermentables que aportan cuerpo a la cerveza final.

Posterior a la maceración se descargó el mosto al tanque receptor donde se retuvo el afrecho de malta y se agregaron 2 L de agua acondicionada para realizar el lavado de granos. Se debe agregar el agua de forma gradual y uniforme en toda la superficie de la bolsa de retención con el fin que se logre tener contacto con

todo el afrecho en la bolsa y así se recupere la mayoría de mosto rico en azúcares fermentables retenido como humedad en el afrecho. Se dejó escurrir la bolsa con el fin de recuperar la mayoría de humedad en exceso retenida en el afrecho, sin embargo, se observó que al extraer el afrecho húmedo se pierde cerca de 1 litro de mosto por lo que se recomienda utilizar una paleta de acero inoxidable para prensar la bolsa y lograr recuperar más mosto retenido en el afrecho antes de retirarlo del tanque. El afrecho obtenido se descartó, sin embargo, puede ser utilizado como alimento para ganado o como materia prima para la elaboración de productos comestibles con base de cereales como fuente de fibra.

Durante la cocción se hicieron 3 adiciones de lúpulo en diferentes tiempos. Se agregaron 56.70 gramos en el inicio de la cocción, 28.35 gramos a los 30 minutos y 28.35 gramos a los 50 minutos de cocción. Las adiciones tempranas de lúpulo aportan al amargor de la cerveza, las adiciones intermedias aportan al sabor y las adiciones tardías aportan al aroma final de la cerveza. Se observó que parte del lúpulo se quedaba pegado en la superficie interior del tanque debido a la agitación del mosto por lo que fue necesario agregar pequeñas cantidades de agua sobre las paredes del reactor para lograr reincorporar el lúpulo al mosto, sin embargo, cuando se descargó el mosto cocido al tanque receptor se observó que pequeñas cantidades de lúpulo se quedaron pegadas en la superficie del agitador y las paredes internas del reactor por lo que se recomienda realizar un lavado interno con agua previo a recircular el mosto de vuelta al reactor. Se obtuvieron 32 L de mosto cocido después del proceso de cocción.

Se inició con el proceso de enfriamiento de mosto hasta que este alcanzó una temperatura de 12°C y luego se agregaron 34.5 g de levadura *Saccharomyces pastorianus* al mosto y se selló el reactor para iniciar el proceso de fermentación. La temperatura de la fermentación se escogió según las condiciones óptimas recomendadas por el proveedor de la levadura (Fermentis) y se escogió esa cepa de levadura dado que es la más adecuada para la producción de cerveza Lager. Se llevó a cabo el proceso de fermentación durante 7 días bajo las mismas condiciones de temperatura siendo este el tiempo recomendado para la fermentación de una Lager tradicional. A medida que se llevó a cabo el proceso de fermentación, se fueron tomando muestras de la cerveza y se midió su densidad. Se observó que la densidad de la cerveza fue disminuyendo con el tiempo, lo cual fue indicio del incremento de concentración de alcohol. También el aroma y apariencia de la cerveza cambió de un aroma dulce a cereal a un aroma más ácido y floral. Después de la fermentación se incrementó la temperatura de la cerveza a 20°C y se inició el proceso de descanso de diacetilo durante 2 días. Este proceso es importante ya que aumenta la actividad metabólica de la levadura y permite la reabsorción de diacetilo, lo cual acentúa mejor el sabor de la cerveza y la limpia, no se recomienda realizar el descanso de diacetilo por más de 3 días ya que puede generar resultados contraproducentes en el sabor y calidad final de la cerveza. Las muestras tomadas después del descanso de diacetilo fueron más claras que las observadas durante la fermentación.

Normalmente una cerveza artesanal Lager alemana tradicional debe ser madurada por un periodo de tiempo que va desde 2 hasta 6 semanas dependiendo del estilo específico que se desee elaborar, sin embargo, el lote de cerveza solo se maduró durante 5 días a una temperatura de 1°C dado que no se contaba con más tiempo disponible para lograr hacer los análisis finales del producto final. Este proceso de maduración corto influyó en la turbidez final de la cerveza y en el sabor ya que no permitió el desarrollo adecuado de todas las notas de sabor características de una Lager.

Se analizaron las muestras tomadas desde el inicio de la fermentación hasta el final de la maduración utilizando cromatografía líquida de alta resolución para la determinación de concentraciones de azúcares y alcohol. Se obtuvo una concentración inicial de azúcares de 45.544 g/L de de sacarosa, 3.400 g/L de glucosa y 3.467 g/L de fructosa. La concentración final de etanol en la cerveza fue de 28.200 g/L. Estos resultados muestran que el proceso de maceración tuvo una eficiencia aceptable ya que logró la conversión de los almidones iniciales presentes en la malta a una concentración de azúcares fermentables adecuada para la fermentación de una cerveza Lager. También se considera que la fermentación fue exitosa ya que se logró llegar a la concentración de alcohol adecuada para una cerveza Lager según los estándares BJCP. Se calculó que durante la fermentación se generaron 278.89 gramos de levadura lo cual hace sentido dado el crecimiento exponencial del microorganismo en la primera fase de la reacción y luego un decremento en su velocidad de reproducción a medida que la reacción se vuelve más lenta como se observó en la gráfica de consumo de azúcares y producción de alcohol durante la fermentación, la cual muestra un comportamiento logarítmico.

El color de la cerveza final en escala Lovibond fue de 7 SRM. Se observó de forma visual el color de la cerveza servida en un vaso transparente y se comparó con la escala de color visual mostrada en la figura 1, se escogió el valor de color que más se acercó al de la cerveza. Este resultado es mayor al esperado ya que el rango adecuado para una Lager es entre 3 y 5 SRM. El resultado se debe en gran parte a la turbidez de la cerveza dado que todos los sólidos que no se lograron filtrar aportan a la opacidad de la cerveza. Se descarta que la opacidad se deba a la malta utilizada ya que solo se utilizó un tipo de malta en la receta y la malta Pilsen no tiene un grado de tueste adecuado para aportar un color intenso a la cerveza, para lograr este efecto se debe utilizar una malta con un mayor grado de tueste como la malta caramel.

Los principales parámetros analizados en la cerveza final fueron: concentración de alcohol, amargor, color, sabor y aroma, los cuales son los factores más determinantes que diferencian cada estilo de cerveza según las normas BJCP. El objetivo era producir una cerveza Lager del estilo Pilsner alemana. Según las normas estandarizadas, este estilo debe tener una concentración de alcohol entre 3% y 6%; un grado de amargor entre 22 y 44 IBU; un color entre 2 y 5 SRM; un sabor ligero y un aroma herbal y afrutado. La cerveza final obtenida cumplió con los parámetros de concentración de alcohol, amargor y aroma característicos del estilo de cerveza, pero el color resultó ser más opaco con un valor de 7 SRM debido a turbidez en la cerveza y el

sabor resultó ser más ácido de lo esperado, también debido a los restos de levadura en la cerveza que ocasionaron turbidez y afectaron en el sabor final del producto.

Después del proceso de filtración final y carbonatación se obtuvo una producción final de 30 L de cerveza Lager con características fisicoquímicas y organolépticas adecuadas para el estilo de cerveza por lo que se considera que los cálculos, las adaptaciones e instalaciones realizadas a la planta de cerveza del Laboratorio fueron satisfactorias.

## IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar fue de  $0.47 \pm 0.1$  kW/h para enfriar 32.65 kg de mosto de 60°C a 12°C, con un “set point” de 10°C y de  $0.04 \pm 0.1$  kW/h para enfriar 32.59 kg de cerveza de 12°C a 1°C, con un “set point” de -1°C.
2. Se determinó que la capacidad de calentamiento de la chaqueta del reactor fue de  $67.92 \pm 0.1$  kW/h para calentar 35.69 kg de mosto de 66°C a 96°C, utilizando vapor saturado a 15 psi.
3. Se determinó que el sistema de agitación Leeson generó una agitación turbulenta con un número de Reynolds de 34,133 a 1,200 rpm. Se logró instalar de manera satisfactoria el sistema de agitación en el reactor.
4. Se determinó la metodología para la elaboración de cerveza tipo Lager en la planta y se desarrolló un manual de operación de los equipos evaluados e instalados en la misma donde se explican las operaciones a realizar en cada proceso de la producción de cerveza, así como una guía para limpiar la planta en cada lote de producción.
5. Los cálculos, diseños, adaptaciones e instalaciones de equipo realizados a los sistemas de maceración, cocción, fermentación y maduración de la planta de cerveza fueron exitosas y satisfactorias ya que se logró la producción de un lote de  $30 \pm 0.1$  L de cerveza Lager con una concentración de alcohol de 28.200 g/L, un amargor de 42.9 IBU y un color de 7 SRM.

## X. RECOMENDACIONES

1. Estudiar la cinética de reacción enzimática durante la maceración de mosto a distintas temperaturas y tiempos, para analizar una mejora en el proceso de conversión de azúcares fermentables y obtener una eficiencia mayor, así como reducción de costos de materia prima y energía.
2. Evaluar la instalación de un lazo de control en el tanque de maceración y cocción para controlar la temperatura del reactor variando el flujo de vapor que ingresa a la chaqueta para calentar. Esto mantendrá la temperatura constante durante los procesos de calentamiento, haciendo el equipo más eficiente y seguro.
3. Evaluar la instalación de aislamiento térmico para el reactor con el fin de minimizar las pérdidas de calor al ambiente durante los procesos de calentamiento y minimizar el intercambio de calor con el ambiente durante los procesos de enfriamiento.
4. Evaluar la adquisición de un chiller específico para la planta de cerveza ya que el equipo actual pertenece a la torre de adsorción del Laboratorio y es necesario utilizar mangueras de más de 15 m para conectar el chiller con el reactor.
5. Realizar un estudio sobre el aprovechamiento del afrecho de malta remanente ya que en cada lote de producción se desecha más de 10 kg de afrecho que se pueden aprovechar para alimento de ganado.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, O. Cruz, J. Orr, W. Recinos, R. Urruela, J. Vilaró, J. Zaghi, M. (2019). *Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias* (Megaproyecto). Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, Guatemala.
2. Çengel, Yunus A. y Afshin J. Ghajar. 2011. *Transferencia de Calor y Masa*. 4ª Edición. Editorial McGraw-Hill. México.
3. Coad, W.J. 1998. “*A Fundamental Perspective on Chilled-Water Systems*” Heating/Piping/Air Conditioning (August 1998): 59-66.
4. Czech Brewery System s.r.o. “Technology for the fermentation and maturation”. Recuperado de: <https://www.czechminibreweries.com/production/technology-fermentation-maturation-process/>. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020].
5. Forbes Centroamérica. 2019. “Cerveceras, un negocio que crece como espuma”. Recuperado de: <https://forbescentroamerica.com/2019/06/24/cerveceras-un-negocio-que-crece-como-espuma/>. [Fecha de consulta: 13 de mayo de 2020].
6. Gonzáles, Marco. 2017. *Principios de Elaboración de las Cervezas Artesanales*. 1ª ed. Carolina del Norte: Lulu Press Inc. 232 págs.
7. Hernández, A. (2003). *Microbiología industrial*. San José, Costa Rica EUNED
8. Jackson, Michael. 1994. *El libro de la Cerveza*. 1ª ed. Barcelona: Blume. 304 págs.
9. Kunze, W. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Primera edición VLB Berlín. Alemania. Pp 225-277
10. Lee J. 2009. “*Biochemical Engineering*”, Segunda Edición. Washington State University Press, Washington.

11. López, T. (24 de junio, 2019). Cerveceras, un negocio que crece como “espuma”. Recuperado de: <https://forbescentroamerica.com/2019/06/24/cerveceras-un-negocio-que-crece-como-espuma/>. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020].
12. McCabe, Warren L. Julian C. Smith y Peter Harriott. 2007. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ª Edición en Español. Editorial McGraw-Hill. España / EEUU.
13. Rodríguez, Héctor. 2003. Determinación de Parámetros Físico-Químicos para la Caracterización de Cerveza Tipo Lager Elaborada por Compañía Cervecería Kuntzmann S.A. Tesis Universidad Austral de Chile. Valdivia: Escuela de Ingeniería en Alimentos. 95 págs.
14. Sancho, R. (2015). *Diseño de Una Micro-Planta de Fabricación de Cerveza y Estudio de Técnicas y Procesos de Producción* (Tesis). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
15. West Coast Brewer. 2019. <https://www.westcoastbrewer.com/brewing-terms/lovibond/> [Revisado el 20/04/2020]



## XII. ANEXOS

### A. Datos originales

Figura 21. Enfriamiento de agua glicolada con chiller Tempstar



Figura 22. Enfriamiento de mosto con agua glicolada

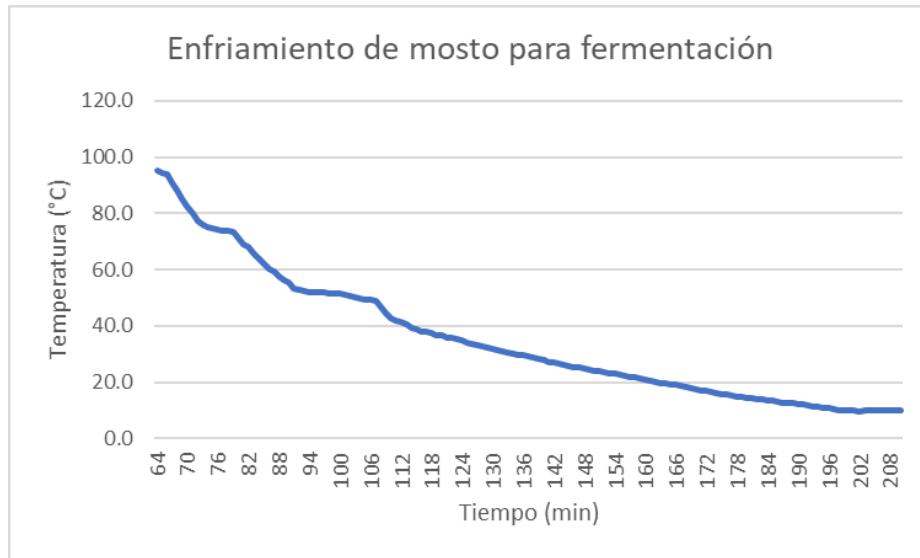


Figura 23. Enfriamiento de cerveza para maduración con agua glicolada

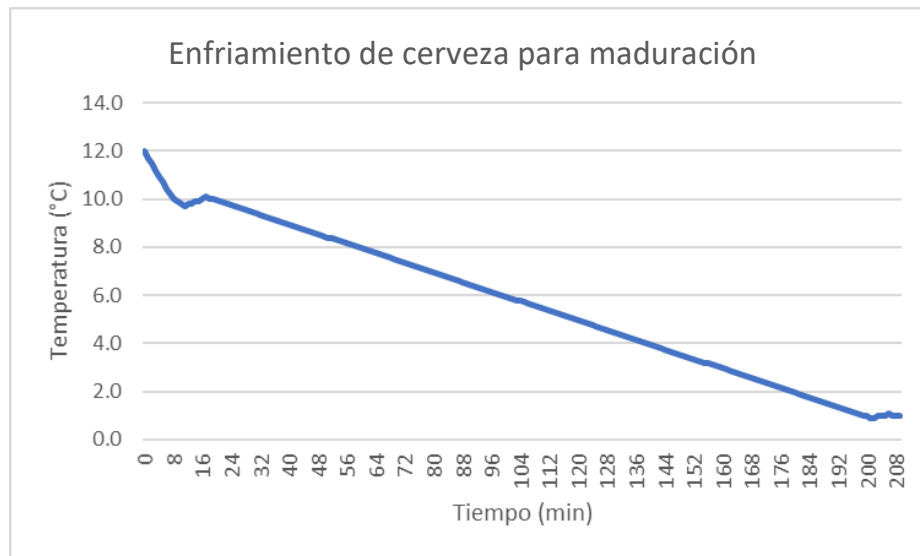


Figura 24. Temperatura de mosto durante maceración

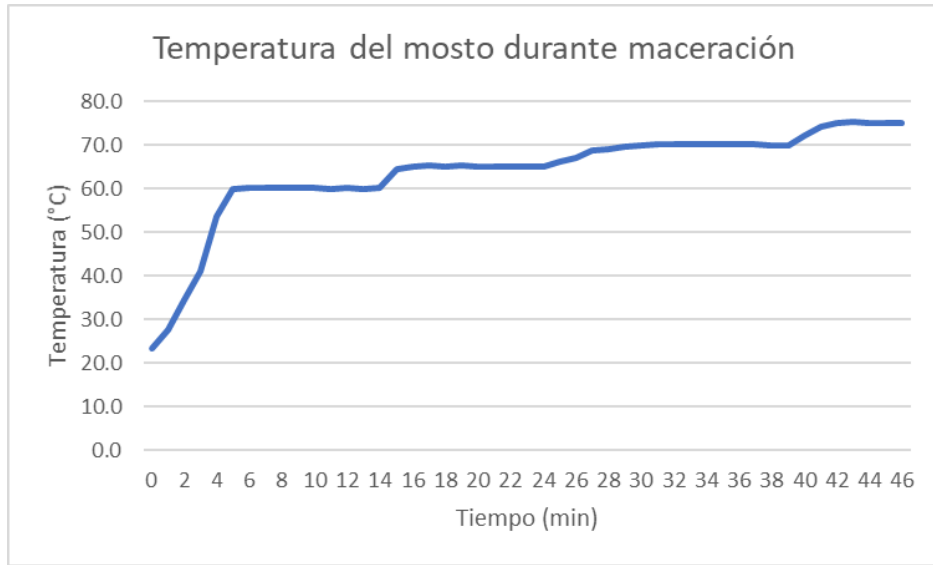


Figura 25. Temperatura de mosto durante cocción

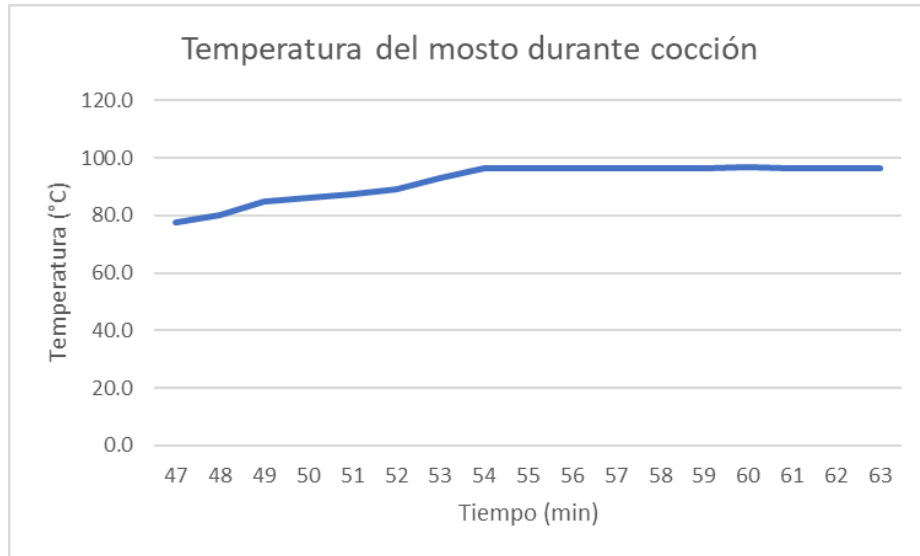


Tabla 12. Masa de levadura seca inicial y muestra de levadura final

	Masa (g)
Levadura seca inicial	34.50
Beaker de 600 mL	215.63
Beaker con muestra de levadura centrifugada húmeda	304.41
Beaker con muestra de levadura seca	244.12

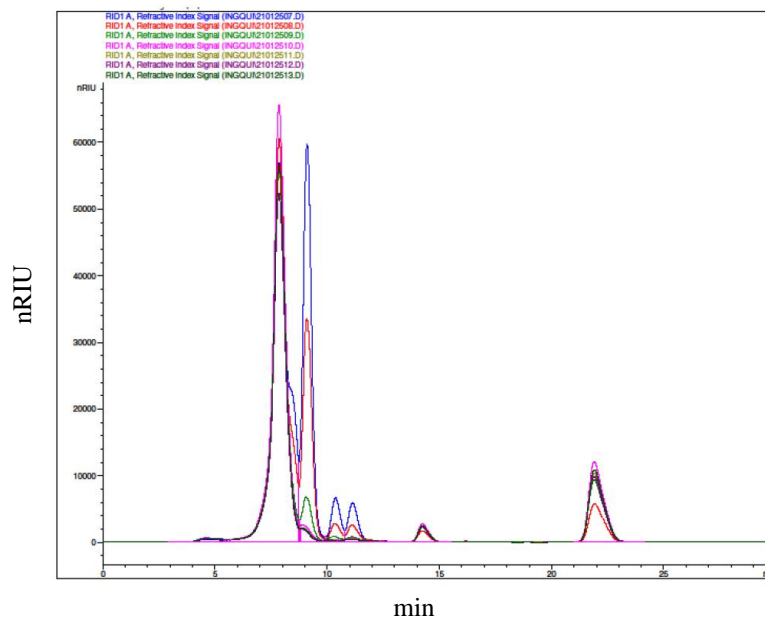
Tabla 13. Volumen de cerveza con asiento de levadura final

	Volumen (L)
Cerveza con asiento de levadura	4.40
Muestra de cerveza con asiento de levadura centrifugado	0.40

Figura 26. Concentración de azúcares y alcohol presente en las muestras analizadas en HPLC

Muestra	Sacarosa (%p/v)	Glucosa (%p/v)	Fructosa (%p/v)	Etanol (%p/v)
1	0.683	0.051	0.052	0
2	0.41	0.024	0.027	0.229
3	0.089	0.009	0.012	0.369
4	0	0	0.008	0.477
5	0.026	0	0.012	0.409
6	0	0	0.01	0.393
7	0	0	0.109	0.423

Figura 27. Cromatograma de azúcares fermentables y etanol en las muestras tomadas durante la fermentación



\*Cromatograma generado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

## B. Cálculos de muestra

### Cálculo 1. Volumen disponible en reactor

$$V_{tanque} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$\pi$  = número pi, 3.1416

$D$  = diámetro interno del tanque, m

$h$  = altura del tanque, m

$$V_{tanque} = \frac{\pi D^2 h}{4} = \frac{\pi (0.36m)^2 (0.5m)}{4} = 0.051 m^3 = 51 L$$

### Cálculo 2. Consumo energético de secador de rodillos

\*Usando datos de placa del motor de corriente alterna y el variador de frecuencia del secador de rodillos.

$$P = V * I$$

$P$  = potencia (W)

$V$  = voltaje (V)

$I$  = corriente (A)

$$P = (1.4 A) * (220 V) = 308W$$

Duración de proceso de 1 hora para moler malta base

$$E = (308 W) * (1h) = 308Wh * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right) * \left(\frac{1kJ}{1000 J}\right) = 1108 kJ$$

### Cálculo 3. Balance de masa de molienda de granos de malta

\*Asumiendo una pérdida de 2% por formación de polvos finos

$$B = A - C$$

$A$  = Entrada de granos enteros

$B$  = Salida de granos molidos

$C$  = Salida de polvos finos

$$B = (8.18 kg granos enteros) - (8.18 kg * 2\% polvos finos) = 8.02 kg granos molidos$$

### Cálculo 4. Demanda térmica en la maceración y cocción

\*Calculado para una producción final de 35 L de mosto cocido

$$Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{requerido}} = Q_{\text{real}}$$

Pérdidas de calor por convección

$$Q_{\text{pérdidas}} = h * A * (\Delta T)$$

$$h = \text{coeficiente de transferencia de calor por convección, } \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

$$A = \text{área superficial, } m^2$$

$$T = \text{gradiente de temperatura, } ^\circ C$$

Número de Nusselt

$$Nu = h * \frac{D}{k}$$

$$Nu = \text{número adimensional de Nusselt}$$

$$h = \text{coeficiente de transferencia de calor por convección, } \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

$$D = \text{diámetro, } m$$

$$k = \text{conductividad térmica del aire, } \frac{W}{m * ^\circ C}$$

Número de Rayleigh

$$Ra_L = Pr * Gr_L = \frac{Lc^3 * \beta * g * \Delta T * Pr}{\nu^2}$$

$$Pr = \text{número adimensional de Prandtl}$$

$$Gr = \text{número adimensional de Grasshof}$$

$$g = \text{aceleración gravitacional, } 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$Lc = \text{Largo característico, } m$$

$$\beta = \text{coeficiente de expansión volumetrico, } 1/K$$

$$\Delta T = \text{gradiente de temperatura, } ^\circ C$$

$$\nu = \text{viscosidad cinemática, } \frac{m^2}{s}$$

Para un cilindro

$$Lc = \text{Diámetro}$$

$$Gr = \frac{D_0^3 * \beta * g * \Delta T}{\nu^2}$$

$$\beta = 1/T(K)$$

$$Gr = \frac{(0.36m)^3 * \left(\frac{1}{25 + 273.15}\right) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) * (66^\circ C - 25^\circ C)}{\left(1.470 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2}$$

$$Gr = 2.91 * 10^8$$

$$Ra_L = (2.91 * 10^8) * (0.7296) = 2.13 * 10^8$$

$$Si D \geq \frac{35L}{Gr_L^{0.25}}, Nu = 0.59(Ra_L)^{0.25}$$

$$D = 0.36 m$$

$$\frac{35L}{Gr_L^{0.25}} = \frac{35 * (0.36 m)}{(2.91 * 10^8)^{0.25}} = 0.096 m$$

$$Nu = 0.59(Ra_L)^{0.25} = 0.59(Pr * Gr)^{0.25}$$

$$Nu = 0.59(2.91 * 10^8)^{0.25} = 77.059$$

$$h = k * \frac{Nu}{D} = \frac{(0.02476 \frac{W}{m * K}) * 77.059}{0.36 m} = 5.300 \frac{W}{m^2 * K}$$

Área superficial de un cilindro

$$A_{cilindro} = \pi * D * L$$

$A_{cilindro}$  = área superficial de un cilindro

$\pi$  = número pi, 3.1416

$D$  = diámetro cilindro

$L$  = largo del cilindro

$$A_{cilindro} = \pi * D * L = \pi * (0.36m) * (0.5m) = 0.565 m^2$$

$$\dot{Q}_{pérdidas} = \left(5.300 \frac{W}{m^2 * K}\right) * (0.565m^2) * (66^\circ C - 25^\circ C) = 122.77 W$$

$$Q_{requerido} = mCp\Delta T$$

$m$  = masa, kg

$Cp$  = calor específico,  $\frac{J}{kg * ^\circ C}$

$\Delta T$  = gradiente de tempertura,  $^\circ C$

$$Q_{requerido} = mCp\Delta T (agua) + mCp\Delta T (malta) + mCp\Delta T (metal)$$

Espesor de tanque de acero inoxidable de 1mm

$$m = \left(7.860 \frac{kg}{m^2}\right) * \left(\pi DL + \frac{\pi D^2}{4}\right) = \left(7.860 \frac{kg}{m^2}\right) * \left(\pi(0.36m)(0.5m) + \frac{\pi(0.36m)^2}{4}\right) = 4.700 kg$$

$$Q_{requerido} = (38.510 kg) \left(4.187 \frac{kJ}{kg} ^\circ C\right) (66^\circ C - 25^\circ C) + (7.850 kg) \left(1.674 \frac{kJ}{kg} ^\circ C\right) (66^\circ C - 25^\circ C) \\ + (4.700 kg) \left(\frac{0.456kJ}{kg} ^\circ C\right) (66^\circ C - 25^\circ C) = 7,237.544 kJ$$

Calor en 10 minutos de calentamiento

$$\dot{Q}_{requerido} = \frac{7,237.544 kJ}{0.167 h} \left(\frac{1h}{3600 s}\right) = 12.038 kW \\ \dot{Q}_{real} = 12.038kW + 0.123kW = 12.161 kW$$

Energía consumida. Con maceración de 1 hora y calentamiento de media hora

$$Q_{pérdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

$$Q_{real} = 7,237.544kJ + 122.77 W \left(\frac{1 J/s}{1 W}\right) * 1.16 h * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right) * \left(\frac{1 kJ}{1000 J}\right) = 7,750.232 kJ$$

Calor en la cocción

$$Q_{pérdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

Partiendo de la misma forma que en las pérdidas de calor durante la maceración, pero con temperatura de ebullición de 96°C.

$$\dot{Q}_{pérdidas} = 89.835 W$$

$$Q_{pérdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

Calor sensible

$$Q_{requerido} = m * Cp * (\Delta T)$$

Calor específico de una solución de agua con sólidos suspendidos



$$Cp = 1 - 0.006 * (^{\circ}Brix) \left| \left[ \frac{kcal}{kg * ^{\circ}C} \right] \right.$$

Mosto de 10 °Brix

$$Cp = 1 - 0.006 * (^{\circ}Brix) = 1 - 0.006 * 10 = 0.94 \frac{kcal}{kg * ^{\circ}C}$$

$$Cp = 0.94 \frac{kcal}{kg * ^{\circ}C} * \left( \frac{4.184 kJ}{1 kcal} \right) = 3.93 \frac{kJ}{kg * ^{\circ}C}$$

$$\begin{aligned} Q_{requerido,sensible} &= m * Cp * (\Delta T)(mosto) + mCp\Delta T(metal) \\ &= 36 kg * \left( 3.93 \frac{kJ}{kg * ^{\circ}C} \right) * (96^{\circ}C - 66^{\circ}C) \\ &\quad + (4.700 kg) \left( \frac{0.456 kJ}{kg} ^{\circ}C \right) (96^{\circ}C - 66^{\circ}C) = 4,308.696 kJ \end{aligned}$$

Asumiendo 10 minutos para cambio de temperatura sensible

$$Q_{requerido,sensible} = \frac{4,308.696 kJ}{0.167 h} \left( \frac{1 h}{3600 s} \right) = 7.167 kW$$

$$Q_{real,sensible} = 7.167 kW + 0.089 kW = 7.256 kW$$

Asumiendo la evaporación de 5 kg de agua

Calor latente

$$Q_{latente} = m\lambda_{vap}$$

$$Q_{latente} = \text{calor latente de cambio de fase, J}$$

$$m = \text{masa, kg}$$

$$\lambda_{vap} = \text{calor de vaporización, J/kg}$$

$$Q_{requerido,latente} = m\lambda_{vap} = 5 kg * \frac{2,257 kJ}{kg} = 11,285 kJ$$

Tiempo de cocción de 1 hora

$$\dot{Q}_{requerido,latente} = \frac{11,285 kJ}{1 h} \left( \frac{1 h}{3600 s} \right) = 3.135 kW$$

$$\dot{Q}_{real,latente} = 3.135 kW + 0.089 kW = 3.224 kW$$

Energía consumida en cocción

$$Q_{pérdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

$$Q_{real} = 0.089kW * (1.167 h) * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right) + 11,285 kJ + 4,308.69 kJ = 15,967.597 kJ$$

Energía consumida en maceración y cocción

$$Q_{real} = 7,750.232 kJ + 15,967.597 kJ = 23,717.829 kJ$$

**Cálculo 5. Balance de masa de lavado de granos**

\*Asumiendo una humedad retenida en los granos del 50%

$$E = (A + B + C) - D$$

$$A = \text{Entrada de afrecho}$$

$$B = \text{Entrada de mosto original}$$

$$C = \text{Entrada de agua de lavado}$$

$$D = \text{Salida de afrecho agotado}$$

$$E = \text{Salida de mosto recuperado}$$

$$D = (7.22 \text{ kg afrecho} * 50\% \text{ humedad}) + (7.22 \text{ kg afrecho}) = 10.83 \text{ kg afrecho húmedo}$$

$$E = (7.22 \text{ kg afrecho} + 37.30 \text{ kg mosto} + 2 \text{ kg de agua}) - (10.83 \text{ kg afrecho húmedo}) \\ = 35.69 \text{ kg mosto}$$

**Cálculo 6. Balance de separación de lúpulo**

\*Asumiendo una humedad retenida en el lúpulo del 50%

$$D = (A + B) - C$$

$$A = \text{Entrada de lúpulo}$$

$$B = \text{Entrada de mosto original}$$

$$C = \text{Salida de lúpulo húmedo}$$

$$D = \text{Salida de mosto recuperado}$$

$$C = (0.10 \text{ kg lúpulo} * 50\% \text{ humedad}) + (0.10 \text{ kg lúpulo}) = 0.15 \text{ kg lúpulo húmedo}$$

$$D = (0.10 \text{ kg lúpulo} + 32.7 \text{ kg mosto}) - (0.15 \text{ kg lúpulo húmedo}) = 32.65 \text{ kg mosto}$$

**Cálculo 7. Balance de energía del sistema de enfriamiento del reactor durante fermentación y maduración**

$$W_{agitador} + Q_{ambiente} + Q_{rxn} = Q_{salida\ agua} + Q_{salida\ gas}$$

\*El trabajo es despreciable debido a que el agitador permaneció apagado durante todo el proceso de fermentación y maduración. Asimismo, el calor de salida del gas es despreciable tomando en cuenta que la temperatura de salida del dióxido de carbono es la misma que la temperatura en el interior del tanque.

$$Q_{ambiente} + Q_{rxn} = Q_{salida\ agua}$$

Coefficiente de expansión térmica

$$\beta = \frac{1}{T}$$

Siendo T, la temperatura absoluta en Kelvin y tomando al aire como un gas ideal,

$$\beta = \frac{1}{273.15\ K} = 0.003\ K^{-1}$$

Número de Grashof

$$Gr = \frac{L^3 \rho_f^2 \beta_g \Delta T_o}{\mu_f^2}$$

$$Gr = \frac{(0.360m)^3 * (1.140\ kg/m^3)^2 * (0.004^\circ C^{-1}) * (60^\circ C - 12^\circ C)}{(1.699 \times 10^{-5}\ m^2/s)^2} = 4.033 \times 10^7$$

Número de Nusselt

$$Nu = b(GrPr)^n$$

$$Nu = 0.59((4.033 \times 10^7) * (0.726))^{0.25} = 43.400$$

Coefficiente convectivo de transferencia de calor

$$Nu = \frac{h L}{K}$$

$$h = \frac{K Nu}{L}$$

$$h = \frac{(0.027\ W/m^2\ ^\circ C) * (43.400)}{(0.360m)} = 3.255\ W/m^2\ ^\circ C$$

Área de transferencia de calor

$$A = C * h$$

$$A = (1.380m) * (0.360) = 0.497\ m^2$$

Transferencia de calor del ambiente

$$Q_{ambiente} = h A \Delta T$$

$$Q_{\text{ambiente}} = (3.255 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}) * (0.497 \text{ m}^2) * (60^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}) = 77.65 \text{ W}$$

Requerimiento de agua fría para el fermentador durante la fermentación

$$\dot{m} = \frac{Q_{\text{rxn}} + Q_{\text{ambiente}}}{C_p \Delta T}$$

$$\dot{m} = \frac{0.580 \text{ W} + 77.65 \text{ W}}{(4186.000 \text{ J/kg }^\circ\text{C}) (25^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})} = 1.438 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Balance de energía para el proceso de maduración

$$W_{\text{agitador}} + Q_{\text{ambiente}} + Q_{\text{líquido}} = Q_{\text{salida agua}}$$

Nuevamente, se desprecia la transferencia de calor del trabajo que realiza el agitador.

$$Q_{\text{ambiente}} + Q_{\text{líquido}} = Q_{\text{salida agua}}$$

$$Q_{\text{ambiente}} + \dot{m}_{\text{líquido}} C_{p \text{ líquido}} \Delta T = \dot{m}_{\text{salida agua}} C_{p \text{ salida agua}} \Delta T$$

$$\dot{m}_{\text{salida agua}} = \frac{Q_{\text{ambiente}} + \dot{m}_{\text{líquido}} C_{p \text{ líquido}} \Delta T}{C_{p \text{ salida agua}} \Delta T}$$

$$\dot{m} = \frac{77.65 \text{ J/s} + (5.175 \text{ kg/h})(3935.90 \text{ J/kg }^\circ\text{C})(24^\circ\text{C})}{4186 \text{ J/kg }^\circ\text{C} (1^\circ\text{C})} * \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 0.0324 \text{ kg/s}$$

Este cálculo se realizó con los resultados obtenidos en cálculos anteriores.

Cálculo 8. Cálculo de amargor en grados IBU con método Rager:

$$IBU = \frac{(\text{gramos de lúpulo}) * (AA\%) * (\text{porcentaje de utilización})}{(\text{litros finales}) * (FC) * (10)}$$

$$IBU = \frac{56.6990 \text{ g} * (5.2\%) * 30}{(34.02 \text{ l}) * (1) * (10)} = 26.00$$

$$IBU = \frac{28.3495 \text{ g} * (5.2\%) * 24}{(34.02 \text{ l}) * (1) * (10)} = 10.40$$

$$IBU = \frac{28.3487 \text{ g} * (5.2\%) * 15}{(34.02 \text{ l}) * (1) * (10)} = 6.50$$

$$IBU \text{ total} = 26.00 + 10.40 + 6.50 = 42.9 \text{ IBU}$$

Cálculo 9. Conversión de concentración de etanol en porcentaje %p/V a concentración en g/L

$$\left( \frac{0.423 \text{ g etanol}}{100 \text{ ml}} \right) * \left( \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \right) * \left( \frac{10 \text{ ml solución}}{1.5 \text{ ml muestra}} \right) = 28.200 \text{ g etanol/L}$$

\*Este mismo cálculo se realizó para determinar la concentración de azúcares y etanol presente en todas las muestras.

Cálculo 10. Numero de Reynolds para el sistema de agitación

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(0.08 \text{ m})^2 (20) (1,200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{(0.0045 \text{ P s})} = 34,133.33$$

Este cálculo se realizó para obtener el número de Reynolds de los 3 sistemas de agitación evaluados.

Cálculo 11. Capacidad de enfriamiento del chiller Tempstar

$$P = \frac{mCp\Delta T}{t}$$

*P = potencia del chiller Tempstar*

*m = masa de mosto*

*Cp = calor específico del mosto*

*ΔT = diferencial de temperatura*

*t = tiempo de enfriamiento*

\*Calor extraído de 32.65 kg de mosto durante el enfriamiento para fermentación usando agua glicolada como fluido refrigerante y con un set point de 10°C en el termostato.

$$P = \frac{(32.65 \text{ kg mosto}) * \left(3.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}\right) * (60^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})}{6,840 \text{ s}} = 0.90 \text{ kW}$$

$$C = \frac{0.90 \text{ kW}}{1.9 \text{ h}} = 0.47 \text{ kW/h}$$

\*Calor extraído de 32.59 kg de cerveza durante el enfriamiento para maduración usando agua glicolada como fluido refrigerante y con un set point de -1°C en el termostato.

$$P = \frac{(32.59 \text{ kg cerveza}) * \left(4.02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}\right) * (12^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C})}{12,120 \text{ s}} = 0.12 \text{ kW}$$

$$C = \frac{0.12 \text{ kW}}{3.37 \text{ h}} = 0.04 \text{ kW/h}$$

Cálculo 12. Capacidad de calentamiento de la chaqueta del reactor

$$P = \frac{mCp\Delta T}{t}$$

*P = potencia del intercambiador*

*m = masa de mosto*

*Cp = calor específico del mosto*

*ΔT = diferencial de temperatura*

*t = tiempo de calentamiento*

\*Calentamiento de 35.69 kg de mosto para maceración usando vapor saturado a 15 psi.

$$P = \frac{(35.69 \text{ kg mosto}) * \left(3.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}\right) * (96^\circ\text{C} - 66^\circ\text{C})}{480 \text{ s}} = 8.83 \text{ kW}$$

$$C = \frac{8.83 \text{ kW}}{0.13 \text{ h}} = 67.92 \text{ kW/h}$$

## C. Datos calculados

Tabla 14. Cálculo de masa de levadura seca final

	Masa (g)
Muestra de levadura húmeda	88.78
Muestra de levadura seca	28.49
Levadura seca final total	313.39
Levadura seca formada durante fermentación	278.89

Tabla 15. Cálculo de concentración de azúcares y etanol presente en muestras en g/L

Muestra	Sacarosa (g/L)	Glucosa (g/L)	Fructosa (g/L)	Etanol (g/L)
1	45.533	3.400	3.467	0.000
2	27.333	1.600	1.800	15.267
3	5.933	0.600	0.800	24.600
4	0.000	0.000	0.533	31.800
5	1.733	0.000	0.800	27.267
6	0.000	0.000	0.667	26.200
7	0.000	0.000	7.267	28.200

Tabla 16. Cálculo de número de Reynolds para los 3 sistemas de agitación

Agitador	Diametro de propela (m)	rpm	densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (Pa s)	n	Re
WEG	0.120	500	1200.00	0.0045	8.33	32000.00
Servodyne	0.04	500	1200.00	0.0045	8.33	3555.56
Leeson	0.08	1200	1200.00	0.0045	20.00	34133.33

## D. Análisis de error

Incertidumbre para multiplicación y división:

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2}$$

Incertidumbre cálculo IBU

$$Incertidumbre = 46.6 IBU * \sqrt{\left(\frac{0.0001g}{38.7945}\right)^2 + \left(\frac{0.2 l}{15.12 l}\right)^2} = 0.06 IBU$$

Se procedió de la misma forma para las incertidumbres a partir de una multiplicación o división

Incertidumbre para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{(Sa)^2 + (Sb)^2}$$

Incertidumbre cálculo total IBU

$$Incertidumbre = \sqrt{(0.62)^2 + (0.25)^2 + (0.03)^2} = 0.07 IBU$$

Se procedió de la misma forma para las incertidumbres a partir de una suma o resta



## E. Especificaciones técnicas del equipo

Figura 28. Hoja de especificaciones de agitador Leeson instalado en la planta

		<b>Ficha técnica agitador Leeson</b>		
<b>Datos generales</b>	No. de trabajo	1		Hoja 1 de 1
	Nombre del trabajo	Planta de cerveza artesanal		
	No. de documento	1		
	No. de proyecto	1		
	Ubicación	Universidad del Valle de Guatemala		
	Planta	Laboratorio de Operaciones Unitarias		
<b>No.</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	
1	Número de ítem	N/A	A-100	
2	Nombre de ítem	N/A	Agitador	
3	Cantidad requerida	Unidad	1	
4	Material a trabajar	N/A	Agua, malta de cebada, lúpulo y mosto	
5	Presión de operación	atm	1	
6	Temperatura de operación	°C	0 - 100	
7	Rango de presión permisible (+/-)	atm	0.05	
8	Rango de temperatura permisible (+/-)	°C	10	
9	Orientación	N/A	Vertical	
10	Largo	m	0.9	
11	Diámetro de eje	m	0.015	
12	Diámetro de turbina	m	0.08	
13	Tipo de turbina	N/A	marina	
14	Material de construcción	N/A	Acero inoxidable SS304	
15	Potencia de motor	HP	1.5	
16	RPM de motor	RPM	1800	

Figura 29. Hoja de especificaciones de tanque de recepción instalado

		<b>Ficha técnica tanque de recepción</b>														
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;"><b>Datos generales</b></td> <td>No. de trabajo</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Hoja</td> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;">1 de 1</td> </tr> <tr> <td>Nombre del trabajo</td> <td style="text-align: center;">Planta de cerveza artesanal</td> </tr> <tr> <td>No. de documento</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>No. de proyecto</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td style="text-align: center;">Universidad del Valle de Guatemala</td> </tr> <tr> <td>Planta</td> <td style="text-align: center;">Laboratorio de Operaciones Unitarias</td> </tr> </table>		<b>Datos generales</b>	No. de trabajo	1	Hoja	1 de 1	Nombre del trabajo	Planta de cerveza artesanal	No. de documento	1	No. de proyecto	1	Ubicación	Universidad del Valle de Guatemala
<b>Datos generales</b>	No. de trabajo	1	Hoja		1 de 1											
	Nombre del trabajo	Planta de cerveza artesanal														
	No. de documento	1														
	No. de proyecto	1														
	Ubicación	Universidad del Valle de Guatemala														
	Planta	Laboratorio de Operaciones Unitarias														
<b>No.</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>													
1	Número de ítem	N/A	A-200													
2	Nombre de ítem	N/A	Tanque de recepción													
3	Cantidad requerida	Unidad	1													
4	Material a trabajar	N/A	Agua, malta de cebada, lúpulo, mosto, levadura y cerveza													
5	Presión de operación	atm	1													
6	Temperatura de operación	°C	0 - 100													
7	Rango de presión permisible (+/-)	atm	0.05													
8	Rango de temperatura permisible (+/-)	°C	10													
9	Orientación	N/A	Vertical													
10	Diámetro	m	0.4													
11	Alto	m	0.5													
12	Tipo de tapadera	N/A	Abatible													
13	Inclinación en el fondo	°	5													
14	Material de construcción	N/A	Acero inoxidable SS304													
15	Espesor de pared	mm	2													

Figura 30. Hoja de especificaciones de Chiller Tempstar

		<b>Ficha técnica Chiller Tempstar</b>														
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;"><b>Datos generales</b></td> <td>No. de trabajo</td> <td>1</td> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Hoja</td> <td rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;">1 de 1</td> </tr> <tr> <td>Nombre del trabajo</td> <td>Planta de cerveza artesanal</td> </tr> <tr> <td>No. de documento</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>No. de proyecto</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td>Universidad del Valle de Guatemala</td> </tr> <tr> <td>Planta</td> <td>Laboratorio de Operaciones Unitarias</td> </tr> </table>		<b>Datos generales</b>	No. de trabajo	1	Hoja	1 de 1	Nombre del trabajo	Planta de cerveza artesanal	No. de documento	1	No. de proyecto	1	Ubicación	Universidad del Valle de Guatemala
<b>Datos generales</b>	No. de trabajo	1	Hoja		1 de 1											
	Nombre del trabajo	Planta de cerveza artesanal														
	No. de documento	1														
	No. de proyecto	1														
	Ubicación	Universidad del Valle de Guatemala														
	Planta	Laboratorio de Operaciones Unitarias														
<b>No.</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>													
1	Número de ítem	N/A	A-300													
2	Nombre de ítem	N/A	Chiller Tempstar													
3	Cantidad requerida	Unidad	1													
4	Material a trabajar	N/A	Agua y propilenglicol													
5	Presión de operación	atm	1													
6	Temperatura de operación	°C	-10 a 30													
7	Rango de presión permisible (+/-)	atm	0.05													
8	Rango de temperatura permisible (+/-)	°C	5													
9	Orientación	N/A	Vertical													
10	Ancho	m	0.8													
11	Largo	m	0.75													
12	Alto	m	1.2													
13	Refrigerante	N/A	R-410A													
14	Voltaje	v	220													
15	Frecuencia	Hz	60													
16	Compresor	N/A	Scroll de 2 etapas													

Figura 31. Secador de rodillos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 17. Datos técnicos del secador de rodillos

Dato	Descripción
Voltaje	220 V
Variador de frecuencia	0-60 Hz
Velocidad máxima de rodillos	359.8 rpm
Diámetro volante	0.17 m
Dimensión de tolva	0.41mX0.31m
Diámetro rodillos	0.10m
Potencia del motor	4 kW
Código	N-449
Fabricante	Talleres Hernández

Figura 32. Bomba centrífuga Aquastrong EJm61C del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

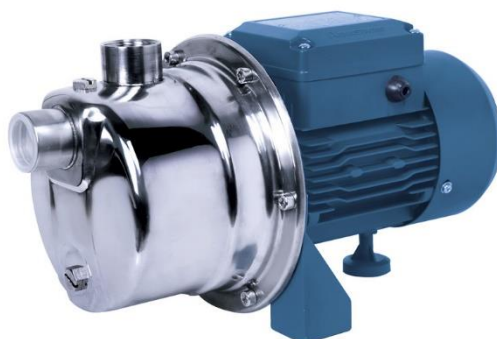


Tabla 18. Datos técnicos de bomba centrífuga

Dato	Descripción
Marca	Aquastrong
Modelo	EJm61C
Voltaje	110 V
Flujo máximo	45 l/min
Cabeza máxima	38 m
Succión máxima	9 m
Potencia motor	0.45 kW
Capacitancia	25 $\mu$ F
Inductancia	250 V
Frecuencia	60 Hz
Diámetro succión	0.0254 m (1 in)
Diámetro descarga	0.0254 m (1 in)
Grado de protección	F
Grado de aislamiento	IPX4
Máxima temperatura ambiente	40°C
Máxima temperatura del líquido	40°C
Material	Acero inoxidable

Figura 33. Reactor de la planta piloto de cerveza del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 19. Datos técnicos de reactor

Dato	Descripción
Forma	Cilindrico vertical
Material	Acero inoxidable
Fondo	Cónico
Diámetro externo	52 cm
Diámetro interno	48 cm
Altura del enchaquetado	32 cm
Termómetro	-20 a 120°C
Manómetro	0 a 15 psi

Figura 34. Agitador con motor WEG del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 20. Datos técnicos de agitador WEG

Dato	Descripción
Voltaje motor	220 V
Marca motor	WEG motors
Frecuencia	0-60 Hz
Potencia motor	1.5 kW
Rpm motor	1730
Grado de protección	IP55
Largo de agitador	0.88 m
Tamaño de aspas	0.04m
Número de aspas	6

Figura 35. Agitador con motor Servodyne del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 21. Datos técnicos de agitador Servodyne

Dato	Descripción
Voltaje motor	110 V
Marca motor	Servodyne
Frecuencia	0-60 Hz
Potencia motor	0.25 kW
Rpm motor	150-6000
Grado de protección	IP55
Largo de agitador	0.5 m
Tamaño de aspas	3 cm
Número de aspas	3



Figura 36. Balanza analítica OHAUS del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 22. Datos técnicos de balanza analítica

Dato	Descripción
Marca	OHAUS
Modelo	V31XH2
Capacidad máxima	2000 g
Capacidad mínima	0.0001 g
Voltaje	110 V
Presición	$\pm 0.0001$ g

Figura 37. Balanza móvil del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 23. Datos técnicos de balanza móvil

Dato	Descripción
Marca	OHAUS
Modelo	T31P
Capacidad máxima	150 kg
Capacidad mínima	1 kg
Voltaje	110 V
Presición	$\pm 0.01$ kg

Figura 38. Densímetro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Tabla 24. Datos técnicos del densímetro

Dato	Descripción
Marca	Genérica
Rango	0.99 a 1.17
Presición	$\pm 0.002$
Material	Vidrio

Figura 39. Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) de la Universidad del Valle de Guatemala



Figura 40. Especificaciones del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC)

Physical Specifications (1100 Series modules)		
Type	Specification	Comments
Weight	11.0 kg (25.0 lbs)	G1310A ISO Pump
	11.0 kg (25.0 lbs)	G1314A VWD
	10.2 kg (22.5 lbs)	G1316A TCC
	17.0 kg (38.0 lbs)	G1362A RID
Dimensions (width × depth × height)	345 × 435 × 140 mm (13.5 × 17 × 5.5 inches)	G1310A, G1314A, G1321A
	345 × 435 × 180 mm (13.5 × 17 × 7.0 inches)	G1362A
	410 × 435 × 140 mm (16.1 × 17 × 5.5 inches)	G1316A
Line Voltage	100 – 120 or 220 – 240 VAC, ± 10 %	Wide-ranging capability
Line frequency	50 or 60 Hz, ± 5 %	
Power consumption	320 VA maximum	
	160 VA maximum	G1362A
Ambient operating temperature	0 – 55 °C (32 – 131 °F)	
Ambient non-operating temperature	-40 – 70 °C (-4 – 158 °F)	
Humidity	<95 %, at 25 – 40 °C (77 – 104 °F)	Non-condensing
Operating altitude	Up to 2000 m (6500 ft.)	
Non-operating altitude	Up to 4600 m (14950 ft.)	For storing the instrument
Safety standards: IEC, CSA, UL, EN	Installation Category II, Pollution Degree 2	

Figura 41. Columna Aminex HPX-87K utilizada en el HPLC



Columna de cromatógrafo especial para cuantificación de maltosa

Figura 42. Especificaciones de la columna Aminex HPX-87K del HPLC

	<b>Aminex HPX-87K column, 300 x 7.8 mm</b>
<b>Catalog number</b>	125-0142
<b>Resin ionic form</b>	Potassium
<b>Support</b>	Sulfonated divinyl benzene-styrene copolymer
<b>Particle size</b>	9 $\mu$ m
<b>Maximum pressure</b>	1,500 psi
<b>Maximum flow rate at temperature max.</b>	1.0 ml/min
<b>Maximum temperature</b>	85°C
<b>Typical mobile phase</b>	H <sub>2</sub> O
<b>pH range</b>	5-9
<b>Guard cartridge*</b>	125-0507

Figura 43. Cinta métrica



Tabla 25. Datos técnicos de la cinta métrica

Dato	Descripción
Marca	Stanley
Rango	0 – 5 m
Presición	$\pm 0.001$ m

Figura 44. Vernier



Tabla 26. Datos técnicos de vernier

Dato	Descripción
Marca	Stanley
Rango	0 – 150 mm
Presición	$\pm 0.02$ mm

Figura 45. Termocupla Extech

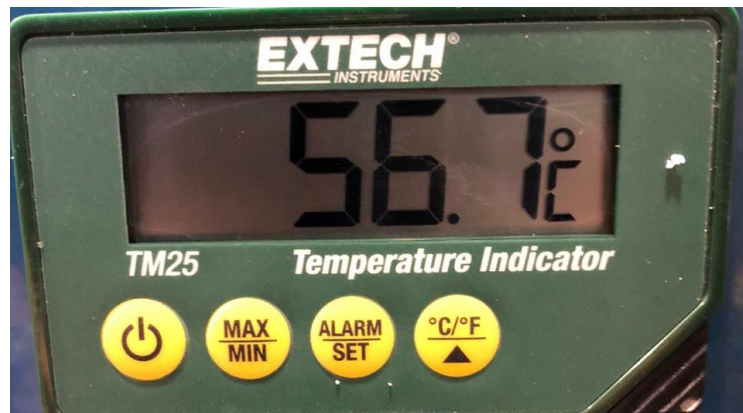


Tabla 27. Datos técnicos de termocupla

Dato	Descripción
Marca	Extech
Rango	0 – 200°C
Presición	$\pm 0.01$ °C

Figura 46. Centrifugadora por lotes del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Figura 47. Probeta de 2 L



Tabla 28. Datos técnicos de probeta de 2 L

Dato	Descripción
Marca	Genérica
Volumen máximo	2 L
Incertidumbre	$\pm 20$ mL
Material	Polietileno

## F. Registro gráfico de experimentación

Figura 48. Representación visual de planta piloto de cerveza artesanal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

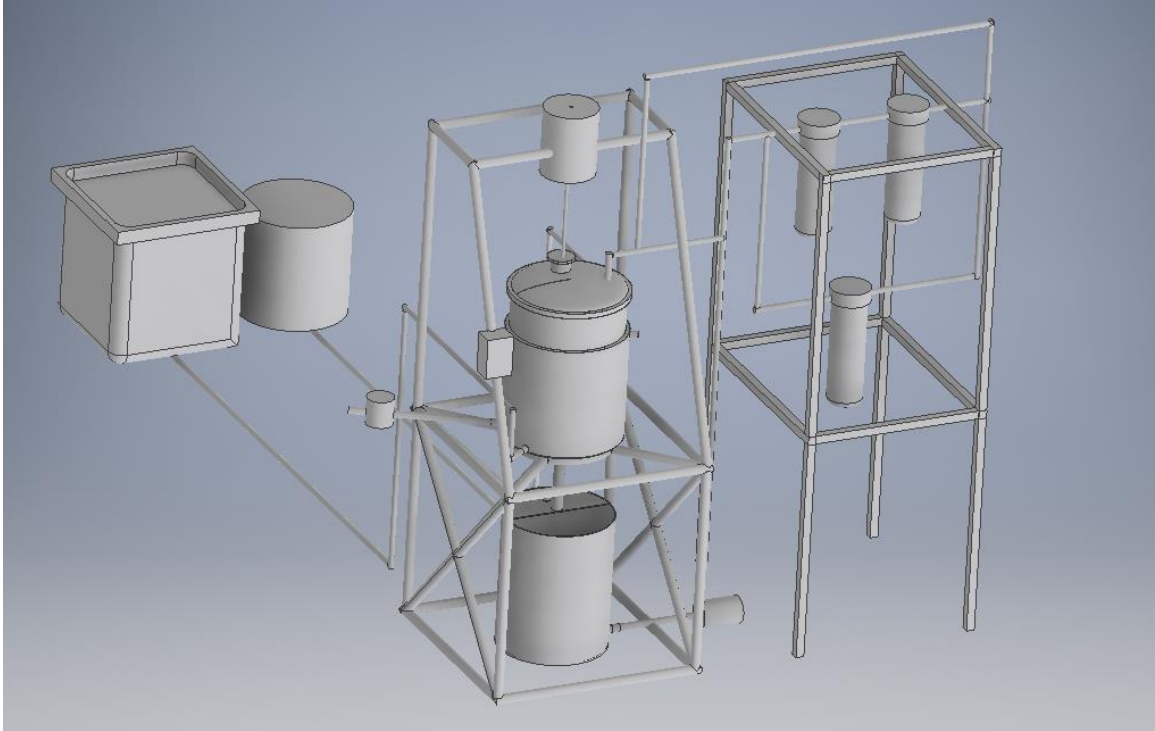


Figura 49. Medidas de espacio en planta piloto

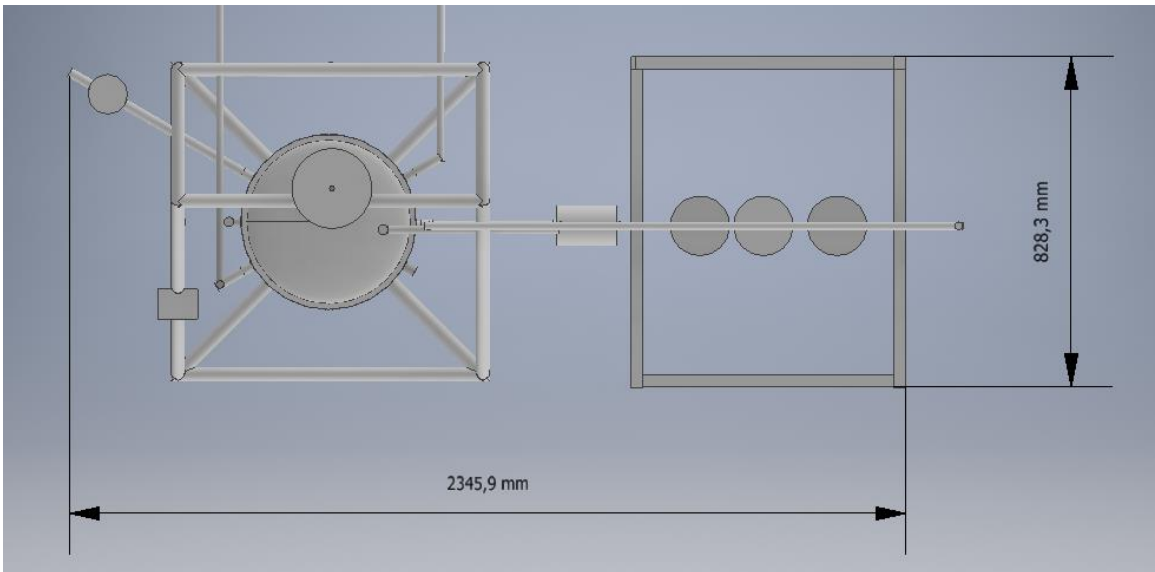




Figura 50. Ajuste de secador de rodillos con estándar de referencia



Figura 51. Comparativa de estándar de distancia entre rodillos y grano de malta típico

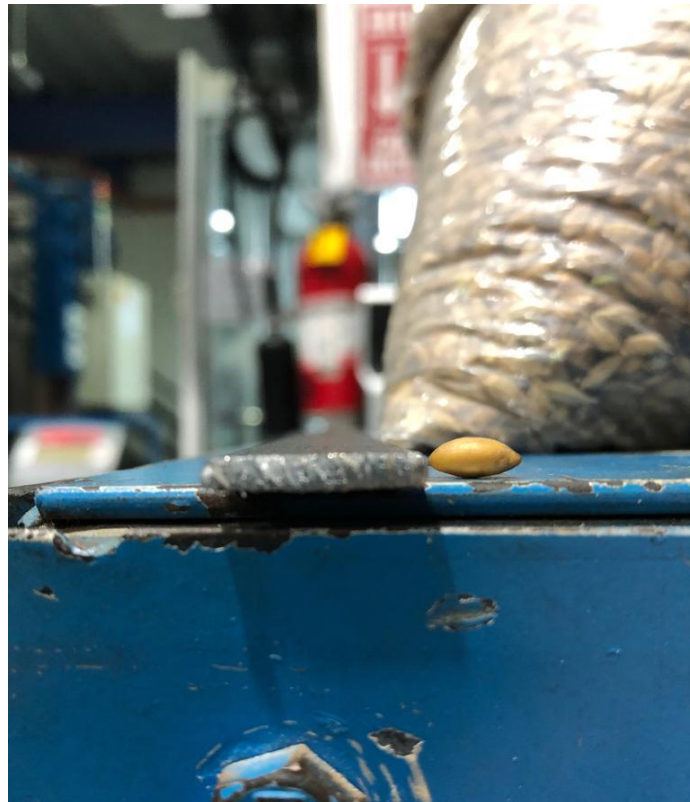


Figura 52. Molienda de malta en secador de rodillos



Figura 53. Lúpulo Hallertau Tradition



Figura 54. Cerveza Lager producida



### XIII. GLOSARIO

**Beer Judge Certification Program (BJCP):** Es una organización estadounidense sin fines de lucro que busca desarrollar y fomentar el conocimiento, comprensión y apreciación de los diversos estilos de cerveza, sidra e hidromiel existentes en el mundo (BJCP, 2008).

**Cebada:** Grano con grandes reservas de almidón (Olmedo, 1965).

**Filtración:** Es un método de separación física utilizado para separar sólidos a partir de fluidos mediante la interposición de un medio permeable capaz de retener partículas sólidas que permite únicamente el paso de líquidos (González, 2017).

**International Bitterness Units (IBU):** Es una sigla definida por la Sociedad Americana de Químicos Cerveceros y se usa para medir que tan amarga es la cerveza. Cuanto mayor sea la cantidad de IBU en una cerveza, más amarga será. Un INU equivale a un miligramo de iso-alpha ácidos por litro de cerveza (Russell, 2009).

**Lovibond (L):** Es la escala de color de la malta según su tueste. Matas claras cuentan con un lovibond bajo y maltas tostadas cuentan con un lovibond alto (Russell, 2009).

**Malta:** Cebada desecada y tostada levemente que se emplea para la elaboración de cerveza y otras bebidas (Olmedo, 1965).

**Mosto:** Líquido extraído del proceso de remojo de malta durante el proceso de fabricación de cerveza. Caldo rico en azúcares fermentables y no fermentables (Russell, 2009).

**Standard Reference Method (SRM):** Es el sistema de colores utilizado en la industria cervecera para especificar el color de la cerveza terminada (Russell, 2009).

**Unidad Nefelométrica de Turbidez (UNT):** Es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido (González, 2017).

**Malta caramel:** Llamada también malta cristal o malta caramelizada. Esta malta ha sido introducida verde a una temperatura de operación dentro del rango de actividad de enzimas amilasas para convertir almidón en azúcares y luego con un golpe de fuego se caramelizan.

**Maceración:** Conversión de almidón en azúcares por medio de enzimas de alfa y beta amilasa.

**Afrecho:** Residuo del proceso cervecero. Residuos de malta a los cuales se les ha extraído los azúcares dentro del grano.

**Amilasa:** Enzima hidrolasa que tiene como función catalizar la reacción de hidrólisis en el almidón y glucógeno para formar maltosa, dextrinas y glucosa libre.

**Maltosa:** Disacárido formado por dos moléculas de glucosa unidas por un enlace glucosídico.

**Dextrinas:** Son un grupo de carbohidratos de bajo peso molecular formados por la hidrólisis de almidón o glucógeno. No son fermentables.

**Lúpulo:** Nombre formal *Humulus Lupulus*. Planta trepadora de la familia Cannabácea cuyo fruto seco se ha vuelto ingrediente de amargor y aroma en la cerveza desde varios siglos.

**Gravedad específica:** Relación de densidad de un líquido en relación a la densidad del agua a cierta temperatura

**Mosto de cerveza:** Es el líquido extraído del proceso de remojo de malta durante el proceso de fabricación de cerveza. Este es aromatizado con lúpulo para ser infundido y posteriormente fermentado en cubas. Se denomina de esta forma por su alto contenido de azúcares y, por consiguiente, su sabor dulce.

**Levadura:** Conjunto de diversos hongos unicelulares que son capaces de iniciar los procesos de descomposición de distintas sustancias orgánicas, particularmente carbohidratos, para dar lugar a subproductos u otras sustancias específicas como alcoholes.

**Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC):** Es un método analítico de separación en el cual, por acción de una bomba, fluye una mezcla de analitos en un sistema disolvente comúnmente conocido como fase móvil. La fase móvil pasa a través de una columna que contiene la fase estacionaria a un flujo determinado. La separación de los compuestos ocurre con base en la interacción de los mismos con la fase móvil y la estacionaria.

**Cromatografía de gases (CG):** Es un método analítico instrumental de separación que permite analizar los componentes de una mezcla. Emplea un gas acarreador que arrastra los componentes de la mezcla por el interior de la columna cromatográfica.

**Ale:** Es una clasificación que abarca todas las cervezas de fermentación alta; en ellas el proceso de fermentación ocurre en la superficie del líquido.

**Lager:** Es una clasificación que abarca todas las cervezas de fermentación baja; en ellas el proceso de fermentación ocurre cerca del fondo del líquido.

**Número de Reynolds:** Es un número adimensional de variables definidas que establecen que la velocidad crítica, a la cual el flujo laminar cambia a flujo turbulento, depende de cuatro variables: el diámetro del tubo y la viscosidad, densidad y velocidad lineal del líquido.