

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el
Laboratorio de Operaciones Unitarias

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por
Olga Alejandra Alvarez Lemus, Jorge Adrián Cruz Pontaza, Raúl
Antonio Recinos Berganza y José Antonio Vilaró Letona para optar por
el grado académico de Licenciados en Ingeniería Química; y María
Marcela Zaghi Lara, para optar por el grado académico de Licenciada en
Bioquímica y Microbiología.

Guatemala,

2019

Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el
Laboratorio de Operaciones Unitarias

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



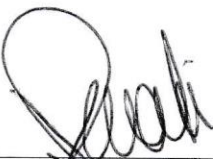
Construcción de una planta piloto para producción de cerveza en el
Laboratorio de Operaciones Unitarias

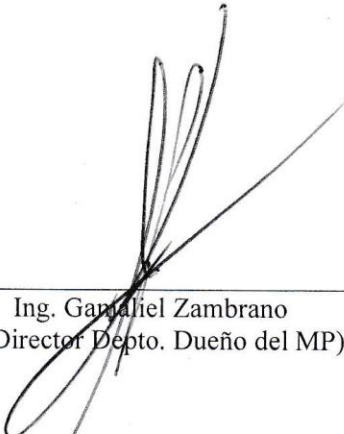
Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado
por Olga Alejandra Alvarez Lemus, Jorge Adrián Cruz Pontaza,
Raúl Antonio Recinos Berganza y José Antonio Vilaró Letona para
optar por el grado académico de Licenciados en Ingeniería
Química; y María Marcela Zaghi Lara, para optar por el grado
académico de Licenciada en Bioquímica y Microbiología.

Guatemala,

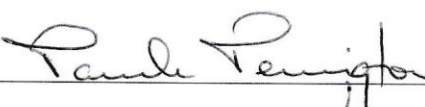
2019

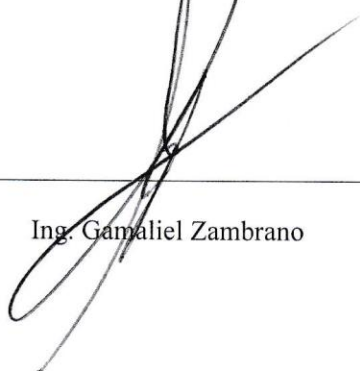
Vo. Bo. :

(f) 
Ing. Frances Recari
(Coordinador del Megaproyecto)

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano
(Director Depto. Dueño del MP)

Directores de los estudiantes que trabajaron el Megaproyecto:

(f) 
Dra. Pamela Pennington

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

Fecha de aprobación: Guatemala, 29 de noviembre de 2019

PREFACIO

Este trabajo es el resultado de años de esfuerzo, sacrificio y dedicación ya que representa el fin de una etapa académica muy importante para nuestra formación como profesionales de Ingeniería Química y Bioquímica y Microbiología. En este tiempo en el que hemos tenido la oportunidad de trabajar juntos, nos hemos dado cuenta que el trabajo en equipo es fundamental para alcanzar metas, que ser un líder va más allá de dar órdenes y que los verdaderos amigos son aquellos que te ayudan a estudiar y a seguir esforzándote para lograr tus objetivos.

Nos gustaría agradecer a todo el equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, así como al Departamento de Investigación los cuales nos brindaron todas aquellas herramientas necesarias para poder llevar a cabo este megaproyecto. También queremos agradecer a todos aquellos profesionales, maestros, ingenieros, licenciados y personas que durante nuestra carrera nos han motivado, nos han brindado consejos y el apoyo necesario para desarrollarnos profesionalmente de la manera en la que lo hemos hecho hasta ahora. Agradecemos a los departamentos de Ingeniería Química y Bioquímica por ser un apoyo excepcional durante todo el transcurso del Megaproyecto y proporcionar las herramientas necesarias para realizar todo de una manera profesional y con aquella excelencia que trasciende. Agradecemos al Ing. Cristián Rossi, al Ing. Luis Núñez, al Ing. Gamaliel Zambrano, al Lic. Roberto de León Fajardo, a la Licda. Ana Luisa Mendizábal de Montenegro, a la Dra. Pamela Pennington, a la Dra. Dalia Lau, a la M.Sc Stefany Argueta y a la Ing. Frances Recari, por ser un pilar de apoyo y conocimiento al cual recurrir en todo momento.

No podemos dejar a un lado el agradecimiento a nuestras familias, que estuvieron con nosotros durante todo el proceso, que nos motivaron y nos dieron seguimiento en cada una de las ideas que quisimos llevar a cabo y estuvieron tanto en las situaciones complicadas que se nos presentaron como también en todos los pequeños y grandes logros que conseguimos en el proceso.

ÍNDICE

PREFACIO	i
LISTA DE ECUACIONES.....	xiii
LISTA DE CUADROS	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xxv
LISTA DE GRÁFICAS	xxxvi
LISTA DE CÁLCULOS	xxxix
RESUMEN	xlii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	1
A. OBJETIVO GENERAL	1
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
C. OBJETIVOS SUB-ESPECÍFICOS.....	4
III. JUSTIFICACIÓN	7
IV. MARCO TEÓRICO.....	1
A. ACONDICIONAMIENTO DE AGUA	1
1. Normativas nacionales	1
2. Sistema de filtración de agua	1
B. PERFILES DE AGUA PARA ELABORAR CERVEZA	11
1. Importancia del agua en la fabricación de cerveza	11
C. PROCESO DE MALTEADO	12
1. Estructura de la planta de cebada.....	12
2. Selección de granos.....	13
3. Tratamientos previos.....	14

4.	Remojo	16
5.	Germinado.....	18
6.	Tratamientos posteriores	20
D.	ECUACIONES DE SISTEMA DE FILTRACIÓN Y MALTEADO.....	20
1.	Diseño del sistema de filtración	20
2.	Proceso de malteado.....	22
E.	CEBADA Y MALTA DE CEBADA	23
1.	La cebada	23
2.	Secado y/o tostado de malta verde.....	23
3.	La malta base	24
4.	La malta caramel	24
5.	Curvas de secado.....	25
6.	Color de cerveza.....	25
7.	Molienda	26
8.	Granulometría de molienda.....	27
9.	Maceración.....	28
10.	Actividad enzimática en la maceración.....	28
11.	Azúcares producto de la maceración.....	29
12.	Enzimas añadidas	30
13.	Filtración de afrecho	30
14.	Cocción	30
15.	El lúpulo.....	31
16.	Grados de amargor	31
17.	Concentración de azúcares	32

18.	Cromatografía líquida de alta resolución	32
19.	Bombas utilizadas	33
F.	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	33
1.	ELABORACIÓN DE CERVEZA	33
a.	Materias primas.....	33
b.	Proceso general	34
2.	ESTILOS DE CERVEZA	36
3.	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	37
a.	Factores que afectan el desarrollo y crecimiento de la levadura.....	37
c.	Reacción de fermentación.....	39
4.	RECUPERACIÓN DE LA LEVADURA	43
5.	ANÁLISIS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.....	44
a.	Detección de azúcares.....	44
b.	Detección de alcoholes.....	44
c.	Conteo de microorganismos.....	46
d.	Cinética de crecimiento microbiano.....	49
1)	Generalidades.....	49
2)	Ciclo de crecimiento para un cultivo por lotes.....	49
3)	Factores que afectan la velocidad de crecimiento específica	51
4)	Evaluación de los parámetros cinéticos de Monod	52
5)	Reactores para fermentaciones.....	53
6)	Equipos auxiliares de un reactor de fermentación	54
a)	Sistema de agitación.....	54
b)	Sistema de control de temperatura	56

c)	Sistema de calentamiento	56
d)	Sistema de enfriamiento	57
e)	Sistema de control de pH	59
f)	Puertos de muestreo	59
g)	Sistema de salida de gases	59
h)	Válvula de seguridad de presión	59
G.	REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS	59
1.	CERVEZA	59
a.	Tipos de cerveza.....	60
b.	Características	61
2.	TIPOS DE TURBIDEZ	63
a.	Biológica	63
b.	Coloidal.....	64
c.	Mediciones de turbidez	66
d.	NTU	66
e.	EBC	68
3.	FORMAS DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS	68
a.	Filtración	68
b.	Sedimentación.....	71
c.	Centrifugación.....	73
d.	Tamizaje.....	73
e.	Equipos para la remoción de sólidos suspendidos	74
1)	Filtros	74
2)	Sedimentadores	74

3) Centrifugadoras.....	75
4) Tamices.....	77
5) Equipos auxiliares.....	78
a) Bombas	78
b) Bombas de desplazamiento positivo	78
c) Bombas centrífugas.....	78
6) Tuberías.....	81
7) Descarte de sólidos suspendidos	81
H. CONTROL DE CALIDAD	82
1. Análisis de materias primas	82
a. Metodología del número más probable (NMP) utilizando Colitag™.....	83
b. Metodología con uso de placa 3M Petrifilm™	84
V. ANTECEDENTES.....	1
VI. METODOLOGÍA	100
A. ACONDICIONAMIENTO DE AGUA	100
1. Determinación del cumplimiento de parámetros de acondicionamiento del agua que ingresa al proceso.....	100
2. Determinación del cumplimiento de parámetros de perfil de agua que ingresa	103
3. Propuesta de sistema de acondicionamiento de agua.....	103
A. PROCESO DE MALTEADO DE CEBADA	106
1. Tratamientos previos.....	107
2. Remojo.....	109
3. Germinado - Planchas	110
4. Germinado – Caja	112

5.	Tratamientos posteriores	115
6.	Propuesta de equipo para malteado de cebada	116
7.	Propuesta de modelo para determinar la concentración de azúcares fermentables el día de germinado de cebada.....	116
B.	SECADO DE MALTA, MACERACIÓN Y COCCIÓN.....	117
1.	Materiales y equipo	117
2.	Secado de malta base	118
3.	Secado de malta caramel.....	118
4.	Reducción de tamaño	119
5.	Granulometría	119
6.	Maceración.....	120
7.	Lavado de granos	120
8.	Cocción	120
9.	Azúcares fermentables	121
10.	Identificación de equipos disponibles	122
11.	Instalación de bomba y tuberías.....	122
12.	Dimensionamiento de calor.....	123
13.	Estadística	123
C.	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA DE CERVEZA.....	124
1.	Materiales, cristalería, reactivos y equipos	124
a.	Materiales.....	124
b.	Cristalería.....	125
c.	Reactivos.....	125
d.	Equipos	126

2.	Corridas de fermentación	126
a.	Montaje del sistema	126
b.	Adición de levadura al mosto.....	127
c.	Medición de temperatura	127
d.	Muestreo y análisis.....	128
3.	Estudio de cinética de reacción.....	129
a.	Preparación de inóculo y muestras.....	129
b.	Análisis de muestras.....	130
c.	Detección de azúcares presentes	131
d.	Detección de alcoholes presentes.....	132
e.	Conteo de microorganismos.....	132
4.	Interpretación de resultados	133
a.	Análisis de resultados de corridas de fermentación	133
b.	Generación de modelo cinético.....	134
c.	Determinación de variables de operación del fermentador.....	136
d.	Selección de equipos auxiliares	137
e.	Prueba de funcionamiento del fermentador	139
D.	REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS	140
1.	Determinación de filtro a utilizar	140
2.	Instalación de filtro	142
3.	Pruebas de tamizaje.....	145
4.	Pruebas de sedimentación	146
5.	Pruebas de centrifugado	147
e.	Pruebas de centrifugado por lotes	147

f.	Pruebas de centrifugado continuo	148
E.	PRUEBAS DE FILTRADO.....	149
F.	CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA.....	150
1.	Toma de muestra.....	150
g.	Toma de muestra para análisis fisicoquímico y microbiológico.....	150
h.	Toma de muestra para análisis de viabilidad de levaduras	150
2.	Análisis fisicoquímicos.....	151
a.	Medición de pH.....	151
b.	Medición de turbidez	151
c.	Medición de conductividad.....	151
d.	Medición de oxígeno disuelto	152
3.	Análisis microbiológicos.....	152
a.	Petrifilm™ 3M.....	152
b.	Número más probable (NMP) utilizando Colitag™	153
c.	Crecimiento en agar EMB.....	153
d.	Tinción Gram	154
4.	Análisis de viabilidad de levaduras.....	155
a.	Citometría de flujo	155
b.	Cámara de Neubauer	155
VII.	RESULTADOS.....	157
A.	ACONDICIONAMIENTO DE AGUA	157
B.	PERFILES DE AGUA PARA ELABORAR CERVEZA	162
C.	SISTEMA DE FILTRACIÓN	163
D.	PROCESO DE MALTEADO	167

E.	EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE FERMENTACIÓN.....	186
F.	PARÁMETROS CINÉTICOS DE REACCIÓN Y RENDIMIENTOS DE MICROORGANISMOS Y PRODUCTO.....	188
G.	MODELO CINÉTICO DE FERMENTACIÓN MICROBIANA DE MOSTO DE CERVEZA	189
H.	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA.....	191
I.	EQUIPOS AUXILIARES NECESARIOS	193
J.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL FERMENTADOR.....	198
K.	ANÁLISIS Y RAZONAMIENTO PARA EVALUACIÓN DE EQUIPO PRINCIPAL Y AUXILIAR PARA REMOCIÓN DE SÓLIDOS	200
L.	DISEÑO DE INSTALACIÓN PARA EQUIPO DE FILTRACIÓN.....	203
M.	TAMIZAJE DE CEBADA, MALTA BASE Y MALTA CAMEL	206
N.	PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN.....	210
O.	PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN	212
P.	PRUEBAS DE FILTRACIÓN.....	214
Q.	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL PRODUCTO FINAL	216
R.	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL PRODUCTO FINAL	217
S.	VIABILIDAD DE LEVADURA DURANTE FERMENTACIÓN.....	218
T.	CRECIMIENTO EN AGAR EMB	219
U.	ANÁLISIS HACCP	219
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	222
IX.	CONCLUSIONES	266
A.	CONCLUSIÓN GENERAL	266
B.	PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA	266
B.	PROCESO DE MALTEADO	267

C.	PROCESO DE FERMENTACIÓN	269
D.	PROCESO DE FILTRADO.....	270
E.	PROCESO DE CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA	271
X.	RECOMENDACIONES	273
A.	PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA	273
B.	PROCESO DE MALTEADO	274
C.	PROCESO DE FERMENTACIÓN	274
D.	PROCESO DE FILTRADO.....	275
E.	PROCESO DE CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA	276
XI.	BIBLIOGRAFÍA	277
XII.	ANEXOS	288
A.	DATOS ORIGINALES	288
1.	Corridas de fermentación de cerveza	301
2.	Cinética de reacción de fermentación	307
3.	Equipos auxiliares	313
4.	Pruebas de funcionamiento de fermentador	314
F.	CÁLCULO DE MUESTRA	326
1.	Cantidad de levadura para el mosto	353
2.	Análisis de alcoholes, azúcares y microorganismos	353
3.	Modelo cinético de predicción de sustrato, microorganismos y productos	354
4.	Propuesta de sistema de agitación.....	358
5.	Sistema de enfriamiento del fermentador	360
6.	Sistema de calentamiento del fermentador	364
G.	ANÁLISIS DE ERROR Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	370

H.	DATOS CALCULADOS	375
1.	Acondicionamiento, germinado y malteado de cebada.....	375
2.	Corridas de fermentación de cerveza	393
3.	Cinética de reacción de fermentación	396
4.	Para los equipos auxiliares	411
I.	FIGURAS	416
1.	Fichas técnicas	416
2.	Diagramas de equipo.....	452
3.	Gráficas.....	476
4.	Procesos	485
5.	Equipo y materiales.....	494
6.	Cromatogramas	511
7.	Esquemas de procesos.....	543
8.	Resultados de análisis microbiológicos	551
9.	Equipos propuestos	556
XIII.	GLOSARIO	566

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Volumen de solución de hipoclorito de sodio requerido.....	20
Ecuación 2. Caudal (general).....	21
Ecuación 3. Diámetro del filtro (sedimentos y carbón activado).....	21
Ecuación 4. Área del filtro (sedimentos y carbón activado).....	21
Ecuación 5. Flujo de retrolavado (sedimentos y carbón activado).	22
Ecuación 6. Cantidad de impurezas removidas en la primera etapa del proceso de limpieza.	22
Ecuación 7. Cantidad de impurezas removidas en la segunda etapa del proceso de limpieza.....	22
Ecuación 8. Cantidad de impurezas removidas en la tercera etapa del proceso de limpieza.	22
Ecuación 9. Porcentaje de rendimiento de cebada.	23
Ecuación 10: Cálculo de IBU con método Rager	32
Ecuación 11. Concentración celular.....	48
Ecuación 12. Densidad celular.....	50
Ecuación 13. Tasa de crecimiento específica.....	50
Ecuación 14. Balance de masa de un sistema de fermentación alcohólica	51
Ecuación 15. Efecto de concentración de sustrato en la velocidad de crecimiento celular	51
Ecuación 16. Efecto de concentración de producto en la velocidad de crecimiento celular.....	52
Ecuación 17. Rendimiento de los microorganismos con respecto al sustrato.....	52
Ecuación 18. Lineweaver-Burk para cálculo de parámetros cinéticos de reacción	53
Ecuación 19. Número de Reynolds.....	55
Ecuación 20. Número de potencia	56
Ecuación 21. Transferencia de calor del vapor	56
Ecuación 22. Transferencia de calor del mosto	57
Ecuación 23. Transferencia de calor del ambiente.....	57
Ecuación 24. Número de Grashof	57
Ecuación 25. Número de Nusselt.....	57
Ecuación 26. Coeficiente convectivo de transferencia de calor.....	58
Ecuación 27. Transferencia de calor de reacción.....	58
Ecuación 28. Velocidad de reacción	58

Ecuación 29. Incertidumbre de turbidímetro marca Hanna modelo HI 98703	68
Ecuación 30. Ley de Darcy	69
Ecuación 31. Determinación de viscosidad de acuerdo al tiempo	70
Ecuación 32. Velocidad de sedimentación.....	72
Ecuación 33. Velocidad de sedimentación teórica.....	72
Ecuación 34. Bernoulli para una bomba centrífuga	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Aplicación de los equipos utilizados en el proceso de filtración de agua	10
Cuadro 2. Iones más importantes en la fabricación de cerveza	12
Cuadro 3. Estructura del grano de cebada.....	13
Cuadro 4. Tamaño de las fracciones en la selección de granos.	15
Cuadro 5. Temperaturas de operación para las enzimas dentro del grano de malta	29
Cuadro 6. Porcentaje de utilización con respecto al tiempo para lúpulo en flor y en pellet	32
Cuadro 7. Comparación de cervezas de alta y baja fermentación.....	39
Cuadro 8. Temperatura adecuada para servir algunos estilos de cerveza	62
Cuadro 9. Turbidez objetivo dependiendo de tipo de filtración en plantas de filtración	67
Cuadro 10. Coeficientes de pérdidas por fricción en accesorios de tuberías	80
Cuadro 11. Tamices de molienda de malta	89
Cuadro 12. Comparación entre molienda fina y gruesa	89
Cuadro 13. Características de una Ipa inglesa	90
Cuadro 14. Características de una Ipa americana	90
Cuadro 15. Turbidez de cerveza con y sin tamizaje de harinas finas producto de molienda.....	90
Cuadro 16. Características iniciales del mosto antes de fermentar en sistema escala laboratorio .	90
Cuadro 17. Requisitos químicos para una cerveza según la norma COGUANOR NGO 33006 ...	92
Cuadro 18. Clasificación general de las bebidas alcohólicas.....	93
Cuadro 19. Especificaciones de la cerveza	94
Cuadro 20. Metodologías utilizadas para la medición de parámetros fisicoquímicos del agua que sale del sistema de acondicionamiento.	100
Cuadro 21: Metodologías utilizadas para la medición de parámetros microbiológicos s del agua que sale del sistema de acondicionamiento.	102
Cuadro 22: Material utilizado en la construcción del segundo separador.....	108
Cuadro 23: Material utilizado en la construcción de la plancha de germinado.	111
Cuadro 24: Material utilizado en la construcción de la caja de germinado.	113
Cuadro 25. Cumplimiento de parámetros físicos y organolépticos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR NGO 29001.....	157

Cuadro 26. Cumplimiento de parámetros químicos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR 29001.	158
Cuadro 27. Cumplimiento de parámetros microbiológicos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR 29001.	161
Cuadro 28. Cumplimiento de parámetros de perfil del agua para proceso según la norma BJCP 2008.....	162
Cuadro 29. Calificación del perfil de agua utilizada para elaboración de cerveza según el nivel de cumplimiento establecido por la BJCP 2008.	163
Cuadro 30. Propuesta de sistema de acondicionamiento de agua específico para la fabricación de cerveza.	163
Cuadro 31. Equipo necesario para realizar el proceso de malteado de cebada.....	167
Cuadro 32. Humedad final en porcentaje másico de los dos tipos de maltas producidos.....	178
Cuadro 33. Relación de distancia de rodillos fija en 2 mm y finos generados en la molienda de malta.....	179
Cuadro 34. Color de cerveza final reportado en escala Lovibond	180
Cuadro 35. Cuadro comparativo entre programa de maceración experimental empleando malta fabricada en el laboratorio comparado con referencias empleando malta comercial.....	180
Cuadro 36. Amargor de la cerveza utilizando método Rager	180
Cuadro 37. Concentración de azúcares analizados en HPLC presentes en el mosto	180
Cuadro 38. Equipos disponibles dentro del área de la planta piloto	181
Cuadro 39. Equipos existentes en el laboratorio y auxiliares a la planta piloto.....	182
Cuadro 40. Equipos requeridos para la operación de la planta piloto.....	183
Cuadro 41. Comparación de condiciones de fermentación teóricas y experimentales en sistema escala laboratorio	186
Cuadro 42. Características iniciales y finales del mosto antes de fermentar en sistema escala laboratorio	186
Cuadro 43. Parámetros cinéticos de reacción	188
Cuadro 44. Rendimiento de microorganismos y producto respecto al sustrato	188
Cuadro 45. Ecuaciones de modelo cinético de predicción con respecto al sustrato	189
Cuadro 46. Porcentajes de error de comportamiento experimental y del modelo generado.....	191

Cuadro 47. Equipos, tubería y accesorios implementados al fermentador disponible.....	193
Cuadro 48. Equipos, tubería y accesorios propuestos para el fermentador disponible	195
Cuadro 49. Requerimiento de agua fría para el proceso de fermentación	197
Cuadro 50. Requerimiento de agua fría para el proceso de maduración.....	198
Cuadro 51. Requerimiento de vapor para el proceso de fermentación	198
Cuadro 52. Comparación de condiciones de fermentación teóricas y experimentales en fermentador disponible.....	198
Cuadro 53. Características iniciales y finales de concentración de sólidos disueltos en pruebas en fermentador disponible	199
Cuadro 54. Características iniciales y finales de contenido alcohólico en pruebas de fermentador disponible.....	199
Cuadro 55. Equipo analizado para remoción de sólidos y razonamiento para evaluación de posible uso.....	200
Cuadro 56. Equipo auxiliar analizado para instalación de remoción de sólidos suspendidos y razonamiento para evaluación de posible uso.....	201
Cuadro 57. Tamaño de partícula de granos y maltas después de utilizar el molino de rodillos con separación de 2 mm y velocidad de giro de 30.8 rpm.....	206
Cuadro 58. Prorratio de cantidad de alcohol no producido por finos retirados.....	208
Cuadro 59. Promedio de parámetros medidos para pruebas de sedimentación	210
Cuadro 60. Porcentaje másico de sedimentos y sobrenadantes en pruebas de sedimentación usando los datos de lote N° 2	211
Cuadro 61. Parámetros promedios, medidos al filtrado, para pruebas de filtración con el equipo instalado, Figura 24, usando los datos del lote N° 3	214
Cuadro 62. Comparación de turbidez de la cerveza IPA producida con cervezas IPAs presentes en el mercado.....	215
Cuadro 63. Reducción de turbidez de equipos y procesos seleccionados para implementar en la planta de producción de cerveza IPA.....	215
Cuadro 64. Reducción de turbidez total de la cerveza IPA con el equipo implementado	216
Cuadro 65. Análisis fisicoquímico de la cerveza final producida.....	216

Cuadro 66. Análisis microbiológico por método de Petrifilm™ 3M EC de la cerveza final producida	217
Cuadro 67. Análisis microbiológico por método de número más probable (NMP) utilizando Colitag™ de la cerveza final producida.....	218
Cuadro 68. Viabilidad de la levadura al inicio y final de la fermentación por técnica de citometría de flujo	218
Cuadro 69. Viabilidad de la levadura al inicio y final de la fermentación por técnica de cámara de Neubauer	218
Cuadro 70. Crecimiento de bacterias, mohos y levaduras en Agar EMB.....	219
Cuadro 71. Análisis HACCP con peligros y puntos de prevención o control en cada proceso de la elaboración de cerveza final.....	219
Cuadro 72. Parámetros físicos y organolépticos del agua para proceso de fabricación de cerveza	288
Cuadro 73. Parámetros químicos del agua para proceso de fabricación de cerveza	290
Cuadro 74. Parámetros microbiológicos del agua para el proceso de fabricación de cerveza.....	291
Cuadro 75. Datos de volumen y tiempo medidos para el cálculo de caudal.....	292
Cuadro 76. Intensidad lumínica de los focos de la plancha de germinado	292
Cuadro 77. Cantidad de cebada según la etapa de limpieza.....	293
Cuadro 78. Mediciones de porcentajes de humedad.....	293
Cuadro 79. Largo del acrospire del grano de cebada según el tiempo de germinado.....	294
Cuadro 80. Cantidad de cebada al finalizar el proceso de germinado	296
Cuadro 81. Concentración de azúcares fermentables según el tiempo de germinado de cebada.....	296
Cuadro 82. Perfil de temperaturas dentro del deshidratador de gabinetes	298
Cuadro 83. Tiempos de procesos involucrados en el módulo con equipos actuales.....	298
Cuadro 84. Tamaños de grano de malta.....	298
Cuadro 85. Humedades de maltas molidas medidas en balanza de humedad OHAUS	299
Cuadro 86. Porcentaje de harinas finas retiradas después de molienda en secador de rodillos ...	299
Cuadro 87. Condiciones de maceración.....	299
Cuadro 88. Cantidades de lúpulo añadidas durante la cocción	299
Cuadro 89. Desechos de producción de cerveza	300

Cuadro 90. Colores de cerveza final reportados	300
Cuadro 91. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 1	300
Cuadro 92. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 2	300
Cuadro 93. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 3	301
Cuadro 94. Mediciones de características iniciales del mosto para la primera corrida de fermentación	303
Cuadro 95. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la primera corrida de fermentación cerveza	303
Cuadro 96. Mediciones de características iniciales del mosto para la segunda corrida de fermentación.	303
Cuadro 97. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la segunda corrida de fermentación cerveza	304
Cuadro 98. Mediciones de características iniciales del mosto en tercera corrida de fermentación cerveza	304
Cuadro 99. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la tercera corrida de fermentación cerveza.....	304
Cuadro 100. Mediciones de características finales del mosto para la primera corrida de fermentación	305
Cuadro 101. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la primera corrida de fermentación cerveza	305
Cuadro 102. Mediciones de características finales del mosto para la segunda corrida de fermentación.	305
Cuadro 103. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la segunda corrida de fermentación cerveza	306
Cuadro 104. Mediciones de características finales del mosto en tercera corrida de fermentación cerveza	306

Cuadro 105. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la tercera corrida de fermentación cerveza.....	306
Cuadro 106. Concentración de azúcares predominantes en el mosto de cerveza	307
Cuadro 107. Concentración de sólidos disueltos (°Brix)	308
Cuadro 108. Resultados de análisis de alcoholes y azúcares presentes	311
Cuadro 109. Resultados de análisis de conteo de microorganismos utilizando el citómetro de flujo	311
Cuadro 110. Tiempos de cada corrida de uso de caldera	313
Cuadro 111. Formación de producto y disminución de concentración de sólidos disueltos en prueba de fermentador disponible.....	314
Cuadro 112. Formación de producto y disminución de concentración de sólidos disueltos en prueba de fermentador disponible.....	314
Cuadro 113. Masa retenida en los filtros de papel al momento de determinar filtro a utilizar	316
Cuadro 114. Resultados de turbidez de la suspensión resultante de la cocción con y sin tamizaje de la malta.....	316
Cuadro 115. Resultados del tamizaje de cebada molida por un molino de rodillos.....	317
Cuadro 116. Resultados del tamizaje de malta mase molida por un molino de rodillos.....	318
Cuadro 117. Resultados del tamizaje de malta caramel molida por un molino de rodillos	319
Cuadro 118. Mediciones de turbidez en NTU para pruebas de sedimentación	320
Cuadro 119. Mediciones de densidad en g/mL para pruebas de sedimentación.....	320
Cuadro 120. Mediciones de tiempo en segundos para cálculos de viscosidad en pruebas de sedimentación	320
Cuadro 121. Turbidez y densidad de la cerveza posterior al proceso de fermentación para pruebas de centrifugación.....	321
Cuadro 122. Turbidez y densidad de la cerveza posterior al proceso de fermentación para pruebas de centrifugación.....	321
Cuadro 123. Turbidez y densidad de la cerveza centrifugada por lotes.....	321
Cuadro 124. Turbidez y densidad de la cerveza centrifugada en el equipo continuo	322
Cuadro 125. Mediciones de turbidez en NTU en pruebas de filtración	322
Cuadro 126. Mediciones de densidad en g/mL para pruebas de filtración	323

Cuadro 127. Mediciones de tiempo en segundos para cálculos de viscosidad en filtración	323
Cuadro 128. Masa de retenido y sobrenadante para pruebas de filtración.....	323
Cuadro 129. Valores de UFC/mL obtenidos por método de Petrifilm™ 3M EC	323
Cuadro 130. Valores de tubos positivos en método utilizando Colitag™	324
Cuadro 131. Valores de parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada lote y réplica	324
Cuadro 132. Valores obtenidos de oxígeno disuelto para 3 muestras.....	325
Cuadro 133. Consumo de energía en el deshidratador de gabinetes según temperatura de operación	328
Cuadro 134. Coeficientes de pérdida por fricción en accesorios de tubería con cuerda estándar, según McCabe.....	351
Cuadro 135. Promedio de parámetros físicos y organolépticos del agua para el proceso de fabricación de cerveza.....	375
Cuadro 136. Comparación de parámetros físicos y organolépticos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).	376
Cuadro 137. Promedio de parámetros químicos del agua para el proceso de fabricación de cerveza.	377
Cuadro 138. Comparación de parámetros químicos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).	378
Cuadro 139. Promedio de parámetros microbiológicos del agua para proceso de fabricación de cerveza	379
Cuadro 140. Comparación de parámetros microbiológicos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).	379
Cuadro 141. Caudal medido en la tubería de la salida del pozo	380
Cuadro 142. Especificaciones determinadas para la bomba dosificadora de cloro.....	381
Cuadro 143. Especificaciones determinadas para el filtro de sedimentos.	381
Cuadro 144. Especificaciones determinadas para el filtro de columna de carbón activado	382
Cuadro 145. Especificaciones determinadas para la lámpara de luz UV.....	382

Cuadro 146. Especificaciones determinadas para el filtro pulidor.....	383
Cuadro 147. Especificaciones determinadas para el tanque de almacenamiento de agua acondicionada	383
Cuadro 148. Especificaciones determinadas para la bomba centrífuga del sistema de acondicionamiento	384
Cuadro 149. Cantidad de impurezas removidas según la etapa del proceso de limpieza.	384
Cuadro 150. Promedio del porcentaje de impurezas removidas según la etapa de limpieza	385
Cuadro 151. Promedio del porcentaje de humedad de la cebada según el tiempo de germinado.	385
Cuadro 152. Promedio del largo del acrospire del grano de cebada según el tiempo de germinado	387
Cuadro 153. Porcentaje de rendimiento del proceso de germinado.....	388
Cuadro 154. Humedad en porcentaje másico con respecto al tiempo en secado de malta base utilizando el deshidratador de gabinetes	388
Cuadro 155. Humedad en porcentaje másico con respecto al tiempo en secado de malta caramel utilizando el deshidratador de gabinetes	388
Cuadro 156. Velocidad de secado y humedad para malta base	389
Cuadro 157. Velocidad de secado y humedad para malta caramel.....	390
Cuadro 158. Tamaño de partícula de malta de cebada sin moler.....	391
Cuadro 159. Análisis granulométrico de malta base molida en tamiz rotap.....	391
Cuadro 160. Análisis granulométrico de malta caramel molida en tamiz rotap	391
Cuadro 161. Amargor calculado en adiciones de lúpulo con método Rager	392
Cuadro 162. Concentración de azúcares en mosto antes de fermentar	392
Cuadro 163. Datos calculados para demanda térmica de la planta piloto para la producción de 35 litros de mosto cocido utilizando un serpentín con vapor como medio de calentamiento	393
Cuadro 164. Cálculo de bomba necesaria para movilización de mosto desde el tanque de cocción al fermentador	393
Cuadro 165. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la primera corrida de fermentación	393

Cuadro 166. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la segunda corrida de fermentación	394
Cuadro 167. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la tercera corrida de fermentación	394
Cuadro 168. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la primera corrida de fermentación	394
Cuadro 169. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la segunda corrida de fermentación	395
Cuadro 170. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la tercera corrida de fermentación	395
Cuadro 171. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la primera corrida de fermentación	395
Cuadro 172. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la segunda corrida de fermentación	396
Cuadro 173. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la tercera corrida de fermentación.....	396
Cuadro 174. Densidad del mosto a través del tiempo.....	396
Cuadro 175. Conteo de microorganismos promedio: células viables y células totales.....	407
Cuadro 176. Datos de concentración de microorganismos y propagación de error.....	407
Cuadro 177. Datos de modelo cinético de predicción de sustrato	408
Cuadro 178. Datos de modelo cinético de predicción de microorganismos	409
Cuadro 179. Datos de modelo cinético de predicción de producto.....	410
Cuadro 180. Masa de condensados en el tanque de ahogamiento	411
Cuadro 181. Masa de condensados en el manífull.....	411
Cuadro 182. Masa de condensados en el evaporador	412
Cuadro 183. Masa de condensados en la planta de biodiesel.....	412
Cuadro 184. Flujos máscicos de vapor de la caldera	412
Cuadro 185. Masa de mosto, agua y levadura inicial para el balance de masa.....	413
Cuadro 186. Masa de azúcares totales fermentables y no fermentables para el balance de masa.....	413
Cuadro 187. Masa de fermentado y agua para el balance de masa	413

Cuadro 188. Concentración y masa de azúcares fermentables y alcoholes presentes al final de la fermentación para el balance de masa.....	414
Cuadro 189. Masa de levadura residual del proceso de fermentación de mosto de cerveza para el balance de masa	414
Cuadro 190. Velocidad en m^2/s para pruebas de sedimentación	414
Cuadro 191. Velocidad de sedimentación calculada para pruebas de sedimentación.....	415
Cuadro 192. Porcentaje másico de sedimentado y sobrenadante para pruebas de sedimentación.	415
Cuadro 193. Velocidad en m^2/s calculada para pruebas de filtración	415
Cuadro 194. Porcentaje másico de retenido y sobrenadante para pruebas de sedimentación.....	415
Cuadro 195. Datos técnicos del deshidratador de gabinetes del laboratorio de operaciones unitarias	433
Cuadro 196. Datos técnicos del secador de rodillos	434
Cuadro 197. Datos técnicos de tamiz vibratorio	435
Cuadro 198. Datos técnicos de bomba centrífuga.....	436
Cuadro 199. Datos técnicos de tanque de acero inoxidable del laboratorio de operaciones unitarias	437
Cuadro 200. Datos técnicos de agitador.....	438
Cuadro 201. Datos técnicos de fermentador	439
Cuadro 202. Datos técnicos de molino de rodillos propuesto.....	440
Cuadro 203. Datos técnicos de bomba propuesta para procesos en sala de cocimiento	440
Cuadro 204. Datos técnicos de tanque de maceración propuesto en casa de cocimiento	460
Cuadro 205. Datos técnicos de filtro Lauter propuesto en casa de cocimientos	461
Cuadro 206. Datos técnicos de serpentín de calentamiento propuesto en tanque de cocción.....	462
Cuadro 207. Datos técnicos de tanque sedimentador Whirlpool propuesto en casa de cocimientos	463

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cebada de dos y seis hileras	14
Figura 2. Tratamientos previos del proceso de malteado.....	15
Figura 3. Esquema de proceso de malteado.....	16
Figura 4. Tanques de remojo.....	18
Figura 5. Caja de germinación	19
Figura 6. Indicadores del proceso de germinado según el porcentaje de rendimiento.....	20
Figura 7. Tipos de malta seca con su respectivo sabor y aroma	24
Figura 8. Paleta de colores de cerveza en escala SRM o Lovibond, con su respectivo tipo de cerveza	25
Figura 9. Diagrama de un molino de rodillos de 3 pasos.....	26
Figura 10. Conversión de almidón en azúcares durante la maceración	29
Figura 11. Algunos estilos de cerveza artesanal	36
Figura 12. Primer paso de la glucólisis: fosforilación de la glucosa.....	40
Figura 13. Segundo paso de la glucólisis: ruptura de la pentosa fructosa-1,6-bifosfato.....	41
Figura 14. Obtención de 3-fosfoglicerato en la tercera etapa de la glucólisis	42
Figura 15. Obtención de piruvato en la tercera etapa de la glucólisis.....	42
Figura 16. Fermentación alcohólica – obtención de etanol a partir de piruvato	43
Figura 17. Diagrama de los principales componentes de un equipo HPLC.....	44
Figura 18. Diagrama de bloques de los componentes principales un cromatógrafo de gases (CG)	45
Figura 19. Conteo celular con la cámara de Neubauer en el microscopio.....	47
Figura 20. Fases de crecimiento celular de microorganismos	51
Figura 21. Ilustración de un tanque agitado.....	53
Figura 22. Tipos de impulsores para agitadores.....	54
Figura 23. Tipo de impulsor en función de la viscosidad del medio de cultivo.....	55
Figura 24. Número de potencia N_p frente N_{Re} para turbina de 6 palas.	56
Figura 25. Sistemas de transferencia de calor	58
Figura 26. Interacción por proporción de proteína-polifenol.....	65

Figura 27. Relación entre las concentraciones de proteína y polifenol en la formación de turbidez	65
Figura 28. Esquema de zonas creadas en un filtro por torta	69
Figura 29. Esquema de filtración por flujo cruzado.....	71
Figura 30. Representación de fases de una sedimentación	71
Figura 31. Tipos de centrífugas comunes con filtración	76
Figura 32. Tipos de centrífugas comunes con sedimentación.....	77
Figura 33. Procedimiento para utilizar una placa 3M Petrifilm™ para Recuento de coliformes (3M Corporation, 2003)	85
Figura 34. Modelos que determinan la cantidad de azúcares fermentables de la cebada, según el tiempo de germinado.....	171
Figura 35. Balance de masa y energía de secado, molienda y tamizaje de malta base y malta caramel.....	174
Figura 36. Balance de masa y energía de maceración, lavado de granos y cocción	174
Figura 37. Diagrama de procesos para el secado de malta base en el deshidratador de gabinetes	175
Figura 38. Diagrama de procesos para el secado y tostado de malta caramel en el deshidratador de gabinetes	176
Figura 39. Diagrama de planta piloto con equipos disponibles	181
Figura 40. Equipos recomendados en casa de cocimiento.....	185
Figura 41. Equipos requeridos en sala de cocimientos dispuestos en el área de la planta piloto.	185
Figura 42. Balance de masa del proceso de fermentación de mosto de cerveza.....	191
Figura 43. Balance de energía del proceso de fermentación de mosto de cerveza y de esterilización del medio de cultivo.....	192
Figura 44. Equipos, tubería y accesorios implementados al fermentador disponible	195
Figura 45. Equipos, tubería y accesorios propuestos para el fermentador disponible	197
Figura 46. Vista de planta de la instalación del equipo de filtración	203
Figura 47. Vista de perfil de la instalación del equipo de filtración	204
Figura 48. Vista de elevación de la instalación del equipo de filtración.....	205
Figura 49. Balance de masa del tamizaje realizado a malta base.....	209

Figura 50. Balance de masa del centrifugado por lotes y continuo de la cerveza fermentada.....	213
Figura 51. Balance de masa del proceso de sedimentado y filtrado de la cerveza fermentada....	214
Figura 52. Temperatura vs tiempo en secado de malta base.....	297
Figura 53. Temperatura vs tiempo en secado y tostado de malta caramel.....	297
Figura 54. Demanda térmica con respecto al tiempo durante proceso de maceración y cocción	344
Figura 55. Demanda de vapor de caldera durante la maceración y cocción con uso de vapor del laboratorio de operaciones unitarias con entalpía de vaporización de 1884.78 kJ/kg	345
Figura 56. Ficha técnica de la bomba dosificadora de cloro.....	416
Figura 57. Ficha técnica del filtro de sedimentos	417
Figura 58. Ficha técnica del filtro de columna de carbón activado.....	419
Figura 59. Ficha técnica del material filtrante del filtro de columna de carbón activado	420
Figura 60. Ficha técnica del material filtrante del filtro de sedimentos.....	421
Figura 61. Ficha técnica de la lámpara de luz UV	422
Figura 62. Ficha técnica del filtro pulidor.....	423
Figura 63. Ficha técnica de la bomba seleccionada	425
Figura 64. Ficha técnica del primer separador	426
Figura 65. Ficha técnica del segundo separador	427
Figura 66. Ficha técnica del tercer separador.....	428
Figura 67. Ficha técnica del tanque de remojo	428
Figura 68. Ficha técnica de la plancha de germinado	429
Figura 69. Ficha técnica de la caja de germinado	430
Figura 70. Ficha técnica de filtro de elemento.....	431
Figura 71. Deshidratador de gabinetes del laboratorio de operaciones unitarias.....	432
Figura 72. panel de control de deshidratador de gabinetes	433
Figura 73. secador de rodillos	434
Figura 74. Tamizadora vibratoria.....	435
Figura 75. Bomba centrífuga Aquastrong EJm61C	436
Figura 76. Tanque de acero inoxidable del laboratorio de operaciones unitarias	437
Figura 77. Agitador con motor WEG.....	438
Figura 78. Fermentador de la planta piloto	439

Figura 79. Molino de rodillos propuesto.....	440
Figura 80. Bomba propuesta en planta piloto	440
Figura 81. Especificaciones de balanza analítica BOECO Germany.....	441
Figura 82. Especificaciones del refractómetro digital ATAGO Rx-5000i.....	442
Figura 83. Especificaciones del potenciómetro utilizado para análisis de pH	443
Figura 84. Especificaciones del autoclave o esterilizador de cristalería	443
Figura 85. Especificaciones del baño térmico Thermo Scientific.....	444
Figura 86. Especificaciones de la incubadora New Brunswick	444
Figura 87. Especificaciones del cromatógrafo de gases (GC)	445
Figura 88. Especificaciones del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC).....	446
Figura 89. Especificaciones de la columna DB-624	446
Figura 90. Especificaciones de la columna Aminex HPX-87K del HPLC	447
Figura 91. Especificaciones del citómetro de flujo Muse	447
Figura 92. Especificaciones del sistema de enfriamiento	448
Figura 93. Especificaciones de la caldera	448
Figura 94. Especificaciones de equipos auxiliares propuestos	449
Figura 95. Especificaciones de equipos disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias	451
Figura 96. Diagrama del primer separador.	452
Figura 97. Diagrama del segundo separador.....	453
Figura 98. Diagrama del tercer separador	454
Figura 99. Diagrama del tanque de remojo.....	455
Figura 100. Diagrama de la plancha de germinado.....	456
Figura 101. Diagrama de la caja de germinado.....	457
Figura 102. Diagrama 3D de la planta de producción de cerveza (Vista Isométrica).....	458
Figura 103. Diagrama 3D de la planta de producción de cerveza (Vista de planta).	459
Figura 104. Tanque de maceración propuesto	460
Figura 105. Filtro Lauter propuesto en planta piloto	461
Figura 106. Serpentín propuesto en tanque de cocción.....	462
Figura 107. Tanque sedimentador Whirlpool propuesto.....	463

Figura 108. Análisis organoléptico y fisicoquímico del agua de pozo que ingresa al Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.	463
Figura 109. Análisis microbiológico del agua de pozo que ingresa al Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.	464
Figura 110. Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano, según norma COGUANOR NGO 29901.	465
Figura 111. Características químicas que debe tener el agua para consumo humano, según norma COGUANOR NGO 29901	465
Figura 112. Relación de sustancias inorgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud, según norma COGUANOR NGO 29901	466
Figura 113. Valores guía para verificación de la calidad microbiológica del agua, según norma COGUANOR NGO 29901	466
Figura 114. Perfiles de agua para cerveza, según la norma BJCP 2008.	467
Figura 115. Datos generales filtros multicapa o multimedia.	468
Figura 116. Datos generales filtros de carbón activado.	469
Figura 117. Requerimiento de dosis de radiación UV según microorganismos.	470
Figura 118. Porcentaje de reducción de microorganismos según dosis de radiación UV.....	470
Figura 119. Propiedades del aire a 1 atm de presión.....	471
Figura 120. Valores de las constantes de la ecuación para obtener el número de Nusselt.....	472
Figura 121. Propiedades termodinámicas de vapor saturado en sistema internacional	472
Figura 122. Propiedades termodinámicas de vapor saturado en sistema inglés.....	473
Figura 123. Tabla control para determinar número más probable (NMP) con límites de confianza de 95% con 10 tubos de 10mL.....	474
Figura 124. Tabla control para determinar número más probable (NMP) con límites de confianza de 95% con 5 tubos de 20 mL.....	474
Figura 125. Conversión de valores de UFC/mL a NMP/mL	475
Figura 126. Hoja técnica de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> SafAle S-04.....	475
Figura 127. Remojo de cebada.....	485
Figura 128. Germinado de cebada.	485
Figura 129. Proceso de molienda.....	486

Figura 130. Macerado.	486
Figura 131. Lavado de granos.	487
Figura 132. Filtración de mosto.	487
Figura 133. Mosto a distintas concentraciones de azúcar.	488
Figura 134. Preparación de viales para el equipo HPLC.	488
Figura 135. Recepción de malta verde germinando.	489
Figura 136. Bandeja de malta verde lista para ser secada en el deshidratador de gabinete.	489
Figura 137. Medición del tamaño de granos de malta.	489
Figura 138. Ajuste de secador de rodillos con estándar referencia.	490
Figura 139. Comparativa de estándar de distancia entre rodillos y grano de malta típico.	491
Figura 140. Molienda de malta en secador de rodillos.	491
Figura 141. Maceración de cerveza a pequeña escala con control de temperatura.	492
Figura 142. Cocción de mosto.	492
Figura 143. Lúpulo Fuggless.	493
Figura 144. Lúpulo Cascade.	493
Figura 145. Hach DR890.	494
Figura 146. Multiparámetros PCSTestr TM marca OAKTON, modelo 35.	494
Figura 147. Petrifilm® 3M.	495
Figura 148. Incubadora Quincy Lab Inc, modelo 12-140E.	495
Figura 149. Regla.	496
Figura 150. Probeta de un 1L.	496
Figura 151. Cronómetro marca CASIO.	497
Figura 152. Balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120.	497
Figura 153. Balanza OHAUS, modelo 3000Series.	498
Figura 154. Cromatógrafo HPLC marca Agilent, 1,100 Series.	498
Figura 155. Light Meter EXTECH.	499
Figura 156. Densímetro Better Brew ®.	499
Figura 157. Amperímetro de gancho.	500
Figura 158. Taquímetro.	500
Figura 159. Vernier.	501

Figura 160. Olla de peltre	501
Figura 161. Termocupla.....	502
Figura 162. Estufa eléctrica de inducción.....	502
Figura 163. Prueba de fermentación a microescala	503
Figura 164. Mosto en proceso de fermentación.....	503
Figura 165. Autoclave o esterilizador de cristalería.....	504
Figura 166. Balanza analítica BOECO Germany	504
Figura 167. Refractómetro utilizado para medir °Brix e índice de refracción	505
Figura 168. Baño térmico utilizado para mantener controlada la temperatura del inóculo	505
Figura 169. Potenciómetro utilizado para medir pH.....	506
Figura 170. Determinación de peso seco con centrífuga	506
Figura 171. Determinación de densidad con un picnómetro.....	507
Figura 172. Muestras para mediciones empleadas en cinética de reacción	507
Figura 173. Sistema de fermentación de cerveza.....	508
Figura 174. Cromatógrafo de gases (GC-FID)	508
Figura 175. Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC).....	509
Figura 176. Columna Aminex HPX-87K utilizada en el HPLC	509
Figura 177. Citómetro de flujo utilizado para conteo celular y viabilidad	510
Figura 178. Fermentador disponible modificado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias ...	510
Figura 179: Cromatograma muestra 0, obtenido por el equipo HPLC.	511
Figura 180. Cromatograma muestra 1, obtenido por el equipo HPLC.	511
Figura 181. Cromatograma muestra 2, obtenido por el equipo HPLC.	512
Figura 182. Cromatograma muestra 3, obtenido por el equipo HPLC	512
Figura 183. Cromatograma muestra 4, obtenido por el equipo HPLC.	513
Figura 184. Cromatograma muestra 5, obtenido por el equipo HPLC	513
Figura 185. Cromatograma muestra 6, obtenido por el equipo HPLC	514
Figura 186. Análisis de alcoholes de muestra inicial de corrida de primera fermentación.....	514
Figura 187. Análisis de alcoholes de muestra final de corrida de primera fermentación	515
Figura 188. Análisis de azúcares de muestra inicial de primera fermentación	515
Figura 189. Análisis de azúcares de muestra final de primera fermentación.....	516

Figura 190. Análisis de alcoholes de muestra inicial de segunda fermentación	516
Figura 191. Análisis de alcoholes de muestra final de segunda fermentación.....	517
Figura 192. Análisis de azúcares de muestra inicial de segunda fermentación	517
Figura 193. Análisis de azúcares de muestra final de segunda fermentación	518
Figura 194. Análisis de alcoholes de muestra inicial de tercera fermentación	518
Figura 195. Análisis de alcoholes de muestra final de tercera de fermentación	519
Figura 196. Análisis de azúcares de muestra inicial de tercera fermentación.....	519
Figura 197. Análisis de azúcares de muestra final de tercera fermentación	520
Figura 198. Curva de calibración para análisis de azúcares.....	520
Figura 199. Muestra 0 para análisis de alcoholes presentes.....	521
Figura 200. Muestra 1 para análisis de alcoholes presentes.....	521
Figura 201. Muestra 2 para análisis de alcoholes presentes.....	522
Figura 202. Muestra 3 para análisis de alcoholes presentes.....	522
Figura 203. Muestra 4 para análisis de alcoholes presentes.....	523
Figura 204. Muestra 5 para análisis de alcoholes presentes.....	523
Figura 205. Muestra 6 para análisis de alcoholes presentes.....	524
Figura 206. Muestra 7 para análisis de alcoholes presentes.....	524
Figura 207. Muestra 8 para análisis de alcoholes presentes.....	525
Figura 208. Muestra 9 para análisis de alcoholes presentes.....	525
Figura 209. Muestra 10 para análisis de alcoholes	526
Figura 210. Muestra 11 para análisis de alcoholes	526
Figura 211. Muestra 12 para análisis de alcoholes	527
Figura 212. Muestra 13 para análisis de alcoholes	527
Figura 213. Muestra 14 para análisis de alcoholes	528
Figura 214. Muestra 15 para análisis de alcoholes	528
Figura 215. Muestra 16 para análisis de alcoholes	529
Figura 216. Muestra 17 para análisis de alcoholes	529
Figura 217. Muestra 18 para análisis de alcoholes	530
Figura 218. Muestra 19 para análisis de alcoholes	530
Figura 219. Muestra 20 para análisis de alcoholes	531

Figura 220. Muestra 1 para análisis de azúcares.....	531
Figura 221. Muestra 2 para análisis de azúcares.....	532
Figura 222. Muestra 3 para análisis de azúcares.....	532
Figura 223. Muestra 4 para análisis de azúcares.....	533
Figura 224. Muestra 5 para análisis de azúcares.....	533
Figura 225. Muestra 6 para análisis de azúcares.....	534
Figura 226. Muestra 7 para análisis de azúcares.....	534
Figura 227. Muestra 8 para análisis de azúcares.....	535
Figura 228. Muestra 9 para análisis de azúcares.....	535
Figura 229. Muestra 10 para análisis de azúcares.....	536
Figura 230. Muestra 11 para análisis de azúcares.....	536
Figura 231. Muestra 12 para análisis de azúcares.....	537
Figura 232. Muestra 13 para análisis de azúcares.....	537
Figura 233. Muestra 14 para análisis de azúcares.....	538
Figura 234. Muestra 15 para análisis de azúcares.....	538
Figura 235. Muestra 16 para análisis de azúcares.....	539
Figura 236. Muestra 17 para análisis de azúcares.....	539
Figura 237. Muestra 18 para análisis de azúcares.....	540
Figura 238. Muestra 19 para análisis de azúcares.....	540
Figura 239. Muestra 20 para análisis de azúcares.....	541
Figura 240. Prueba de identificación de presencia de almidón en cromatograma	541
Figura 241. Prueba de identificación de presencia de alcohol en cromatograma	542
Figura 242. Sistema existente de acondicionamiento de agua presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	543
Figura 243. Nuevo sistema de acondicionamiento de agua propuesto para la elaboración de cerveza artesanal en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	544
Figura 244. Balance de masa del sistema de acondicionamiento de agua presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	547
Figura 245. Balance de masa del proceso de tratamientos previos.	548

Figura 246. Balance de masa del proceso de remojo.	549
Figura 247. Balance de masa del proceso de germinado.	550
Figura 248. Resultados de muestra de lote 2 con control negativo por método de Petrifilm™ 3M EC	551
Figura 249. Repetición de resultados de muestras de lotes 1 y 2 con controles positivos y negativos por método de Petrifilm™ 3M EC.....	551
Figura 250. Resultados de burbujas observadas en control negativo de agua destilada estéril y de la dilución 1/100 de la muestra obtenida del lote 1 en Petrifilm™ 3M EC	552
Figura 251. Resultado positivo obtenido en dilución 1/10 de muestra del tercer lote comparada con controles.....	552
Figura 252. Resultados de controles obtenidos utilizando Colitag™ (E. coli, Klebsiella, Control Negativo).....	553
Figura 253. Colonias observadas en placas sembradas con muestras del lote 2 y 3 en agar EMB	553
Figura 254. Hongos observados en filtros 0.45µm sembrados en agar EMB	554
Figura 255. Tinción Gram realizada a colonias aisladas de agar EMB	554
Figura 256. Tinción con Azul de metileno a muestra de levaduras de lote 3 al iniciar fermentación	555
Figura 257. Tinción con azul de lactofenol a hongo presente en filtros sembrados en Agar EMB	555
Figura 258. Sensor de temperatura para el fermentador disponible.....	556
Figura 259. Sensor de pH para fermentador disponible.....	556
Figura 260. Controlador digital para sensor de pH para fermentador disponible	556
Figura 261. Sistema de agitación mecánica propuesto para el fermentador disponible.....	557
Figura 262. Tipo de impulsor para el agitador mecánico.....	558
Figura 263. Motorreductor seleccionado	558
Figura 264. Válvula de alivio de presión para el fermentador disponible	558
Figura 265. Válvula de retención de acero inoxidable soldable	559
Figura 266. Sistema de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias	559
Figura 267. Bomba centrífuga conectada al sistema de enfriamiento.....	560

Figura 268. Turbidímetro marca Hanna modelo HI 98703.....	560
Figura 269. Filtro de cartuchos suspendido en estructura para filtración	561
Figura 270. Viscosímetro marca Ez Zahn de copa 5	561
Figura 271. Bomba centrífuga de 0.45 kW instalada para bombeo de cerveza marca Aquastrong	562
Figura 272. Bomba aurora analizada para bombeo de cerveza.....	562
Figura 273. Centrífuga continua utilizada para análisis.....	563
Figura 274. Centrífuga por lotes utilizada para análisis.....	564
Figura 275. Tamizadora marca W.S. Tyler modelo RX-29.....	564
Figura 276. Tacómetro marca Extech modelo 461920	565
Figura 277. Molino de rodillos utilizado con separación de 2 mm a 30.8 rpm.....	565

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Gráfica del factor de fricción para tuberías circulares	80
Gráfica 2. Comportamiento de concentración de azúcares fermentables en función del tiempo	172
Gráfica 3. Concentración de azúcares fermentables en función del tiempo	173
Gráfica 4. Curva de secado en el deshidratador de gabinetes de malta base	177
Gráfica 5. Curva de secado en el deshidratador de gabinetes de malta caramel	177
Gráfica 6. Porcentajes en masa de análisis granulométrico a malta caramel, utilizando 2mm de separación entre rodillos en un secador de rodillos, en un solo paso.....	178
Gráfica 7. Porcentajes en masa de análisis granulométrico a malta base, utilizando 2mm de separación entre rodillos en un secador de rodillos, en un solo paso.....	179
Gráfica 8. Modelo cinético para predecir concentración de sustrato	189
Gráfica 9. Modelo cinético para predecir concentración de microorganismos.....	190
Gráfica 10. Modelo cinético para predecir concentración de producto	190
Gráfica 11. Porcentajes promedio retenidos de cebada molida en los tamices utilizados	207
Gráfica 12. Porcentajes promedios retenidos de malta base en los tamices utilizados	207
Gráfica 13. Porcentajes promedios retenidos de malta caramel en los tamices utilizados	208
Gráfica 14. Tendencia de la turbidez de la cerveza respecto al tiempo de sedimentado usando los valores promedio de las muestras analizadas.....	211
Gráfica 15. Comparación de turbidez resultante del centrifugado por lotes y continuo de las muestras del lote N° 1	212
Gráfica 16. Comparación de densidad resultante del centrifugado por lotes y continuo de las muestras del lote N° 1	212
Gráfica 17. Registro de valores de temperatura de primera corrida de fermentación.....	301
Gráfica 18. Registro de valores de temperatura de segunda corrida de fermentación	302
Gráfica 19. Registro de valores de temperatura de tercera corrida de fermentación	302
Gráfica 20. Comportamiento de pH del mosto en mediciones de cinética	307
Gráfica 21. Comportamiento de concentración de sólidos disueltos (° Brix)	309
Gráfica 22. Comportamiento de azúcares predominantes en el mosto de cerveza con respecto al tiempo durante la fermentación.....	309

Gráfica 23. Comportamiento de metanol con respecto al tiempo.....	310
Gráfica 24. Comportamiento de peso seco en función del tiempo.....	310
Gráfica 25. Comportamiento de concentración de sólidos disueltos en prueba de funcionamiento	315
Gráfica 26. Comportamiento de formación de etanol en prueba de funcionamiento.....	315
Gráfica 27. Comportamiento de concentración de sustrato en el proceso de fermentación	397
Gráfica 28. Comportamiento de microorganismos en el proceso de fermentación	398
Gráfica 29. Comportamiento del producto en el proceso de fermentación.....	398
Gráfica 30. Comportamiento de la densidad del mosto con respecto al tiempo durante la fermentación	399
Gráfica 31. Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de crecimiento celular.....	399
Gráfica 32. Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de microorganismos en fase de crecimiento celular.....	400
Gráfica 33. Curva de concentración de producto sin ajuste en fase de crecimiento celular	400
Gráfica 34. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de decrecimiento celular	401
Gráfica 35. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de microorganismos en fase de decrecimiento celular	401
Gráfica 36. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de producto en fase de decrecimiento celular	402
Gráfica 37. Logaritmo natural de concentración de microorganismos	402
Gráfica 38. Linealización de Lineweaver-Burk para fase de crecimiento celular	403
Gráfica 39. Linealización de Lineweaver-Burk para decrecimiento celular.....	403
Gráfica 40. Modelo cinético para predecir concentración de sustrato en la fase de crecimiento celular.....	404
Gráfica 41. Modelo cinético para predecir la concentración de microorganismos en la fase de crecimiento celular.....	404
Gráfica 42. Modelo cinético para predecir la concentración de producto en la fase de crecimiento celular.....	405

Gráfica 43. Modelo cinético para predecir la concentración de sustrato en la fase de decrecimiento celular.....	405
Gráfica 44. Modelo cinético para predecir la concentración de microorganismos en la fase de decrecimiento celular	406
Gráfica 45. Modelo cinético para predecir la concentración de producto en la fase de decrecimiento celular.....	406
Gráfica 46. Porcentaje de impurezas removidas según la etapa de limpieza.	476
Gráfica 47. Porcentaje promedio de humedad de los lotes de cebada según el tiempo de remojo	477
Gráfica 48. Porcentaje promedio del largo del acrospire de la cebada según el día de germinado	478
Gráfica 49. Concentración de azúcares fermentables según el día de germinado de cebada.....	479
Gráfica 50. Concentración de azúcares fermentables según el día de germinado de cebada.....	480
Gráfica 51. pH medido de los 3 lotes analizados	481
Gráfica 52. Gráfico de turbidez de los 3 lotes analizados.....	482
Gráfica 53. Gráfico de conductividad de los 3 lotes analizados	483
Gráfica 54. Gráfico de oxígeno disuelto de los 3 lotes analizados	484

LISTA DE CÁLCULOS

Cálculo 1. Volumen de solución de hipoclorito de sodio al 0.5%, necesaria para desinfectar 35L de agua, a una dosis de 2.50 mgL	326
Cálculo 2. Determinación del caudal de salida de la tubería de los filtros.	326
Cálculo 3. Determinación del diámetro del filtro de sedimentos.....	326
Cálculo 4. Determinación de área del filtro de sedimentos.....	326
Cálculo 5. Determinación del flujo de retrolavado del filtro de sedimentos.....	327
Cálculo 6. Cantidad de impurezas removidas en la primera etapa del proceso de limpieza.....	327
Cálculo 7. Cantidad de impurezas removidas en la segunda etapa del proceso de limpieza.	327
Cálculo 8. Cantidad de impurezas removidas en la tercera etapa del proceso de limpieza.	327
Cálculo 9. Porcentaje de conversión de cebada en el proceso de germinado.	327
Cálculo 10. Balance de energía de secado de malta y maceración de granos	327
Cálculo 11. Amargor de cerveza con ecuación Rager	335
Cálculo 12. Volumen disponible en tanque de planta piloto	336
Cálculo 13. Volumen disponible en tanque de fermentación.....	336
Cálculo 14. Volumen de tanque de maceración recomendado	337
Cálculo 15. Volumen de tanque sedimentador Whirlpool recomendado.....	337
Cálculo 16. Calor de reacción en conversión de almidón en azúcares	338
Cálculo 17. Demanda térmica en planta piloto	339
Cálculo 18. Cálculo de bomba	347
Cálculo 19. Curva de secado.....	352
Cálculo 20. Conversión de gravedad específica a grados Plato.....	353
Cálculo 21. Tasa de inoculación base	353
Cálculo 22. Cantidad de levadura a utilizar	353
Cálculo 23. Conversión de concentración en porcentaje %m/v a concentración en g/L	353
Cálculo 24. Conversión de concentración en porcentaje %m/v a concentración en g/L	354
Cálculo 25. Concentración de microorganismos experimental utilizando el peso seco	354
Cálculo 26. Diferencial de concentración de sustrato sobre el diferencial de tiempo.....	354

Cálculo 27. Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de crecimiento celular	354
Cálculo 28. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de decrecimiento celular	355
Cálculo 29. Rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato.....	355
Cálculo 30. Parámetros cinéticos utilizando ecuación de Lineweaver-Burk	355
Cálculo 31. Primer paso para obtener diferencial de tiempo sobre diferencial de sustrato	356
Cálculo 32. Segundo paso para obtener diferencial de tiempo sobre diferencial de sustrato	356
Cálculo 33. Diferencial de tiempo sobre el diferencial de sustrato.....	356
Cálculo 34. Diferencial de sustrato en el tiempo corregido	356
Cálculo 35. Diferencial de concentración de sustrato	356
Cálculo 36. Modelo final de concentración de sustrato	357
Cálculo 37. Diferencial de concentración de microorganismos.....	357
Cálculo 38. Diferencial de concentración de microorganismos sobre diferencial de tiempo	357
Cálculo 39. Diferencial de concentración de sustrato	357
Cálculo 40. Diámetro del agitador $Da = 13Dt$	358
Cálculo 41. Distancia de la parte superior del agitador al fondo del tanque	358
Cálculo 42. Altura de la pala del agitador	358
Cálculo 43. Ancho de la pala del agitador	358
Cálculo 44. Altura del estanque con respecto al fermentador.....	359
Cálculo 45. Número de Reynolds	359
Cálculo 46. Potencia del motor	359
Cálculo 47. Corrección de potencia	359
Cálculo 48. Balance de energía del sistema de enfriamiento del fermentador.....	360
Cálculo 49. Cálculo del coeficiente de expansión térmica.....	360
Cálculo 50. Número de Grashof	360
Cálculo 51. Número de Nusselt	361
Cálculo 52. Coeficiente convectivo de transferencia de calor	361
Cálculo 53. Área de transferencia de calor	361
Cálculo 54. Transferencia de calor del ambiente	361

Cálculo 55. Entalpía de reacción utilizando Ley de Hess	362
Cálculo 56. Velocidad de reacción de fermentación.....	362
Cálculo 57. Volumen de maltosa en el punto de velocidad máxima de reacción	363
Cálculo 58. Calor de reacción	363
Cálculo 59. Requerimiento de agua fría para el fermentador durante la fermentación.....	363
Cálculo 60. Balance de energía del sistema de enfriamiento del fermentador y requerimiento de agua fría para el proceso de maduración.....	363
Cálculo 61. Cálculo de calor específico de mosto de cerveza	364
Cálculo 62. Flujo másico de vapor para esterilización	364
Cálculo 63. Flujo másico de vapor de la caldera	364
Cálculo 64. Dimensionamiento de bomba centrífuga a utilizarse.....	365
Cálculo 65. Viscosidad cinemática de la cerveza	367
Cálculo 66. Velocidad de sedimentación de la cerveza	367
Cálculo 67. Velocidad de sedimentación teórico	368
Cálculo 68. Porcentaje másico de sedimentado en las pruebas de sedimentación.....	368
Cálculo 69. Corrección de UFC/mL por factor de dilución en muestras	368
Cálculo 70. Recuento de levaduras viables y totales por método de cámara de Neubauer.....	369
Cálculo 71. Porcentaje de viabilidad por método de cámara de Neubauer.....	369
Cálculo 72. Incertidumbre para sumas y restas.....	370
Cálculo 73. Incertidumbre para multiplicación y división.....	370
Cálculo 74. Porcentaje de error en comparación con valor teórico	371
Cálculo 75. Promedio de las corridas de caudal.	371
Cálculo 76. Desviación estándar para el promedio de las corridas del cálculo de caudal.	372
Cálculo 77. Incertidumbre de la turbidez medida con el turbidímetro portátil	372
Cálculo 78. Incertidumbre de la densidad de la cerveza fermentada	372
Cálculo 79. Incertidumbre de la viscosidad de la cerveza	373
Cálculo 80. Incertidumbre de la velocidad de sedimentación de la cerveza.....	373
Cálculo 81. Desviación estándar de la turbidez de la cerveza	374
Cálculo 82. Desviación estándar de medición de pH.....	374

RESUMEN

Con el fin de construir una planta piloto para la producción de cerveza artesanal tipo India Pale Ale (IPA), se utilizó la norma COGUANOR NGO 33 006 para establecer los parámetros de funcionamiento y seleccionar los equipos necesarios para la operación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Se partió de análisis fisicoquímicos, microbiológicos, cinéticos y principios de selección de equipo para comprender y especificar técnicamente cada una de las operaciones unitarias involucradas. De esta forma, se pudo asegurar que en cada etapa se cumplía con lo requerido para producir cerveza del tipo deseado.

Utilizando equipos disponibles y otros fabricados de acuerdo a las especificaciones calculadas, se logró instalar un proceso por lotes de producción de cerveza, el mismo consta de: un sistema de limpieza de cebada en donde se lleva a cabo una reducción de los distintos contaminantes presentes en el grano (partículas sólidas, material particulado y granos descartados); un tanque de remojo en donde ocurre un proceso de absorción de agua por parte del grano de cebada, con el fin de aumentar su porcentaje de humedad (de 15% a 45%), una cámara de germinado en donde la cebada aumenta su concentración de almidón (mediante condiciones controladas de humedad, temperatura y crecimiento del embrión), con el fin de estar preparada para un posterior proceso de secado; un sistema de acondicionamiento de agua (bomba dosificadora de cloro, filtro de sedimentos, filtro de columna de carbón activado, filtro pulidor y lámpara de luz UV) en donde ocurre un proceso de potabilización según lo establecido en la norma COGUANOR NGO 29001; un deshidratador de gabinetes ya instalado en el laboratorio, para producir malta base y malta caramel, un secador de rodillos que se empleó para moler la malta; un tanque de fermentación en el que ocurre el proceso de conversión de azúcares fermentables (maltosa, glucosa, sacarosa y fructosa) en etanol; este es un equipo muy importante ya que su efectividad es determinante para que la calidad y características del producto terminado sean fieles a la norma COGUANOR NGO 33006; un sistema de filtración en donde se separan los sedimentos restantes de la fermentación alcohólica del mosto que será posteriormente embotellada. Este último equipo es de suma importancia ya que permite obtener una cerveza traslúcida sin sólidos suspendidos que mantenga un nivel de turbidez constante por cada lote de producción.

Con estos equipos, se obtuvo una cerveza con un porcentaje de alcohol promedio de 5.9 % v/v, un valor promedio de pH de 4.46, un valor promedio de conductividad de 153.39 μ S/cm, un valor de oxígeno disuelto de 1.1 mg/L y un valor de <1.1 UFC/mL para *E. coli* y coliformes totales para los primeros dos lotes evaluados, los cuales cumplen con los límites establecidos por la norma COGUANOR NGO 33 006.

I. INTRODUCCIÓN

La cerveza es una bebida alcohólica resultante de fermentar levadura junto a un mosto elaborado de malta, lúpulo y agua. Es originaria de la cultura mediterránea, aunque se desarrolló en diversos lugares por lo que sus características son realmente diversas generando diferentes estilos de cervezas. En la actualidad, la producción de cerveza se clasifica en tres diferentes tipos según la forma en la que se produce: artesanal, casera e industrial y se ha definido que los cuatro ingredientes principales para crearla son: agua, cebada, lúpulo y levadura (Bamforth, 2009).

Dentro de los tres diferentes tipos de cerveza, la artesanal fue el punto de partida y enfoque de este estudio. Estas se caracterizan por carecer de conservantes, aditivos y un proceso de pasteurización. Las principales características que identifican a una cerveza son: color, espuma, brillo y transparencia; además de su contenido alcohólico y densidad o extracto. Dichas características varían dependiendo de qué estilo de cerveza se trate. Las cervezas India Pale Ale (IPA) se caracterizan por tener un sabor amargo y alta graduación alcohólica con respecto a otros tipos de cerveza artesanal.

Todas las operaciones unitarias que una planta de producción de cerveza artesanal utiliza fueron trasladadas a la planta piloto de cerveza artesanal. Empezando por el tratamiento de agua que se utilizó en la producción, el cual inició con un acondicionamiento a base de cloración seguido por un filtro de sedimentos y una columna de carbón activado finalizado por una lámpara de luz UV. También se trabajó con malta, otro de los ingredientes principales, el cual es derivado de la cebada en un proceso conocido como malteado. Este proceso constó de tratamientos para liberar impurezas, control de humedad, germinado y cambios de temperatura en hornos para obtener el tipo de malta que se deseaba. Todos estos procesos, de acondicionamiento de agua y malteado, fueron adaptados a los equipos de la planta piloto.

La molienda de la malta fue el siguiente proceso que se adaptó a la planta piloto de producción, estableciendo parámetros de granulometría y cantidad de finos producidos. La malta molida continuó a un proceso de maceración que convierte el almidón en azúcares fermentables y no fermentables. Al momento de implementar este proceso en la planta piloto se debió controlar la temperatura del agua, el pH, la relación malta molida y agua y el tiempo. Luego en el proceso de la cocción se añadió el lúpulo que definirá el amargor de la cerveza artesanal. La planta piloto continuó las prácticas de una planta cervecera en este punto para ajustar la concentración de azúcar en base a la evaporación de agua y a la medición de su gravedad específica.

El proceso que siguió y el cual se considera uno de los más importantes en la planta de producción de cerveza artesanal fue la fermentación. Este consistió en la adición de una cepa de levadura que estaba controlada en términos de tiempo y temperatura para dar lugar a la producción de etanol. Otro de los procesos presentes fue el filtrado que se lleva a cabo entre la fermentación y la carbonatación de la cerveza. La finalidad de este filtrado fue remover los sólidos suspendidos que quedaron como subproducto de la fermentación alcohólica. El último proceso que se adaptó a la planta piloto fue el de la carbonatación y envasado, junto a un proceso de control de calidad. Las regulaciones establecen parámetros microbiológicos y organolépticos a tomar en cuenta en estos procesos.

Debido a la calidad y facilidad que representa la producción de la cerveza tipo IPA, en este estudio se planteó la producción de este tipo de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias; el cual cuenta con 80 equipos utilizados actualmente para 23 operaciones unitarias, los cuales manejan diez procesos industriales diferentes. Esto lo caracteriza como uno de los laboratorios más grandes a nivel regional, por el número de equipos y de operaciones desarrolladas (Barrera, 2019).

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

1. Construir una planta piloto de producción de cerveza a partir de equipo y materiales disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias para obtener una cerveza tipo India Pale Ale con un contenido alcohólico según la norma COGUANOR NGO 33006.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Proponer el equipo necesario para realizar los procesos de acondicionamiento de agua y malteado de cebada para la producción de cerveza tipo India Pale Ale.
2. Implementar el equipo necesario para llevar a cabo secado, tostado, molienda, maceración y cocción de la malta en la elaboración de cerveza tipo India Pale Ale en planta piloto con el uso de pruebas para definir parámetros y procedimiento de operación, estandarizando el proceso.
3. Realizar un escalamiento e implementación del proceso de fermentación del mosto para que el producto fermentado presente un contenido alcohólico según la norma COGUANOR NGO 33006.
4. Implementar equipo y procesos para la reducción de sólidos suspendidos en el proceso de producción de cerveza tipo India Pale Ale.
5. Evaluar la caracterización microbiológica y fisicoquímica de la cerveza producida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería en la Universidad del Valle de Guatemala con referencia de algunos parámetros según la norma COGUANOR establecida para bebidas alcohólicas 33 006, y realizar un análisis de viabilidad de la levadura *saccharomyces cerevisiae* tipo SafAle™ S-04.

C. OBJETIVOS SUB-ESPECÍFICOS

1. Determinar el cumplimiento de parámetros de acondicionamiento del agua, según la norma COGUANOR NGO 29001, que ingresa al proceso de fabricación de cerveza, usando el equipo Hach DR890.
2. Determinar el cumplimiento de parámetros de perfil de agua, según la norma BJCP 2008, que ingresa al proceso de fabricación de cerveza, utilizando el equipo Hach DR980.
3. Proponer un sistema de acondicionamiento de agua específico para el proceso de fabricación de cerveza, cumpliendo con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos según las normas establecidas.
4. Dimensionar el equipo necesario para realizar el malteado de la cebada a utilizar en el proceso de fabricación de cerveza, para realizar los procesos de tratamientos previos, remojo y germinado de cebada, a fin de obtener una malta verde.
5. Proponer un modelo que determine la cantidad de azúcares fermentables según el tiempo de germinado de la cebada, usando como fuente de datos los proporcionados por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).
6. Establecer una metodología durante el secado y tostado para obtener diferentes tipos de malta (malta base y malta caramel) diseñando curvas de secado, para elaboración de cerveza India Pale Ale con un color definido.
7. Implementar molienda de malta graduando distancia de rodillos con el volante, con una referencia para obtener granulometría deseada en la molienda de malta.
8. Seleccionar de condiciones de operación en tanque de maceración para la conversión de almidón en azúcares, con un cuadro comparativo entre referencias y experimentación.

9. Calcular amargor de cerveza final a partir de tiempos y cantidades de lúpulo Cascade y Fuggles durante la cocción, para cumplir con el grado de amargor establecido para una cerveza India Pale Ale según BJCP.
10. Evaluar equipos disponibles para los procesos involucrados del módulo y proponer equipos nuevos para mejorar el proceso en la planta piloto.
11. Evaluar a las condiciones determinadas de temperatura y presión atmosférica del Laboratorio de Operaciones Unitarias, el proceso de fermentación para la obtención de cerveza tipo Ale.
12. Cuantificar el contenido alcohólico del fermentado usando análisis de cromatografía de gases (CG-FID) de muestras del proceso de fermentación para determinar el rendimiento de etanol como producto de la reacción.
13. Cuantificar el contenido de sacarosa, glucosa, fructosa y maltosa, por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) de muestras del proceso de fermentación para determinar el rendimiento del etanol como producto de la reacción.
14. Evaluar la cinética de reacción de la levadura con la medición del crecimiento de microorganismos y la concentración de sustrato y producto, en función del tiempo, para generar un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de microorganismos, sustrato y producto.
15. Determinar las variables de operación de un fermentador disponible usando el modelo obtenido para establecer los requerimientos de los equipos auxiliares necesarios.
16. Determinar e instalar los equipos auxiliares necesarios y hacer las pruebas de funcionamiento del sistema de fermentación.

17. Seleccionar el equipo para realizar la remoción de sólidos y disminuir la turbidez de la cerveza fabricada utilizando un análisis comparativo.
18. Implementar el equipo seleccionado para realizar las operaciones de remoción de sólidos suspendidos haciendo las instalaciones necesarias.
19. Tamizar la malta molida para determinar el impacto de la reducción de finos en la producción del mosto clarificado, evaluando los cambios al realizar este proceso.
20. Sedimentar la cerveza tipo IPA durante el proceso de su maduración para remover los sólidos suspendidos y con ello, reducir la turbidez.
21. Determinar si es posible centrifugar en forma continua la cerveza tipo IPA para reducir la turbidez previa a su filtración, usando el equipo disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
22. Realizar filtraciones de cerveza tipo IPA para reducir la turbidez final y determinar equipos a usar y las condiciones de operación del mismo.
23. Evaluar los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, turbidez y oxígeno disuelto para determinar la calidad del producto final producido dentro de la planta cervecera y hacer una comparación de estos según la norma COGUANOR 33006 y las especificaciones según la cerveza IPA a producir.
24. Evaluar los parámetros microbiológicos por medio del número de coliformes totales y *E. coli* presentes en el producto final producido para determinar el cumplimiento de la norma COGUANOR 34155 h3 con el uso de Petrifilm™ 3M y la metodología de número más probable (NMP).
25. Determinar el porcentaje de viabilidad de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* tipo SafAle™ S-04 al inicio y al final del proceso de fermentación con las técnicas de citometría de flujo y cámara de Neubauer.

III. JUSTIFICACIÓN

El principal reto en la producción de cerveza artesanal es la adecuada reproducibilidad del producto. Tecnificar el proceso de cerveza artesanal es importante para tener producciones repetitivas y eficientes. La escala de producción es directamente proporcional al nivel de tecnificación. En el Laboratorio de Operaciones Unitarias, el proceso de elaboración de cerveza se tecnificó con la ayuda de los equipos auxiliares que estuvieron a disposición. Por el momento, la planta piloto de producción de cerveza artesanal no tuvo fines lucrativos, pero en el futuro se podría evaluar la rentabilidad del proyecto y su venta. No se realizó una inversión para la compra de los equipos auxiliares necesarios, sino que se adaptó los equipos existentes y se utilizaron diversos materiales para instalar.

El tamaño del mercado de la cerveza artesanal a nivel mundial en 2015 estaba valuado en 85 mil millones de dólares, sin embargo, de acuerdo con un reporte de Grand View Research, Inc., se estima que, para antes de 2025, tendrá un valor de 502.9 mil millones de dólares a una tasa de crecimiento anual de 19.9%, en gran medida por la creciente demanda de esta bebida, su gran variedad de estilos y sabores y la inclusión en nuevos mercados (Grand View Research, 2017).

La demanda de cerveza artesanal en Guatemala es cada vez mayor, por lo que conocer el proceso de fabricación de cerveza es un tema de mucha importancia para las carreras de Ingeniería Química, Ingeniería Química-Industrial, Bioquímica y Microbiología e Ingeniería en Biotecnología Industrial. La construcción de una planta piloto de cerveza artesanal en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala permitió que los alumnos no solo sepan sobre el proceso, sino que puedan fabricar su propia cerveza, desde el proceso inicial de malteado, hasta el proceso final en el embotellado además de identificar que ésta es apta para consumo humano.

Por otro lado, la construcción de la planta piloto de cerveza permitió que la Universidad del Valle de Guatemala, sea el primer centro educativo en Centroamérica, en contar con una micro cervecería para el completo uso de los estudiantes. Otra función importante para el Departamento

de Ingeniería Química, fue el aplicar en la planta de cerveza, la tecnología desarrollada sobre la producción de levaduras en un biorreactor que se encuentra dentro del Laboratorio de Ingeniería Química

El proceso de producción de cerveza involucró varias operaciones unitarias en cada uno de sus procedimientos. En este proceso se aplicaron cursos como: transferencia de calor en ingeniería química, flujo de fluidos, termodinámica química, bioingeniería, microbiología, biología molecular, entre otros. La construcción de una planta piloto de producción de cerveza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias tuvo como objetivo principal ser parte de la formación educativa de los estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala.

IV. MARCO TEÓRICO

A. ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

1. Normativas nacionales

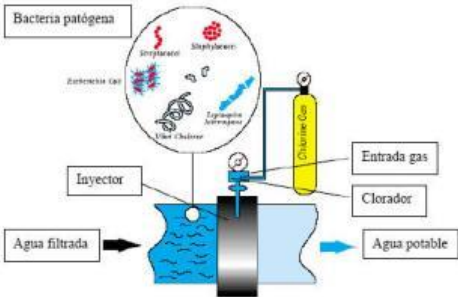
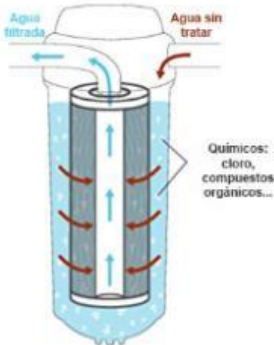
El agua es el ingrediente más abundante (alrededor de 90%) presente en cualquier tipo de cerveza, por lo tanto, su calidad influye notablemente en la calidad de la cerveza. Debido a lo anterior, se debe garantizar el acondicionamiento del agua que utilizaremos para la elaboración de la cerveza, ya que puede tener agentes contaminantes físicos, químicos y microbiológicos. Para evitar esto hay medidas preventivas como el análisis acorde al cumplimiento de la legislación vigente (COGUANOR 29001) para agua potable.

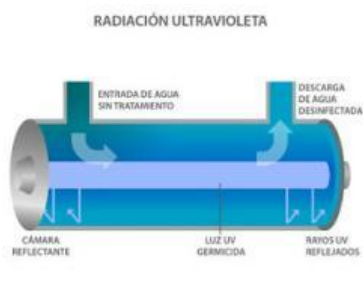
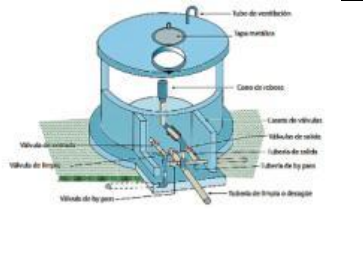
En el caso del agua que se almacena en tanques, es donde podemos tener un mayor riesgo para la salud. Ya que si el agua no se trata correctamente puede fomentar el crecimiento de patógenos entéricos o estafilococos, por lo que nos podemos encontrar con un producto de riesgo, ya que estos microorganismos se van a multiplicar durante la fermentación.

2. Sistema de filtración de agua

El sistema para potabilizar el agua que ingresa a los distintos procesos de la elaboración de cerveza, es el siguiente: 1) Clorador, 2) Filtro de sedimentos, 3) Filtro de columna de carbón activado, 4) Lámpara de luz UV. La función de cada equipo es detallada a continuación:

Cuadro 1. Aplicación de los equipos utilizados en el proceso de filtración de agua

Equipo	Proceso	Equipo
Clorador	La cloración es un medio sencillo y eficaz para desinfectar el agua y hacerla potable. Consiste en introducir productos clorados en el agua para matar los microorganismos contenidos en ella. Normalmente, tras un tiempo de actuación de unos 30 minutos, el agua pasa a ser potable. Gracias al efecto remanente del cloro, continúa siéndolo durante horas (Lenntech, 2019).	
Filtro de sedimentos	La sedimentación es la deposición de materia suspendida. Estas partículas puede ser partículas derivadas de la corrosión de las tuberías del agua, granos de arena, pequeñas partículas de materia orgánica, partículas arcillosas u otra partícula pequeña que esté presente en el agua suministrada (Lenntech, 2019).	
Filtro de columna de carbón activado	El carbón activado o carbón activo es carbón poroso que atrapa compuestos, principalmente orgánicos, presentes en un gas o en un líquido. A la propiedad que tiene un sólido de adherir a sus paredes una molécula que fluye, se le llama “adsorción”. Al sólido se le llama “adsorbente” y a la molécula, “adsorbato” (Lenntech, 2019).	

Lámpara de luz UV	La luz UV es un germicida poderoso que elimina microorganismos del agua (Ver Figuras 38 y 39, de Anexos) purificada sin uso de químicos adicionados. Entonces microorganismos que son expuestos a una frecuencia de luz, con cierta intensidad y en un tiempo específico, llegan a ser esterilizados (Novem, 2019).	
Filtro pulidor	Un pulidor tiene el principal objetivo de dar claridad y brillantez al agua, reteniendo partículas suspendidas e impurezas pequeñas a través de membranas porosas o semipermeables (Lenntech, 2019).	
Tanque de almacenaje de agua	El almacenaje de agua es importante cuando se requiere retener esta para un uso posterior y evitar que la muestra de agua se contamine debido al contacto exterior de microorganismos (Lenntech, 2019).	

B. PERFILES DE AGUA PARA ELABORAR CERVEZA

1. Importancia del agua en la fabricación de cerveza

Generalmente se utiliza el agua de pozo, que en el caso de tener dudas sobre su acondicionamiento debe ser sometida a estudios o análisis acorde a la legislación y al estatuto vigente de acuerdo con cada país. Uno de los principales problemas de la elaboración de la cerveza, radica en la calidad del agua y en el control que se realice en el caso de utilizar agua envasada. Si el agua posee microorganismos acidificantes o formadores de ácido acético, se producirá una alteración de la cerveza, ligado a un cambio rotundo en las características de sabor (BJCP, 2008).

Las propiedades del agua son aptas para elaborar cerveza por varias razones. En primer lugar, porque los seis principales iones del agua son vitales sobre las enzimas que modifican los almidones de la malta. Un pH adecuado determina la efectividad del trabajo de esas enzimas. En segundo lugar, porque el agua potable influencia fuertemente el balance de los sabores. Por último, el agua contiene varios iones que ayudan a la levadura en el proceso de fermentación del mosto. Además, posee minerales de mucha importancia como son el calcio, el sodio, los sulfatos, los nitritos y los cloruros (BJCP, 2008).

Cuadro 2. Iones más importantes en la fabricación de cerveza

Ion	¿En qué afecta a la hora de la fabricación de cerveza?
HCO₃⁻	Primer determinante del nivel de dureza temporal del agua. Determina la acidez de la mezcla de grano.
Na⁺	Contribuye al cuerpo y la sensación en la boca de la cerveza.
Cl⁻	Potencia la sensación en la boca y la complejidad de la cerveza, dando una textura más plena.
SO₄⁻²	Potencia el lúpulo y “saca” el amargor de la cerveza. Añade notas secas y agudiza a las cervezas bien lupuladas.
Ca⁺²	Principal determinante en la dureza permanente del agua. Ayuda a reducir el nivel de pH durante el macerado, ayudando en la precipitación de proteínas durante la ebullición, potenciando la estabilidad de la cerveza (rebajando su color y opacidad) y actúa como un importante nutriente para las levaduras, aumentando su vigor y efecto.
Mg⁺²	Contribuye a alimentar las levaduras.

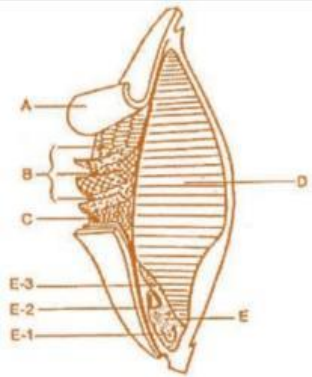
2. PROCESO DE MALTEADO

1. Estructura de la planta de cebada

La planta de cebada presenta raíces fasciculadas, lo cual significa que su ramificación se produce por el crecimiento subterráneo de pequeños tallos, por lo tanto, no tiene razón principal. El tallo aéreo de esta planta corresponde a una caña hueca, la cual se encuentra segmentada por nudos. Los tallos aéreos tienen la característica de alcanzar alturas que van desde 50 a 110 centímetros. La planta de cebada tiene hojas de tipo laminar, las cuales surgen desde la caña sin

presentar un peciolo (pequeño tallo de las hojas). Las hojas pueden llegar a alcanzar hasta 20 centímetros de largo. (Priest, 2006). La estructura del grano de cebada es la siguiente:

Cuadro 3. Estructura del grano de cebada

Grano de cebada	Estructura
	A. Cáscara B. Capa del fruto (Pericarpio). Capa de semilla con superficie culinizada interior y exterior (Testa), Pericarpio. C. Capa de aleurona. Fuente de enzimas D. Endospermo E. Embrión E-1. Raicillas E-2. Plúmula E-3. Escudillo

2. Selección de granos

El grano malteado en la industria de la cerveza suele ser de cebada debido a la gran actividad enzimática que posee, el bajo nivel de proteínas y el olor y color característicos. El tipo de grano varía según la época del año en que se haya sembrado y dependiendo del número de hileras que tenga. Las cebadas más utilizadas en la fabricación de cerveza son:

- Cebada de dos hileras: la espiga es plana y tiene dos hileras de grano a cada lado del tallo. Se puede cultivar en zonas secas ya que es resistente a sequías (Priest, 2006).
- Cebada de seis hileras: la espiga es cilíndrica y el grano se organiza a lo largo del tallo en seis hileras. Este tipo de cebada suele cultivarse en zonas más húmedas y ofrece rendimientos por hectárea superiores, lo cual la hace más barata (Priest, 2006)

Figura 1. Cebada de dos y seis hileras



Una vez se tiene definido el tipo de cebada con la cual se está trabajando, es necesario hacer un pesaje de esta para tener el dato inicial de producto que entra al proceso de limpieza. Esta cebada puede contener distinto tipo de impurezas que deben de ser eliminadas.

3. Tratamientos previos

Antes de pasar al proceso de germinado de cebada, es necesario someterla a una limpia y posterior clasificación de sus granos (Ver Figura 2).

Se comienza por un proceso de limpieza en donde se separan las materias gruesas por cribado, las partículas ligeras por un procedimiento neumático y las posibles partículas de hierro magnéticamente. La maquinaria encargada de realizar la primera limpia es de alto rendimiento, pero al no ocurrir lo mismo con las máquinas que realizan los tratamientos siguientes, es necesario almacenar el grano hasta su siguiente uso. Este almacenamiento resulta beneficioso cuando la cebada ha sido seleccionada y recolectada antes de alcanzar la madurez necesaria para los demás procesos del malteado. Es necesario que la cebada no debe de perder sus propiedades germinativas durante el almacenamiento, por lo cual es imprescindible almacenarla con una humedad inferior al 14%-16% y verificar que la temperatura no supere los 15°C (Olmedo, 1965).

El método más simple de almacenar la cebada consiste en extenderla en distintas capas sobre el suelo. Mientras más húmeda esté la cebada, más delgadas deberán de ser las capas. El enorme espacio que esto requiere hace más ventajoso el uso de silos de acero o de hormigón. Cuando la cebada se almacena de esta manera, es necesario airearla, cuidando que la temperatura y la humedad del aire sean tales que no se produzcan condensaciones peligrosas o que inicien el proceso de germinado dentro de los silos (Olmedo, 1965).

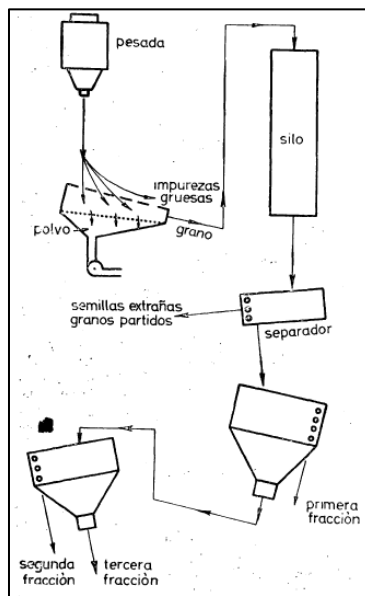
A medida que se va necesitando, la cebada se somete a una segunda limpia, en la cual se separan las semillas extrañas y los granos partidos por medio de un separador cilíndrico rotatorio de pared alveolada (Ver Figura 2, página 15).

El comportamiento durante el proceso de malteado y, consecuentemente, las distintas propiedades de la malta resultante están estrechamente relacionadas por el tamaño y la integridad del grano de cebada. Debido a esto, se realiza una clasificación y se maltean por separado las distintas fracciones. El método más común es obtener tres tipos de fracciones, de las cuales las dos mayores se destinan al proceso de malteado. El proceso se realiza por medio de clasificadores cilíndricos o por plansifters, los cuales son de mayor rendimiento y pueden colocarse antes del separador. (Olmedo, 1965). No existe una norma fija y específica que fije el tamaño de las tres fracciones, sin embargo, suele considerarse que:

Cuadro 4. Tamaño de las fracciones en la selección de granos.

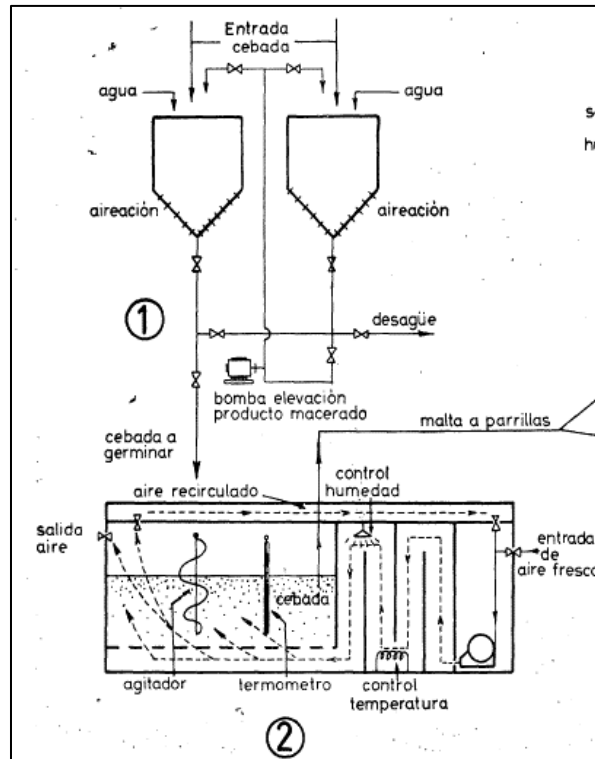
Fracción	Tamaño (mm)
Primera	> 2.5
Segunda	2.5 – 2.2
Tercera	< 2.2

Figura 2. Tratamientos previos del proceso de malteado.



Una vez clasificada, el grano de cebada es sometido a ciertas condiciones de humedad, temperatura y aireación tales, que se inicia el proceso germinativo. Dichas condiciones se logran mediante dos fases. La primera fase consiste en una maceración o remojo, en el cual, además de completarse la limpieza del grano, se suministra agua y oxígeno a la cebada (Olmedo, 1965). La segunda fase, es el proceso germinativo (Ver Figura 3, página 16).

Figura 3. Esquema de proceso de malteado



4. Remojo

En este proceso, la humedad del grano se debe de aumentar de un 15% a un 42%-46%. El porcentaje de humedad final dependerá de la clase de cebada y el tipo de malta que se desee obtener. Para maltas claras se desea un grado con humedad de 42%-44%, mientras que para las oscuras se desean valores superiores. En general, se procura que el porcentaje de humedad final del grano sea el que provoque el proceso germinativo. El tiempo de remojo depende de la rapidez con la cual el grano alcanza el porcentaje de humedad deseado (Olmedo, 1965).

Los factores principales que influyen en la rapidez con la que el agua es absorbida son la temperatura de esta y el tamaño del grano. La temperatura óptima del agua de remojo suele estar

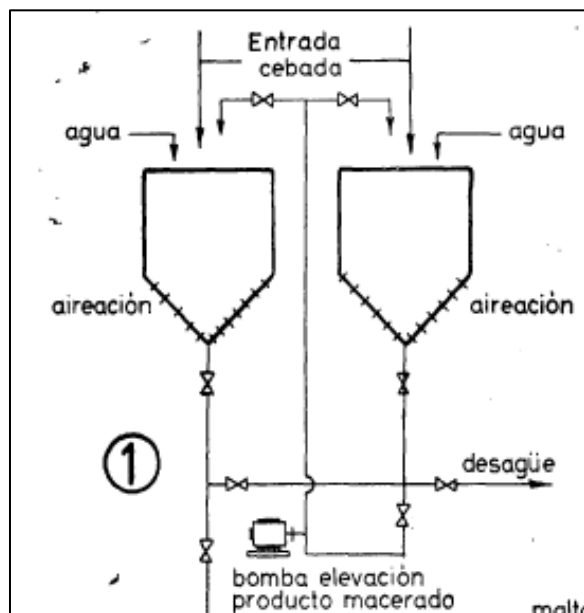
entre 12°C-14°C, aunque muchas veces se utilizan temperaturas entre los 20°C y 30°C, si se cuenta con un sistema de aireación. Las cebadas que son especialmente sucias y decoloradas pueden ser sometidas a temperaturas de remojo de 45°C-50°C durante un corto periodo de tiempo, para posteriormente emplear agua fría (Olmedo, 1965). Un buen remojo es importante ya que la limpieza del grano de cebada se completa gracias a la acción del agua: los polvillos residuales y los microorganismos son separados si se emplea también un sistema de agitación en el tanque de remojo. Muchas veces se recomienda alcalinizar debidamente el agua para conseguir una limpieza más completa del grano y eliminar sustancias ácidas no deseables, presentes en la cáscara del grano (Olmedo, 1965). Los procesos químicos que propician la germinación del grano empiezan cuando se aumenta el porcentaje de humedad de este.

El proceso de remojo requiere grandes cantidades de oxígeno. Se debe de tener especial cuidado en el oxígeno presente en el agua del tanque de remojo, ya que este se agota pronto y es necesario un nuevo suministro. Esto se puede llevar a cabo de las siguientes maneras: renovación frecuente del agua de remojo, por medio de una aireación constante durante todo el proceso de remojo o por medio de alternaciones entre periodo de remojo y periodos de aireación en ambientes distintos (Olmedo, 1965).

Debido a que el proceso de remojo persigue una doble finalidad (proporcionar el porcentaje de humedad deseado en el grano y terminar el proceso de limpieza de este), el equipo necesario debe de tener un buen diseño. Los más modernos utilizados en las distintas industrias malteras son de hierro, cilíndricos y cónicos. En estos equipos se inyecta aire por la parte inferior para homogenizar la cantidad de oxígeno en el agua, minimizar el efecto del peso de la cebada sobre las capas inferiores y someter el grano a un agitado suave que tienda a favorecer su limpieza (Ver Figura 4). Dicho sistema permite remojar capas de cebada de más de dos metros y medio, mientras que, en los tanques antiguos, el espesor de esta no podía ser superior a un metro de alto (Olmedo, 1965).

El tiempo de remojo puede oscilar alrededor de tres días, aunque para la obtención de maltas especiales puede variar desde dos a cinco días (Olmedo, 1965; ver Figura 4, página 18).

Figura 4. Tanques de remojo



5. Germinado

El complejo proceso de se inicia naturalmente en el momento en que el grano es humedecido. Este proceso el favorecido por una buena aireación. Durante la germinación la raicilla puede llegar a romper o quebrar la cubierta del grano (Olmedo, 1965).

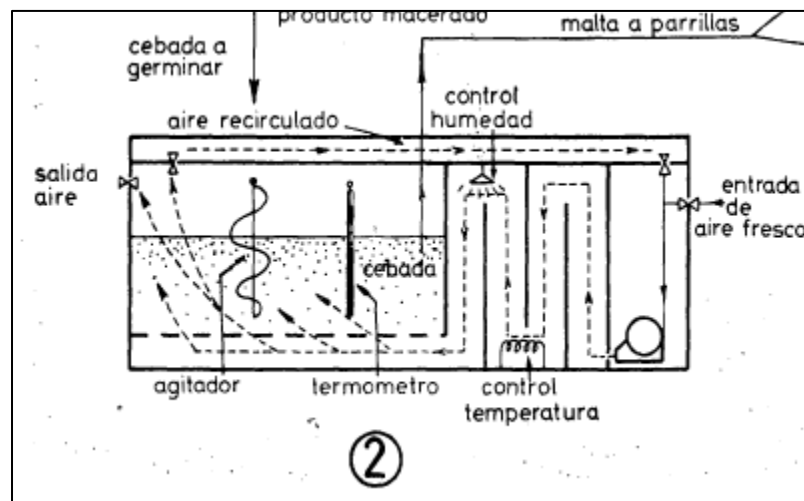
Una buena germinación es llevada a cabo en equipos especiales (Ver Figura 5, página 19). Durante el proceso germinativo es recomendable que la temperatura no exceda los 16°C y el aire debe estar casi saturado de humedad. A medida que se acumula anhídrido carbónico en las capas inferiores, por lo cual es necesario tener un agitador que distribuya la cebada. Con la introducción del malteo neumático se dio un gran paso en el aumento del porcentaje de conversión del proceso. Otra mejora fue en la parte económica, ya que ocupaba solo un sexto del espacio y la mitad del personal para su operación. Debido al diseño del equipo, no es necesario parar el proceso en épocas calurosas (Olmedo, 1965).

El procedimiento consiste en pasar una corriente de aire saturado de humedad (a una temperatura prefijada) a través de la capa de cebada en germinación. La temperatura debe de ser inferior a la del grano. Generalmente suele ser entre 10°C-12°C a la entrada, elevándose unos 3°C-

4°C después de atravesar la capa de cebada. Dicha capa debe de tener menos de un metro de espesor (Olmedo, 1965). El malteo neumático puede efectuarse de dos maneras:

- Malteo en tambor rotatorio: un tambor de hasta dos metros de diámetro, en cuyas paredes se encuentran tubos por los cuales se inyecta el aire saturado de humedad que atraviesa la capa de cebada. El aire sale por un tubo axial. Por medio de la rotación del tambor se logra conseguir una germinación homogénea (Olmedo, 1965).
- Malteo en caja de germinación: cuentan con una mayor capacidad que el tambor rotatorio. Son cajas rectangulares de 1.80 metros de altura y cuentan con una relación longitud-anchura de 5:1. La cebada ya remojada se distribuye en una capa de espesor inferior a un metro sobre la rejilla a través de la cual se pasa una corriente de aire saturado. (Olmedo, 1965). La remoción del grano se logra por medio de un conjunto de agitadores helicoidales desplazables a lo largo de la caja (Ver Figura 5, página 19).

Figura 5. Caja de germinación



Una variante muy especial del proceso de malteo neumático es el método propuesto por Windish y Kropff. Consiste en que en una caja de germinado se provoca la acumulación de anhídrido carbónico en la segunda mitad del proceso. Esto hace que el crecimiento de la raicilla se contenga y se disminuyan las pérdidas del malteo. Por ende, estas cajas reciben el nombre de cajas de modificación de Kropff (Olmedo, 1965).

Es de vital importancia de que la germinación se deje progresar hasta que se obtiene una malta verde con las características adecuadas. Mientras mejor sea el germinado, mayores serán las reservas de almidón presentes en este. La malta verde aún puede contener hasta un 40% de humedad, la cual debe de ser reducida (Olmedo, 1965).

6. Tratamientos posteriores

No todos los granos ingresados al proceso de germinado germinan correctamente. Hay un pequeño porcentaje que puede hasta no germinar. En los tratamientos posteriores, se realiza una selección de los granos. La relación entre la cantidad de cebada que germina y la cantidad de cebada inicial, se denomina porcentaje de rendimiento. (Olmedo, 1965). Es importante mencionar que dicho valor, depende puramente del proceso de malteado y el trato que haya tenido el grano durante su crecimiento en el campo. Granos sometidos a mucho estrés pueden no tener las propiedades germinativas adecuadas, incluso ante un buen proceso de malteo. Algunos indicadores del porcentaje de rendimiento son:

Figura 6. Indicadores del proceso de germinado según el porcentaje de rendimiento.

Porcentaje de rendimiento (%)	Indicador
> 90	Excelente
75 – 90	Bueno
50 -75	Regular
< 50	Pobre

Durante este proceso la humedad de la malta se trata de reducir a un 15% para detener el proceso germinativo por completo.

3. ECUACIONES DE SISTEMA DE FILTRACIÓN Y MALTEADO

1. Diseño del sistema de filtración

Ecuación 1. Volumen de solución de hipoclorito de sodio requerido.

$$V_{\text{NaClO}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} * D}{C * 10}$$

En donde:

V_{NaClO} : Volumen de solución de hipoclorito de sodio requiero (L).

$V_{\text{H}_2\text{O}}$: Volumen de agua a desinfectar (L).

D: Dosis de solución de hipoclorito de sodio $\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$.

C: Concentración de cloro disponible en la solución de hipoclorito de sodio $\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$..

Ecuación 2. Caudal (general).

$$Q = \frac{V}{t}$$

En donde:

Q: Caudal (L/s).

V: Volumen (L)

t: Tiempo (s).

Ecuación 3. Diámetro del filtro (sedimentos y carbón activado)

$$D = \sqrt{\frac{FD}{FF * \pi}}$$

En donde:

D: Diámetro

FD: Flujo de Diseño

π : 3.1416

FF: Factor de Flujo

Ecuación 4. Área del filtro (sedimentos y carbón activado)

$$A = \left(\frac{D^2}{4}\right) * \pi$$

En donde:

A: Área

D: Diámetro (Filtro)

π : 3.141

Ecuación 5. Flujo de retrolavado (sedimentos y carbón activado).

$$FR = A * FF$$

En donde:

FR: Flujo de Retrolavado

A: Área (Filtro)

FF: Factor de Flujo (dado por el fabricante del medio filtrante)

2. Proceso de malteado

Ecuación 6. Cantidad de impurezas removidas en la primera etapa del proceso de limpieza.

$$I_{1-E} = M_{I1-E} - M_F$$

En donde:

I_{1-E} : Masa de impurezas removidas en la primera etapa de limpieza (kg).

M_{I1-E} : Masa de cebada que ingresar a la etapa de limpieza (kg).

M_F : Masa de cebada al finalizar la primera etapa (kg).

Ecuación 7. Cantidad de impurezas removidas en la segunda etapa del proceso de limpieza.

$$I_{2-E} = M_{I2-E} - M_F$$

En donde:

I_{2-E} : Masa de impurezas removidas en la segunda etapa de limpieza (kg).

M_{I2-E} : Masa de cebada que ingresar a la etapa de limpieza (kg).

M_F : Masa de cebada al finalizar la segunda etapa (kg).

Ecuación 8. Cantidad de impurezas removidas en la tercera etapa del proceso de limpieza.

$$I_{3-E} = M_I - M_F$$

En donde:

I_{3-E} : Masa de impurezas removidas en la tercera etapa de limpieza (kg).

M_I : Masa de cebada que ingresar a la etapa de limpieza (kg).

M_F : Masa de cebada al finalizar la primera etapa (kg).

Ecuación 9. Porcentaje de rendimiento de cebada.

$$R = \left(\frac{M_G}{M_T} \right) * 100$$

En donde:

R: Porcentaje de rendimiento (%).

M_G: Masa de cebada germinada (kg).

M_T: Masa de cebada ingresada al proceso de malteado (kg).

4. CEBADA Y MALTA DE CEBADA

1. La cebada

Son varios los granos de cereales que pueden ser satisfactoriamente malteados, pero los de cebada son los que generalmente presentan menos problemas técnicos. En el transcurso del tiempo, se ha ido imponiendo, prácticamente en todo el mundo, el aroma de las cervezas elaboradas a partir de cebada malteada. Además, la cebada utilizada para la elaboración de malta destinada a la producción de cerveza es más rica en almidón, que es la sustancia que da origen al extracto fermentable (Suarez, 2013)

La cebada (*Hordeum vulgare*) es una planta gramínea anual, originaria de Asia occidental. Hay dos variedades de cebada: cebada cervecera o de dos hileras (*Hordemum distichum*) que presenta dos hileras de semillas, y la cebada de seis hileras (*Hordeum dextrastichum*) con seis hileras de semillas. La variedad de dos hileras es más apta para la elaboración de la cerveza porque produce más azúcares fermentables y tiene menos proteína. La ventaja de la variedad de seis carreras para grandes fabricantes cerveceros es que convierte más que su propio peso de grano sin maltear, como el maíz o el arroz, pero requiere una maquinaria de filtración, ya que presenta problemas de clarificación por su contenido de proteínas (Suárez, 2013)

2. Secado y/o tostado de malta verde

El proceso de germinación, después de 4 a 5 días es interrumpido por el secado y por el tostado, a los efectos de prevenir transformaciones y pérdidas adicionales. Se persiguen en esto los siguientes objetivos: el contenido de agua, que es mayor que el 40%, es disminuido a menos del

5%, logrando así resistencia de almacenamiento y conservación de la malta. Durante el tostado también se forman sustancias aromáticas y colores nuevos. El secado se diferencia del tostado debido a las temperaturas que se manejan. El secado solamente retira humedad del grano mientras que el tostado cambia el color del grano de malta (Kunze, 2006)

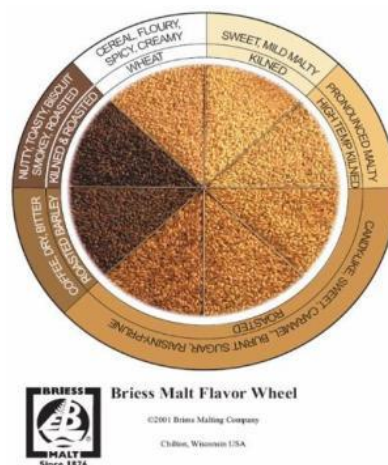
3. La malta base

Al secar la malta a temperaturas bajas (30-45°C), por largos periodos de tiempo se tiene una malta base. Siempre se recomienda que las maltas tengan menos del 6% de humedad, para que no sean punto de ataque de alguna plaga. Las maltas base tienen una cantidad importante de enzimas aún dentro del grano puesto que no fueron expuestos a altas temperaturas que afectarían las mismas. Es importante que este tipo de malta exista en proporciones altas dentro de cada receta cervecera puesto que nos importa tener una cantidad considerable de enzimas en la maceración de cerveza.

4. La malta caramel

La malta caramel, se obtiene con un proceso de tostado especial. La malta verde sin secar debe de ser introducida a una temperatura de alrededor de 65°C que activan enzimas diastáticas que convierten el almidón en azúcar y posteriormente se da el golpe de fuego hasta 100°C-160°C, el tiempo dependiendo del color del grano deseado y punto de caramelización de las azúcares dentro del grano. Este tipo de malta es muy utilizado para balancear sabores en una cerveza y acentuar los del caramelo (Caffaratti, 2017).

Figura 7. Tipos de malta seca con su respectivo sabor y aroma



(Briess, 2001)

5. Curvas de secado

El mecanismo físico del secado de productos con poros capilares como los granos de cereales es muy complicado y poco conocido. Se acepta, generalmente, que el agua se mueve dentro del grano en forma líquida y/o vapor. Una serie de mecanismos físicos se han propuesto para describir la transferencia de humedad en granos de cereales (Llorca, 1995)

6. Color de cerveza

El color de la cerveza se debe en su mayoría, al nivel de tueste de las maltas a emplear. Mientras mayor sea la proporción de una malta tostada en una receta, el color será el color oscuro también. La humedad en la malta resultante puede ser un parámetro para medir el nivel de tostado, pero es más fiable el color resultante en la cerveza, después de la maceración y cocción. Al obtener el mosto se puede comparar el color resultante con la escala lovibond y así hacer ajustes en los programas de tostado de las maltas. Esto es porque se debe al nivel de tueste de las maltas, el color de la cerveza. La medida europea para medir el color de la cerveza son los grados EBC (Kunze, 2006).

Figura 8. 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

(West Coast Brewer, 2019)

Si bien el color del mosto no suministra una prueba segura con respecto del color de la cerveza final, se lo mide, sin embargo, porque permite una indicación sobre el tipo de malta utilizada. Se mide por medio de una comparación entre el color observado y un disco de colores adecuado (Kunze, 2006).

En los primeros días de fermentación, el color de la cerveza se aclara en aproximadamente tres unidades EBC. Ello se debe a la decoloración de algunas sustancias causadas por la disminución del valor pH y la adsorción de sustancias de colores intensos en células de levadura o la precipitación de aquellas en la capa de espuma y fondos de tanque (Kunze, 2006)

Cuando la malta está aún caliente, se deben remover las raicillas, que son muy higroscópicas y comunican un mal sabor. Estas se desprenden fácilmente por frotamiento de unos granos con otros y se eliminan junto con el polvo por un procedimiento neumático. A continuación, se deja enfriar y se puede almacenar (García, 1965)

7. Molienda

La malta debe ser molida para facilitar el contacto entre las enzimas y los sustratos presentes en ella. La operación se lleva a cabo en un molino, similar al que se muestra en la Figura 9, página 26.

Figura 9: Diagrama de un molino de rodillos de 3 pasos

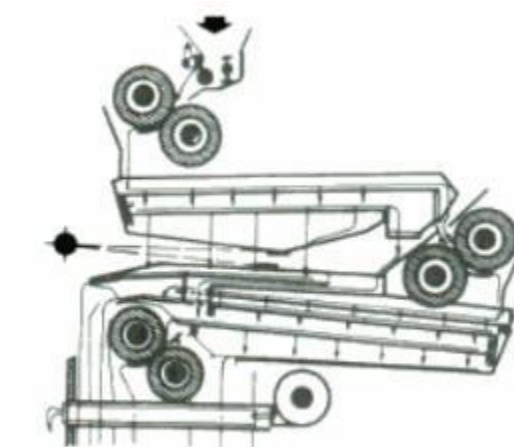


DIAGRAMA 6.1: Un molino de malta.

Fuente: Adaptado de Teufel (1993).

(Hernandez, 2003)

Hoy, en la práctica existen dos sistemas de molienda: molido en seco, con acondicionamiento de la cascara, y molido en húmedo. En el molino en seco, la malta es ligeramente humedecida con agua líquida o en forma de vapor, inmediatamente antes de ser molida; en el molido en húmedo, la malta es puesta en remojo antes de ser molida. Ambos métodos poseen ventajas y desventajas, por lo que la selección está en función de las características de la cervecería (Hernandez, 2003)

Los molinos más comúnmente utilizados en las fábricas de cerveza son los molinos trituradores de malta en seco. En estos, la malta es triturada en seco entre rodillos dispuestos en pares. Según la cantidad de rodillos, se diferencia entre molino de dos rodillos, de cuatro rodillos, cinco rodillos y seis rodillos (Kunze, 2006)

En la molturación, las cascara son dañadas en mayor o menor grado también con un tratamiento cuidadoso, por lo cual solo pueden cumplir su función como material filtrante de manera restringida. Pero si se remoja la malta antes de la molturación, tanto las cascara como el contenido de grano absorben humedad elastilizándose. El contenido de malta se puede entonces expeler sencillamente de las cascara, las que así casi no son dañadas y tienen por este motivo, una menor capacidad de filtración del mosto en tanto el contenido del grano es triturado más fino, pudiendo así ser mejor aprovechado (Kunze, 2006)

8. Granulometría de molienda

La elección y el control del tamaño de las partículas molidas influyen mucho en la eficiencia de los pasos posteriores de la extracción de sustancias y separación de la cascara. Entre menor sea el tamaño promedio de la harina va a existir un mayor contacto entre las enzimas y los sustratos, y la extracción será mejor; sin embargo, una molienda muy fina reducirá demasiado la cascara del grano de la cebada, que es uno de los principales constituyentes del residuo, y la operación de separación se hace más difícil. Debe seleccionarse un tamaño intermedio que asegure una apropiada extracción y una buena separación (Hernández, 2003)

La molturación debe ser tanto más fina cuanto peor modificada está la malta. El grado de trituración tiene una influencia decisiva sobre el volumen y la capacidad de filtración de las heces. Para los equipos usuales de filtración de mosto rige: cuanto más fino se moltura, tanto menor será el volumen de las heces. Pero cuanto más fina es la molienda, tanto menos porosa es la torta

filtrante, tanto más rápidamente se contrae y tanto mayor es la duración del proceso de filtración de mosto (Kunze, 2006).

Se recomienda entonces moler solamente para exponer el germen del grano, y que fluya el mosto después de la maceración, de lo contrario puede llegar a suceder que el mosto ya no fluya. O en todo caso retirar por granulometría con un tamiz por ejemplo, las partículas más finas producidas en la molienda. Es por esto que no se debe moler demasiado fino al utilizar una cuba de filtración de mosto o se debe reducir la altura de heces, si se moltura más fino (Kunze, 2006).

9. Maceración

En la maceración se pone en contacto la malta molida con el agua, lo que permite que las enzimas (formadas durante la germinación) degraden los constituyentes de la malta (carbohidratos y proteínas) a formas solubles y, entonces, se origina el líquido que se va a fermentar, denominado mosto. Una relación común es aplicar 3 litros de agua por cada kg 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 de una cervecera a otra, pues depende de aspectos como la naturaleza del cereal utilizado, las características del producto deseado, el tipo y la capacidad del equipo (Hernández, 2003)

10. Actividad enzimática en la maceración

En la maceración existen reacciones enzimáticas, y principalmente interesa 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. El control de temperatura es muy importante debido a que ello dictará el tipo de cerveza que se está haciendo. Si se favorece la temperatura de la beta amilasa, se tienen muchos azúcares fermentables que aportarán mucho para formar alcohol, pero no tanto para el cuerpo de la cerveza. Mientras que la alfa amilasa convierte muchos azúcares no fermentables y la cerveza final tendría mucho cuerpo, pero no tanto volumen de alcohol (Hernandez, 2003)

Cuadro 5. Temperaturas de operación para las enzimas dentro del grano de malta

CONDICIONES DE LAS REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA MACERACIÓN

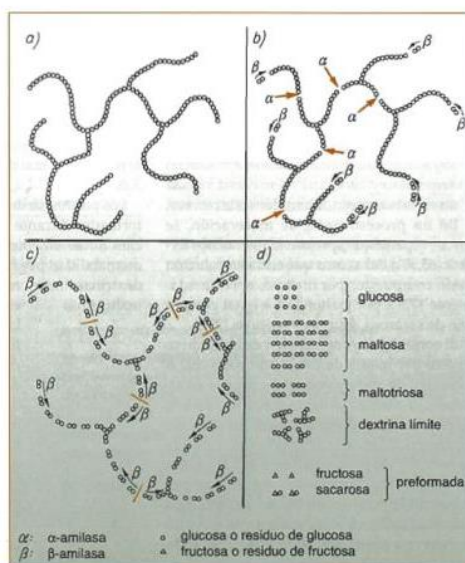
Temperatura °C	Reacción	Enzima involucrada
40-50	Degradación de gomas (β -glucanos)	Glucanasas
50-60	Degradación de proteínas	Proteasas
60-64	Degradación de almidón a maltosa	β -amilasa
70-74	Degradación de almidón a dextrinas	α -amilasa

(Hernandez, 2003)

11. Azúcares producto de la maceración

La enzima α -amilasa rompe las cadenas de la amilosa y de la amilopectina progresivamente hasta obtener dextrinas con 7 a 12 residuos de glucosa. La B-amilasa disocia dos residuos (maltosa) de los grupos terminales de las nuevas cadenas formadas (ver Figura 10, página 29). Con esto, la α amilasa forma asimismo con cada disociación dos cadenas terminales, que pueden ser atacadas por la B-amilasa, al disociar maltosa. Debido a la diferente longitud de las cadenas, se forman, aparte de maltosa, otros azúcares, tales como glucosa y maltotriosa. En todos los casos, la degradación de sustancias se detiene 2 a 3 residuos de glucosa antes de los enlaces 1,6 de la amilopectina, dado que estos enlaces 1,6 no pueden ser rotos por la α amilasa ni por la β amilasa. Estas dextrinas límite se encuentran presentes en un mosto normal (Kunze, 2006)

Figura 10: Conversión de almidón en azúcares durante la maceración



(Kunze, 2006)

12. Enzimas añadidas

El uso de enzimas amilasas agregadas es muy común sobre todo cuando se emplean proporciones altas de adjuntos. Se piensa que pueden ser elaboradas cervezas con solo 5 % de malta y 95 % de cebada cruda mediante el empleo de enzimas añadidas. Las enzimas amilasas son empleadas profusamente en las grandes industrias cerveceras, sin embargo, los fabricantes artesanales también han hecho buen uso de ellas y las pueden obtener al menudeo a través de las tiendas dedicadas al ramo. Las marcas más conocidas de este tipo de productos son L.D. Carlson y BSG, antes Crosby & Baker (Gonzalez, 2003).

13. Filtración de afrecho

Después de la maceración es importante separar el mosto del afrecho. Esto se hace en la industria con un filtro Lauter que es de forma cilíndrica con perforación abajo y aprovecha la cascara de la malta como medio filtrante. Media vez se separa el mosto del afrecho, se pueden realizar lavados de afrecho que aumentan la eficiencia de extracción de azúcares. Estos lavados por una parte extraen más cantidad de azúcares del afrecho pero al mismo tiempo, cada vez bajan la gravedad específica del mosto, por lo que se tiene que evaporar más agua en la cocción para llegar a la gravedad específica deseada. Una técnica utilizada en el proceso de lavado de granos, es la recirculación de mosto por el medio filtrante de afrecho que va clarificando el mosto (Hernandez, 2003)

14. Cocción

El mosto es después llevado por medio de tuberías a un tanque de cocción. En este tanque, con un sistema de calentamiento diseñado para llevar a ebullición el volumen de mosto, tiene varias funciones. Para comenzar en la cocción se añade el lúpulo que agrega amargor a el mosto y al mismo tiempo se precipitan sustancias albuminoideas. La cocción del mosto ocurre en la paila de mosto, que está equipada con todo lo necesario para la cocción. Cuando todo el cocimiento se encuentra en la paila de mosto, se habla del mosto de paila llena. El producto final de la cocción del mosto es llamado mosto caliente o mosto a bombear (Kunze, 2006).

Durante la cocción del mosto ocurre una serie de procesos, que son de importancia para nosotros:

1. Disolución y transformación de componentes del lúpulo
2. Formación y precipitación de compuestos formados por proteínas y polifenoles
3. Evaporación de agua
4. Esterilización del mosto
5. Destrucción de todas las enzimas

6. Carga térmica del mosto
7. Reducción del valor pH del mosto
8. Formación de sustancias reductora
9. Evaporación de sustancias aromáticas indeseadas (principalmente DMS) (Kunze, 2006)

15. El lúpulo

El lúpulo (*Humulus Lupulus*) es una planta que en latín quiere decir “lobo silvestre”. De la familia de las cannabáceas, cuyos frutos, desecados, se emplean para aromatizar y dar sabor amargo a la cerveza. El lúpulo es una planta perenne, trepadora que normalmente llega a tener cinco metros o más de altura. Solo se utilizan los conos (o flores) de las plantas femeninas antes de que serán fecundadas. En países como Inglaterra y Bélgica también utilizan, a veces, lúpulos femeninos fecundados que son más fuertes y amargos. Habitualmente, estas flores son desecadas antes de ser usadas. Los conos contienen en su interior unas glándulas de color amarillo, llenas de una resina llamada lupulina, que es el principio activo que los cerveceros buscan en el lúpulo. Recientemente, gracias a años de investigación, se ha conseguido cultivar plantas enanas con unos niveles de resina y una adaptación al almacenaje muy aceptables, con buena resistencia a varios tipos de plagas, y con perfiles de sabor y aroma excelentes (Suarez, 2007).

El lúpulo puede encontrarse en presentaciones de flor o pellet. Los pellets por su parte, son flores procesadas que han sido desecadas y comprimidas en forma de pastillas. Los pellets son útiles debido a que tienen mayor eficiencia de amargor y son de manejo más fácil. El problema con el pellet es que se disuelve gran parte, pero queda muchas partículas pequeñas que enturbian la cerveza. Las flores por otra parte no tienen tanta eficiencia al disolver sus componentes, pero no crean el problema de turbidez (González, 2009).

16. Grados de amargor

Los alfa-ácidos son probablemente los componentes más importantes del lúpulo. A altas temperaturas se transforman en sus formas isoméricas (iso-humulonas), las cuales son las responsables de la acción antibacteriana y de impartir amargor a la cerveza (Gonzalez, 2017).

Las adiciones de lúpulo en cervezas depende de la receta. Existen recetas con varias adiciones de lúpulo y otras con una sola. Para medir el amargor existen fórmulas que consideran la cantidad de lúpulo a añadir en volumen de mosto, el tiempo de hervor en el cual se añade para obtener cierto grado de amargor, porcentaje de alfa ácidos y el porcentaje de utilización. El método que se utilizará será el método Rager. En adición, se puede medir con ayuda de equipos en cervecerías más grandes,

los grados IBU. Esto puede ayudar, en caso de que algún lúpulo no especifique algún dato importante de su composición.

Ecuación 10: Cálculo de IBU con método Rager

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

$$FC = 1 + \frac{GE - 1.05}{\text{litros finales}}$$

El factor de corrección FC es 1 cuando el mosto es menor a 1.05 de gravedad específica (GE). Se debe de corregir siempre que sea mayor a 1.05 de gravedad específica (Caffaratti, 2017).

Cuadro 6. Porcentaje de utilización con respecto al tiempo para lúpulo en flor y en pellet

Tiempo de hervor en minutos	Porcentaje de utilización	
	Flor	Pellets
0 a 9	5	6
10 a 19	12	15
20 a 29	15	19
30 a 44	19	24
45 a 59	22	27
60 a 74	24	30
mas de 75	27	34

(The Beer Times, 2018)

17. Concentración de azúcares

La determinación de los porcentajes másicos se realiza con la ayuda de un hidrómetro. El hidrómetro es un cuerpo flotante y trabaja según el principio de los aerómetros: cuanto más específicamente liviano es un líquido, tanto más se sumerge el hidrómetro. En el cuello fino del hidrómetro se encuentra ubicada una escala que indica porcentaje másico de azúcares disueltos. La medición debe hacerse comúnmente a 20°C debido a la calibración del equipo. La concentración de azúcares antes de fermentar es uno de los principales factores que determinan la cantidad de alcohol en el producto final (Kunze, 2006).

18. Cromatografía líquida de alta resolución

La cromatografía líquida de alta resolución es el tipo de cromatografía por elución más versátil y utilizada. La técnica es utilizada por científicos para separar y determinar especies en una variedad de materiales orgánicos, inorgánicos y biológicos. En la cromatografía líquida, la fase móvil es un disolvente líquido que contiene a la muestra en la forma de una mezcla de solutos. Es una técnica

ampliamente utilizada para determinar carbohidratos, proteínas, edulcorantes artificiales, alcoholes, entre otros (Skoog, 2015)

19. Bombas utilizadas

Las bombas de rodete centrífugo helicoidal tienen ventajas en el proceso de la cerveza debido a que

- Trabajan libres de taponamiento
- El bombeo es muy cuidadoso
- Tienen un alto rendimiento (mayor que el 80%)
- Tiene un consumo uniforme de potencia
- Sus valores de NPSH son bajos y por ello el riesgo a cavitación es bajo

Por motivos de higiene alimentaria, el empleo de esta bomba tiene lugar únicamente en el área caliente, es decir en el bombeo de mosto. (Kunze, 2006)

5. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

1. ELABORACIÓN DE CERVEZA

a. Materias primas

- **Mosto:** Para obtener el mosto, se parte del grano de cebada. Este se germina y pasa a un proceso de secado y tostado con el fin de darle un sabor particular al producto final. Posteriormente, se muele el grano para que ingrese al proceso de maceración, en el cual se convierten azúcares como el almidón, en azúcares fermentables. Los principales azúcares fermentables que resultan del proceso anterior son: maltosa, sacarosa, glucosa y fructosa (Hall, 1990).
- **Levadura:** La levadura actúa como la materia prima principal del proceso de fermentación ya que lleva a cabo el consumo de azúcares fermentables para su mantenimiento, reproducción y producción de etanol. Existen dos familias grandes de levaduras para cerveza: las Ale y las Lager. Las principales diferencias entre estas dos familias son los rangos de temperatura de fermentación y el tiempo que dura el proceso (Pires, 2015).

b. Proceso general

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

- **Malteado:** 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. Para otros cereales, dependiente del tipo de cerveza que se está elaborando, no es necesaria esta etapa. (González, 2017)

Inicialmente, se almacena el grano con baja humedad para evitar fermentaciones indeseables. Posteriormente, se limpian y se clasifican tomándolo como una primera sección de control de calidad. Los granos de cebada se mantienen en tanques aireados a determinadas condiciones de temperatura y humedad para que puedan ser remojados y alcancen un valor del 45% de humedad; es así como inicia la germinación del grano (González, 2017).

Para que la germinación continúe, se coloca la cebada en un lugar aireado y se mantienen las condiciones iniciales. También se generan volteos periódicos por varios días hasta obtener algo conocido como la “malta verde” (González, 2017).

La última etapa, consiste en secar y tostar la malta verde. Para detener el proceso de germinación se puede utilizar aire seco y caliente. Existe una cantidad de días óptimo para detener la germinación teniendo así la mayor cantidad de azúcares en el grano que serán útiles en el proceso de fermentación para producir etanol (González, 2017).

- **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).
- **Maceración:** Es parte del proceso realizar el desdoblamiento del almidón y las proteínas contenidas en los granos de malta para dar lugar a azúcares fermentables como la maltosa

y otras sustancias denominadas péptidos. Para lograr esto, se procede a mezclar los granos que fueron previamente molidos con agua a determinadas temperaturas y el resto de aditivos que aportan una buena cantidad de almidón (González, 2017).

- **Filtración:** Para eliminar los restos de cáscara de malta que se conocen como “bagazo” o “afrecho”, se realiza una filtración y adicionalmente, se agrega agua varias veces de modo que se quede la mayor cantidad de azúcares en el mosto (González, 2017).
- **Cocción:** En esta etapa se lleva el mosto a ebullición de modo que se pueda agregar el lúpulo. Este ingrediente se agrega al principio de la cocción para que gradualmente le agregue el característico sabor amargo a la cerveza. Un poco antes de que finalice este proceso, se agrega más lúpulo que funciona aportando aromas particulares a la bebida final. Previo a pasar a la fermentación, el mosto se enfría utilizando un intercambiador de calor (González, 2017).
- **Fermentación:** El mosto enfriado y aireado se introduce en los tanques de fermentación donde se agregan las levaduras que se encargarán de transformar los azúcares fermentables en alcohol; esta es una reacción en la cual también se produce dióxido de carbono. Este último se puede purificar para saturar posteriormente la cerveza y desplazar el aire de los envases (González, 2017).
- **Maduración:** La cerveza “verde”, es decir, justo el producto que se obtiene después de fermentar, aún no es apta para el consumo ya que necesita pasar por una etapa de maduración en la cual se afinan sabores y aromas. Asimismo, se precipitan algunas proteínas y péptidos que después se separan por decantación (González, 2017).
- **Filtración:** Esta parte es esencial para retirar las levaduras que quedaron en el mosto y otras sustancias coloidales. Por lo general, se utilizan tierras diatomeas cuya capacidad de adsorción es muy alta por lo que el proceso es eficiente. En el caso de las cervezas artesanales, se realiza un centrifugado de modo que la bebida no queda 100% traslúcida (González, 2017).
- **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).

- **Envasado:** La cerveza carbonatada ingresa a las líneas de envasado en diferentes formatos de presentación y en el caso de las botellas, se prefiere un color ámbar para evitar que la cerveza entre en contacto directo con la luz. Las cervezas pueden someterse a un proceso de pasteurización final para preservarla por mucho más tiempo, sin embargo, las cervezas artesanales no pasan por este proceso. Las botellas se lavan y posteriormente se les inyecta la cerveza seguida de dióxido de carbono para evitar que quede oxígeno en el interior (González, 2017).

2. ESTILOS DE CERVEZA

Las cervezas se clasifican en dos grandes grupos: las Ale y las Lager. Partiendo de estas dos familias, se puede decir que existe una gran variedad de estilos de cerveza. Esto es posible gracias a las distintas combinaciones del tipo de malta, el grado de tostado, la cantidad y el tipo de lúpulo elegido, y, además, la adición de otros ingredientes que han revolucionado el proceso de hacer cerveza (Toledano, 2017).

Uno de los estilos más representativos de cerveza es la India Pale Ale (IPA), la cual fue diseñada en el año 1790 en Reino Unido, con el fin de resistiera los largos viajes hasta la India. Su fórmula base consta de maltas tostadas ligeras con una buena selección de lúpulo y agua con una determinada concentración de minerales para evitar el crecimiento de microorganismos. Es una bebida muy refrescante debido a su amargor, espumosa y con un alto contenido alcohólico (Toledano, 2017).

Figura 11. Algunos estilos de cerveza artesanal



3. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

En general, las bebidas alcohólicas se elaboran mediante el uso de productos vegetales con un alto contenido de carbohidratos; específicamente azúcares fermentables. Es importante que las bebidas tengan al menos una cantidad determinada de azúcares no fermentables, como en el caso de la cerveza, ya que éstas cumplen la función de darle cuerpo y un sabor particular a la bebida (Koolman, 2005).

Los responsables del proceso de fermentación son levaduras, los cuales son hongos unicelulares pertenecientes al grupo de los organismos eucariotas. Existe una gran diversidad de levaduras respecto a su tamaño, forma y color. Son mayores que las bacterias alcanzando un diámetro máximo de entre 4µm y 5µm. Estos organismos también se utilizan en otros procesos de reacción microbiana como en la elaboración del pan (Suárez, 2016).

Para la fermentación de cerveza se utilizan las especies *Saccharomyces Cerevisiae* y *Saccharomyces Pastorianus*. Estas células se caracterizan por ser haploides, es decir, que se reproducen por gemación; este es un proceso en el cual se forma una yema o protuberancia en el cuerpo de la célula para dar un lugar a una nueva célula (Koolman, 2005).

Este tipo de células pueden vivir en condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno o, por el contrario, en condiciones anaeróbicas. Depende del proceso y del producto que se desea obtener, las condiciones de fermentación cambiarán y esto influirá directamente en el tipo de levadura que se seleccionará para el proceso. La mayoría de las levaduras toleran un rango de pH entre 3 y 10, sin embargo, un pH entre 3.5 y 6.5 les resulta favorable por tratarse de un medio ligeramente ácido (Suárez, 2016).

a. Factores que afectan el desarrollo y crecimiento de la levadura

- **Temperatura:** Un incremento de temperatura podría ocasionar el descenso del contenido de proteínas en las células hasta la muerte. Por otro lado, una disminución significativa de la temperatura provocaría que las células entren en un estado de latencia retrasando su crecimiento y desarrollo.
- **pH:** Los valores de pH adecuados para que la levadura se desarrolle de una mejor manera están entre 3.5 y 6.5. La ventaja de estos microorganismos es que tienen la capacidad de crecer y desarrollarse en medios ligeramente ácidos, en comparación con otros. Este factor debe ser controlado de modo que los microorganismos puedan competir satisfactoriamente por el sustrato. Por lo general, la variación del pH durante el proceso de fermentación se

debe a la transformación de los aminoácidos por pérdida de nitrógeno, pasando a ácidos, lo cual origina una disminución del pH del medio. Asimismo, la producción de dióxido de carbono puede provocar el cambio del pH.

- **Presión osmótica:** Es importante que los microorganismos no sean sometidos a un medio hipertónico o hipotónico para evitar la plasmólisis. Un efecto del estrés osmótico es la disminución del volumen celular y, por consiguiente, reduce la velocidad de fermentación y viabilidad celular.
- **Luz:** A cualquier tipo de microorganismo que no tenga clorofila u otro pigmento que absorba la energía de las radiaciones en el proceso de fotosíntesis, la luz puede afectarlo.
- **Alcohol:** El alcohol puede llegar a actuar como un inhibidor de la fermentación cuando se llega a un valor determinado, el cual depende de la cepa que se esté utilizando.

La cepa *Saccharomyces Cerevisiae* es de “alta fermentación” y produce cervezas como Ale, Porter y Stout. El término hace referencia al hecho de que la levadura permanece en la superficie del medio de cultivo formando espuma. El rango de temperatura óptimo de fermentación utilizando esta cepa oscila entre 18 °C y 25 °C dando lugar a fermentaciones rápidas y cervezas finales de marcados y fuertes aromas frutales. Con relación al tiempo que toma el proceso de la reacción, una “fermentación alta” toma aproximadamente dos semanas de fermentación primaria y una semana de maduración o fermentación secundaria (Pires, 2015).

Por otro lado, la cepa *Saccharomyces Carlsbergensis* o *Saccharomyces Uvarum*, es de baja fermentación lo cual hace referencia a que tienden a dirigirse al fondo del fermentador; algunas cervezas de baja fermentación son: Pilsener, Märzen y Bock. Los mostos para este tipo de fermentación conllevan una cocción con malta menos modificada y con niveles altos de proteínas. La fermentación primaria se realiza entre 7 °C y 14 °C. Estas temperaturas hacen que el proceso sea más lento, sin embargo, el sabor de la cerveza final se considera más “limpio”. El tiempo que toma el proceso de fermentación es de aproximadamente tres semanas de fermentación primaria y una semana de maduración o fermentación secundaria (Pires, 2015).

A continuación, se presenta un cuadro con las principales diferencias entre las cervezas de alta y baja fermentación:

Cuadro 7. Comparación de cervezas de alta y baja fermentación

Variables	Alta Fermentación	Baja Fermentación
Rango de temperaturas (°C)	18 °C - 25 °C	7 °C - 14 °C
Tiempo aproximado fermentación	3 semanas	4 semanas
Especie de levadura	<i>Saccharomyces Cerevisiae</i>	<i>Saccharomyces Carlsbergensis</i>

c. Reacción de fermentación

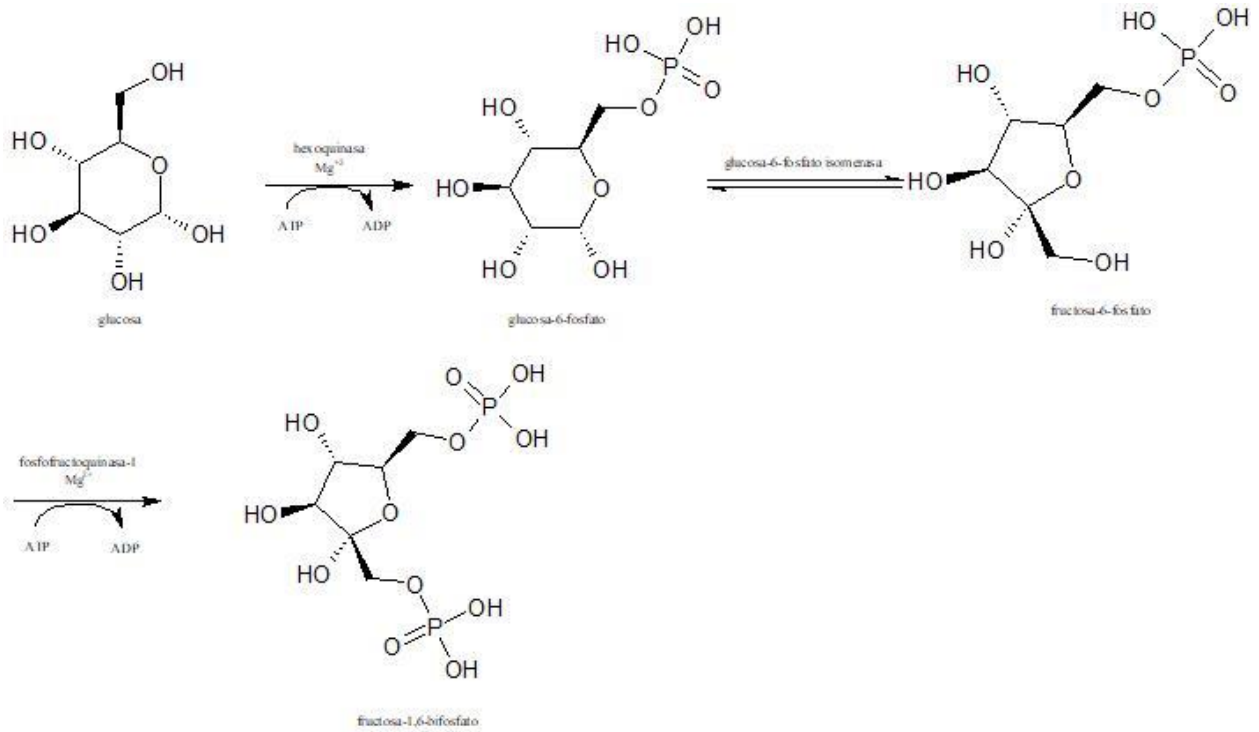
Para describir a fondo la reacción de fermentación alcohólica, se partirá de la glucosa para analizar el comportamiento de este sustrato al entrar en contacto con los microorganismos. Este proceso de fermentación globalmente tiene dos pasos importantes: la glucólisis y la fermentación. Es importante mencionar que las enzimas que catalizan las reacciones que se mencionan a continuación, son secretadas por los microorganismos en el proceso de reproducción y mantenimiento celular; y de producción de etanol.

El proceso de glucólisis consta de tres pasos, en los cuales se produce finalmente una molécula de piruvato que reaccionará para producir etanol.

Fosforilación de la glucosa: En este paso se consume energía en forma de adenosín trifosfato (ATP).

- Inicia con la fosforilación del hidroxilo unido al carbono en la posición 6 de la glucosa consumiendo una molécula de ATP. Esta reacción es catalizada la enzima hexoquinasa; utilizando magnesio como cofactor.
- Posteriormente, se da la isomerización de la glucosa-6-fosfato en fructosa-6-fosfato. Es paso es catalizado por la enzima glucosa-6-fosfato isomerasa.
- Por último, se da una segunda fosforilación en el hidroxilo del carbono en la posición 1 de la fructosa-6-fosfato; este paso es altamente irreversible. La reacción es catalizada por la enzima fosfofructoquinasa-1 y magnesio como cofactor.

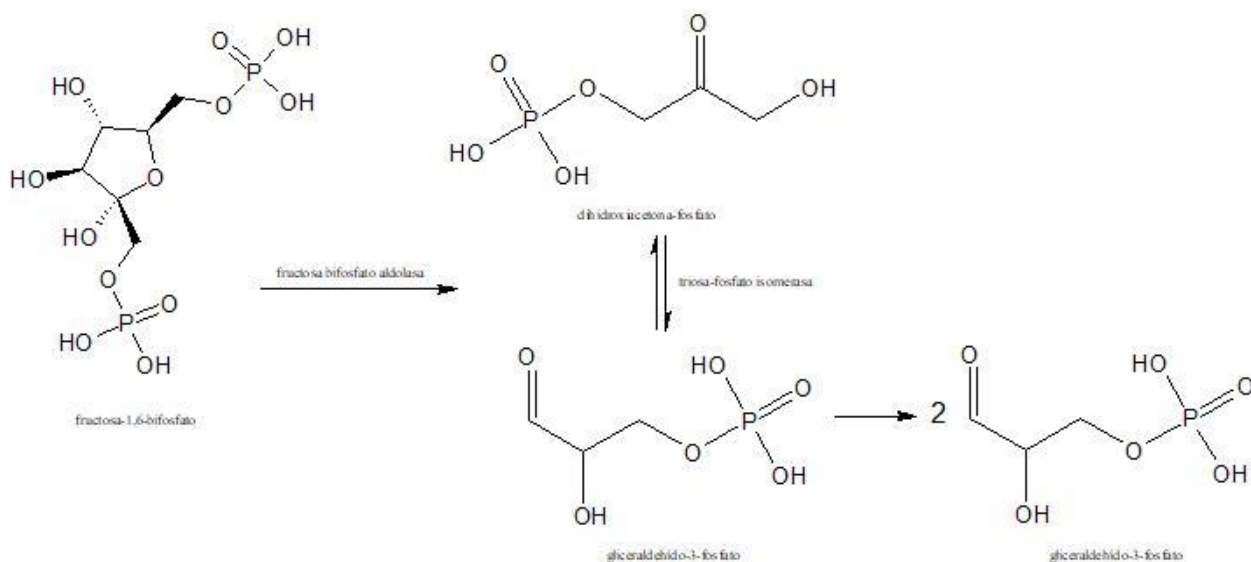
Figura 12. Primer paso de la glucólisis: fosforilación de la glucosa



(Koolman, 2005)

Ruptura de la pentosa fructosa-1,6-bisfosfato: En este paso no hay consumo ni producción de energía en forma de ATP. La molécula que se formó previamente, fructosa-1,6-difosfato se rompe en dos moléculas con la acción de la enzima fructosa-1,6-bisfosfato aldolasa; dando lugar a dihidroxiacetona fosfato y gliceraldehído-3-fosfato. Ambas moléculas se pueden convertir una en la otra en presencia de la enzima triosa-fosfato isomerasa. Por lo tanto, de una fructosa-1,6-difosfato se obtienen dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato.

Figura 13. Segundo paso de la glucólisis: ruptura de la pentosa fructosa-1,6-bifosfato

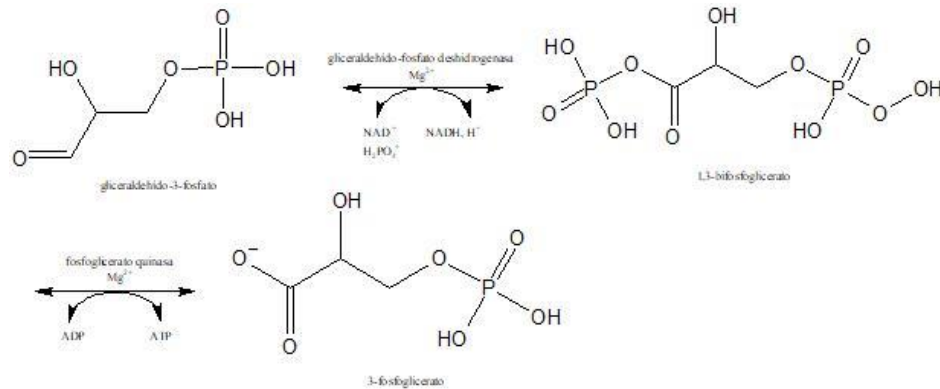


(Koolman, 2005)

Desfosforilación: En este último paso, se realiza una oxidación del carbono aldehídico a un grupo carboxílico generando una molécula de ATP.

- La primera parte consiste en una fosforilación del carbono aldehídico para dar lugar a una molécula energética: 1,3-bisfosfoglicerato. Aquí se consume NAD^+ y se reduce a NADH debido al aporte de protones en la reacción. La reacción es catalizada por la enzima gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa; teniendo magnesio como cofactor.
- La segunda parte consiste en la desfosforilación del 1,3-bisfosfoglicerato con la acción de la enzima fosfoglicerato quinasa a 3-fosfoglicerato. Aquí se consume energía en forma de ATP teniendo, de igual forma, magnesio como cofactor.

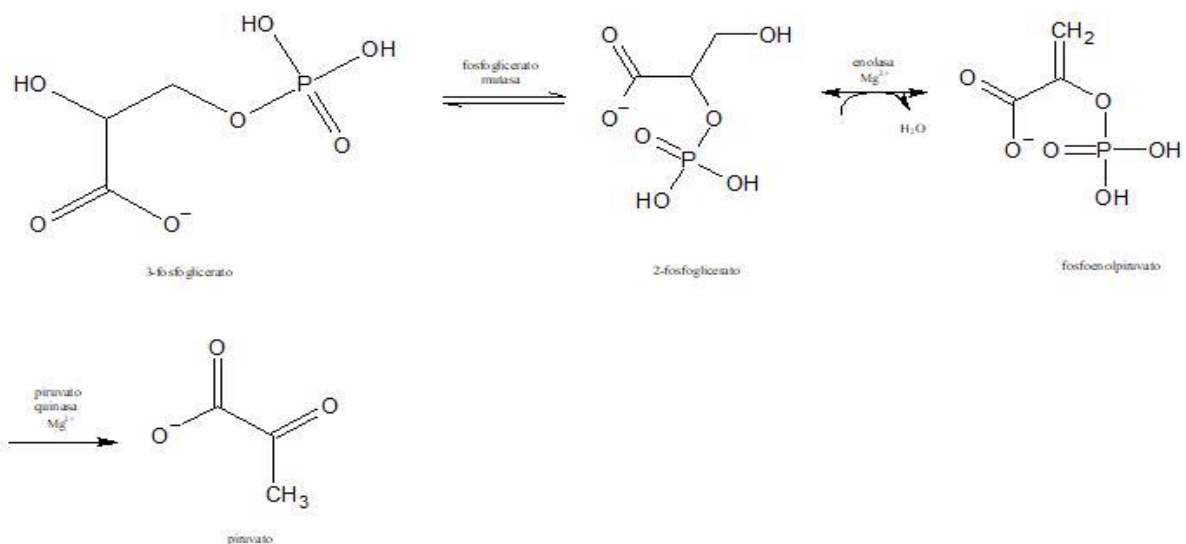
Figura 14. Obtención de 3-fosfoglicerato en la tercera etapa de la glucólisis



(Koolman, 2005)

- La tercera parte involucra la isomerización del 3-fosfoglicerato dando lugar al 2-fosfoglicerato; donde la posición del fosfato cambia del carbono 3 al carbono 2. Esta reacción es catalizada por fosfoglicerato mutasa.
- En la cuarta parte, la enzima enolasa y magnesio como cofactor, libera una molécula de agua para dar como resultado la molécula fosfoenolpiruvato.
- Por último, se da la desfosforilación del fosfoenolpiruvato con la acción de la enzima piruvato quinasa para producir piruvato y ATP. La enzima utiliza nuevamente magnesio como cofactor.

Figura 15. Obtención de piruvato en la tercera etapa de la glucólisis

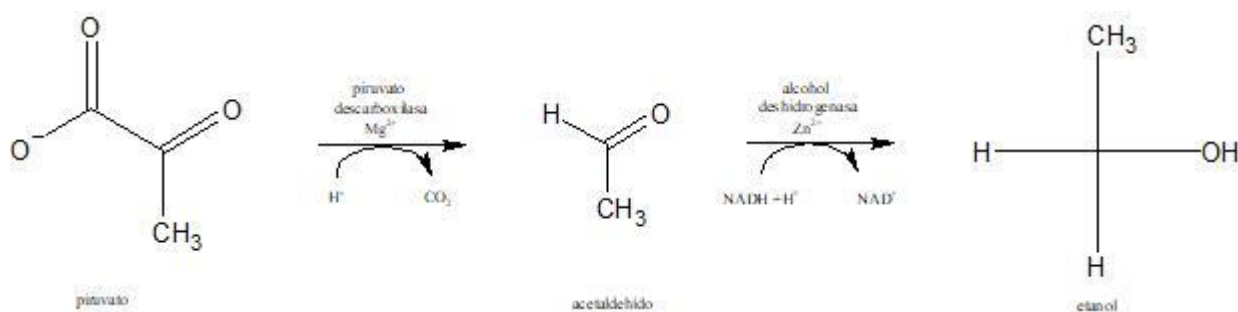


(Koolman, 2005)

Después del proceso de glucólisis, se da la fermentación alcohólica iniciando con la descarboxilación de piruvato. Esto se da en dos pasos:

- a) Se pierde una molécula de dióxido de carbono (CO_2) del grupo carboxílico de la molécula, formando así, acetaldehído. Esta reacción es catalizada por la enzima piruvato descarboxilasa.
- b) Se da un proceso de óxido-reducción para obtener etanol mediante la acción de la enzima alcohol deshidrogenasa y NADH como coenzima en medio ácido.

Figura 16. Fermentación alcohólica – obtención de etanol a partir de piruvato



(Koolman, 2005)

4. RECUPERACIÓN DE LA LEVADURA

Durante la fermentación independientemente del proceso que se esté realizando, producción de bebidas alcohólicas, panadería u otros, la levadura se va desarrollando y debido a sus propiedades, se convierte en un producto muy valioso para su posterior utilización como lo podría ser para empleo de alimento animal o humano o bien para ser recirculada en un nuevo proceso de fermentación (Ortiz, 2010).

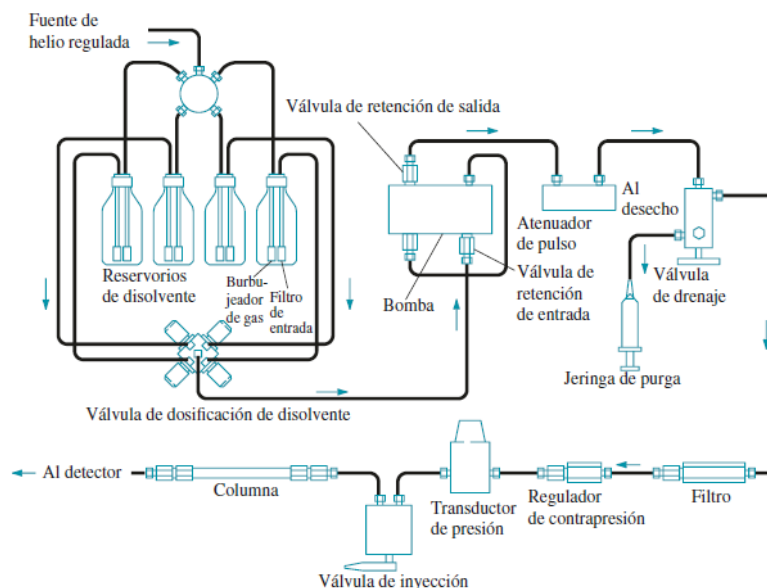
Por lo mismo, es importante determinar un proceso para poder recuperarlas, este consiste en realizar una centrifugación del producto y lavar las levaduras lo que se hace por medio de enviarlas por varios filtros rotatorios que permitan disminuir la cantidad de agua y recuperar hasta un 70% de humedad (Suárez-Machín et al., 2017). Esta levadura recuperada puede ser envasada en forma granulada o en bloques y es refrigerada (Mendieta Bojorge & Picardo Rivera, 2002). Otro proceso de recuperación que no necesita de refrigeración o ser almacenada por mucho tiempo consiste en secar la levadura al vacío o en un secador buscando tener una humedad final del 8% que es suficiente para que la levadura conserve su actividad biológica (Mensour, Margaritis, Briens, Pilkington, & Russell, 1997).

5. ANÁLISIS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

a. Detección de azúcares

De acuerdo con un estudio realizado por la Universidad de La Rioja en España, la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) es el método más adecuado para cuantificación de azúcares debido a que se obtienen resultados con mayor precisión y presenta una alta reproducibilidad aún con los azúcares minoritarios; en comparación el método de espectroscopía de infrarrojo. Este tipo de cromatografía se clasifica dentro de la cromatografía de elución. En esta, un líquido (fase móvil) circula y tiene contacto con un sólido u otro líquido inmisible (fase estacionaria). Posteriormente, se introduce una mezcla de analitos en la corriente de fase móvil y a medida que pasa el tiempo, esta avanzará a lo largo del sistema con una velocidad diferente que dependerá de su afinidad por cada una de las fases. Cada uno de los analitos eluirá en un tiempo diferentes lo cual quiere decir que estarán separadas y podrán ser cuantificadas. (Skoog, 2015)

Figura 17. Diagrama de los principales componentes de un equipo HPLC



(Skoog, 2015)

b. Detección de alcoholes

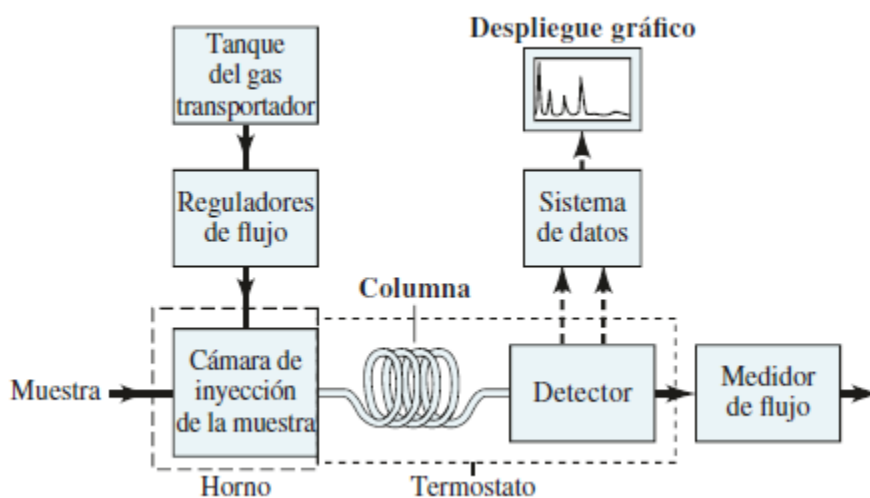
La cromatografía de gases es uno de los métodos más utilizados para análisis tanto cualitativo como cuantitativo. En este tipo de cromatografía, los componentes de una muestra vaporizada se separan a medida que se distribuyen entre una fase móvil gaseosa y una fase estacionaria líquida o sólida retenida en una columna. La muestra se inyecta en la parte superior de la columna

cromatográfica. La elución ocurre a causa del flujo de una fase móvil inerte gaseosa. Comparando con otros métodos analíticos de cromatografía, la fase móvil no interactúa con las moléculas del analito.

La cromatografía gas-líquido está basada en la partición del analito entre una fase móvil gaseosa y una fase líquida inmovilizada en la superficie de un empaque sólido inerte o en las paredes del tubo capilar. Este método se puede aplicar a gases y a cualquier compuesto volátil o convertido en un derivado volátil.

En la industria, la cromatografía de gases tiene amplia aplicación y se enfoca principalmente en la evaluación de pureza de los reactantes y productos de reacción o también, monitorear la secuencia de la reacción.

Figura 18. Diagrama de bloques de los componentes principales un cromatógrafo de gases (CG)



(Skoog, 2015)

Principales compuestos volátiles en las fermentaciones

Los compuestos volátiles presentes en las bebidas alcohólicas se consideran como compuestos secundarios derivados de la fermentación alcohólica del mosto. Las bebidas alcohólicas son formadas básicamente por una solución de alcohol etílico y agua, los cuales se consideran como compuestos mayoritarios (Pires, 2015).

- 1) **Metanol:** Es considerado como un contenido en las bebidas alcohólicas y tiene un límite máximo de 30g/L según la norma COGUANOR NGO 33006 en relación con la

legislación guatemalteca para bebidas alcohólicas fermentadas. El metanol proviene de la actividad metabólica de las levaduras en contacto con la actividad de enzimas pépticas.

- 2) **Etanol:** En el proceso de fermentación, se produce principalmente etanol influenciado por las condiciones del medio. Entre ellas, la concentración de azúcares, pH, el contenido las fuentes de nitrógeno disponible, la temperatura de fermentación y el tipo de levadura.

Para el análisis, el equipo necesita de un estándar interno, una sustancia que se agrega en cantidad constante a las muestras, el blanco y los estándares de calibración. Generalmente, se hace para corregir la pérdida durante la preparación o bien, durante la inyección de la muestra en el equipo. El estándar interno debe tener un tiempo de retención y derivación similar al del analito (Skoog, 2015).

Detector de ionización de llama (FID)

El detector de ionización de llama se utiliza comúnmente en el cromatógrafo de gases ya que es muy versátil. Básicamente, es un quemador de hidrógeno/oxígeno donde se mezcla el efluente de la columna con hidrógeno. Se produce una llama de alta temperatura donde los compuestos orgánicos producen iones y electrones que son conductores eléctricos (Barquero, 2006).

Las principales ventajas de este detector son las siguientes:

- Alta sensibilidad, 10^{-13} g/s.
- Bajo ruido de fondo
- Amplio intervalo lineal de respuesta, 10^7 unidades.

c. Conteo de microorganismos

Los métodos de conteo de microorganismos o recuento celular convencionales determinan directamente las células vivas y muertas en una muestra; lo cual puede lograrse utilizando un extendido teñido o una cámara especial de recuento celular. Estos métodos se consideran directos y se describen a continuación:

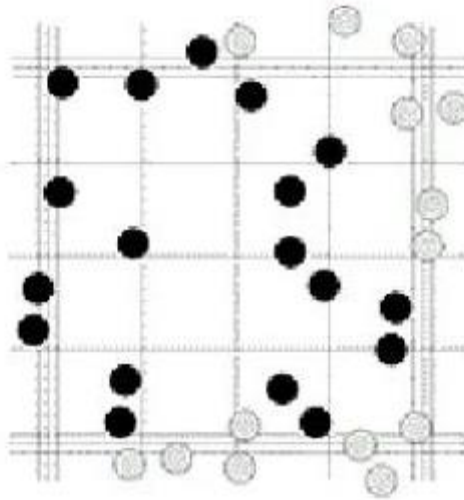
- **Recuento celular con microscopio:** Consiste en extender un volumen determinado de la muestra, o bien, una dilución de ésta, en un área establecida de un portaobjetos. Posteriormente, la muestra se fija con un cubreobjetos y se tiñe generalmente con azul de metileno. Se cuenta el número de bacterias presentes en 15 campos microscópicos de

inmersión escogidos al azar. Se obtiene el valor promedio por campo microscópico y se determina el total de campos que abarca el espacio. Si se realizó una dilución, se toma en cuenta y finalmente se obtiene el número aproximado de bacterias por mililitro de muestra (Rodríguez, 2005).

- **Recuento celular con cámara Neubauer:** Consiste en preparar muestras con una concentración apta para su recuento. Puede o no hacerse una dilución y en caso de hacerse, se debe tomar en cuenta para el cálculo final del número aproximado de microorganismos en la muestra. Se coloca un cubreobjetos sobre la cámara de Neubauer, se toma una pequeña cantidad de muestra y se coloca en la cámara de forma que penetre en ella por capilaridad. Debe evitarse la formación de burbujas. Posteriormente, se coloca la cámara en el microscopio y se buscan al menos 5 cuadros grandes para realizar el recuento (Rodríguez, 2005).

Existe una convención en la cual se cuentan únicamente las células que tocan el límite superior o izquierdo del cuadro, esto se muestra en la siguiente figura:

Figura 19. Conteo celular con la cámara de Neubauer en el microscopio



(Rodríguez, 2005)

Con el promedio obtenido de los 5 cuadros en los que se contaron las células, se utiliza la siguiente ecuación para determinar la concentración:

Ecuación 11. Concentración celular

$$C_N = \frac{\# \text{ de células} * 10000}{\# \text{ de cuadros} * \text{dilución}}$$

Esta metodología se utiliza comúnmente ya que los reactivos son fáciles de conseguir, el equipo es económicamente de bajo costo y se puede utilizar varias veces (Madison, 2001). Se considera más como una estimación porque se trabaja con valores de millones de células y no es un buen método para el análisis de células demasiado pequeñas. Es importante recalcar que dicho procedimiento es poco preciso ya que depende del ojo del analista lo que provoca que se tome más tiempo del debido y ya que las muestras deben leerse inmediatamente porque si pasa mucho tiempo el colorante puede oxidar las células y matarlas esto afecta directamente en el conteo celular (Keller, 2013).

A pesar de que su precisión es muy baja, puede utilizarse para el análisis de una cinética de reacción (Rodríguez, 2005).

- **Recuento celular por fluorescencia:** Es un equipo que utiliza reactivos fluorescentes y detección para medir tres parámetros para cada célula, con poca preparación requerida. El equipo disponible para éste método es el Muse Cell Analysis. Está diseñado para mostrar resultados de células adherentes con diámetros desde 2 hasta 60 micrones. Este método permite analizar directamente de cada muestra la cantidad de células vivas, la cantidad de células muertas y la viabilidad celular (Luminex, 2016).

La citometría de flujo es una técnica que consiste en tomar una muestra de células que han sido teñidas o marcadas previamente por medio de reactivos o de un láser y colocarlas de tal manera que vayan pasando una por una para ser identificadas por sus parámetros fisiológicos como lo son tamaño, estructura y la fluorescencia propia según los marcadores colocados permitiendo dar información sobre el estado de las células (Lynn, 2002). Esta es una técnica que se ha perfeccionado con el tiempo y a pesar de que es un equipo con un valor económico alto, se utiliza con mayor frecuencia debido a que se obtienen resultados en muy pocos minutos y pueden contarse miles de células de manera más eficiente y exacta (do Pazo, 2014). En este equipo la viabilidad puede medirse por medio de un colorante que marca todas las células y otro que marca sólo las células muertas o bien con un kit más específico que es capaz de detectar la actividad enzimática de cada levadura y su capacidad de mantener un pH cercano a la neutralidad (Biotechnologies, 2017). Por otro lado, la vitalidad indica si la célula está viva y se mide por la capacidad que tiene una célula de producir activamente ciertas moléculas (Laguado, 2007). Existe un kit específico que permite

medir el promedio de fluorescencia en un rango de tiempo para que se pueda analizar en qué fase del crecimiento está la levadura (Biotechnologies, 2017).

Algunas de las ventajas de este equipo son las siguientes:

- Operación simple para el analizador
- Rápida instalación y configuración
- Obtención de resultados altamente cuantitativos con respecto a conteo celular
- Tecnología de citometría de flujo en un instrumento accesible

d. Cinética de crecimiento microbiano

1) Generalidades

Durante el desarrollo de un medio de cultivo, los microorganismos muestran una curva de crecimiento uniforme. El estudio de esta curva de crecimiento se considera la base para la comprensión del proceso y para el diseño de equipos necesarios para llevar a cabo la reacción (Lee, 2009).

El modelo más simple es el “no estructurado distributivo”, que sigue los siguientes supuestos:

- Las células pueden ser representadas por una sola variable como masa celular, número de células o concentración de proteínas. Esto es cierto únicamente para un crecimiento balanceado.
- La población de células se distribuye uniformemente en el medio de cultivo, lo cual implica cierto grado de homogeneidad.

2) Ciclo de crecimiento para un cultivo por lotes

Si se colocan microorganismos unicelulares en un medio fresco y esterilizado, y se mide la concentración celular con respecto al tiempo y se grafica; se pueden observar seis fases importantes durante el crecimiento y decrecimiento celular (Lee, 2009).

- **Fase lag o de latencia:** Es un período de tiempo en el cual el cambio en el número de células es cero. A pesar de esto, puede que las células crezcan en tamaño durante este período. El tiempo que dura esta fase depende de muchos factores como el tipo y la edad de los microorganismos, el tamaño del inóculo y las condiciones del medio. Si se prepara un inóculo, se reduce la fase lag puesto que los microorganismos pasan de un medio con alta cantidad de nutrientes y un medio con baja cantidad de nutrientes. (Lee, 2009).

- **Fase de aceleración:** En esta fase, el número de células empieza a incrementar y la tasa de división incrementa hasta llegar a un punto máximo (Lee, 2009).
- **Fase exponencial:** El número de células incrementa exponencialmente y las células empiezan a dividirse. La tasa de crecimiento celular incrementa, pero la tasa de división es constante a su máximo valor. La población celular incrementa a cualquier tiempo particular y es proporcional a la densidad celular (Lee, 2009).

Ecuación 12. Densidad celular

$$r_{C_N} = \frac{C_N}{dt} = \mu C_N$$

La constante μ es la tasa de crecimiento específica y ésta no debe confundirse con la tasa de crecimiento que tiene diferentes unidades y significado. La tasa de crecimiento específica está definida de la siguiente forma:

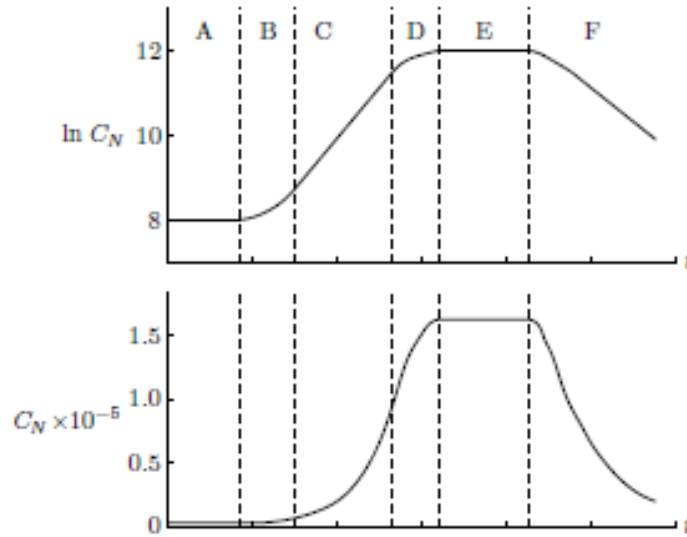
Ecuación 13. Tasa de crecimiento específica

$$\mu = \frac{1}{C_N} \frac{dC_N}{dt} = \frac{d \ln C_N}{dt}$$

- **Fase de desaceleración:** Después de que la tasa de crecimiento llega a un máximo, se produce una desaceleración tanto de la tasa de división celular como la de crecimiento celular (Lee, 2009).
- **Fase estacionaria:** En esta fase la población celular llega a un valor máximo y permanece constante. La velocidad de la población de microorganismos se ve afectada por el agotamiento de los nutrientes disponible o por la acumulación de productos tóxicos del metabolismo. Con base en lo anterior, se puede decir que las células de la fase estacionaria tienen una composición química diferente que las células de la fase exponencial (Lee, 2009).
- **Fase de muerte:** Después de que los nutrientes se han agotado y que el sustrato se ha consumido, las células empiezan a morir y el número de células viables empieza a disminuir. Otra razón por la que inicia esta fase, es por la acumulación de productos

tóxicos para los microorganismos. En algunos casos, los microorganismos no solo mueren sino también se desintegran en un proceso llamado lisis celular (Lee, 2009).

Figura 20. Fases de crecimiento celular de microorganismos



(Lee, 2009)

En la Figura anterior, las letras muestran cada una de las fases de crecimiento celular.

Ecuación 14. Balance de masa de un sistema de fermentación alcohólica

$$-\left(\frac{dC_s}{dt}\right) = mC_N + \frac{\mu C_N}{Y_{X/S}} + \frac{dC_p/dt}{Y_{P/S}}$$

3) Factores que afectan la velocidad de crecimiento específica

- **Concentración del sustrato:** El efecto de la concentración de sustrato se explica en la ecuación de Monod, la cual es una expresión empírica basada en la forma de la ecuación normalmente asociada con la cinética enzimática o la adsorción de gases (Lee, 2009).

Ecuación 15. Efecto de concentración de sustrato en la velocidad de crecimiento celular

$$\mu = \frac{\mu_{\max} C_s}{K_s + C_s}$$

Donde C_s es la concentración del sustrato limitante en el medio y K_s es la constante de afinidad al sustrato. El valor de K_s es igual a la concentración del nutriente cuando la velocidad de crecimiento específica es la mitad de su valor máximo (Lee, 2009).

- **Concentración del producto:** A medida que las células crecen, producen subproductos metabólicos que pueden acumularse en el medio. El crecimiento de los microorganismos es a veces inhibido por estos productos, cuyo efecto se puede agregar a la ecuación de Monod (Lee, 2009).

Ecuación 16. Efecto de concentración de producto en la velocidad de crecimiento celular

$$\mu = \frac{\mu_{m\acute{a}x} C_s}{K_s + C_s} \frac{K_p}{K_p + C_p}$$

- **Otras condiciones:** La velocidad de crecimiento específica de microorganismos se ve afectada también por el pH del medio, temperatura y suministro de oxígeno. El rango de pH ideal y temperatura depende del tipo de microorganismos que estén en el medio (Lee, 2009).

4) Evaluación de los parámetros cinéticos de Monod

Se ha observado frecuentemente que la cantidad de masa celular producida es proporcional a la cantidad del sustrato limitante consumido, lo cual permite definir el rendimiento de los microorganismos (Lee, 2009).

Ecuación 17. Rendimiento de los microorganismos con respecto al sustrato

$$Y_{X/S} = \frac{\Delta C_N}{-\Delta C_s} = \frac{C_N - C_{No}}{-(C_s - C_{So})}$$

Con la medición de la concentración de sustrato a varias velocidades de flujo en estado estable, varios modelos cinéticos pueden ser puestos a prueba y el valor de los parámetros cinéticos pueden ser estimados. Para esto se utiliza una relación lineal con la ecuación de Lineweaver-Burk. La ventaja es que muestra la relación entre la variable independiente (concentración de sustrato) y la variable dependiente (velocidad de crecimiento específica) (Lee, 2009).

Ecuación 18. Lineweaver-Burk para cálculo de parámetros cinéticos de reacción

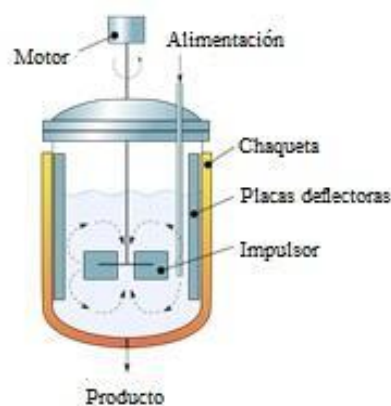
$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_S}{\mu_{m\acute{a}x}} \frac{1}{C_S} + \frac{1}{\mu_{m\acute{a}x}}$$

5) Reactores para fermentaciones

Un biorreactor es un equipo en el cual las transformaciones bioquímicas son causadas por la acción de enzimas u células vivas. A un biorreactor cuya transformación tiene relación con células vivas se le conoce como fermentador. Por otro lado, un biorreactor cuya transformación tiene relación con actividad enzimática se conoce como reactor enzimático (Lee, 2009).

Para operaciones de gran escala, un reactor de tanque agitado (STR) es el más utilizado para los procesos de fermentación industrial. Puede utilizarse para fermentaciones aeróbicas o anaeróbicas. La intensidad de agitación radica en la selección de un adecuado impulsor y en la variación de la velocidad de agitación. Por lo general, está construido a base de acero inoxidable y opera a condiciones de funcionamiento moderadas. Una desventaja de este tipo de reactor es que el motor del agitador tiene un alto consumo energético. Para evitar la formación de vórtice, producto de la agitación, se colocan placas deflectoras en el interior del tanque agitado. El pH es controlado mediante una solución buffer o un controlador de pH y la temperatura con un sistema de enfriamiento o calentamiento. Un reactor CSTR cumple con las mismas características, la única diferencia es que el proceso es continuo (Lee, 2009).

Figura 21. Ilustración de un tanque agitado



(Lee, 2009)

6) Equipos auxiliares de un reactor de fermentación

Los principales componentes, también llamados equipos auxiliares, de un reactor de tanque agitado:

a) Sistema de agitación

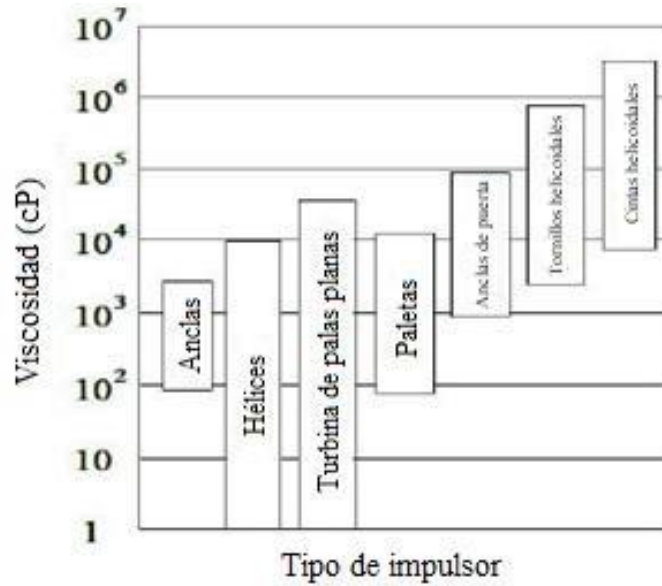
Su objetivo es reducir la falta de uniformidad en los fluidos a través de la eliminación de los gradientes de concentración, temperatura y de otras propiedades que influyen en el rendimiento de la reacción. Existen diferentes tipos de impulsores, que se utilizan en diferentes procesos de fermentación dependiendo de la viscosidad del medio de cultivo (Harrison, 2003).

Figura 22. Tipos de impulsores para agitadores



(Ago, 2005)

Figura 23. Tipo de impulsor en función de la viscosidad del medio de cultivo



(Khizar, 2018)

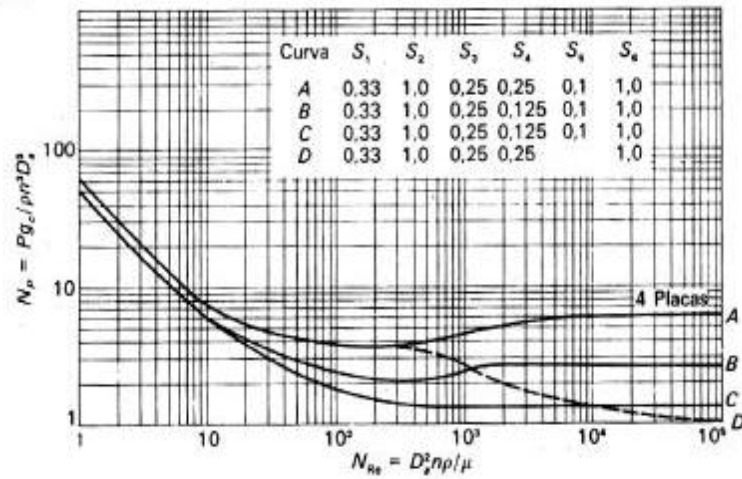
Existen semejanzas geométricas para el diseño de un agitador en función del diámetro del tanque. Por lo general, el diámetro de agitación es 1/3 del diámetro del tanque, el largo de la pala es 1/4 del diámetro de agitación y el ancho de la pala es 1/5 del diámetro de agitación.

La potencia del motor se obtiene con el número de potencia, un valor que se obtiene de una gráfica que relaciona el número de potencia con el número de Reynolds.

Ecuación 19. Número de Reynolds

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$$

Figura 24. Número de potencia N_p frente N_{Re} para turbina de 6 palas.



(McCabe, 2007)

Ecuación 20. Número de potencia

$$N_p = \frac{P}{N^3 d^5 \rho}$$

b) Sistema de control de temperatura

Al diseñar un fermentador se debe tomar en cuenta un sistema de control de temperatura. Para esto se puede realizar la instalación de un sensor que indique la temperatura del medio de cultivo durante toda la reacción.

c) Sistema de calentamiento

Es necesario calentar el reactor para un proceso conocido como esterilización. Esto se realiza para que el medio de cultivo se encuentre libre de microorganismos ajenos a la fermentación, al igual que el interior del reactor. Para esto se puede tener una chaqueta con una línea de vapor o bien, un serpentín. Para calcular el flujo másico de vapor necesario se debe tomar en cuenta el calor del mosto de cerveza y el calor del vapor (Lee, 2009).

Ecuación 21. Transferencia de calor del vapor

$$Q_{vapor} = \dot{m} H_v$$

Para el calor del mosto, se debe tomar un flujo en función del tiempo que se desea esterilizar y el calor específico debe corresponder al del mosto de cerveza.

Ecuación 22. Transferencia de calor del mosto

$$Q_{mosto} = \dot{m}_{mosto} C_{p_{mosto}} \Delta T$$

d) Sistema de enfriamiento

La consideración primordial en un fermentador es la eliminación de calor durante la reacción de fermentación. Las tres fuentes de calor que deben ser removidas son las siguientes:

- El calor del ambiente alrededor del reactor
- El calor generado por el metabolismo del organismo en el medio de cultivo.
- El calor generado por agitación mecánica.

En otras palabras, se necesita mantener enfriado el contenido del reactor. Es importante mencionar que la agitación mecánica no es significativa si la velocidad de agitación es mínima. Para obtener el flujo de agua fría que debe pasar por la chaqueta se necesita: la transferencia de calor del ambiente, de la reacción y de salida del agua fría (Lee, 2009).

Para la transferencia de calor del ambiente, se necesita el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el área de transferencia de calor y el cambio de temperatura (McCabe, 2007).

Ecuación 23. Transferencia de calor del ambiente

$$Q_{ambiente} = hA\Delta T$$

Para el coeficiente convectivo de transferencia de calor se debe calcular el número de Grashof y con las propiedades del aire registradas (incluido el número de Prandtl) se obtiene el número de Nusselt. Con el número de Nusselt se obtiene el coeficiente. El área de transferencia de calor se calcula en función del área del cilindro como una lámina (McCabe, 2007).

Ecuación 24. Número de Grashof

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

Ecuación 25. Número de Nusselt

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

El número de Nusselt se calcula con los coeficientes b y n, para el producto de Grashof y Prandtl para cilindros verticales (McCabe, 2007).

Ecuación 26. Coeficiente convectivo de transferencia de calor

$$Nu = \frac{hL}{K}$$

Con la altura del tanque, la conductividad térmica del aire y el número de Nusselt que se obtuvo con la ecuación anterior.

Para obtener la transferencia de calor de la reacción se debe tomar en cuenta la velocidad de reacción, la entalpía de reacción y el volumen del sustrato principal.

Ecuación 27. Transferencia de calor de reacción

$$Q_{rxn} = (\Delta H)(-r_A)(V)$$

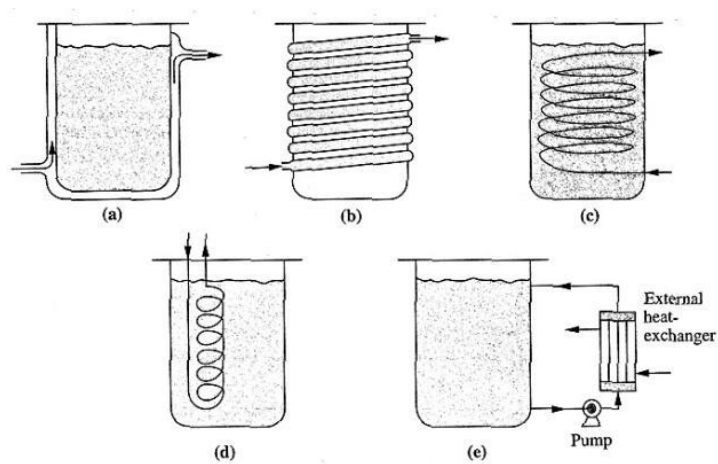
La velocidad de reacción está dada por velocidad máxima de crecimiento celular, la concentración de microorganismos y sustrato, la constante de afinidad al sustrato y el rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato.

Ecuación 28. Velocidad de reacción

$$-r_A = \frac{-dC_s}{dt} = \frac{\mu_{\max} C_s}{C_s + K_s} \frac{C_N}{Y_{X/S}}$$

La transferencia de calor de la salida del agua fría de la chaqueta está dada por su flujo másico, el calor específico del agua y su cambio de temperatura.

Figura 25. Sistemas de transferencia de calor



(Levenspiel, 1999)

e) Sistema de control de pH

El pH es una variable importante que debe ser controlada para asegurar que la constancia del rendimiento de la reacción. Para esto se pueden instalar sensores de pH y en caso de ser necesario, por el tipo de reacción que ese esté manejando, una bomba dosificadora con soluciones ácida y álcali para nivelar el pH (Lee, 2009).

f) Puertos de muestreo

Los puertos de muestreo son necesarios para que se puedan realizar análisis de las muestras que se toman durante el curso de la reacción. Esto es esencial para monitorear el rendimiento los microorganismos y productos con respecto al sustrato (Lee, 2009).

g) Sistema de salida de gases

Para los procesos de fermentación alcohólica, es necesario un sistema de salida de dióxido de carbono ya que es un subproducto de la reacción. Adicionalmente, se coloca una trampa para evitar que ingrese oxígeno en el reactor (Lee, 2009).

h) Válvula de seguridad de presión

Esta válvula es sumamente importante y es necesaria para cualquier tipo de reacción ya que, como su nombre lo dice, hace el proceso más seguro. Este accesorio funciona abriéndose en el momento en el que el sistema alcanza la presión máxima para el que está diseñado. En la industria, también es conocida como válvula de alivio (Lee, 2009).

6. REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

1. CERVEZA

Es una de las bebidas alcohólicas más consumidas a nivel mundial. Su origen puede rastrearse hasta el antiguo Egipto o incluso previo a los 3000 años antes de Cristo. Esta bebida se produce con la fermentación alcohólica de diferentes granos que deben procesarse previamente para extraer el azúcar que contengan y transformarla en alcohol. Esta transformación se lleva a cabo usando levadura que se introduce en la etapa de fermentación. Esta, junto al agua y la cebada, el grano principalmente usado para la producción de la cerveza, son tres de los cuatro principales ingredientes de la cerveza, siendo el cuarto, el lúpulo, flor de una planta herbácea que fue añadida a la producción de la cerveza durante el siglo XVI (González, 2017).

La cerveza denominada 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 (González, 2017).

a. Tipos de cerveza

Las cervezas tienen una clasificación tan extensa debido a la complejidad en formulación, su proceso y de los cambios en todas las variables que entran en juego en su producción. Esta bebida puede clasificarse por su aspecto (color o turbidez, por ejemplo), su método de elaboración (industrial o artesanal), los ingredientes utilizados (cebada, trigo, avena), su procedencia (cervezas tipo *Kolsch* se originan en Colonia, Alemania mientras que las cervezas *pilsner* vienen de República Checa) o según su fermentación (a temperatura alta o baja). Debido al alto número de clasificación de cervezas se explicarán las más famosas (Jackson, 1999).

- **Pale Ale:** Las cervezas estilo Pale Ale suelen ser elaboradas con maltas pálidas, es decir, con un tueste moderado, variando su color desde un dorado hasta un ámbar. Esta división de las cervezas tiene tres subdivisiones: English Pale Ale (EPA), American Pale Ale (APA) e Indian Pale Ale (IPA). Las cervezas EPA suelen ser bebidas muy amargas debido al alto nivel de ésteres que poseen. También tienen una carbonatación superior y generan una espuma característica de alta persistencia (Jackson, 1999).

La cerveza IPA nace como una rama de la cerveza EPA, ya que los cerveceros británicos desarrollaron una cerveza que soportara el largo viaje por barco a sus colonias en la India, sin que esta se estropeará. Las cervezas IPA pueden variar en color desde un ámbar rojizo hasta un dorado claro. La cerveza APA es mucho más reciente en comparación a sus dos homólogas ya que fue creada en 1980 por la cervecería Sierra Nevada de los Estados Unidos. La cerveza APA es una adaptación americana de las cervezas EPA, con la principal diferencia que los ingredientes utilizados son de origen americano (Jackson, 1999).

- **Pilsner:** La cerveza Pilsner es una cerveza estilo Lager, que a diferencia de las cervezas Ale, usan levaduras tipo *Saccharomyces carlsbergensis*, las cuales fermentan en las partes bajas de los tanques, por ende, el término fermentación baja, además que es entre 4 y 9 °C. Este tipo de cerveza fue originada en República Checa en el año 1842 y fue la primera cerveza dorada y transparente de la historia. Este tipo de cervezas suele tener un contenido alcohólico entre 3% y 5%, con un

cuerpo ligero que la vuelve fácil de tomar. Este tipo de cervezas, al igual que las Pale Ale, tiene varias subdivisiones, entre ellas el estilo bohemio, el alemán y el americano. El primero se caracteriza por tener menos carbonatación que las otras dos, pero cuenta con un mayor color y cuerpo. El estilo alemán se caracteriza por ser refrescante y seco con cierto amargor persistente, algo que copia el estilo americano, pero usando ingredientes estadounidenses (Jackson, 1999).

- **Stout:** Las cervezas Stout entran dentro de la clasificación Ale, al igual que las Pale Ale. Esta subdivisión se genera en el siglo XVIII a partir de las cervezas estilo Porter (cervezas oscuras con alto contenido nutricional) pero con la diferencia que las Stout tenían una densidad más elevada. Con el paso del tiempo, el declive en ventas de las cervezas Porter generó que todas las cervezas oscuras fueran denominadas como Stout, sin importar su densidad. Este color oscuro, incluso negro en algunos casos, se debe al intenso grado de tostado al que la malta es expuesta. Estas cervezas generan una espuma densa, incluso cremosa y es común que las cervezas de este estilo tengan aromas parecidos al chocolate o café. Este tipo de cervezas es el que incluye la mayor cantidad de subdivisiones, incluyendo: Dry Stout, Sweet Stout, Foreign Extra Stout, Imperial Stout, por mencionar algunas (Jackson, 1999).

b. Características

Las características de las cervezas son tan amplias como la cantidad de tipos y divisiones que existen. Existen características organolépticas como son el color, aromas o sabor con las que son producidas y existen características cuantificables como el porcentaje de alcohol o el grado de turbidez. Todas estas características son desarrolladas desde el proceso de malteado y durante la fermentación, pero también son asentadas en la cerveza durante el proceso de maduración en el período de, aproximadamente, 7 días después de la fermentación.

- **Temperatura:** Los diferentes tipos de cervezas, al igual que otras bebidas alcohólicas, tienen diferentes temperaturas a las que deberán servirse. En el cuadro 8, presentada a continuación, se encuentran diferentes tipos de cervezas y las respectivas temperaturas a las que deben ser servidas y consumidas. Estos rangos de temperaturas han sido establecidos por catadores con años de estudio y práctica, pero al final no existe una regla de cómo deba tomarse cada cerveza, llegando a depender del gusto del consumidor. Cabe resaltar algunas de las características que

estos catadores usan para determinar la temperatura ideal a la que estas cervezas deben ser consumidas. Las cervezas de trigo suelen ser las que se ingieren más frías, a temperaturas de 4 °C, seguidas por las cervezas rubias que oscilan entre los 6 y 8 °C. Las cervezas amargas y espesas tienden a liberar todos sus aromas y sabores a temperaturas más cálidas, generalmente cercanos a los 10 °C. Existen catadores que aseguran que servir las cervezas a temperaturas superiores a los 15 °C genera resultados positivos en cuanto a los sabores y olores desprendidos (Gonzáles, 2017).

Cuadro 8. Temperatura adecuada para servir algunos estilos de cerveza

Muy fría 2 – 4 °C	Fría 4 - 7 °C	Fresca 7 - 10 °C	Bodega 10 - 13 °C	Cálida 13 - 16 °C
Lagers Americanas	Pilsner	Pale Ales Americanas	Ales Amargas	Stouts Imperiales
Licores de malta	Lagers de cuerpo ligero	Lagers de cuerpo medio	Lambic	Ales Fuertes Belgas
Bajas en alcohol	Kolsch	Indian Pale Ale (IPA)	Bitter Inglesa	Quads Belgas
	Wit Belga	Porters	Ales Fuertes	Vino de Cebada
	Hefeweizen	Alt	Porters Bálticas	Ales Añejas
	Weisse Berlinesa	Irish Stouts	Bocks	Dopplebock
	Trigo Americana	Stout Dulce		Eisbock

- **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. Por eso 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).
- **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 dentro del envase como precipitación, floculación y sedimentación, reduciendo la estabilidad del producto. La turbidez u opacidad de una cerveza puede tener tres principales motivos: biológica, coloidal o química, estas serán profundizadas posteriormente (Rodríguez, 2003).

2. TIPOS DE TURBIDEZ

a. Biológica

Diversas características de la cerveza hacen que la mayoría de las bacterias no puedan desarrollarse dentro de una cerveza. Las razones principales son el pH bajo que presentan, los altos contenidos de alcohol, o la falta de oxígeno que se trabaja en las cervezas. Debido a esto, la mayoría de las fuentes de contaminación biológica que existen en los procesos de manufactura cervecera se deben a las propias levaduras que se utilizan, a levaduras “salvajes” o a bacterias que logran tolerar las condiciones previamente mencionadas. Estas levaduras salvajes hacen referencia a aquellas que no se introducen directamente al proceso de fermentación de la cerveza. En algunos casos, la introducción de estas levaduras salvajes se da por descuido o error pero en varios casos,

especialmente en cerveza artesanal, se busca capturar levadura salvaje para experimentar en los sabores y características que estas pueden producir. En muchos casos, los resultados producen sabores indeseados por el tipo de cepa invasora. Sin embargo, muchos cerveceros optan por probar este método por las propiedades difíciles de encontrar en caso los resultados sean positivos (De Clerck, 1957).

Según Ros (1980), la contaminación biológica por microorganismos se da generalmente en la preparación del mosto. Las razones implicadas son el uso de levadura contaminada, contaminación bacteriana por un mal manejo de la materia prima o un cultivo inicial impuro.

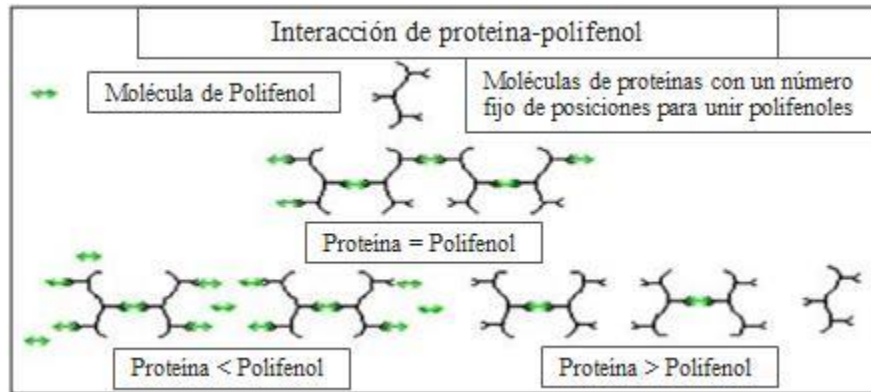
b. Coloidal

La estabilidad de la cerveza se debe a que esta es una disolución acuosa con ligero contenido alcohólico y medianamente ácida. Esta mezcla contiene principalmente dos tipos de compuestos: los estables y los inestables. Los compuestos estables hacen referencia a las disoluciones iónicas y moleculares, denominadas por Rodríguez (2007) como verdaderas. Los compuestos inestables son descritos como disoluciones falsas que generan inestabilidad en la cerveza por su naturaleza coloidal. En algunos casos una suspensión mecánica de las mismas permite que cierta cantidad de estos compuestos se encuentren presentes en la cerveza.

El problema de los coloides en la cerveza se debe a que, con el paso del tiempo, tienden a coagular en estructuras que van aumentando de tamaño hasta que se vuelven visibles a simple vista y precipitan. La velocidad y el tiempo en que los coloides tardan en hacerse visibles depende de varios factores de las cervezas en sí, por ejemplo: el contenido y tipo de proteínas presentes, la presencia y cantidad de taninos, la temperatura, el grado de oxidación, el nivel de agitación, presencia de trazas de metales, presencia de sales, pH del medio y exposición a la luz (De Clerck, 1957).

La producción de sedimento, por parte de los coloides, se debe a la naturaleza de las proteínas que se encuentran presentes. Estas proteínas generalmente contienen una gran proporción de prolina, una proteína derivada del grano de cebada y similares. Se ha demostrado que la cantidad de sedimento formado está ligado linealmente con el porcentaje de prolina que se encuentra en la cerveza (Siebert, 1996).

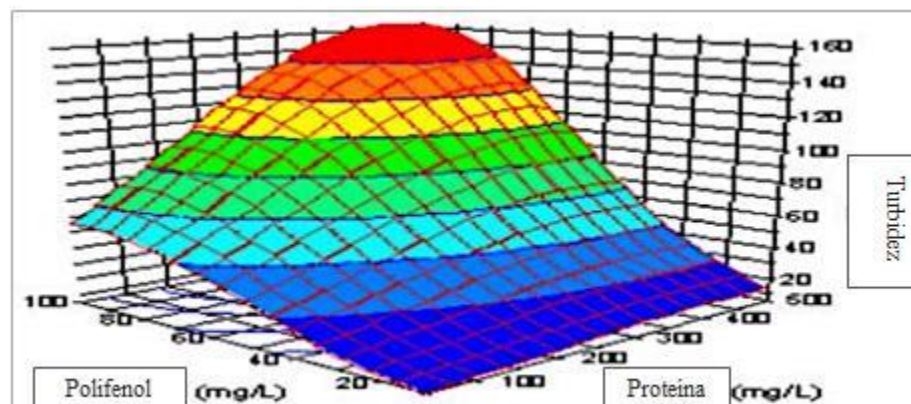
Figura 26. Interacción por proporción de proteína-polifenol



(Siebert, 1996)

Como se puede ver en la Figura 26, página 65, las proteínas poseen un número determinado de sitios de unión para los polifenoles. En el caso que la cantidad de puntos de unión en las proteínas sea la misma que la cantidad de polifenoles disponibles, las moléculas resultantes de esta unión serán más grandes y complejas, lo que significará un mayor porcentaje de coagulación y por ende, mayor sedimento en la cerveza. La Figura 27, página 65 presenta un modelo de superficie comparando la formación de turbidez con la presencia de proteínas y polifenoles. Es importante resaltar que son las proteínas ricas en prolina las que generan turbidez, por ende, aumentando la concentración de estas proteínas, la turbidez aumenta al interactuar con los polifenoles presentes (Siebert, 1996).

Figura 27. Relación entre las concentraciones de proteína y polifenol en la formación de turbidez



FUENTE: Siebert, 1996

En términos de turbidez coloidal, existen dos tipos: turbidez por frío y turbidez permanente. La primera hace referencia al fenómeno que ocurre cuando la cerveza es enfriada en repetidas

ocasiones a temperaturas cercanas a 0 °C y luego se calienta a temperatura ambiente, cercana a 20 °C. La turbidez coloidal por su parte, hace referencia a la turbidez que solo desaparece cuando la cerveza es calentada a temperaturas mayores a 70 °C pero que reaparece al momento de bajar la temperatura (Ros, 1980).

c. Mediciones de turbidez

La turbidez en los líquidos es causada por materia suspendida y coloidal, ocasionada por arcilla, sedimentos, materia orgánica e inorgánica, microorganismos o mezcla de las anteriores. Es una expresión de la propiedad óptica que la luz experimenta al ser dispersada y absorbida en lugar de ser transmitida al pasar por un líquido sin cambios en su dirección. Por ende, a mayor intensidad de dispersión de luz, mayor será la turbidez que el líquido presenta. Los valores de turbidez, en especial, en líquidos que serán para consumo humano, sirven para establecer el grado de tratamiento requerido. De igual manera, son útiles para determinar la tasa de filtración adecuada y la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación, centrifugación y filtración (IDEAM, 2007).

Para medir los parámetros de turbidez, el equipo normalizado es el turbidímetro. Un turbidímetro comercial está diseñado para medir bajos niveles de turbidez. Su funcionamiento se basa en lecturas de intensidad de luz dispersa en una dirección particular, predominantemente en ángulos rectos de la luz incidente. Cada tipo de turbidímetro, dependiendo de la longitud de onda que utilice para sus mediciones, genera diferentes resultados de turbidez. Ya que existen muchas mediciones, dependiendo del ángulo de medición y de la longitud de onda del haz de luz, en 2004 se procedió a establecer nuevas unidades para medir la turbidez (IDEAM, 2007).

d. NTU

La escala de NTU (Nephelometric Turbidity Units) es una de las más comunes para la medición de turbidez en líquidos debido a su precisión, sensibilidad y aplicabilidad. Los turbidímetros que aplican la lectura de NTU se denominan nefelómetros y trabajan con detectores de luz dispersa a 90° del haz incidente. Es cuanto a longitud de onda utilizada, los nefelómetros siguen el método EPA 180.1 donde se utiliza un haz de luz blanco. La norma establece que este haz de luz debe estar dentro del rango de 400 a 680 nanómetros de longitud. Es importante mencionar que otra de las principales mediciones de turbidez se basa en la norma ISO 7027 en donde se utiliza un haz de luz

infrarrojo en lugar de un haz de luz blanco. Debido a esta diferencia, las mediciones de turbidez de los equipos que siguen la norma ISO 7027 no pueden ser comparables con las mediciones de los equipos que siguen la norma EPA 180.1 (OWSC, 2017).

Existen variaciones en los equipos que miden NTU pero siempre deberán seguir la norma EPA 180.1. Principalmente se encuentran los NTRU (Nephelometric Turbidity Ratio Unit) y los NTMU (Nephelometric Turbidity Multibeam Unit). Todos estos equipos trabajan leyendo rayos de luz a 90° del punto incidente. La diferencia recae en la cantidad de puntos de recepción que tiene el equipo, junto a la complejidad del procesador con el que se trabaja. El equipo NTU tiene un único detector de luz mientras que los NTRU y NTMU tienen detectores múltiples y al mismo tiempo utilizan algoritmos para combinar estas mediciones detectadas. De igual manera, estos tipos de mediciones pueden ajustarse para generar lecturas a ángulos diferentes del estándar de 90°. La diferencia principal entre los NTRU y los NTMU es que los equipos correspondientes a la primera medición utilizan un solo haz de luz, mientras que el segundo tipo de equipo trabaja con múltiples rayos de luz, como su nombre lo indica (OWSC, 2017).

Cuadro 9. Turbidez objetivo dependiendo de tipo de filtración en plantas de filtración

Tipo de Tratamiento	Turbidez objetivo
Filtración convencional	≤ 0.3 NTU en 95% de las mediciones. Ninguna medición puede exceder 1 NTU
Filtración y flotación por aire disuelto (DIFF)	Coagulación, floculación y flotación seguido por filtración
Filtración directa	≤ 0.3 NTU en 95% de las mediciones. Ninguna medición puede exceder 1 NTU
Arena	≤ 1 NTU en 95% de las mediciones. Ninguna medición puede exceder 5 NTU
Tierra Diatomea	≤ 1 NTU en 95% de las mediciones. Ninguna medición puede exceder 5 NTU

(WHO, 2017)

Dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, se cuenta con un turbidímetro marca Hanna modelo HI 98703. Este turbidímetro está diseñado para hacer lecturas en NTU con un límite máximo de 1000 NTU. Su funcionamiento está basado en llenar una celda del líquido que se desea medir hasta la marca que esta tiene, introducir dicha celda

en el turbidímetro y hacer la lectura correspondiente. La ecuación 1 se utiliza para obtener la incertidumbre de cada medición de este equipo.

Ecuación 29. Incertidumbre de turbidímetro marca Hanna modelo HI 98703

$$Incertidumbre = Medición * 2\% + 0.02NTU$$

e. EBC

Específicamente para la cerveza, existen las pruebas EBC o las SRM (Standard Reference Method) para la medición de turbidez. La diferencia entre ellas es solo un factor de conversión que explica que un EBC es 1.97 veces un SRM. Sin embargo, las pruebas EBC no se limitan a la turbidez de la cerveza, ya que son una serie de pruebas de varios parámetros como el color o el amargor. Para realizar las pruebas de estabilidad coloidal en las cervezas según las normas EBC, estas se deben de almacenar durante una noche a 0 °C seguidas por 48 horas a 60 °C finalizando con otra noche a 0 °C. Una vez se complete este proceso, se pueden realizar las mediciones de turbidez de EBC. Los valores obtenidos por en estas mediciones no pueden ser comparadas con las mediciones realizadas con equipos NTU (Rabin, 2013).

3. FORMAS DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

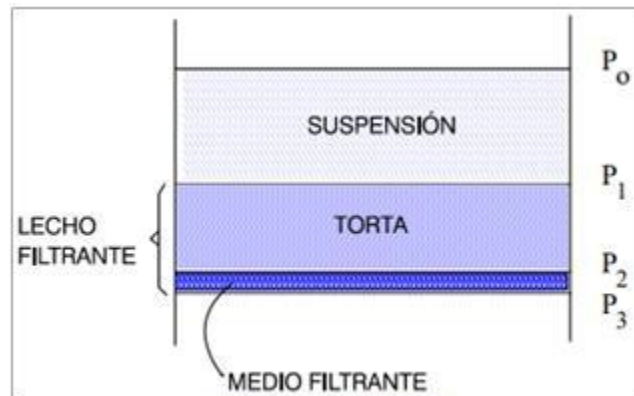
a. Filtración

Los procesos de filtración hacen referencia a aquellas operaciones de separación sólido-líquido en las que se utiliza un medio filtrante. En estos casos el líquido filtrado se denomina filtrado, efluente o permeado. Entre los varios tipos de filtración que existen se encuentra la filtración por torta, la filtración de lecho profundo o la filtración de flujo cruzado (Martín, 2011).

1) Filtración por torta

La filtración por torta es la más común de los tipos de filtración. En esta se utiliza un medio filtrante poroso por el cual el líquido puede pasar, pero los sólidos se acumulan sobre la superficie de medio filtrante formándose una torta. Esta torta ayuda al proceso de filtración, pero debido a que su tamaño va aumentando con el uso se debe retirar cada determinado tiempo. Se puede observar el funcionamiento de un filtro por torta donde se encuentra el medio filtrante junto a la torta que se va formando de material sólido ya filtrado. Arriba de esta se encuentra la suspensión esperando por ser filtrada (Martin, 2011). Al líquido claro obtenido se le llama filtrado. Al material sólido se le conoce como retenido.

Figura 28. Esquema de zonas creadas en un filtro por torta



FUENTE: Martín, 2011

La velocidad del filtrado depende de la diferencia de presiones que existan en la entrada y salida del medio filtrante. En caso todavía no exista torta la diferencia sería entre P_3 y P_2 usando de referencia el diagrama de arriba, en caso ya exista una torta presente el diferencial sería entre P_3 y P_1 ya que la torta también actúa como medio filtrante. Otros factores que afectan el caudal de filtrado incluyen el área superficial del filtro que está en contacto con la suspensión, la viscosidad del líquido y la cantidad de resistencia que el medio filtrante y la torta ejercen sobre la circulación del flujo. Según la ley de Darcy, mostrada en la ecuación 2, la velocidad media de filtrado a través de la torta, denominada u^+ , puede ser encontrada con la presión del líquido en la superficie de la torta (P_1), la presión del líquido en la descarga (P_3), la viscosidad del filtrado (μ), la resistencia del medio filtrante (R_f) y la resistencia de la torta (R_t) (Martín, 2011).

Ecuación 30. Ley de Darcy

$$u^+ = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{P_1 - P_2}{\mu R_t} = \frac{P_2 - P_3}{\mu R_f} = \frac{P_1 - P_3}{\mu (R_t + R_f)}$$

(Martín, 2011)

La viscosidad representa un factor de suma importancia en cuánto a la velocidad y la cantidad de filtrado que se puede remover por parte de un equipo determinado. La viscosidad puede ser determinada usando equipos especiales denominados viscosímetros. De acuerdo con Gardner, la viscosidad puede ser determinada en función del tiempo que el líquido en cuestión se retiene dentro de su equipo, demostrado en la ecuación 3. Este procedimiento consiste en llenar la copa de

viscosidad del equipo, hasta su borde mientras se obstruye el agujero encontrado en la parte inferior. Una vez se retira la obstrucción del agujero se debe tomar el tiempo en que tarda en vaciarse la copa hasta la última gota. Existen diversos tipos de copas para líquidos con diferente grado de viscosidad. La ecuación 3 provee valores en centiskotes.

Ecuación 31. Determinación de viscosidad de acuerdo al tiempo

$$V = 23.56T - \frac{766}{T}$$

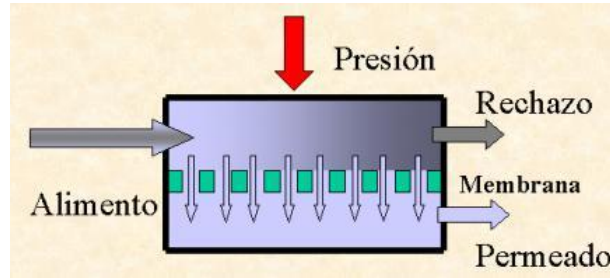
2) Filtración de lecho profundo

Este tipo de filtración se realiza en lechos granulares con profundidades entre los 0.5 y 3.0 m, con el propósito de retener partículas con un rango de diámetro entre 0.3 y 5.0 micrómetros. Se utiliza principalmente en la depuración de aguas ya que es útil en casos donde la concentración de los sólidos es menor a 0.1 g/L de sólidos. Estos filtros trabajan con caudales de carga entre 5 y 50 m³/m², dependiendo de la sección transversal con la que trabajen. Al igual que en la filtración por torta, con el paso del tiempo los sólidos retenidos hacen que el caudal de filtrado vaya disminuyendo. Cada cierto tiempo se debe lavar el filtro con agua a contracorriente, a velocidades de flujo elevadas (alrededor de 36 m/h) (Martín, 2011).

3) Filtración de flujo cruzado

A diferencia de la filtración por torta y de la filtración de lecho profundo, en la separación por flujo cruzado no se genera una torta ya que el líquido atraviesa los poros de la membrana filtrante por la presión ejercida pero los sólidos retenidos se van desplazando en forma de material rechazado como se puede apreciar. La desventaja de estos filtros es que no toda la suspensión será filtrada ya que cierta cantidad de líquido no debe atravesar la membrana para ir removiendo los sólidos, esto genera una corriente de rechazo en donde la concentración de sólidos suspendidos es mayor a la concentración inicial. Estos procesos logran eliminar sólidos disueltos de gran tamaño molecular por el uso de membranas de tamiz molecular (Martín, 2011).

Figura 29. Esquema de filtración por flujo cruzado

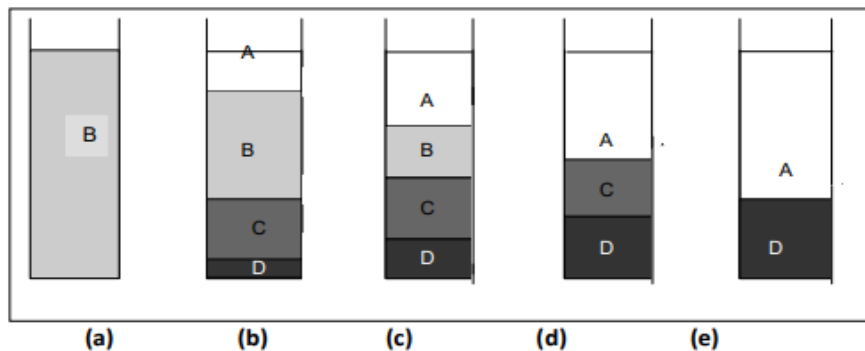


(Martín, 2011)

b. Sedimentación

La sedimentación es una operación unitaria que consiste en usar el efecto de la gravedad para separar un sólido que se encuentra suspendido en un líquido. Una vez el proceso haya finalizado, se obtendrá un líquido clarificado o sobrenadante, en comparación a la suspensión original, y un lodo con alto contenido de sólidos, al cual se le conoce como sedimento (Martín, 2011).

Figura 30. Representación de fases de una sedimentación



(Martín, 2011)

La Figura 30, página 71, ayuda a representar las fases que una suspensión atraviesa durante el proceso de sedimentación. En el tiempo 0 se encuentra una suspensión con cierta cantidad de sólidos como la zona B. Con el paso del tiempo los sólidos se van desplazando hasta el fondo del contenedor por efectos de gravedad formando partes con mayor concentración de sólidos, como la zona D, y partes donde no hay concentración de sólidos como la zona A. Entre más tiempo transcurra, las zonas A y D irán incrementando su tamaño y las zonas intermedias desaparecerán.

En los procesos de centrifugación existe un punto, denominado punto crítico, en que el líquido presente ya no posee partículas de sólidos suspendidos que puedan sedimentarse. Sin embargo, la

capa sólida que se formó en la parte inferior del recipiente donde se esté trabajando, posee ciertos niveles de líquido disperso. A partir de este punto empieza un proceso de compresión donde las partículas sólidas van generando una capa cada vez más comprimida extrayendo lentamente las capas de líquido que se encontraban presentes. Este fenómeno se da en suspensiones que tienen concentraciones de sólidos altas ya que se genera más peso en la capa de sólidos lo que forma canales por donde el agua logra movilizarse a la capa líquida superior (Martín, 2011).

Cómo explica Pérez (2005), la definición de la suspensión de sólidos por coloides, en la cerveza, está dada por el diámetro de partículas que se encuentran suspendidas en el líquido, siendo estas de un diámetro entre 10^{-4} y 10^{-6} cm. Debido a que la sedimentación se dará por la gravedad, ejerciendo fuerza en estas partículas, el tamaño de ellas influye en la velocidad a la que se sedimentarán. Pérez deduce la ecuación 4 para la velocidad de la sedimentación de una suspensión dada por el efecto gravitacional (g), el diámetro de la partícula (d_p), la viscosidad cinemática (ν) y la densidad de la partícula respecto al líquido (δ) que se describe como el cociente entre la densidad específica de la partícula y la densidad específica del líquido.

Ecuación 32. Velocidad de sedimentación

$$V_s = \frac{g}{18} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} d_p^2 = \frac{g}{18} \frac{d_p^2}{\nu} (\delta - 1)$$

La ecuación anterior demuestra una forma de encontrar la velocidad de sedimentación de manera experimental dado que es dependiendo de las mediciones de viscosidad. La ecuación 5 demuestra la forma teórica de calcular la velocidad de sedimentación. Según la teoría, la velocidad de sedimentación también puede ser calculada a partir de la velocidad individual de la partícula que para la levadura es de 0.5 cm/h. La ecuación también depende de un factor de corrección dependiendo del volumen ya sedimentado y de la forma de la partícula que para la levadura *Saccharomyces cerevisiae* es de 2. La ecuación es la presentada a continuación:

Ecuación 33. Velocidad de sedimentación teórica

$$v_c = v(1 - \phi)^n$$

c. Centrifugación

La centrifugación puede describirse como una unión de los procesos de filtración y de sedimentación, en donde la fuerza gravitacional es sustituida o incrementada por una fuerza centrífuga a partir de un eje de rotación. En esto se basa la diferencia entre filtrado con centrifugación y sedimentado con centrifugación (Martín, 2011).

Las centrífugas pueden clasificarse dependiendo de la velocidad a la que trabajen. Se consideran de baja velocidad las centrífugas utilizadas para procesos biológicos ya que pueden ser utilizadas para el conteo de células o para separar los órganos de las células como el núcleo del cloroplasto. Las centrífugas de alta velocidad usualmente trabajan a velocidades de 1,800 a 2,500 revoluciones por minuto (Martín, 2011).

Existen centrífugas que están diseñadas para la separación de suspensiones sólido-líquido mientras que otras centrífugas están diseñadas para separaciones líquido-líquido. Estas separaciones de 2 líquidos miscibles funcionan a base de diferencia de densidades que, al momento de girar, separan estos dos líquidos. Las centrífugas que son diseñadas para uno de estos procesos específicamente no suelen ser útiles para separaciones que involucren el otro tipo de proceso descrito (Martín, 2011).

d. Tamizaje

El tamizaje es un método de separación de partículas que se basa únicamente en la diferencia de tamaño que estas poseen. Al trabajarse de manera industrial, los sólidos son depositados sobre una superficie denominada tamiz, que deja pasar partículas por las perforaciones que esta superficie tiene. Ya que un plato puede separar solamente los sólidos en dos, los sistemas de tamizado suelen utilizar una serie de platos, cada uno con un tamaño de perforación menor al anterior para que cada plato retenga cierto diámetro de partícula (UNAM, 2010).

La razón principal del tamizaje recae en la utilización de un producto que tenga un tamaño granular con límites mínimo o máximos, ya que la variación en el tamaño de un sólido puede hacer que este sea satisfactorio para un proceso, pero no lo sea para otro. Por eso el uso de sistemas de tamices que tengan mallas con orificios sucesivamente decrecientes en su diámetro. Estos tamices consisten en telas de malla de alambre cuyo espaciado entre ellas depende del número de tamiz. Un tamiz de malla 10, por ejemplo, tiene 10 orificios en una pulgada y la abertura tendrá una longitud de 0.1 pulgadas menos que el espesor del alambre utilizado. Existen otros tipos de tamices

como los Tyler o los establecidos por el Bureau Nacional de Estándares de Washington (UNAM, 2010).

e. Equipos para la remoción de sólidos suspendidos

1) Filtros

a) Filtro de elemento

En un filtro de elemento, la suspensión se circula un sistema que contiene un medio filtrante que, microscópicamente, contiene diferentes marcos por donde el líquido puede avanzar. Sobre la pared del filtro se va formando la torta de sólidos retenidos, la cual debe removerse cada cierto tiempo. Este tipo de sistemas suelen operar a presión constante, pero la velocidad de filtración del equipo no lo será. Esto se debe a la capa de sólidos retenidos que se va formando mediante el uso del filtro. Por este motivo, se suele trabajar con un caudal medio para denominar la velocidad de filtración. Este caudal medio, representa la relación entre el volumen del filtrado y el tiempo del ciclo de operación (Martín, 2011).

b) Filtro de tambor

Este tipo de filtros constan de un tambor rotatorio con una velocidad de rotación constante en donde el medio filtrante se encuentra en la superficie cilíndrica del tambor. El filtro se encuentra colocado en el interior de un contenedor el cual se está alimentando de la suspensión que se desea filtrar. Parte de la superficie cilíndrica del tambor se encuentra sumergida en la suspensión a todo momento. La fase líquida de la suspensión logra atravesar la membrana del filtro y es retirada por un sistema de vacío. La fase sólida se mantiene en la parte de afuera del filtro formando una torta. Para que esta torta no vuelva a entrar en contacto con la suspensión original, se coloca un rascador que retira por completo el sólido formado en la superficie del tambor. Internamente el tambor está dividido en secciones triangulares conectadas al sistema de vacío. Se diseña de tal forma para que solo las secciones sumergidas en la suspensión tengan acceso a la fuerza de succión generadas y por ende generar ahorros de energía en el proceso (Martín, 2011).

2) Sedimentadores

Los procesos de sedimentación pueden realizarse por uso de la gravedad para separar las partículas sólidas del líquido donde está suspendido. El proceso de sedimentación depende directamente de la masa de las partículas con respecto al líquido donde se encuentran, así como la

velocidad del fluido donde se encuentra. Es por esto, que los procesos de sedimentación suelen darse en tanques de volúmenes grandes. Este tipo de sedimentadores, sin embargo, no suelen lograr una separación completa de la suspensión y la automatización de la misma suele ser compleja (McCabe, 2007).

Los principios generales de la sedimentación pueden subdividirse en clarificadores y en clasificadores. El primero de estos hace referencia a un equipo que logra separar prácticamente todas las partículas sólidas de la suspensión mientras que el segundo tipo se refiere a equipos que hacen una separación parcial. Ambos tipos de sedimentadores trabajan bajo el principio que las densidades de todas las partículas presentes en la suspensión es la misma, sin importar su tamaño (McCabe, 2007).

Los tanques de sedimentación suelen ser semicilíndricos y se encuentran con una inclinación de 12° con un sobre flujo de líquido en el extremo más bajo. La suspensión se alimenta de manera continua a mitad del vertedor y se ajusta una velocidad de flujo lo suficientemente alta para que los finos no se sedimenten, pero que sí logren salir del tanque en la corriente de sobre flujo. Las partículas más grandes se sedimentan y una hélice rotatoria desplaza estos sólidos a lo largo del piso del vertedero fuera del tanque. Existen otro tipo de sedimentadores que utilizan fuerzas centrífugas de los que se hablará más adelante (McCabe, 2007).

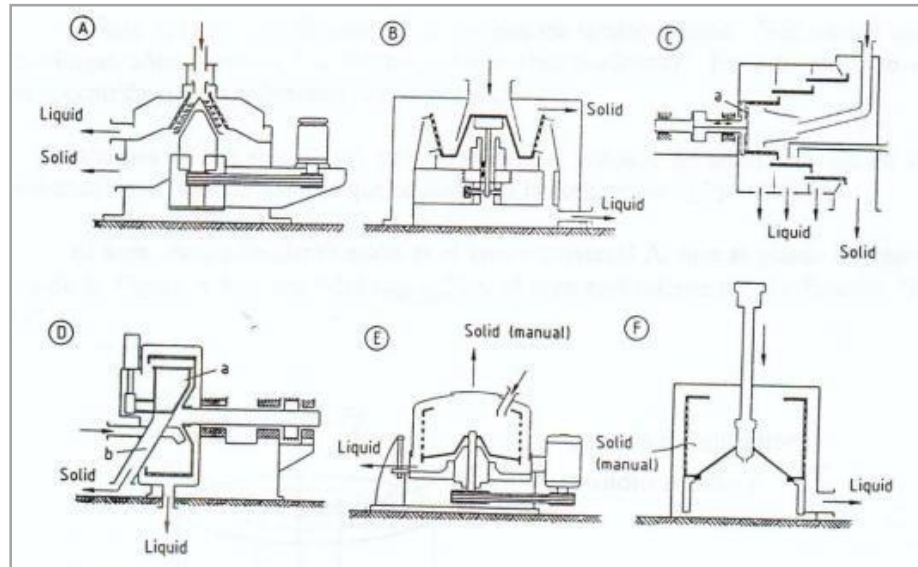
3) Centrifugadoras

a) Centrifugadoras por filtración

El filtrado con centrifugación trabaja de manera que los sólidos son depositados sobre un medio filtrante, los cuáles pueden ser retirados de manera continua o en intervalos. Dentro de esta categoría de centrífugas existen varias subdivisiones dependiendo la forma de trabajo, cómo se puede observar en la Figura 31, página 76. La centrífuga A presenta un funcionamiento con tamizaje continuo, donde la torta formada es retirada de manera continua por un tornillo sin fin presente, que tiene una velocidad de rotación diferente a la del tambor perforado. En el caso del equipo B, el funcionamiento tiene el mismo concepto que el anterior, pero en este caso la torta formada es retirada por la acción de un mecanismo de vibración. La centrífuga C es un equipo de platos con empuje que suele tener capacidades en el rango de 60 a 80 t/h. La figura D es una centrífuga tipo cesta con un rascador interno que va retirando la torta formada a un grosor determinado utilizando cuchillos que se encuentran tangenciales a la formación radial de la torta.

Finalmente, las centrífugas E y F presentan esquema de centrífugas de trabajo manual (Martín, 2011).

Figura 31. Tipos de centrífugas comunes con filtración

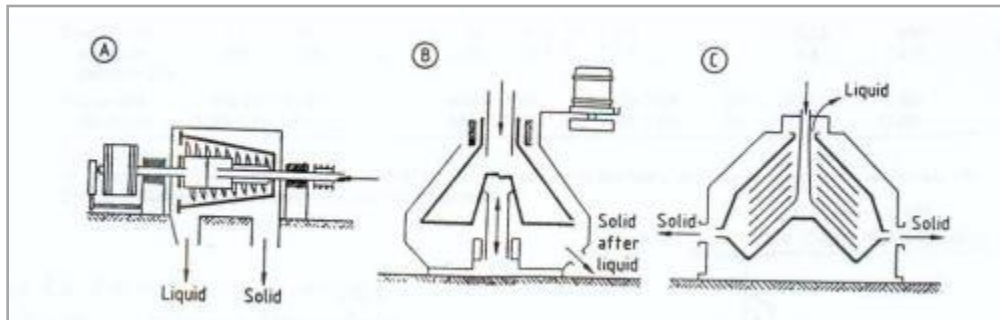


(Martín, 2011)

b) Centrífugas por sedimentación

El sedimentado con centrifugación utiliza la fuerza centrífuga para sedimentar las partículas sólidas presentes en la suspensión en lugar de a fuerza gravitacional utilizada en los procesos de sedimentación convencionales. La centrífuga presente en el laboratorio de operaciones unitarias y con la que se realizaron las pruebas de centrifugación es de este estilo, específicamente como el ejemplo A de la Figura 32. Este tipo de equipo cuenta con un tambor rotatorio y un rascador que gira con una velocidad menor en una relación de 1:40 a 1:120. El ejemplo B presenta una centrífuga granular que trabaja por lotes. La centrífuga C es llamada de disco y boquillas, y su funcionamiento se debe a que la suspensión alimentada se desplaza hacia la periferia y con ayuda de los discos troncónicos, el sólido logra descender y el líquido se desplaza hacia arriba por lo que la boquilla de entrada actúa como regulador del caudal de sólidos (Martín, 2011).

Figura 32. Tipos de centrífugas comunes con sedimentación



(Martín, 2011)

4) Tamices

Existen varios tipos de tamices utilizados dentro de la industria, uno de ellos siendo el de parrillas. Este tipo de tamiz consta de una parrilla inclinada de barras o telas metálicas. Para tamizar se coloca la muestra granulada en la parte superior del tamiz y se permite que los sólidos grandes rueden hacia el final de la parrilla mientras que los sólidos con una granulometría menor a la separación de las barras o de la tela caigan y sean recolectados debajo de la parrilla. Este tipo de tamiz suele usarse para separaciones que consisten en poca cantidad de sólidos finos (McCabe, 2007).

Los tamices giratorios también se hacen presentes en la industria. Este tipo de equipos consisten en dos tamices, uno encima del otro, que están sostenidos en una carcasa inclinada entre 16° y 30° respecto a la horizontal. Al igual que en los de parrilla, la mezcla es colocada en la parte superior. Luego los tamices, junto a la carcasa, empiezan su etapa de giro en un plano vertical utilizando como eje horizontal el punto medio entre la carga y descarga del equipo. Normalmente trabajan a velocidades entre 600 y 1800 revoluciones por minuto. Las partículas grandes de la muestra caen dentro de recolectores colocados en los extremos de los tamices mientras que los finos pasan por la malla del tamiz hacia una tolva de descarga (McCabe, 2007).

También existen tamices que utilizan vibración para hacer la operación de separación de sólidos. A diferencia de los tamices giratorios, estos tamices operan con rapidez y una amplitud pequeña por lo que se obstruyen menos. Sin embargo, los sistemas vibratorios solo pueden trabajar con 3 tamices dentro de ellos. Comúnmente las vibraciones trabajadas son de entre 1800 a 3600 revoluciones por minuto y requieren una potencia de 3 kW (McCabe, 2007).

El proceso de tamizaje es importante para la reducción de sólidos finos que pudieran interferir en el proceso de cocción y posterior fermentación del mosto. Esta interferencia también puede llegar a afectar en la calidad final de la cerveza y en la estandarización de su color y aroma ya que el uso de estos finos puede alterar las propiedades que ya se han estipulado. También al momento del filtraje de la cerveza los finos pueden llegar a causar problemas al tapar dichos filtros de manera más recurrente.

5) Equipos auxiliares

a) Bombas

En caso un líquido no puede ser transportado desde un tanque hasta otro por medio de gravedad, se debe utilizar una bomba. Estos aparatos incrementan la energía mecánica de los líquidos al aumentar su velocidad, presión, elevación o cualquier combinación de estas 3 características. Existen dos clases de bombas, las bombas de desplazamiento positivo y las bombas centrífugas (McCabe, 2007).

b) Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas de desplazamiento positivo aplican presión al líquido de manera directa utilizando un pistón reciprocante. Su funcionamiento también puede estar basado en miembros rotatorios que forman, de manera alternada, cámaras llenas o vacías del líquido en cuestión. Existen tres tipos principales de bombas de desplazamiento positivo: peristálticas, reciprocantes y rotatorias. La principal diferencia entre ellas recae en que en las bombas reciprocantes la cámara es un cilindro estacionario que contiene un émbolo o pistón. En el caso de las bombas rotatorias es la misma cámara la que se mueve de la entrada hasta la descarga y de regreso al punto de carga, trasladando una cantidad determinada de flujo en cada ciclo. Finalmente, las bombas peristálticas constan de un tramo de tubería flexible la cual es comprimida por una succión de rodillos móviles. Este tipo de bombas, a pesar de ser a prueba de fugas, solo pueden utilizarse para flujos pequeños (McCabe, 2007).

c) Bombas centrífugas

Por su parte, las bombas centrífugas generan altas velocidades mediante rotación. Esto hace que la energía cinética que poseía el líquido se convierta en energía de presión, es decir en energía mecánica mediante el uso de fuerza centrífuga. El líquido suele entrar a estas bombas de manera constante mediante la conexión de succión que se encuentra concéntrica al eje del elemento giratorio de alta velocidad denominado rotor. El rotor cuenta con aspas radiales que hacen que el

líquido se mueva hacia el exterior por la parte interior de dichas aspas, dejando el rotor a una velocidad considerablemente más alta que a la velocidad de entrada. Para un funcionamiento correcto, el espacio existente entre las aspas nunca se encuentra libre de líquido para evitar cavitación. Una vez el líquido deja las aspas del rotor, este se desplaza por la coraza hasta la salida de la bomba que debe encontrarse tangencial al punto de entrada (McCabe, 2007).

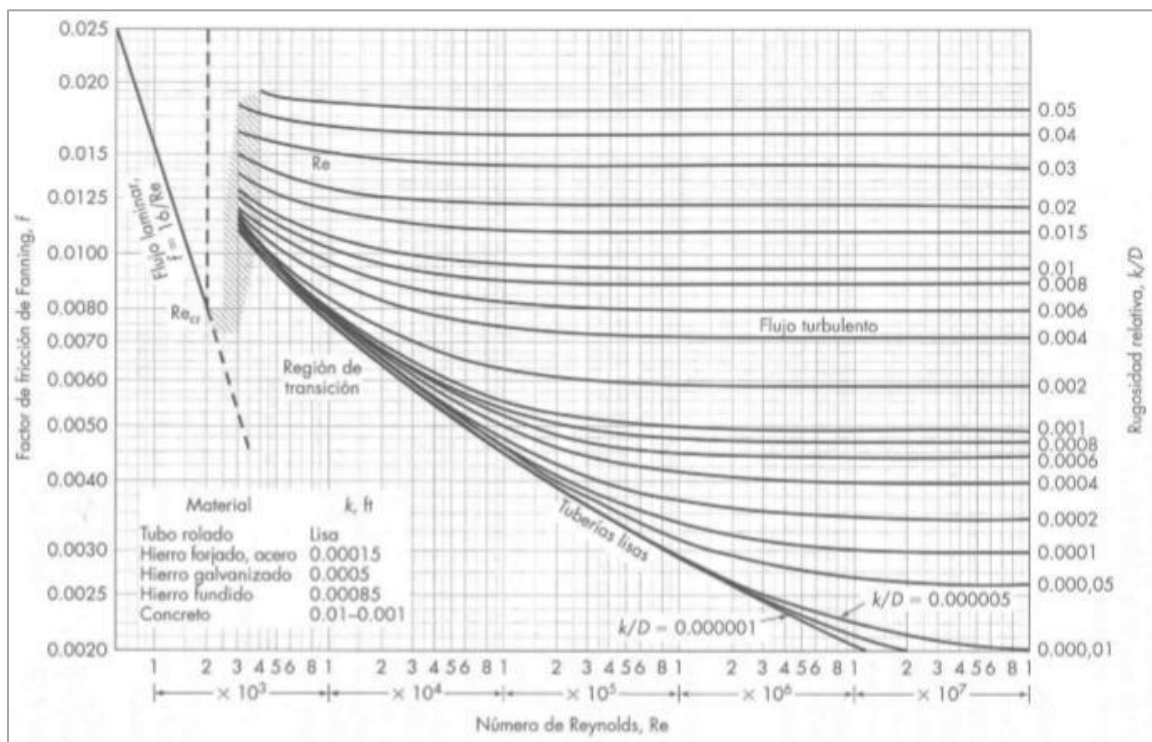
Para calcular el trabajo requerido por una bomba centrífuga se utiliza la ecuación de Bernoulli, representada en la ecuación 34. Esta ecuación utiliza de referencia un punto de carga, denominado A, y un punto de descarga, denominado B. Cada punto utiliza su respectiva presión (P_A o P_B) ya sea la atmosférica si el punto de succión está abierto o una presión diferente ya sea un tanque cerrado, por ejemplo. También se necesita la densidad (ρ_A o ρ_B) del líquido con el que se esté trabajando. Es importante recalcar que el uso de cualquier tipo de bombas genera un cambio en la densidad del líquido despreciable por lo que la misma se puede considerar constante. Con esta suposición y asumiendo que, tanto el punto de carga como descarga, se encuentren abiertos a la atmósfera, estas partes de la ecuación de Bernoulli normalmente se cancelan (McCabe, 2007).

Ecuación 34. Bernoulli para una bomba centrífuga

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZ_A}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} + nWp = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZ_B}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

Para el cálculo de potencia de la bomba partiendo de la ecuación de Bernoulli, es necesario conocer el factor de fricción de Fanning, un dato que puede ser obtenido leyendo la figura 8 utilizando el número de Reynolds y el valor de la rugosidad relativa, k/D . Más adelante en los cálculos es necesario usar la tabla 2 para conocer los coeficientes de las pérdidas por fricción en accesorios de tubería. Estos datos son necesarios para el cálculo de pérdidas por fricción totales, h_f .

Gráfica 1. Gráfica del factor de fricción para tuberías circulares



(McCabe, 2007)

Cuadro 10. Coeficientes de pérdidas por fricción en accesorios de tuberías

Accesorio	K_f
Codo estándar	
45°	0.35
90°	0.75
T	
En líneas rectas	0.4
Usados como codo	1.0
Retorno, 180°	1.5
Válvula de compuerta	
Semiabierta	4.5
Completamente abierta	0.17
Válvula de ángulo, completamente abierta	2.0
Válvula de globo, completamente abierta	6.0

(McCabe, 2007)

6) Tuberías

Los fluidos suelen transportarse en tuberías que varían en su sección transversal, espesor de pared y en el material de construcción. Aunque no existe una definición estricta entre tubería y tubo, como regla gruesa la tubería tiene un espesor de pared grande con diámetros relativamente grandes y largos entre 6 a 12 metros. Los tubos, mientras tanto, cuentan con paredes delgadas y vienen en rollos de cientos de pies (McCabe, 2007).

Tanto para tubería como para tubos, las paredes internas de estos tienen rugosidad que afecta el transporte del fluido por lo que afecta la presión necesaria de la bomba para ganarle a la caída de presión del sistema con el que se esté trabajando. Dentro de las tuberías consideradas, los tubos de acero inoxidable presentan una rugosidad menor a la que presentan los tubos de hierro galvanizado. Los tubos pueden fabricarse de una amplia gama de opciones, incluidas: metales, aleaciones, cerámica, plástico, vidrio, entre otros. La selección del material depende directamente del uso que se le brindará a la tubería. Por ejemplo, los tubos de cloruro de polivinilo, mejor conocido como PVC, son muy utilizados en el transporte de aguas residuales. Para procesos que usan agua, como calderas, se suele utilizar hierro negro que es un acero con bajo contenido de carbono. Para plantas de procesos alimenticios, se debe usar tubería de grado alimenticio o, como mínimo, tubería de acero inoxidable. Sin importar el material, los tramos de tubería suelen unirse por medio de bridas, roscas, accesorios de roscas, accesorios de compresión o por soldaduras (McCabe, 2007).

Para el transporte de líquidos también puede considerarse el uso de mangueras industriales. Sin embargo, para la selección de las mangueras se debe tener en cuenta las condiciones de temperatura y presión del proceso con el que se trabajará. Esto se debe a que temperaturas elevadas pueden afectar la naturaleza de las mangueras en caso estas no estén diseñadas para soportar niveles altos de temperatura. De igual manera las mangueras presentan mayores pérdidas de presión (McCabe, 2007).

7) Descarte de sólidos suspendidos

Durante el proceso de producción de la cerveza, la producción de sólidos es inevitable, por lo que encontrar un uso para dichos subproductos es más eficiente que simplemente descartarlos. Al ser subproductos de un proceso alimenticio, estos sólidos todavía contienen diferentes nutrientes y almidones que deben ser aprovechados. Esto hace que el principal uso de dichos residuos sea para concentrado animal. Según Kerby (2017), esta opción representa un 80% del uso dado a los residuos sólidos, especialmente por cervecías artesanales. La siguiente opción más utilizada es la

de creación de compostaje o fertilizante a partir de las levaduras que son extraídas de la cerveza. Las opciones del uso de estos sólidos son tan amplias que se han utilizado para hacer rellenos en obras de construcción. Sin embargo, más del 50% de las cervecerías artesanales optan por no dar un uso a sus subproductos sólidos y simplemente los descartan por el drenaje.

7. CONTROL DE CALIDAD

En la elaboración de cerveza es importante tener puntos de control que permitan realizar un análisis de los parámetros que podrán determinar que el producto final es de calidad. Existen ciertos reglamentos que permiten realizar las metodologías específicas para medir dichas características (Maldonado Cardona, 2012).

1. Análisis de materias primas

Dentro de los requisitos de calidad, se encuentra el análisis a las materias primas, es decir, determinar que todas aquellas características y especificaciones de los ingredientes que se van a utilizar estén en buenas condiciones. Dentro de dichos análisis se pueden mencionar: el análisis completo del agua, controles analíticos como humedad, proteínas, poder enzimático, rendimiento y demás de la malta y adjuntos, controles de alfa ácidos, aceites esenciales, frescura y otros del lúpulo y ausencia de contaminaciones y recuento de levaduras. Esto permite determinar cualquier variabilidad en un lote antes de la siguiente elaboración y garantizar desde el inicio el control de calidad del proceso (QABrewer, 2016).

Durante el proceso de la elaboración de la cerveza artesanal, es necesario definir parámetros significativos en cada etapa y guardar un registro de estos. Dentro de ellos pueden mencionarse: tiempo, temperatura, pH, densidad, color, proteínas solubles, porcentajes de azúcares, entre otros que a veces es posible medirlos en tiempo real o pueden medirse antes y después de realizado un proceso específico (QABrewer, 2016).

2. ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS

Este tipo de análisis son característicos para determinar los parámetros físicos del líquido que se evaluará, dentro de ellos se pueden mencionar: Turbidez, pH, conductividad, sólidos disueltos y temperatura. También se realizan los análisis químicos los cuales, para la cerveza son: el grado de alcohol, oxígeno disuelto, el contenido de gas carbónico y el amargor (COGUANOR, 2002).

3. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Los microorganismos están presentes en diversas superficies y espacios, dentro de ellos se pueden mencionar: bacterias, hongos y virus (Pascual Anderson, Calderón, & Pascual, 2000). Un

grupo grande de dichos organismos se caracteriza por ser patógenos para el ser humano y por lo mismo, la ciencia y sus diversas aplicaciones se han encargado de crear diferentes metodologías que permitan controlar la calidad de los productos que tendrán contacto con el ser humano para evitar que éste se contagie y se contamine de ellos (Camilo, Sanchez, Alberto, Gil, & Katherine, 2016).

Existen ciertos microorganismos que son marcadores y su presencia en alimentos o bebidas indica la posible presencia de microorganismos patógenos relacionados. En la industria, se realiza un análisis con bacterias entéricas indicadoras para determinar *Escherichia coli*, coliformes termotolerantes y coliformes totales (Gutiérrez, 2000). Las coliformes termotolerantes se caracterizan por un grupo de bacterias gram-negativo que son capaces de fermentar lactosa y producir gas a las 48 h de incubación a una temperatura de 45 °C aproximadamente, mientras que las coliformes totales son un grupo de bacterias gram-negativo, que son bacilos anaerobios o aerobios facultativos y que pueden fermentar lactosa y producir gas y ácido entre las 24 y 48 h de incubación a una temperatura de 37°C. Los 4 géneros que se incluyen en este grupo son: *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella* y *Citrobacter* (Madigan & Martinko, 2006).

a. Metodología del número más probable (NMP) utilizando Colitag™

Dentro de las metodologías que se conocen para determinar las bacterias presentes en diversos alimentos y bebidas se encuentra la determinación de microorganismos por el método del número más probable (NMP) que está determinada por la capacidad que tienen los géneros y especies ya mencionadas anteriormente para fermentar la lactosa produciendo ácido y gas por medio de un cultivo que esté compuesto de sales biliares (Internacional, 2005). Este es un método que se lleva utilizando desde hace mucho tiempo y que presenta datos válidos y en relativamente poco tiempo. Actualmente, existen pruebas basadas en diferentes fundamentos para la detección de coliformes; dentro de ellos, se pueden mencionar las pruebas basadas en reacciones enzimáticas, las cuales se están utilizando con mayor frecuencia (Palintest 2019).

Colitag™ se utiliza específicamente para determinar presencia/ausencia de coliformes totales y/o *E. coli* luego de 24 horas de incubación a 35°C (Palintest 2019). Esta prueba consiste en dos reactivos: ONPG (orto-nitrofenil-β-D-galactopiranosido) y MUG (4-metil-umbeliferil-β-D-glucuronido) que le permiten detectar de manera simultánea, *E. coli* y coliformes totales. El reactivo ONPG reacciona en la presencia de coliformes totales ya que estas producen galactosidasa β-D y eso provoca que se libere un cromógeno amarillo que es fácilmente detectado de manera visual por el analista. A su vez, el reactivo MUG reacciona en presencia de *E. coli* que produce glucuronidasa

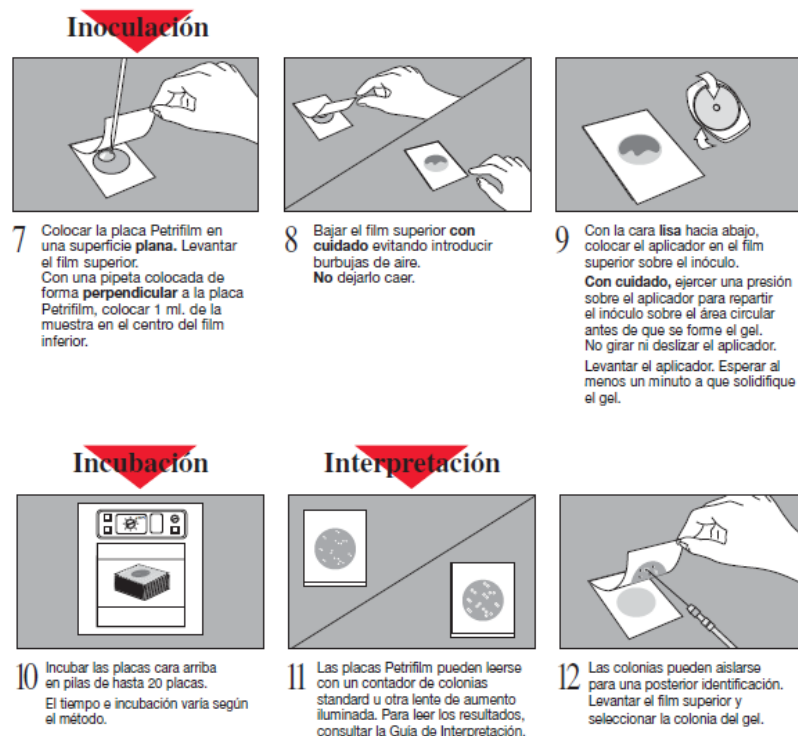
β -D provocando que libera 4-metil umbeliferona que es un fluorógeno azul distintivo que se puede observar bajo luz ultravioleta (365 nm) (Olstadt *et al* 2007). Las pruebas de sustrato enzimático, como Colitag™, para determinación de coliformes totales y *E. coli* en aguas, ha sido aprobada como norma COGUANOR NOG 29018 h21. Si se realiza un procedimiento de NMP, se calcula el valor de NMP para coliformes totales y *E. coli* a partir del número de tubos positivos como se describe en la norma COGUANOR NGO 29001 (COGUANOR 1985).

b. Metodología con uso de placa 3M Petrifilm™

Es un sistema de recubrimiento que fue fabricado por la corporación 3M (Nero, y otros, 2006). Se utiliza para diferentes campos de la microbiología con el fin de realizar cultivos de diversos microorganismos permitiendo que la detección y conteo de éstos sea de manera más eficiente (Watterworth & Scharft, 2005). Generalmente fue creado para que se utilizara en las industrias alimenticias para determinar microorganismos patógenos en alimentos y bebidas diversas de manera rápida y fácil (Silva, Caraviello, Rodrigues, & Ruegg, 2005). Existen diferentes tipos dependiendo de la especificidad con la que se quieran crear por lo mismo, sus ingredientes variarán para ser selectivas, pero en común todas las placas Petrifilm™ tendrán un agente gelificante que es soluble en agua fría, diversos nutrientes para permitir que las bacterias, si hay, se desarrollen e indicadores de actividad (Watterworth & Scharft, 2005).

Estas placas se han utilizado ya que son rentables, simples, no ocupan mucho espacio ni se necesita mucha muestra además de que son cómodas y obtienen resultados relativamente rápido en comparación a otras metodologías que consisten en más procedimientos, más reactivos y medios y se tardan más tiempo (Nero, y otros, 2006). Se ha observado que no existe una diferencia significativa entre el conteo utilizando estas placas con otros métodos como lo sería el vertido en placa de Petri con agar estándar (Watterworth & Scharft, 2005). Su forma de utilización es muy sencilla y consiste en agregar 1 mL de la muestra en el centro de la placa, esparcirla correctamente e incubarla según la especificidad (Figura 33) (3M Corporation, 2003).

Figura 33. Procedimiento para utilizar una placa 3M Petrifilm™ para Recuento de coliformes



(3M Corporation, 2003)

Existen distintos tipos de placas según lo que se desee medir, dentro de las cuales la más conocida es la Placa Petrifilm™ para el Recuento de *E. coli* / coliformes (placa Petrifilm™ EC). Esta se caracteriza por contener nutrientes de Bilis Rojo Violeta (VRB), un indicador de actividad de glucuronidasa BCIG, un indicador de tetrazolio para facilitar el conteo de las colonias y un agente gelificante (3M Corporation 2002). La bacteria *E. coli* se caracteriza por producir β -glucuronidasa por lo que, al reaccionar con el medio, produce a su vez una precipitación azul que se asocia con la colonia. La película superior utilizada en las placas permite atrapar el gas producido por las bacterias fermentadoras de lactosa. Al encontrarse *E. coli* en la muestra, éstas se observan como colonias de color azul o morado-azul con una burbuja de gas atrapado cerca de la colonia (3M Corporation 2006). Por su parte, las coliformes totales durante la fermentación metabólica de lactosa, producen ácido y gas de la lactosa, dicho ácido causa el oscurecimiento del gel y permite una coloración rosada o roja de las colonias. Estas se identifican por medio de dicha coloración y nuevamente, el gas atrapado alrededor de las colonias (3M Corporation 2003).

4. NORMAS GUATEMALTECAS

Para determinar el control de calidad y las especificaciones necesarias para realizar una cerveza, se toman en consideración las normas y métodos establecidos por la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). Para esta parte, se utilizará el criterio microbiológico de la norma COGUANOR NGO 33 006 la cual establece que: la cerveza no deberá tener microorganismos en cantidades que representen un riesgo para la salud del consumidor (COGUANOR 2002). Este estudio también toma como referencia la norma COGUANOR NGO 34 155 h3, que rige el control de calidad para bebidas carbonatadas y explica la metodología para los análisis de microorganismos; sin embargo, es importante mencionar que esta norma fue elaborada para el control de bebidas carbonatadas con valores de pH neutro (COGUANOR 1986). Finalmente, también se hizo revisión de la norma COGUANOR NGO 29 001 específica para agua potable, la cual indica que, en el agua de consumo directo, tanto coliformes totales como *E. coli* no deben ser detectables en 100 mL de muestra (COGUANOR 1985). Además, se determinarán los parámetros fisicoquímicos que deben realizarse, para considerar el producto final de buena calidad y tomando en consideración que se producirá una cerveza tipo IPA, los parámetros que caracterizan este tipo de cerveza son: un pH bajo, una turbidez alta, una coloración pálida ámbar y un grado alcohólico entre 5.1° y 7.6°. El rango deseado de estos parámetros fisicoquímicos también puede consultarse en la norma COGUANOR NGO 33 006, pero se debe tener en cuenta que, dichos parámetros pueden ser diferentes de acuerdo con el tipo de cerveza producido.

5. NORMAS INTERNACIONALES

Dentro de las normas internacionales, se pueden mencionar distintas organizaciones como el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA), el programa de certificación para juzgar cervezas (BJCP por sus siglas en inglés), la organización internacional para estandarización (ISO), entre otras. El primero, el RTCA está conformado por distintas entidades de la administración pública de los países centroamericanos (Guatemala, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Honduras, Panamá) como lo es el ministerio de salud y seguridad alimentaria. Este consiste en distintos reglamentos, de los cuales se pueden mencionar 3: RTCA 67.04.50:17 específico para los criterios microbiológicos para la inocuidad de los alimentos; RTCA 67.01.33:06 específico para la industria de alimentos y bebidas procesados. Buenas prácticas de manufactura. Principios generales y RTCA 67.01.31:07 específico para alimentos procesados. Procedimientos para otorgar los registros y la inscripción sanitarios (RTCA 2017; RTCA, 2006; RTCA, 2013) las cuales no son específicas para

bebidas fermentadas, como la cerveza, pero pueden utilizarse como guía para un control de instalaciones y productos finales. La segunda, BJCP tiene como propósito promover el conocimiento de la cerveza y la apreciación de la verdadera cerveza, la utilizan los jueces para certificar y categorizar los diversos tipos de cerveza que existen. La certificación es un documento con una serie que describe diversos estilos de cervezas y las pautas para ser calificadas, la revisión y actualización más reciente es del año 2015 y en la página web se puede encontrar la actualización más reciente (Beer Judge Certification Program, Inc. 2015). Por último, la organización ISO se encarga de determinar los requisitos específicos para un sistema de gestión de calidad, dentro de ellas, la que más se toma en consideración en la elaboración de productos es la norma ISO 9001:2015 la cual se centra en la eficacia de satisfacer los requisitos del cliente (ISO, 2015). También se puede mencionar la norma ISO 14001:2015 la cual se encarga de determinar los requisitos para la gestión de los riesgos medioambientales que puedan surgir en el desarrollo del producto final. Se puede conseguir una certificación, la cual consiste en distintas auditorías que permiten determinar que se cumplen con todos los requisitos allí descritos y dan mayor validez a la empresa u organización permitiendo fomentar la mejora continua (ISO, 2015).

V. ANTECEDENTES

En la tesis con título “*Acondicionamiento y optimización del agua utilizada para la elaboración de cerveza y servicios*”, se estipula que el equipo principal empleado para filtrar el agua que se obtiene de un río, es el proceso de ósmosis inversa. Esto se debe a que elimina o reduce la gran mayoría de contaminantes presentes en esta agua. El equipo de acondicionamiento propuesto se define de la siguiente manera: el agua permeada será mezclada con agua filtrada y clorada, en tal cantidad que las mezclas cumplan con cada uno de los usuarios, el agua de rechazo del ósmosis se propone darte un tratamiento químico para bajarle la concentración de contaminantes, filtrarla y pasarla después a un sistema de ósmosis, el agua permeada podría ser usada como materia prima en la dilución de la cerveza o bien en otros usos propios de la planta (Benítez, 2002).

En la conferencia impartida por PhD. Claudia Ronquillo, Gerente de Producción de la Cervecería Centro Americana, se hablaron de las etapas del proceso de malteado. Estas etapas fueron: selección de granos, procesos de limpieza, remojo, germinado y secado de granos. Durante la etapa de selección de granos se debe de clasificar la cebada que ingresa al proceso como: cebada de dos hileras o cebada de seis hileras. Para la etapa de limpieza es necesario remover las impurezas que vienen con el grano de cebada. Para el remojo es necesario llegar el porcentaje de humedad del grano a valores superiores a 40%. En el germinado es importante mantener la humedad del grano arriba de 40% y cuidar el crecimiento de acrospire. Para el proceso de secado se desea bajar la humedad del grano a valores estipulados según el tipo de malta que se desee. Lo hablado en esta conferencia fue de vital importancia para entender el proceso de malteado y ver las implicaciones que este tiene en el proceso de fabricación de cerveza.

La cervecería Chamuco, instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, cuenta con una capacidad de producción de 35L/Lote operando a su máxima capacidad de producción, por un periodo de 3 semanas. El estilo de cerveza producido fue del tipo American IPA. Para esto se utilizó cebada previamente malteada, lúpulos Cascade y Fuggles UK, y levadura *Saccharomyces Cerevisiae* SAFALE S-04. El producto final obtenido

contó con un porcentaje de alcohol de 4.7%, con un amargor de 66 IBU. Este producto se embotelló en botellas de 355mL.

La molturación debe ser tanto más fina cuanto peor modificada está la malta. El grado de trituración tiene una influencia decisiva sobre el volumen y la capacidad de filtración de las heces. Para los equipos usuales de filtración de mosto rige: cuanto más fino se moltura, tanto menor será el volumen de las heces. Pero cuanto más fina es la molienda, tanto menos porosa es la torta filtrante, tanto más rápidamente se contrae y tanto mayor es la duración del proceso de filtración de mosto. Puede llegar a suceder que el mosto ya no fluya. Es por esto que no se debe moler demasiado fino al utilizar una cuba de filtración de mosto o se debe reducir la altura de heces, si se moltura más fino (Kunze, 2006).

Cuadro 11. Tamices de molienda de malta

Tamiz No.	Fracción	Diámetro de alambre (mm)	Abertura libre de malla (mm)
1	Cáscaras	0.31	1.27
2	Molienda gruesa	0.26	1.01
3	Molienda fina	0.15	0.547
4	Molienda fina II	0.07	0.253
5	Harina	0.04	0.152
Fondo	Harina fina	-	-

Cuadro 12. Comparación entre molienda fina y gruesa

Molienda fina	Molienda gruesa
Se debe molturar más fino	Se debe molturar más grueso
En maltas con elevado contenido de agua	En maltas con muy bajo contenido de agua
En maltas pobremente modificadas	En maltas bien modificadas y friables
En procesos de maceración poco intensivos	En procesos de maceración intensivos
Cuando el rendimiento de la sala de cocción es pobre	Cuando los tiempos de filtración de mosto son prolongados

Según Beer Judge Certification Program (BJCP) estas son las características vitales de un tipo de cerveza IPA:

Cuadro 13. Características de una Ipa inglesa

Gravedad específica inicial	Gravedad específica final	Grado de amargor (IBU)	Color (Grados Lovibond)	Contenido alcohólico (V/V)
1.050 – 1.075	1.010 – 1.018	40 – 60	8 – 14	5 – 7.5%

Cuadro 14. Características de una IPA americana

Gravedad específica inicial	Gravedad específica final	Grado de amargor (IBU)	Color (Grados Lovibond)	Contenido alcohólico (V/V)
1.056 – 1.075	1.010 – 1.018	40 – 60 +	6 – 15	5.5 – 7.5%

Cuadro 15. Turbidez de cerveza con y sin tamizaje de harinas finas producto de molienda

Sin Tamizaje	Con Tamizaje
>1000 NTU*	980 ± 19.66 NTU

*El valor de turbidez de la suspensión resultante de la cocción, sin realizar un tamizaje de harinas finas, excedía el valor superior que el turbidímetro podía leer.

Cuadro 16. Características iniciales del mosto antes de fermentar en sistema escala laboratorio

Parámetros	Resultado experimental	
Promedio	Desviación estándar	
Densidad del mosto (kg/m ³)	998.000	1.045
°Brix del mosto (±0.01%)	9.958	1.377
pH del mosto (±0.001)	5.848	0.181
Maltosa (±0.0001g/L)	50.598	5.254
Sacarosa (±0.0001g/L)	18.604	2.378
Glucosa (±0.0001g/L)	36.291	1.148
Fructosa (±0.0001g/L)	4.334	0.901

*Los datos teóricos son para una cerveza IPA y los datos experimentales hacen referencia a tres corridas durante la experimentación. Se tomó como referencia un estudio realizado del contenido de los principales azúcares presentes en el mosto de cerveza.

Para complementar la investigación realizada sobre el proceso de fermentación de cerveza artesanal, se realizó una visita a la cervecería El Zapote ubicada en la Finca El Zapote, zona 2 de la ciudad de Guatemala. Se pudo visualizar a gran escala el proceso, los equipos involucrados y las materias primas que utilizan actualmente para la elaboración de cerveza artesanal. Asimismo, fue posible realizar una visita a la cervecería Ambev en Teculután, Zacapa para analizar las diferencias entre los procesos para una cerveza artesanal y para una cerveza comercial.

Se asistió a una conferencia titulada “*Proceso de producción de cerveza: Técnicas y tendencias industriales*” impartida por PhD. Claudia Ronquillo por la Universidad Técnica de Múnich en Alemania y egresada de Ingeniería Química en Guatemala. Se resolvieron dudas sobre el proceso de fermentación y la conferencista explicó que, por ser un proceso pequeño para producir cerveza artesanal, lo más conveniente era utilizar levadura seca directamente para iniciar la fermentación del mosto. Posteriormente, se puede realizar una evaluación de la reproducción de microorganismos previa con fines de reducción de costos y de tiempo de producción. Además, se determinó que en los biorreactores de la industria de cerveza no se utilizan sistemas de agitación mecánicos porque no son indispensables.

Se necesitaba un punto de comparación de resultados experimentales; para ello, se analizó un artículo científico realizado por R. D. Hall y G. Harris, con el nombre de “Carbohidratos en el malteado y la elaboración de cerveza”. Para elaborar el artículo, se estudiaron varios estilos de cerveza, así como las proporciones de los diferentes tipos de malta para cada estilo y realizaron análisis para cuantificar azúcares fermentables iniciales presentes en el mosto. Este fue el punto de partida para analizar los cuatro azúcares predominantes en el mosto de cerveza: maltosa, sacarosa, glucosa y fructosa.

Por otro lado, para el presente trabajo fue necesario obtener la temperatura más alta registrada en el laboratorio de Operaciones Unitarias. En la torre de enfriamiento está localizado un sensor que registra la temperatura más alta diaria, por lo que se tomó el dato para realizar los cálculos del sistema de enfriamiento durante el proceso de fermentación.

Para los cálculos de balances de energía, se utilizaron las propiedades del aire a 1 atm de presión: conductividad térmica, difusividad térmica, Número de Prandtl, viscosidad cinemática y densidad. Estos datos se encuentran en la sección de Anexos (Ver Figura 119 página 469).

Para el diseño del agitador, se utilizó como referencia una tesis cuyo título es: “*Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*”, elaborada por Vladimir Castillo Uribe. En este trabajo se encuentra

toda la información sobre agitadores e impulsores, la teoría que sustenta los cálculos realizados y las especificaciones finales que deben presentarse para ordenar la fabricación de un agitador para un reactor.

Se toma como referencia la norma COGUANOR NGO 33006 para bebidas alcohólicas fermentadas, en el apartado de cervezas. En la norma se encuentran especificaciones con las que debe cumplir la bebida final y principalmente, se tomaron en cuenta para este trabajo los límites de contenido de etanol y metanol, y los de pH final de la bebida.

La norma aplica a la cerveza que se comercializa en el país, ya sea de producción nacional o importada. No aplica a bebidas que por costumbre llevan la denominación de cerveza y que no están comprendidas dentro de la definición establecida en la norma, tales como “cerveza sin alcohol”. (COGUANOR, 2002).

Según la norma, la clasificación de las cervezas es la siguiente:

- De bajo contenido alcohólico: con un grado alcohólico, en porcentaje en volumen, mayor de 0.5% y menor de 2.5%.
- De alto contenido alcohólico: con un grado alcohólico, en porcentaje en volumen, entre 2.5% y 9.0%.
- Cervezas especiales: con un contenido alcohólico, en porcentaje en volumen, entre 9.0% y 13.0%. El contenido alcohólico se realiza generalmente por procesos especiales y debe provenir exclusivamente de la fermentación del mosto con levadura de cerveza.

Los requisitos químicos del producto final son los siguientes:

Cuadro 17. Requisitos químicos para una cerveza según la norma COGUANOR NGO 33006

CARACTERÍSTICA	De bajo y alto contenido de alcohol	Cervezas especiales
	Valor	
Grado alcohólico, en porcentaje en volumen a 20°C	0.5% - 9.0%	9.1% - 13.0%
Extracto original en la cerveza, en grados Plato	6.5° – 18.0°	18.1° – 29.0°
Contenido de gas carbónico (máximo)	0.65%	

CARACTERÍSTICA	De bajo y alto contenido de alcohol	Cervezas especiales
	Valor	
pH	3.9 – 4.5	3.5 – 4.8
Suma de alcoholes superiores, en miligramos por litro (máximo)	160	
Metanol, en miligramos por 1L de producto (máximo)	3	
Valor amargo, en UA (máximo)	55	

(COGUANOR, 2002)

La norma oficial mexicana NOM-199-SCFI-2017 contiene la denominación de las bebidas alcohólicas y establece las especificaciones fisicoquímicas, la información comercial y los métodos de prueba que deben aplicarse para determinar su cumplimiento. Esta norma establece que, para una cerveza tipo Ale, el proceso de fermentación debe realizarse entre 13°C y 25°C. A continuación, se presenta un cuadro con la clasificación de las bebidas alcohólicas en México según su contenido alcohólico en porcentaje en volumen:

Cuadro 18. Clasificación general de las bebidas alcohólicas

Clasificación	Contenido alcohólico
Bebidas alcohólicas fermentadas	2% a 20% Alc. Vol.
Bebidas alcohólicas destiladas	32% a 55% Alc. Vol.
Licores o cremas	13.5% a 55% Alc. Vol.
Cocteles	12% a 32% Alc. Vol.
Bebidas alcohólicas preparadas	2% a 12% Alc. Vol.

(Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017)

La norma mexicana difiere de la norma guatemalteca en cuanto al límite máximo permitido de contenido alcohólico para cerveza, la cual se describe en la norma como “bebida alcohólica fermentada elaborada con malta, lúpulo, levadura y agua potable”. A continuación, se presenta un cuadro con los límites permitidos de alcohol, metanol, acidez total, pH, contenido de plomo y arsénico en la cerveza.

Cuadro 19. Especificaciones de la cerveza

ESPECIFICACIONES	LÍMITES	
	Mínimo	Máximo
Contenido de alcohol a 20°C (%Alc. Vol)	2	20
Metanol (mg/100mL de alcohol anhidro)	-	300
Acidez Total (como ácido láctico en g/L)	-	10
Ph	2.5	5
Plomo (mg/L)	0	0.5
Arsénico mg/L)	0	0.5

(Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017)

Las normas DIN son los estándares técnicos para el aseguramiento de la calidad en productos industriales y científicos en Alemania. Las siglas DIN significan “Deutsches Institut für Normung” que en español significa “Instituto Alemán de Normalización”. Estas normas representan regulaciones que operan sobre el comercio, la industria, la ciencia e instituciones públicas respecto del desarrollo de productos alemanes y realizan las mismas funciones que organismos internacionales como la International Organization for Standardization (ISO). Los resultados del trabajo de DIN sirven para avanzar en la innovación, seguridad y comunicación entre la industria, las organizaciones de investigación, el sector público y la sociedad en su conjunto para apoyar la garantía de calidad (Solares, 2013).

Algunos de los accesorios y equipos auxiliares seleccionados para el fermentador cumplen con la norma DIN, como en el caso de la válvula de alivio o de seguridad con respecto a sus conexiones estándar. Contar con equipos y accesorios que cumplen con esta norma y sus estándares, permite asegurar la calidad del proceso.

Algunos datos recopilados en este trabajo, provienen del módulo de “Implementación de procesos de preparación y cocción de malta para una planta piloto de producción de cerveza artesanal tipo India Pale Ale”. Además, el mosto recibido de la parte de enfriamiento después de la cocción tiene características que se han visto afectadas por este módulo y por el de “Propuesta del equipo necesario para realizar los procesos de acondicionamiento de agua y malteado de cebada para la producción de cerveza tipo IPA”. Por lo anterior, es importante mencionar que las condiciones iniciales del mosto recibido por parte de estos dos módulos fueron críticas para la obtención de etanol durante el proceso de fermentación en este módulo.

Dentro de la producción de la cerveza artesanal, los niveles de turbidez o de sólidos suspendidos es una de las pocas características que no posee parámetros establecidos que deban cumplirse. Esto se debe a que cada estilo de cerveza, por su método de fermentación y cocción, genera diferentes productos en términos de turbidez. El único parámetro que se debe seguir es el de la turbidez que cada compañía ha establecido a su producto final y que dicha turbidez no afecte otros procesos de la producción.

Los resultados de turbidez que se logran encontrar son principalmente para cervezas tipo “lager” ya que este tipo de cerveza son las más producidas a nivel industrial por las grandes compañías cerveceras. Reportado por Rodríguez (2003), la turbidez promedio de la cerveza estilo lager producida industrialmente por cierta fábrica chilena fue de 2.41 °EBC con un rango de variación de 0.03 y límites estadísticos superiores e inferiores de 1.86 y 2.96 °EBC, respectivamente. Dentro del estudio algunos valores reportados excedían los límites estadísticos de turbidez, fenómeno que se explica a partir de una saturación de los filtros o de una mala sedimentación posterior al fermentado. Se debe recordar que la turbidez generada en el proceso de producción de una cerveza lager es diferente al de una cerveza IPA (cerveza producida en la planta descrita en este informe). Se encuentra reportado por Suárez (2016) que las levaduras usadas en los procesos de fermentación de cerveza llegan a tener diámetros de entre 4 y 5 μm con volúmenes y densidades despreciables.

La capacidad de la planta de cerveza artesanal instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias cuenta con una producción de 35 L/lote a máxima capacidad en un periodo de 3 semanas. El estilo IPA fue producido con un tipo de levadura *Saccharomyces cerevisiae* llamado Saf-Ale S-04 y con lúpulos estilo Cascade y Fuggles. El producto final contó con un porcentaje de alcohol de 4.72%, con una turbidez de 333 NTU, con un amargor de 65 IBUs y fue embotellada en botellas de vidrio color ámbar de 355 mL.

La planta está diseñada para trabajar desde el malteado de la cebada en una cama construida específicamente para ello, la cual cuenta con un sistema de iluminación e irrigación. Posterior al malteado, se muele la malta y se hace una cocción previa a la generación del mosto, dentro de un tanque con agitación. Luego se transporta al fermentador donde el producto se queda 3 semanas, 2 de ellas fermentando y una de ellas madurando. El fermentador cuenta con un sistema de enfriamiento para la etapa de maduración ya que esta se debe dar a temperaturas cercanas a los 0 °C. Una vez madurada, la cerveza se traslada al sistema de filtración con el propósito de reducir la turbidez. Se plantean otras formas de reducción de sólidos suspendidos, incluidas el tamizaje de

malta molida, sedimentación de la cerveza fermentada y su centrifugación continua. Posteriormente, esta se transporta nuevamente al fermentador donde será carbonatada. Aquí se hace uso del sistema de enfriamiento nuevamente ya que la carbonatación también se debe realizar a temperaturas cercanas a 0 °C. Finalmente la cerveza se traslada al sistema de embotellado. Un esquema general de la planta de producción se puede observar en las Figuras 102 y 103 en la sección de anexos (Ver páginas 456 y 457).

Para complementar la investigación realizada sobre el proceso de elaboración de cerveza artesanal, los puntos críticos de control y los análisis microbiológicos y fisicoquímicos que se realizan, se realizó una visita a la cervecería El Zapote ubicada en la Finca El Zapote, zona 2 de la ciudad de Guatemala. Se pudo visualizar a gran escala el proceso, los equipos involucrados y las materias primas que utilizan actualmente para la elaboración de cerveza artesanal. Asimismo, fue posible realizar una visita a la cervecería Xamán, ubicada en el Km 22.5 Carretera a El Salvador, Ecoplaza Bodega #416, en Fraijanes para determinar el proceso de elaboración de la cerveza artesanal y realizar preguntas acerca de los análisis que se realizan para determinar que el producto final es adecuado.

En la conferencia titulada “*Proceso de producción de cerveza: Técnicas y tendencias industriales*” impartida por PhD. Claudia Ronquillo se resolvieron dudas sobre el proceso de elaboración de la cerveza. En la conferencia, se hablaron de las etapas del proceso de malteado. Estas etapas fueron: selección de granos, procesos de limpieza, remojo, germinado y secado de granos. Durante la etapa de selección de granos se debe clasificar la cebada que ingresa al proceso como: cebada de dos hileras o cebada de seis hileras. Para la etapa de limpieza es necesario remover las impurezas que vienen con el grano de cebada. Para el remojo es necesario llegar el porcentaje de humedad del grano a valores superiores a 40%. En el germinado es importante mantener la humedad del grano arriba de 40% y cuidar el crecimiento de acrospire. Para el proceso de secado se desea bajar la humedad del grano a valores estipulados según el tipo de malta que se desee. También se mencionó que, por ser un proceso pequeño para producir cerveza artesanal, lo más conveniente en el proceso de fermentación, era utilizar levadura seca directamente para iniciar la fermentación del mosto. Posteriormente, se puede realizar una evaluación de la reproducción de microorganismos previa con fines de reducción de costos y de tiempo de producción. Además, se determinó que en los biorreactores de la industria de cerveza no se utilizan sistemas de agitación mecánicos porque no son indispensables. La conferencista comentó que, para los análisis de la cerveza final producida, se toman en consideración el conteo de coliformes totales, *E. coli* por medio de la metodología de número más probable.

Para la correcta caracterización microbiológica y fisicoquímica de la cerveza final producida por la planta piloto, se tomaron en consideración algunas metodologías, condiciones y resultados obtenidos y realizados por los módulos anteriores. En el módulo titulado: Propuesta del equipo necesario para realizar los procesos de acondicionamiento de agua y malteado de cebada para la producción de una cerveza tipo IPA se consideraron las metodologías de Placas de recuento bacteriano Petrifilm™ 3M para determinar que el agua obtenida por los filtros del Laboratorio de Operaciones unitarias era inocua. Además, se consideraron parámetros fisicoquímicos de la misma como determinación de metales y sólidos disueltos los cuales cumplían con la norma COGUANOR NGO 29 001.

Del módulo titulado: *Implementación de procesos de preparación y cocción de malta para una planta piloto de producción de cerveza artesanal tipo India Pale Ale* se tomaron en consideración las metodologías para la elaboración del mosto. Las cuales consistieron en la adquisición de cebada en el mercado La Palmita, en zona 5 de la Ciudad de Guatemala. Esta cebada fue tratada para permitir la remoción de materias gruesas, de partículas ligeras y de granos descartados. Para la primera separación se utilizó un separador con una malla de 2.00 mm de Mesh, para la segunda separación se realizó un sistema de separación compuesto por una caja separadora y un ventilador y para la tercera separación se utilizó una bolsa fabricada con una malla de 2.5 mm de Mesh. Se toma en consideración también las condiciones en las que se realizaron los procedimientos como lo fueron: un remojo de la cebada durante 4 días cambiando el agua cada 6 horas y aireación de esta 1 hora en cada cambio. Se realizó el proceso de germinación por aproximadamente 96 – 100 horas en donde se atomizaba la cebada periódicamente con agua para mantenerla húmeda durante las primeras 72 horas de germinación. Para el secado de las dos maltas que se utilizaron, la primera se dejó secando durante 9 horas a una temperatura de 45°C mientras que la segunda se dejó secando durante 2 horas a 66°C, luego 30 min a 77°C y por último 2 horas y 30 min a 115°C. Para el proceso de cocción se calentó el mosto de maceración a 96°C durante 1 hora y se agregó el lúpulo a los minutos de cocción de 5, 30 y 60 respectivamente.

Del módulo titulado: *Escalamiento e implementación del proceso de fermentación de mosto empleando levadura tipo Ale para la producción de cerveza* se debe tomar en consideración las condiciones a las cuales se realizó la fermentación. El mosto luego del proceso de cocción se transportó al garrafón correspondiente para el proceso de fermentación. A éste, además del mosto, se le agregó la cantidad de aproximadamente 7.5 gramos de levadura seca *Saccharomyces cerevisiae* tipo SafAle S-04. El garrafón se sumergió en agua con hielo para permitir que el sistema se enfriara y dejarlo a la temperatura idónea para que la levadura pudiera realizar el proceso de

fermentación de manera óptima. La temperatura promedio a la cual se dejó el producto fue de 21.5°C midiendo cada cierto tiempo la temperatura y agregando hielo de ser necesario para permitir que la temperatura no saliera de los límites esperados. La fermentación se llevó a cabo en las primeras dos semanas y el proceso de maduración se llevó a cabo en 1 semana posterior al proceso de fermentación. Para la maduración se colocó en un recipiente apropiado y debidamente sellado y se almacenó en una refrigeradora con capacidad de temperatura de -4°C.

Del módulo titulado: *Implementación de equipo de filtración para planta piloto de producción de cerveza artesanal*, se tomaron en consideración los tres métodos propuestos para la filtración del producto final obtenido luego del proceso de fermentación y antes de ser éste carbonatado. Se consideró un filtro de 1.00 μm , el proceso de centrifugación y la utilización de un filtro comercial. Además de ello, se tomó también en consideración las medidas obtenidas de turbidez. Dentro de los parámetros fisicoquímicos que se evalúan en la cerveza artesanal final producida, la turbidez es de las pocas características que no posee parámetros establecidos que deban cumplirse. Esto se debe a que cada estilo de cerveza, por su método de fermentación y cocción, genera diferentes productos en términos de turbidez. Los resultados de turbidez que se logran encontrar son principalmente para cervezas tipo “lager” ya que este tipo de cerveza son las más producidas a nivel industrial por las grandes compañías cerveceras. Se debe tomar en consideración que la turbidez generada en el proceso de producción de una cerveza lager es diferente al de una cerveza IPA (cerveza producida en la planta descrita en este informe).

Del módulo titulado: *Implementación al proceso de producción de cerveza un sistema de embotellado manual para cerveza tipo “IPA”* se tomó en consideración la metodología realizada para el lavado de botellas de vidrio reutilizadas para el proceso de embotellado, la cual consistió en someter cada botella a una presión tratando de eliminar cualquier residuo posible además de un posterior lavado minucioso con agua y con jabón. Se tomó en consideración un criterio de rechazo, de las botellas muy sucias o ya rajadas. Esto para considerar la posible contaminación de microorganismos u otros contaminantes en la cerveza final producida.

La cervecería Chamuco, instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, cuenta con una capacidad de producción de 35L/Lote operando a su máxima capacidad de producción, por un periodo de 5 semanas. El estilo de cerveza producido fue del tipo American IPA. Para esto se utilizó cebada previamente malteada, lúpulos Cascade y Fuggles UK, y levadura *Saccharomyces Cerevisiae* SafAle S-04. El producto final obtenido contó

con un porcentaje de alcohol de 4.7%, con un amargor de 66 IBU. Este producto se embotelló en botellas de 355mL.

VI. METODOLOGÍA

A. ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

1. Determinación del cumplimiento de parámetros de acondicionamiento del agua que ingresa al proceso

Se realizó un esquema del sistema de condicionamiento de agua que está en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (Ver Figura 242, de Anexos página 541).

Se abrió la válvula bola que permite el paso del agua de pozo hacia el sistema de filtración.

El agua de pozo fluyó por los siguientes equipos que componen el sistema de filtración:

- Filtro de sedimento de microfibra
- Filtro de columna de carbón activado
- Lámpara de luz UV

Para tomar la muestra de agua, se dejó que esta fluyera por aproximadamente cinco minutos. Todo esto para evitar tomar una muestra de agua estancada en los filtros ya que estos no están siempre en funcionamiento.

Se tomó una muestra de 1L del agua que salía del sistema de filtración, utilizando una probeta, previamente esterilizada para evitar contaminación.

Se utilizó el equipo Hach DR890 y el Multiparámetros (Ver figuras 145 y 146 de Anexos, página 492) para medir los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua. Las metodologías utilizadas fueron las siguientes:

Cuadro 20. Metodologías utilizadas para la medición de parámetros fisicoquímicos del agua que sale del sistema de acondicionamiento.

Parámetro	Equipo	Metodología
Temperatura	Multiparámetro PCSTestr 35	Medición <i>in situ</i>
Potencial de hidrógeno	HACH DR/890 COLORIMETER	Phenol Red Method 10076
Dureza total	HACH DR/890 COLORIMETER	Calmagite Colorimetric Method 8030
Conductividad eléctrica	Multiparámetro PCSTestr 35	Medición <i>in situ</i>
Olor	----	Medición <i>in situ</i>
Color real	HACH DR/890 COLORIMETER	APHA Platinum-Cobalt Standard Method 8025
Sólidos Suspendidos	HACH DR/890 COLORIMETER	Photometric Method 8006
Turbiedad	HACH DR/890 COLORIMETER	Absorptometric Method 8237
Calcio	HACH DR/890 COLORIMETER	Calmagite Colorimetric Method 8030
Cloruros	HACH DR/890 COLORIMETER	DPD Method 8167
Cloro residual	HACH DR/890 COLORIMETER	DPD Method 8021
Magnesio	HACH DR/890 COLORIMETER	Calmagite Colorimetric Method 8030

Parámetro	Equipo	Metodología
Nitratos	HACH DR/890 COLORIMETER	Cadmium Reduction Method 8171
Nitritos	HACH DR/890 COLORIMETER	Ferrous Sulfate Method 8153
Sodio	----	----
Sulfatos	HACH DR/890 COLORIMETER	SulfaVer 4 Method 8051

Nota: Si se desea más información del manual, acceder a <https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639982259>

Todas las mediciones se realizaron en triplicado para poder hacer análisis estadístico (Ver cuadros 72 y 73, de Anexos, página 287 y 289).

Se realizó el promedio de las tres mediciones (cuadros 135 y 137, de Anexos páginas 374 y 376).

El valor reportado fue comparado con el Límite Máximo Aceptable (LMA) y Límite Máximo Permisible (LMP) establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 (Ver figuras 110, 111 y 112 de Anexos páginas 463 y 464); también fue comparado con la guía para calidad del agua potable de la OMS (Ver Cuadros 136 y 138, de Anexos páginas 375 y 377).

De acuerdo con la comparación se determinó el cumplimiento del valor del parámetro fisicoquímico, de la siguiente manera:

- Colocando “SÍ”, si el valor era igual o menor al LMA.
- Colocando “NO”, si el valor era mayor al LMA o al LMP.

El cumplimiento fue reportado en los cuadros 25 y 26, de la sección de Resultados en las páginas 157 y 158.

Se realizó el mismo procedimiento de los pasos 7-11 para todos los parámetros fisicoquímicos.

Para la medición de los parámetros microbiológicos, se utilizó lo siguiente:

Cuadro 21: Metodologías utilizadas para la medición de parámetros microbiológicos s del agua que sale del sistema de acondicionamiento.

Parámetro	Equipo	Metodología
Coliformes totales	- Placas de recuento de bacterias (Petrifilm® 3M) - Incubadora.	Número Más Probable (NMP) Unidades Formadoras de Colonias (UFC)
Coliformes fecales	- Placas de recuento de bacterias (Petrifilm® 3M) - Incubadora.	Número Más Probable (NMP) Unidades Formadoras de Colonias (UFC)
<i>E. Coli</i>	- Placas de recuento de bacterias (Petrifilm® 3M) - Incubadora.	Número Más Probable (NMP) Unidades Formadoras de Colonias (UFC)

Para realizar el recuento bacteriano se tomó una muestra de agua que sale de los filtros.

De la muestra de agua se tomó una alícuota de 1mL utilizando una pipeta volumétrica de 1mL.

Para la medición de estos parámetros se utilizaron Petrifilm® 3M y una incubadora Quincy Lab Inc (Ver Figuras 147 y 148, de Anexos página 493).

Se colocó la placa Petrifilm® 3M sobre una superficie plana.

Se levantó el film superior que cubre la placa.

Se colocó 1mL de la muestra en el centro del film inferior a la placa y se bajó el film superior, de manera que no se formen burbujas durante ese procedimiento.

Se ejerció presión sobre la placa para sellarla.

Se encendió la incubadora, abrieron las compuertas y se colocaron las placas dentro de ella.

La temperatura de la incubadora se ajustó en 37°C.

Las placas se dejaron dentro de la incubadora por 24h para recuento de *E. Coli* y 48h para recuento de coliformes fecales y totales.

Todas las mediciones se realizaron en triplicado. (Ver Cuadro 74, de Anexos, página 290). El valor reportado fue comparado con el parámetro establecido en la norma COGUANOR NGO 29001 (Ver Figura 113, de Anexos página 464) y la guía para calidad del agua potable de la OMS (Ver Cuadro 140, de Anexos, página 378).

De acuerdo con la comparación se determinó el cumplimiento del valor del parámetro microbiológico, de la siguiente manera:

Colocando “SI”, si el valor cumplía con el establecido en la norma.

Colocando “NO”, si el valor no cumplía con el establecido en la norma.

El cumplimiento fue reportado en el Cuadro 27, de Resultados página 160.

Se realizó un balance de masa del sistema existente de acondicionamiento de agua del Laboratorio de Operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala (Ver Figura 244, de Anexos, página 545).

2. Determinación del cumplimiento de parámetros de perfil de agua que ingresa al proceso

Con los valores fisicoquímicos obtenidos en la sección A, se realizó una comparación de los parámetros químicos que dictan el perfil de agua para una cerveza tipo IPA, según la norma BJCP 2008 (Ver Figura 114, de Anexos, página 491).

De acuerdo con la comparación se verificó el cumplimiento de los parámetros químicos que dictan el perfil de agua para una cerveza tipo IPA, de la siguiente manera:

Colocando “SÍ”, si el valor se encontraba dentro del rango establecido por la norma.

Colocando “NO”, si el valor se encontraba fuera del rango establecido por la norma.

El cumplimiento fue reportado en el Cuadro 28, de Resultados página 161.

De acuerdo con el cumplimiento se realizó una tabla de puntaje del perfil de agua según la norma BJCP 2008 (Ver Figura 114, de Anexos, página 465). El valor fue reportado en el Cuadro 29 de Resultados, página 162.

3. Propuesta de sistema de acondicionamiento de agua

Se buscó una válvula que estuviera conectada a un pozo y proporcionara agua de pozo cerca del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Se tomó una muestra de 1L del agua de pozo, utilizando una probeta marca, previamente esterilizada para evitar contaminación.

Se utilizó el equipo Hach DR890 y el Multiparámetros (Ver Figuras 145 y 146 de Anexos, página 492) para medir los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua. Los parámetros microbiológicos se calcularon utilizando Petrifilm® 3M y una incubadora Quincy Lab Inc (Ver

Figuras 147 y 148, de Anexos página 493). Las metodologías utilizadas fueron las establecidas en los Cuadros 20 y 21, de la parte A, de Metodología páginas 100 y 102.

Los valores medidos sirvieron para poder ser dados al proveedor de los equipos a seleccionar en caso de que este quisiera un análisis fisicoquímico del agua de pozo.

Los valores se reportaron en las Figuras 108 y 109 de Anexos páginas 461 y 462.

Según el análisis de agua de pozo, se determinó que los equipos adecuados serían:

- Bomba dosificadora de cloro.
- Filtro de sedimentos.
- Filtro de columna de carbón activado.
- Lámpara de luz UV.

Se calculó el caudal (flujo de diseño) de la tubería de agua de pozo, utilizando una probeta de 1L, un cronómetro marca CASIO (Ver Figuras 150 y 151, de Anexos, páginas 494 y 495) y la Ecuación 2.

Las mediciones de volumen y tiempo de llenado fueron colocadas en el Cuadro 75, de Anexos, página 291.

Los valores calculados de caudal fueron reportados en el cuadro 141, de Anexos, página 379.

Se realizó un promedio de los datos de caudal obtenidos.

Conociendo el caudal como primer parámetro de especificación, se procedió a calcular las demás especificaciones importantes, según cada equipo de acondicionamiento.

Para el clorador se determinó lo siguiente:

La dosis de hipoclorito de sodio (tomando un valor promedio de $2.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$).

El volumen de la solución de hipoclorito de sodio, utilizando la Ecuación 1. Determinada de acuerdo con volumen actual de agua a desinfectar (35L). También se determinó a el doble y triple de volumen de agua a desinfectar (Por si en algún futuro se desea doblar o triplicar la producción de cerveza).

Valor inicial de cloro residual (tomado del análisis fisicoquímico del agua de pozo).

El valor objetivo de cloro residual a tener en el tanque de descarga (fijado en $< 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ para cumplir con la norma COGUANOR NGO 2008).

Los valores calculados fueron colocados en el Cuadro 142, de Anexos, página 379.

Para el filtro de sedimentos se determinó lo siguiente (Ver Figura 57, de Anexos, página 415):

- Diámetro de filtro, utilizando la Ecuación 3.
- Área de filtro, utilizando la Ecuación 4.
- Flujo de retrolavado, utilizando la Ecuación 5.
- Los valores calculados fueron colocados en el Cuadro 143, de Anexos, página 380.

Para el filtro de columna de carbón activado se determinó lo siguiente (Ver Figura 58, de Anexos, página 417):

- Diámetro de filtro, utilizando la Ecuación 3.
- Área de filtro, utilizando la Ecuación 4.
- Flujo de retrolavado, utilizando la Ecuación 5.
- Los valores calculados fueron colocados en el Cuadro 144, de Anexos, página 380.

Para la lámpara de luz UV se determinó lo siguiente:

- Dosis UV, utilizando la Figura 61 de Anexos, página 420.
- Porcentaje de reducción de microorganismos, utilizando la Figura 118 de Anexos, página 468.
- Los valores determinados fueron colocados en el Cuadro 145, de Anexos, página 381.

Para el filtro pulidor se determinó lo siguiente:

- Diámetro y largo del filtro, utilizando el manual del fabricante.
- Cartucho filtrante, utilizando como base el tamaño de partícula del carbón activado.
- Los valores determinados fueron colocados en el Cuadro 146, de Anexos, página 381.

Para el tanque de almacenaje y post acondicionamiento de agua se determinó lo siguiente:

- Diámetro y largo, utilizando el volumen deseado de agua a utilizar.
- Tiempo de llenado, utilizando el caudal de diseño que sale de la lámpara de luz UV.

- Los valores determinados fueron colocados en el Cuadro 147, de anexos, página 382.

La bomba del recirculado del tanque hacia la lámpara de luz UV, se determinó tomando en cuenta el caudal calculado en el paso 10.

Con las especificaciones importantes de cada equipo determinadas, se procedió a buscar un clorador, un filtro de sedimentos, un filtro de columna de carbón activado y una lámpara de luz UV en el manual de compra del proveedor.

Se seleccionaron los equipos que tuvieran las especificaciones más similares a las determinadas.

Las especificaciones importantes del equipo seleccionado se reportaron en el Cuadro 30, de Resultados, página 162.

Para el filtro de sedimentos y columna de carbón activado se seleccionó el material filtrante adecuado. Los materiales seleccionados se reportaron en el Cuadro 30, de Resultados, página 162. Las especificaciones del material filtrante fueron colocadas en Anexos.

B. PROCESO DE MALTEADO DE CEBADA

Se realizó un balance de masa del proceso de malteado (previo al proceso de secado). El balance de masa se reportó como las Figuras 245, 246 y 247 Anexos, páginas 546, 547 y 548.

Para adquirir la cebada fue necesario ir al mercado La Palmita, en la zona 5 de la ciudad de Guatemala.

Dependiendo de la disponibilidad de cebada en los distintos puestos, se compraban de 15 a 20 libras (6.80 y 9.00 kg) del producto por cada lote de cerveza a realizar.

La cebada era inmediatamente colocada en bolsas de plástico para evitar que perdiera su humedad y que se contaminara con agentes externos.

Se examinó la cebada para saber si se trataba de una cebada de dos o seis hileras. Si los granos eran del mismo diámetro (4 mm aproximadamente) se trataba de cebada de 2 hileras; si los granos eran de distinto diámetro (unos de 4 mm y otros de 2 mm) se trataba de cebada de 6 hileras.

Manualmente, se tomó una muestra de un gramo de cebada para poder hacer un análisis de humedad.

Se utilizó una balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120 (Ver Figura 152, de Anexos, página 495). La medición se realizó de la siguiente manera:

Se encendió la balanza de humedad.

Se taró el recipiente de recepción de la balanza.

La muestra de un gramo fue colocada en el recipiente circular de la balanza.

Se cerró la cabina de la balanza.

La temperatura de secado fue programada a 80°C.

Se dejó que la balanza determinara el porcentaje de humedad.

El valor reportado al final de la medición fue colocado en el Cuadro 151, de Anexos, página 383.

La muestra de cebada fue sacada de la balanza y posteriormente se desechó.

La cebada fue almacenada en un recipiente de plástico para, nuevamente, evitar su contaminación por agentes externos y conservar el porcentaje de humedad medido previamente.

La cebada era almacenada hasta su posterior uso en el proceso de malteado.

1. Tratamientos previos

Para el primer paso del proceso de malteado (tratamientos previos) se tomaba aproximadamente de 15 a 20 libras (6.80 y 9.00 kg) de cebada.

El lote de cebada era sometido a un proceso de limpieza, para asegurar su inocuidad. El proceso tenía la función de remover: 1) materias gruesas, 2) partículas ligeras y 3) granos descartados.

El proceso fue realizado de la siguiente manera:

Para la remoción de materias gruesas (primera separación) se utilizó un separador con una malla de 2.00 mm de mesh. Durante este proceso el lote de cebada era colocado por partes y tenía que ser movido a lo largo de la malla.

Se colocó una bolsa debajo de la malla para recolectar las materias gruesas.

La cebada era pesada al finalizar el proceso, utilizando una balanza marca OHAUS, modelo 3000 (Ver Figura 153, de Anexos, página 496). El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 149, de Anexos, página 382.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones del primer separador, la cual corresponde a la Figura 64 de Anexos, página 424. También se realizó un diagrama del equipo, correspondiente a la Figura 96 de Anexos, página 450.

Para la remoción de partículas ligeras (segunda separación) se realizó un sistema de separación compuesto por: 1) una caja separadora, 2) un ventilador.

Se realizó un diagrama en AutoCAD para saber la cantidad de material a utilizar en la construcción del segundo separador (Ver Figura 97, de Anexos, página 451).

Los materiales utilizados para la construcción de la caja separadora fueron:

Cuadro 22: Material utilizado en la construcción del segundo separador.

Material	Dimensiones	Número de piezas
Cartón piedra	0.20 m largo x 0.20 m alto	1
Ventilador	0.40 m alto	1

En la cara frontal y trasera de la caja, se cortó un círculo de diámetro de m.

Se pegaron todas las piezas de cartón a modo de formar una estructura rectangular.

Se acopló la caja separadora al ventilador por medio de cinchos plásticos.

La cebada era colocada en un recipiente de plástico y se trasvasaba a otro recipiente de plástico. El trasvase se realizó enfrente del flujo de aire del ventilador, pasando por la caja separadora, para que las partículas ligeras fueran arrastradas por la corriente de aire.

El proceso de trasvase se realizaba aproximadamente 10 veces, hasta que la corriente de aire se viera limpia de partículas ligeras.

La cebada era pesada al finalizar el proceso, utilizando una balanza marca OHAUS, modelo 3000 (Ver Figura 153, de Anexos, página 496). El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 149, de Anexos, página 382.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones del segundo separador, la cual corresponde a la Figura 65 de Anexos, página 425.

Para la remoción de granos descartados (tercera separación) se utilizó una bolsa fabricada con una malla de 2.5 mm de mesh. La cebada era colocada dentro de la bolsa y esta se agitaba para que salieran los granos partidos o demasiados pequeños.

La cebada que salía del proceso fue pesada, utilizando una balanza marca OHAUS, modelo 3000 (Ver Figura 153, de Anexos página 496). El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 149 de Anexos, página 382.

Las impurezas (granos descartados) eran desechadas.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones del tercer separador, la cual corresponde a la Figura 66 de Anexos, página 426. También se realizó un diagrama del equipo, correspondiente de la Figura 98 de Anexos, página 452.

Para determinar la cantidad de impurezas removidas durante cada etapa de separación se utilizaron las Ecuaciones 6, 7 y 8. Los datos obtenidos fueron reportados en el Cuadro 149, de Anexos, página 382.

El proceso de tratamientos previos se realizó para cada lote de cebada.

Se realizó un promedio de la cantidad de impurezas removidas de todos los lotes. Este valor se reportó en el Cuadro 150, de Anexos, página 383.

En base al promedio se calculó el porcentaje de impurezas removidas según la etapa del proceso de limpieza. Los valores obtenidos fueron reportados en el Cuadro 151, de Anexos, página 383.

Con el promedio de impurezas removidas, se realizó un gráfico de pie para mostrar de mejor manera la distribución del porcentaje. El gráfico corresponde a la Figura 46 de Anexos, página 202.

2. Remojo

Después del proceso de tratamientos previos, el lote de cebada fue colocado en una cubeta de plástico.

La cubeta se llenó con agua a 22°C, hasta que el nivel estuviera 10 cm por encima de la cama de cebada.

La cebada se remojó durante 4 días, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:
El agua era cambiada cada 6 horas (durante el día).

Cada vez que se cambiada el agua la cebada era agitada para homogenizar la posición de los granos dentro de la cubeta.

Antes de colocar nuevamente agua en la cubeta, la cebada se dejaba aireando por aproximadamente media hora.

La humedad del lote de cebada era medida cada 24 horas, utilizando una balanza marca OHAUS, modelo MB 120 (Ver Figura 152, de Anexos, página 495). El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 78, de Anexos, página 292.

Las mediciones de humedad fueron realizadas en triplicado para poder hacer análisis estadístico.

El promedio de las tres mediciones fue reportado en el Cuadro 151, de Anexos, página 383.

Las mediciones de humedad se realizaron hasta que el grano contara con un 45% - 50% de humedad.

Se realizó el promedio de porcentaje de humedad de todos los lotes de cebada. El valor obtenido fue reportado en el Cuadro 151, de Anexos, página 383.

Con los valores de humedad obtenidos se realizó un gráfico del porcentaje de humedad de la cebada según el tiempo de remojo. El gráfico corresponde a la Gráfica 47 de Anexos, página 475.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones del tanque de remojo, la cual corresponde a la Figura 67 de Anexos, página 426; También se realizó un diagrama del equipo (Ver Figura 99, de Anexos, página 453).

3. Germinado - Planchas

Después del proceso de remojo, el agua fue removida de la cubeta.

Para el proceso de germinado se construyeron planchas de germinado.

Se realizó un diagrama en AutoCAD para saber la cantidad de material a utilizar en la construcción de la plancha (Ver Figura 100, de Anexos, página 454).

Se cortaron las piezas necesarias de material para armar la estructura de la plancha de germinado, presentes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

El material utilizado para la construcción de la plancha de germinado fue el siguiente:

Cuadro 23: Material utilizado en la construcción de la plancha de germinado.

Material	Dimensiones	Número de piezas
Plancha de acero galvanizado	0.95 m largo x 0.30 m alto	1
Tubo cuadrado de acero galvanizado de 0.0127m	0.20 m largo	4
Barra plana de acero galvanizado de 0.0127m	0.85 m largo	2
Barra plana de acero galvanizado de 0.0127m	0.45 m largo	2
Tubo angular de acero galvanizado de 0.0127m	0.85 m largo	2
Malla de acero de 2.5 mm (mesh 7)	0.85 m largo x 0.20 m alto	1
Varilla de acero de 3/8 in (0.009 m)	0.15 Largo	2

Se dobló la plancha de acero galvanizado a modo de formar una estructura hueca rectangular.

Se doblaron las varillas de acero para formar un mango

Se soldaron las piezas de acero galvanizado para formar una estructura rectangular.

Se soldaron las varillas de acero a la estructura anterior. Una en la cara frontal de la plancha y otra en la cara trasera.

La malla fue colocada en la parte superior de la plancha de germinado.

La estructura finalizada se muestra en la Figura 100 de Anexos, página 454.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones de las planchas de germinado, la cual corresponde a la Figura 68 de Anexos, página 427.

La cebada se colocó uniformemente en la malla de la plancha de germinado.

La cebada se dejó germinar por aproximadamente 96-100 horas, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

La cebada era atomizada con agua periódicamente para mantenerla húmeda (solamente de las 0 a 72 horas).

Se realizaron mediciones del largo del acrospire cada 24, utilizando una regla (Ver Figura 149, de Anexos, página 494). Para esto se seleccionaron granos al azar a lo largo de toda la plancha. El valor reportado por se colocó en el Cuadro 79, de Anexos, página 293.

Las mediciones se realizaron en triplicado para poder hacer análisis estadístico y análisis de error.

El promedio de las mediciones fue reportado en el Cuadro 152, de Anexos, página 385.

Se realizaron mediciones de humedad cada 24 horas, utilizando la balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120 (Ver Figura 152, de Anexos, página 495). Esto permitía verificar que la cebada estuviese lo suficientemente húmeda para llevar a cabo el proceso de germinado sin ninguna interrupción. El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 78, de Anexos, página 292.

En el rango de las 72 a 96 horas, no se atomizó con agua la cebada. Esto para lograr un secado natural y hacer que la cebada llegará a un porcentaje de humedad de aproximadamente de 15%, para detener el germinado.

4. Germinado – Caja

Para un mejor proceso de germinado se diseñó una caja de germinado.

Se realizó un diagrama en AutoCAD para saber la cantidad de material a utilizar en la construcción de caja (Ver Figura 101, de Anexos, página 455).

Se cortaron las piezas necesarias de material para armar la estructura de la caja de germinado, presentes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

El material utilizado para la construcción de la caja de germinado fue el siguiente:

Cuadro 24: Material utilizado en la construcción de la caja de germinado.

Material	Dimensiones	Número de piezas
Tubo angular de acero galvanizado de 0.0254m	2.00 m largo	8
Tubo angular de acero galvanizado de 0.0254m	1.00 m largo	8
Tubo angular de acero galvanizado de 0.0254m	0.50 m largo	6
Barra plana de acero galvanizado de 0.0254m	0.95 m largo	7
Malla de acero de 2.5 mm (mesh 7)	2.00 m largo x 1.00 m de alto	1
Malla de acero de 0.03 m	2.00 m largo x 1.00 m de alto	1
Malla de acero de 0.03 m	1.00 m largo x 1.00 m alto	2
Polietileno de alta densidad (negro)	2.00 m largo x 0.50 m alto	2
Polietileno de alta densidad (negro)	1.00 m largo x 0.50 m alto	2
Polietileno de alta densidad (negro)	2.00 m largo x 1.00 m alto	2
Foco LED	0.03 m de diámetro de rosca	2
Plafonera de plástico	0.05 m de diámetro general 0.03 m de diámetro de rosca	2
Cable eléctrico paralelo calibre 14 AWG (2.08 mm ²)	5.00 m largo	1
Espiga eléctrica tipo A	0.035 m de largo 0.03 m de alto 0.150 e ancho	1

Se soldó las piezas de acero galvanizado para formar una estructura rectangular.

Se soldó las distintas mallas de acero a la estructura anterior.

Se pegó el nylon a les estructura formada en el paso 44.

Se colocaron las respectivas plafoneras en la parte superior interior de la caja de germinado.

Se colocaron los focos LED en las plafoneras.

Se realizó la conexión eléctrica de las plafoneras hacia la espiga, utilizando el cable paralelo.

Se soldaron las bisagras en la parte frontal y lateral de la caja, y a estas se soldaron las puertas.

La estructura finalizada se muestra en la Figura 101 de Anexos, página 455.

Se realizó una ficha técnica con las características y especificaciones de la caja de germinado, la cual corresponde a la Figura 69 de Anexos, página 428.

La cebada se colocó uniformemente a lo largo de recámara de germinado.

La cebada se dejó germinar por aproximadamente 96-100 horas, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

La cebada era atomizada con agua periódicamente para mantenerla húmeda (solamente de las 0 a 72 horas).

Se realizaron mediciones del largo del acrospire cada 24h, utilizando una regla (Ver Figura 149, de Anexos, página 494). Para esto se seleccionaron granos al azar a lo largo de toda la plancha. El valor reportado por hora se colocó en el Cuadro 79, de Anexos, página 293.

Las mediciones se realizaron en triplicado para poder hacer análisis estadístico y análisis de error.

El promedio de las mediciones fue reportado en el Cuadro 152, de Anexos, página 385.

Se realizaron mediciones de humedad cada 24 horas, utilizando la balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120 (Ver Figura 152, de Anexos, página 495). Esto permitía verificar que la cebada estuviese lo suficientemente húmeda para llevar a cabo el proceso de germinado sin ninguna interrupción. El valor reportado por la balanza se colocó en el Cuadro 78, de Anexos, página 292.

En el rango de las 72 a 96 horas, no se atomizó con agua la cebada. Esto para lograr un secado natural y hacer que la cebada llegará a un porcentaje de humedad de aproximadamente de 15%, para detener el germinado.

Se realizó el promedio del largo del acrospire de todos los lotes de cebada (ya sea en plancha o en la caja). El valor fue reportado en el Cuadro 152, de Anexos, página 385.

Con los valores de largo del acrospire obtenidos, se realizó un gráfico del largo de acrospire según el tiempo de germinado. El gráfico corresponde a la Gráfica 48 de Anexos, página 476.

Se determinó la intensidad lumínica de los focos de la caja de germinado, utilizando un Light Meter marca EXTECH (Ver Figura 155, de Anexos, página 497). El valor obtenido fue reportado en el Cuadro 76, de Anexos, página 291.

5. Tratamientos posteriores

Tanto para los lotes realizados en las planchas de germinado como para los realizados en la caja de germinado, se calculó el porcentaje de conversión de la cebada de la siguiente manera:

Utilizando la malla presente en la plancha de germinado o en la caja de germinado, se separó la cebada que no había germinado.

Se pesó la cebada que no había germinado utilizando una balanza marca OHAUS, modelo 3000 (Ver Figura 153, de Anexos, página 496). Los datos fueron reportados en el Cuadro 149 de Anexos, página 382.

Se utilizó la Ecuación 9 para calcular el porcentaje de rendimiento.

- Los valores obtenidos fueron reportados en el Cuadro 153, de Anexos, página 386.
- La cebada que si germinó fue entregada al Módulo 2.

6. Propuesta de equipo para malteado de cebada

Las especificaciones importantes del equipo de malteado de cebada se colocaron en el Cuadro 31, de Resultados, página 166.

Se realizó un Diagrama 3D de la planta de producción de cerveza (Ver figuras 102 y 103, de Anexos, página 456).

7. Propuesta de modelo para determinar la concentración de azúcares fermentables el día de germinado de cebada

La cebada se sumergió en agua y se dejó reposar por dos días. El agua era cambiada cada seis horas (Ver Figura 127, de Anexos página 483)

Después de los dos días de remojo, se trasladó la cebada a una plancha de germinado (Ver Figura 128, de Anexos, página 483).

Cada día, una muestra de 63 g cebada era retirada y secada al sol (para detener el germinado). Las muestras recolectadas eran guardadas en recipientes cerrados para evitar su contaminación. Esto se realizó por seis días.

La malta fue molida utilizando un mortero y pistilo (Ver Figura 129, de Anexos, página 484).

El producto obtenido se colocó en un beaker con 190 mL de agua filtrada a 66°C (macerado). Se agitó el mosto por aproximadamente una hora, teniendo especial cuidado de la temperatura. (Ver Figura 130, de Anexos, página 484).

Se agregó al mosto 200 mL de agua de lavado a 75°C. Se agitó por aproximadamente quince minutos (Ver Figura 131, de Anexos, página 485).

El mosto se filtró para eliminar los residuos de malta y se colocó en un frasco (Ver Figura 132, de Anexos, página 485).

Las siete muestras (Ver Figura 133, de Anexos, página 486) se llevaron al laboratorio de análisis instrumental avanzado para su análisis en el equipo HPLC (Ver Figura 154, de Anexos, página 496).

De cada frasco se tomó una muestra y se colocó en los viales especiales del equipo (Ver Figura 134, de Anexos, página 486).

Se esperó el resultado proporcionado por el equipo HPLC (Ver Figuras 179, 180, 181, 182, 183, 184 y 185 de Anexos, páginas 509 a 512). Los resultados obtenidos fueron colocados en el Cuadro 37, de Resultados, página 179.

De acuerdo con los cromatogramas obtenidos se construyó la curva de cinética de reacción, graficando:

- Concentración de azúcares fermentables (g/100 mL) vs tiempo de germinado (horas).
La gráfica obtenida corresponde a la Gráfica 49 de Anexos, página 477.

Según el comportamiento de la cinética, se aplicó una regresión cuadrática para poder determinar el modelo.

La ecuación determinada se reportó en la Figura 34, de Resultados, página 170.

Debido que para las 96 horas el modelo determinado no era muy precisa, fue necesario aplicar una regresión solamente a los días 72, 92 y 120 horas para tener una mayor exactitud. Se realizó otra gráfica solamente para esos días. El gráfico corresponde a la Gráfica 50 de Anexos, página 478.

El nuevo modelo determinado se reportó en la Figura 34, de Resultados, página 170.

C. SECADO DE MALTA, MACERACIÓN Y COCCIÓN

1. Materiales y equipo

Bandejas de deshidratador de gabinetes de dimensiones: 0.47m X 0.80m

Deshidratador de gabinetes

Malta verde

Lúpulo Cascade

Lúpulo Fuggles

Balanza de humedad OHAUS modelo MB 120

Secador de rodillos

Tamiz Rotap con tamices de malla 20, 30, 45, 60, 80, 100

Estufa eléctrica de inducción

Balanza OHAUS modelo T31P Balanza analítica OHAUS modelo V31XH2

Termómetro de bulbo (0-100°C)

Amperímetro de gancho marca Fluke

Contador eléctrico deshidratador de gabinetes

Vernier

Cinta métrica

Densímetro de triple escala para vino y cerveza

Probeta de 100mL

Probeta de 2 litros

Cedazo

Taquímetro marca Extech

2. Secado de malta base

Se midió la humedad de granos de malta verde en la balanza de humedad OHAUS

Se introdujo al proceso de secado la malta verde con humedad de un 15%

Se forró bandejas del deshidratador de gabinetes con papel aluminio

Se colocó malta verde sobre las bandejas, esparcida por la bandeja sin colocar unos granos sobre otros

Se colocaron bandejas metálicas dentro del deshidratador de gabinetes

Se fijó temperatura en deshidratador a 45°C por 9 horas

Se midió humedad cada hora en balanza de humedad OHAUS para construir curva de secado

Se cambió de lugar las bandejas

Se almacenó malta en una bolsa

Se pesó producto secado

3. Secado de malta caramel

Se midió la humedad de granos de malta verde en la balanza de humedad OHAUS

Se introdujo al proceso de secado la malta verde con humedad de un 15%

Se forró bandejas del deshidratador de gabinetes con papel aluminio

Se colocó malta verde sobre las bandejas, esparcida por la bandeja sin colocar unos granos sobre otros

Colocar bandejas dentro del deshidratador de gabinetes

Se fijó la temperatura en 66°C por dos horas en el deshidratador

Se fijó la temperatura en 77°C por media hora

Se fijó la temperatura en 115°C por 2.5 horas

Se midió la humedad final

Pesar producto secado

4. Reducción de tamaño

Se midió la longitud más pequeña de los granos de malta de cebada con vernier

Se separó con el volante en el secador de rodillos la distancia a 2 mm

Se encendió el secador de rodillos

Se fijó la velocidad de rodillos en 30.8 rpm

Se midió la corriente en el equipo con un amperímetro de gancho

Se colocó la bandeja del deshidratador en la descarga del secador para recibir producto molido

Se pesó la malta molida

5. Granulometría

Se pesaron los tamices de tamiz Rotap con malla No. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y plato

Se colocó producto molido en el primer plato (malla No. 20)

Se encendió separador por 5 minutos

Se pesaron los tamices de equipo Rotap nuevamente

Se calculó, por resta, la masa de malta retenida en cada tamiz

Se calculó el porcentaje de masa de molienda en cada tamiz

Se descartó los sólidos menores a malla No. 100 (último plato)

6. Maceración

Se utilizó programa de cerveza para arreglar receta de cerveza tipo IPA

Se pesó malta base en una relación de 85% en balanza móvil OHAUS

Se pesó malta caramel en una relación de 15% en balanza móvil OHAUS

Se calentó en hornilla relación de 3 litros por cada kg de malta a procesar, a 75°C

Se midió volumen de agua en probeta de 2 litros

Se colocó mezcla de maltas en agua y se agitó

Se fijó la temperatura de mezcla de agua y malta en 66°C por una hora

Se agitó para evitar aglomeración

Se filtró con bolsa de cedazo afrecho de agua

Se colocó mosto filtrado en olla en estufa

7. Lavado de granos

Se calentó el mismo volumen de lavado de granos que en la maceración

Se midió el volumen en probeta de 2 litros

Se calentó agua en una hornilla a 75°C

Se colocó afrecho procedente de maceración en agua a 75°C

Se agitó para homogenizar solución

Se filtró el afrecho con cedazo

Se trasvasó el mosto resultante junto con el mosto de maceración

Se pesó el afrecho y se midió humedad, puesto que es residuo de proceso

8. Cocción

Se mezcló el mosto de maceración y lavado de granos

Se elevó la temperatura hasta punto de ebullición

Se midió el tiempo por 1 hora luego de alcanzar el punto de ebullición

Se calculó amargor de cerveza a partir de adiciones de lúpulo

Se añadió 40 gramos de lúpulo Cascade al comienzo de la ebullición, es decir, minuto 60

Se agitó la solución

Se añadió 20 gramos de lúpulo Cascade al minuto 30

Se añadió 20 gramos de lúpulo Fuggles al minuto 5

Se finalizó la ebullición, después de una hora de hervor

Se separó el lúpulo con coladores

Se tomó muestra y se midió gravedad específica con densímetro, hasta que se alcanzara temperatura de 20°C

Se enfrió el mosto con un baño de agua

Se midió el volumen de mosto con probetas de 2 litros

Se colocó en mosto en garrafón para su seguida fermentación

9. Azúcares fermentables

En conjunto con el módulo de fermentación, se caracterizaron azúcares en el mosto antes de fermentar.

Para la detección de azúcares presentes, se trabajó con un cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) marca Agilent serie 1100 con un detector marca Agilent serie 1200 (Ver Figura 154, de Anexos, página 496).

Para iniciar con el uso del equipo, se preparó una solución madre y a partir de esta, soluciones que actuaron como estándares para la curva de calibración del método. Es importante mencionar que este método utiliza agua como fase móvil.

Para la preparación de la solución madre, se pesó 1.0g de maltosa, 1.0g de sacarosa, 2.0g de glucosa y 2.0g de fructosa. Todos los azúcares se disolvieron en agua y se aforó la solución en un balón de 50 ml. La solución final tiene una concentración de 40mg/ml de fructosa y glucosa, y 20mg/ml de sacarosa y maltosa.

Para preparar los estándares, se tomaron alícuotas de 7 ml, 5 ml, 4ml y 1ml de la solución madre y se aforó en balones de 50 ml. La primera solución de la curva tuvo una concentración de 0.8 mg/ml para glucosa y fructosa y 0.4 mg/ml para maltosa y sacarosa. La segunda solución,

2.4mg/ml para glucosa y fructosa y 1.2 mg/ml para sacarosa y maltosa. La tercera solución, 4.0 mg/ml para glucosa y fructosa y 2.0 mg/ml para sacarosa y maltosa. Por último, la cuarta solución tuvo una concentración de 5.6mg/ml para glucosa y fructosa y 2.8 mg/ml para sacarosa y maltosa. Se prepararon las muestras para su ingreso al equipo. Se utilizó una jeringa de 10 ml y microfiltros Millipore Millex-GV de 0.22 μ m para agregar entre 1.0ml y 1.5ml en viales de 2.0 ml. Con un sellador de viales, se cerraron los viales con sus respectivas tapas.

Se rotularon las muestras para facilitar la configuración del equipo al realizar los análisis.

Se utilizó una columna Aminex HPX-87K de 300.0mm x 7.8mm. Esta columna es ideal para la separación de alta calidad de glucosa, maltosa y maltotriosa (Ver Figura 176, página 507).

Se encendió el equipo y se configuró el método de cuantificación de azúcares. Se colocaron las muestras en el automuestreador.

Para este análisis, se inyectan primero los estándares de la curva de calibración y las muestras al final. El método muestra los cromatogramas con los picos característicos y calcula de forma instantánea el porcentaje masa/volumen de los azúcares en cada muestra (g/100ml).

Se realizó la conversión de concentración en g/100 ml a unidades en g/L

10. Identificación de equipos disponibles

Se identificó equipos disponibles para los procesos involucrados en el laboratorio de operaciones unitarias

Se identificó el deshidratador de gabinetes para el secado y tostado de malta

Se midió temperaturas cambiando la altura dentro del deshidratador a distintas temperaturas de operación

Se calculó consumo energético de equipo a temperaturas de operación

Se identificó el secador de rodillos para la reducción de tamaño de grano de malta

Se calculó consumo energético de equipo a partir de datos de motor

Se identificó tanque para maceración y cocción de mosto

Se identificó agitador en tanque

Se calculó el volumen disponible en el tanque de maceración

11. Instalación de bomba y tuberías

Se midieron las dimensiones de área de planta piloto

Se midió capacidad de tanques

Se calculó largo de tuberías y accesorios necesarios para conectar tanques

Se calculó potencia de bomba necesaria

Se instaló bomba atornillada a el piso

Se instaló eléctricamente cableado de bomba con espiga

Se colocó tubo flexible alrededor del cableado eléctrico

Se cortó tubos necesarios y se hizo tarraja en ambos extremos

Se enrolló teflón en uniones

Se acopló accesorios como T, reductores, válvulas y uniones universales desde el tanque de maceración, pasando por la bomba y el fermentador

12. Dimensionamiento de calor

Se realizó el balance de masa y energía del proceso

Se calculó el volumen de fermentador

Se calculó sobre volumen disponible de fermentador, cantidades de agua y malta en macerador, según balance de masa y energía

Se calculó demanda térmica durante los procesos

Se instaló aislamiento térmico en tanque de planta piloto

Se calculó flujo de vapor necesario durante los procesos

Se definió diámetro de tubo de serpentín

Se calculó área de serpentín

Se calculó el largo del serpentín

13. Estadística

Se realizaron 3 lotes de mosto de volumen de alrededor de 16 litros

Se calculó humedad promedio de maltas y desviación estándar

Se calculó porcentaje de masa promedio en cada malla del tamiz y su desviación estándar

Se calculó con ecuación Rager el amargor del mosto promedio y desviación estándar (ver ecuación 1)

Se calculó la gravedad específica promedio y desviación estándar (Ver análisis estadístico)

Se calculó el color en grados Lovibond promedio y desviación estándar

D. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA DE CERVEZA

1. Materiales, cristalería, reactivos y equipos

a. Materiales

Garrafón de 20 litros

Manguera de vinil con diámetro de 0.0095m (3/8’')

Manguera de vinil con diámetro de 0.0063m (1/4’')

Contenedor de plástico de 40L

Contenedor de plástico de 60L

Termómetro de alcohol

Densímetro o alcoholímetro

Cuchilla

Pegamento epoxipol

Espátula analítica

Espátula

Bolsas de basura negras

Tubería de hierro galvanizado de 0.00127m (1/2’')

Soporte de metal

Pinzas de laboratorio

6 tubos de centrifuga

Gradilla

Jeringa de 10 mL

Microfiltros Millipore Millex-GV de 0.22 μ m

Sellador de viales

Pipeteador Transferpette Brand

Jeringa de 10µL

Micropipeta con rango de 1µL a 20µL

Micropipeta con rango de 20µL a 200µL

b. Cristalería

Pipeta graduada de 10 mL

Pipeta volumétrica 1 mL

Probeta de 50 mL

Probeta de 25 mL

Probeta de 10 mL

Probeta de 100 mL

Balón aforado de 50 mL

Vidrio de reloj

Beaker de 50 mL

5 tubos de ensayo de 20mL

20 frascos de vidrio con tapadera de 250 mL marca Wheaton

Viales de 2.0 mL

c. Reactivos

Hidróxido de sodio (NaOH) 1% m/v

Ácido fosfórico (H₃PO₄) 1% m/v

Desinfectante amoniacal diluido según instrucciones del fabricante

Levadura Saf-Ale S-04 (*Saccharomyces Cerevisiae*)

Azúcar

d. Equipos

Balanza analítica BOECO Germany. Ver Figura 81 y Figura 166 (páginas 439 y 502)

Refractómetro digital ATAGO Rx-5000i. Ver Figura 82 y Figura 167 (páginas 440 y 503).

Potenciómetro Fisher Scientific Accumet AB15 Plus. Ver Figura 83 y 169 (página 441 y 504).

Picnómetro de 25 mL. Ver Figura 171 página 505.

Autoclave o esterilizador Sterilmatic marca Market Forge. Ver Figura 84 y Figura 165 (páginas 441 y 502).

Baño térmico Thermo Scientific ARTIC A10. Ver Figura 85 y Figura 168 (páginas 442 y 503).

Incubadora con sistema de agitación New Brunswick Scientific Serie G25. Ver Figura 86 página 442.

Centrífuga CFW500 Vector Inverter.

Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) marca Agilent serie 1100 con detector marca Agilent serie 1200 utilizando una columna Aminex HPX-87K de 300.0mm x 7.8 mm. Ver Figura 175, Figura 176, página 507.

Cromatógrafo de gases (GC) marca Agilent 7890A con detector de ionización de llama (FID) utilizando una columna DB-624. Ver Figura 87 y Figura 174, páginas 443 y 506.

Muse Cell Analyzer marca Millipore Sigma. Ver la Figuras 91 y 177 páginas 445 y 508.

2. Corridas de fermentación

a. Montaje del sistema

Para el montaje del sistema se utilizó un garrafón de 20L, manguera de 0.0095m (3/8'') de vinil, cinta de aislar y dos contenedores de plástico con capacidad de 40L y 60L.

Se preparó una solución 1%*m/v* de hidróxido de sodio, una solución 1%*v/v* de ácido fosfórico y una solución de desinfectante. Para la primera solución, se pesaron 50.0g de hidróxido de sodio en un beaker de 25mL y se disolvió en 5L de agua. Para la segunda solución, se midieron 30.6 mL de ácido fosfórico con una pipeta graduada de 10mL y se agregó a este volumen a 5L de agua poco a poco. Para la última solución, se midieron 50 mL con una probeta de 50 mL y se disolvió este volumen en 5L de agua.

Se lavó el garrafón con las soluciones anteriores en el mismo orden y, por último, se hicieron tres lavados con agua para retirar las trazas de desinfectante.

Se colocó el mosto saliente de la cocción en el garrafón y este sumergió en agua con hielo para enfriar el sistema dado que la levadura no puede estar en un medio con alta temperatura. En los tres procesos se tuvo un volumen de mosto promedio de 15.91 ± 0.687 L.

Se midió 1.2 m de manguera y se cortó con una cuchilla.

Se perforó la tapadera del garrafón con un barreno utilizando una broca de 3/8".

Se introdujo parcialmente la manguera y se colocó epoxipol para sellar la unión de la tapadera y la manguera.

Se llenó ambas cubetas con agua: una para sumergir el garrafón durante la fermentación de modo que se pueda controlar la temperatura y la otra que funciona como trampa del dióxido de carbono producido.

La fermentación se llevó a cabo en dos semanas y el proceso de maduración se llevó a cabo en una semana.

b. Adición de levadura al mosto

Se pesó aproximadamente 7.5 g de levadura Saf-Ale S-04 tomando como referencia el Cálculo 3 y aproximaciones encontradas en la literatura. Se pesó en una balanza analítica BOECO Germany, haciendo uso de un vidrio de reloj y una espátula analítica.

La levadura se colocó en un beaker de 50 mL y se hidrató por 5 minutos con 20 mL de agua a 20°C medidos con una probeta de 25 mL.

Se agregó la levadura hidratada al garrafón con el mosto e inmediatamente se colocó la tapadera y se utilizó cinta de aislar para terminar de sellar la tapadera al garrafón.

Se sumergió la manguera en la otra cubeta con agua y se colocó un tubo de hierro galvanizado para mantener la manguera sumergida en el agua.

Se colocaron dos bolsas de basura negras para evitar que el sistema tenga contacto con la luz.

c. Medición de temperatura

Desde el momento en que se agregó la levadura, inició el proceso de fermentación y se tomó la primera medición de temperatura con un termómetro de alcohol.

Se realizaron mediciones cada 4 horas por los 15 días que dura la fermentación y se anotaron los datos obtenidos para graficar posteriormente el comportamiento de la temperatura en función del tiempo.

Para mantener nivelada la temperatura dentro del rango aceptable indicado en las especificaciones de la levadura utilizada se fue agregando hielo conforme se veía que iba subiendo la temperatura.

d. Muestreo y análisis

Antes de fermentar y después de fermentar, se tomaron dos muestras y se almacenaron en dos tubos de ensayo de 20 mL para cuantificar la concentración de azúcares y alcoholes iniciales. En la sección de detección de azúcares presentes, y alcoholes presentes se explica detalladamente el procedimiento realizado para estos análisis.

Por aparte, se analizaron las muestras de antes y después de fermentar para medir grados Brix, índice de refracción, densidad y pH.

Para medir índice de refracción y grados Brix, se utilizó el refractómetro digital ATAGO RX-5000i y se realizaron los análisis en triplicado para realizar un análisis estadístico posterior. Primero, se debe medir el blanco o referencia para las mediciones; que en este caso es agua destilada. Después se procede a medir las muestras. Cada una de las mediciones se realizó a 20°C. Las especificaciones de este equipo se encuentran en la sección de anexos.

Para medir el pH se utilizó un potenciómetro Fisher Scientific Accumet AB15 Plus. Se realizaron mediciones en triplicado. Las especificaciones de este equipo se encuentran en la sección de anexos.

Para obtener datos de densidad se utilizó un picnómetro de 25 mL. Se pesó el picnómetro vacío y se anotó el dato. Se llenó el picnómetro con la muestra de análisis y se colocó el termómetro para anotar la temperatura a la que se estaba midiendo la densidad. Se pesó nuevamente el picnómetro con la muestra y la diferencia del dato de picnómetro vacío y el picnómetro con muestra es la masa que ocupa la muestra. Se realizó el mismo procedimiento para la densidad del agua. Por último, se obtuvo la densidad del mosto dividiendo la masa dentro del volumen obtenido en relación con la densidad del agua.

3. Estudio de cinética de reacción

a. Preparación de inóculo y muestras

Para mediciones de cinética se necesita analizar cambio de sustrato, microorganismos y producto en el tiempo. Se debe trabajar con un mismo volumen por lo que fue necesario utilizar 20 frascos de vidrio con tapadera de 250 mL marca Wheaton.

Se abrieron agujeros a las tapaderas de los frascos con un barreno y se cortaron 20 secciones de manguera para armar las trampas de dióxido de carbono. Se introdujeron las mangueras en las tapaderas y se selló con epoxipol.

Para evitar la fase lag de crecimiento celular, se preparó un inóculo. Para esto fue necesario, preparar 150 mL de una solución de azúcar a la misma concentración del mosto. Posteriormente, se colocó el frasco en un autoclave o esterilizador Sterilmatic marca Market Forge por 20 minutos a una temperatura de 85°C.

Se retiró el frasco del equipo con unos guantes de seguridad y se esperó a que la temperatura disminuyera para poder agregar la levadura.

Se pesaron 3.0g de levadura Saf-Ale S-04 en una balanza analítica utilizando un vidrio de reloj y una espátula analítica. Se agregó la levadura al frasco que se encontraba ya a temperatura ambiente.

Con el frasco, se armó un pequeño sistema de fermentación en el cual se colocó la tapadera con la manguera y se introdujo un extremo de la misma en un tubo de ensayo de 20 mL. El tubo de ensayo con la manguera se sumergió de modo que fuera expulsado todo el aire contenido en el sistema.

Se tapó el frasco con la tapadera y se colocó el sistema en el baño térmico Thermo Scientific ARTIC A10, utilizando un soporte de metal y pinzas de laboratorio. Se fijó la temperatura a 19°C y se dejó el sistema así por 24 horas para que se reprodujeran los microorganismos.

Se utilizó una probeta de 100 mL para medir 150 mL de mosto y se agregó este volumen a cada frasco para tener una cantidad aceptable de puntos para la cinética, en caso se tuviera que eliminar alguna muestra para la generación del modelo.

Se utilizó nuevamente la autoclave para esterilizar los frascos con el medio de cultivo en su interior.

Se retiró el sistema del baño térmico y se tomó una alícuota de 1 mL de la solución de inóculo con una pipeta volumétrica de 1 mL y un bulbo. Este volumen se agregó a cada frasco con el mosto y se cerraron los sistemas.

Los sistemas se colocaron en una incubadora con sistema de agitación New Brunswick Scientific Serie G25. Se ajustó a una velocidad de agitación de 80 rpm.

b. Análisis de muestras

Las muestras se sacaron en tiempos determinados de modo que se pudiera apreciar el comportamiento exponencial de los resultados.

Para cada muestra, se colocaron 10 mL de muestra en un tubo de ensayo y 10 mL en otro. Los primeros tubos se guardaron en una gradilla en el congelador para análisis de azúcares y los segundos tubos se guardaron en una gradilla en el refrigerador. Para análisis de azúcares y etanol es importante inactivar la levadura para que no se sigan consumiendo y produciendo mientras se realizan los análisis.

Se realizaron mediciones de pH, índice de refracción, °Brix y densidad en triplicado como se indicó anteriormente.

Se tomaron 4 tubos de centrifuga y pesaron en la balanza analítica. Se anotaron los datos para usarlos posteriormente en la obtención de peso seco.

Para medir peso seco, se agitó previamente el frasco con la muestra para homogenizar la mezcla. Se utilizaron tubos para centrifuga, a los cuales se les colocaron 25 mL de muestra a cada una. Se posicionaron los tubos en la centrifuga CFW500 Vector Inverter y se ajustó la velocidad a 60 rpm por un tiempo de 25 minutos.

Se retiraron los tubos y separó el líquido del sedimento que quedó al fondo del tubo.

Con únicamente los restos de levadura en el fondo de los tubos, se pesaron los 4 tubos y se restaron los valores del peso del tubo real para obtener el peso seco. Posteriormente, se multiplicó el peso obtenido por el volumen de muestra que es 0.150mL y de esta forma, obtener el peso seco en g/mL.

c. Detección de azúcares presentes

Para la detección de azúcares presentes, se trabajó con un cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) marca Agilent serie 1100 con un detector marca Agilent serie 1200.

Para iniciar con el uso del equipo, se preparó una solución madre y a partir de esta, soluciones que actuaron como estándares para la curva de calibración del método. Es importante mencionar que este método utiliza agua como fase móvil.

Para la preparación de la solución madre, se pesó 1.0g de maltosa, 1.0g de sacarosa, 2.0g de glucosa y 2.0g de fructosa. Todos los azúcares se disolvieron en agua y se aforó la solución en un balón de 50 mL. La solución final tiene una concentración de 40mg/mL de fructosa y glucosa, y 20mg/mL de sacarosa y maltosa.

Para preparar los estándares, se tomaron alícuotas de 7 mL, 5 mL, 4mL y 1mL de la solución madre y se aforó en balones de 50 mL. La primera solución de la curva tuvo una concentración de 0.8mg/mL para glucosa y fructosa y 0.4 mg/mL para maltosa y sacarosa. La segunda solución, 2.4mg/mL para glucosa y fructosa y 1.2 mg/mL para sacarosa y maltosa. La tercera solución, 4.0 mg/mL para glucosa y fructosa y 2.0 mg/mL para sacarosa y maltosa. Por último, la cuarta solución tuvo una concentración de 5.6mg/mL para glucosa y fructosa y 2.8 mg/mL para sacarosa y maltosa.

Se prepararon las muestras para su ingreso al equipo. Se utilizó una jeringa de 10 mL y microfiltros Millipore Millex-GV de 0.22 μ m para agregar entre 1.0mL y 1.5mL en viales de 2.0 mL. Con un sellador de viales, se cerraron los viales con sus respectivas tapas.

Se rotularon las muestras para facilitar la configuración del equipo al realizar los análisis.

Se utilizó una columna Aminex HPX-87K de 300.0mm x 7.8mm. Esta columna es ideal para la separación de alta calidad de glucosa, maltosa y maltotriosa.

Se encendió el equipo y se configuró el método de cuantificación de azúcares. Se colocaron las muestras en el automuestreador.

Para este análisis, se inyectan primero los estándares de la curva de calibración y las muestras al final. El método muestra los cromatogramas con los picos característicos y calcula de forma instantánea el porcentaje masa/volumen de los azúcares en cada muestra (g/100mL).

Para facilitar el uso de los resultados obtenidos en la generación del modelo cinético, se realizó la conversión de concentración en g/100 mL a unidades en g/L.

d. Detección de alcoholes presentes

Para la detección de alcoholes presentes, se utilizó un cromatógrafo de gases (GC) marca Agilent 7890A con detector de ionización de llama (FID). Para el análisis se utilizó la columna DB-624 de 60m de longitud y 0.53 mm de diámetro. Las especificaciones del equipo y la columna se encuentran en la sección de anexos.

Para este método analítico, también se prepararon estándares para la curva de calibración tanto de etanol como de metanol. Para esto, se prepararon soluciones de 3% v/v, 9% v/v, 12% v/v y 15% v/v de etanol y 0.3% v/v, 0.9% v/v, 1.2% v/v y 1.5% v/v de metanol, utilizando isopropanol al 10% v/v como estándar interno.

Para preparar las muestras previo a la inyección, se utilizó nuevamente isopropanol al 10% v/v como estándar interno. Utilizando un pipeteador Transferpette Brand con rango de medición de 0.5 a 5mL, se agregaron 0.5 mL de isopropanol en viales de 5 mL. Posteriormente, se agregaron 1.5 mL de cada muestra en su respectivo vial.

Se encendió el equipo y se configuró el método para la determinación de alcoholes. Se inyectó 1μL de cada muestra de la curva de calibración empezando con la de menor concentración utilizando una jeringa de 10μL. Entre cada muestra, se debe esperar a que la temperatura disminuya a aproximadamente 30°C para poder seguir con las inyecciones.

El método mostró los cromatogramas con los picos característicos y calculó de forma instantánea el porcentaje masa/volumen de metanol y etanol en cada muestra (g/100mL).

A la concentración que muestran los cromatogramas como resultado, se le debe aplicar un factor de corrección. Se multiplica por 2 por ser el volumen total y se divide dentro de 1.5 por ser el volumen de muestra en la solución preparada.

Para facilitar el uso de los resultados obtenidos en la generación del modelo cinético, se realizó la conversión de concentración en g/100 mL a unidades en g/L.

e. Conteo de microorganismos

Para el conteo de microorganismos se utilizó el equipo Muse Cell Analyzer marca Millipore Sigma.

Las muestras se diluyeron con el fin de obtener un dato representativo para la cantidad de células en la muestra. Para esto, se agregó 1 mL de agua destilada en un tubo de ensayo de 20 mL y posteriormente, se agregó 1 mL de muestra.

Se encendió el equipo y se procedió a calibrar el equipo. Para esto, se preparó una solución utilizando dos reactivos que vienen con el equipo. Se midieron 380 μ L del primer reactivo y 20 μ L del segundo con una micropipeta de 1 μ L a 20 μ L y otra de 20 μ L a 200 μ L; se agregaron ambos volúmenes en un vial y se agitó vigorosamente.

Se utiliza la opción “System Check” y se procede a calibrar con la solución preparada. La solución debe ingresar y ser analizada tres veces en el equipo para que pase la prueba de calibración.

Una vez calibrado, se utiliza la opción “Count & Viability” para empezar las mediciones de conteo celular.

Se corre una primera muestra, de preferencia que sea la menos concentrada, y se ajusta la gráfica que aparece en la pantalla para adaptar la viabilidad desde el punto en el que van apareciendo las células.

Una vez se ajustó la gráfica, se coloca el nombre de la muestra y se vuelve a ingresar al equipo para que cuantifique. El resultado se obtiene en unidades de células por mililitro; tomando en cuenta principalmente la cantidad de células viables. Para facilitar la generación del modelo cinético, se obtuvo la concentración en g/L a partir del peso seco obtenido como se observa en el cálculo 25, página 353.

Cada tres muestras analizadas, se realiza una “Quick Clean” en el equipo. Al final del análisis, se realiza un “Complete Clean” para dejar el equipo listo para análisis posteriores.

4. Interpretación de resultados

a. Análisis de resultados de corridas de fermentación

Se calculó el promedio y desviación estándar de los resultados obtenidos de la temperatura registrada en las tres corridas de fermentación con el fin de verificar si se cumplió con las condiciones de temperatura especificadas para la levadura utilizada. Se graficó la temperatura contra tiempo para las tres corridas y se colocaron los límites para determinar si la temperatura se mantuvo dentro del rango.

Se obtuvo el promedio y desviación estándar de los resultados obtenidos de pH con el fin de verificar si se cumplió con las condiciones de pH especificadas para la levadura utilizada. De igual forma, se graficó el pH contra tiempo para las tres corridas y se colocaron los límites para determinar si el pH se mantuvo dentro del rango.

Se obtuvo promedio y desviación estándar de las mediciones realizadas de °Brix y la densidad del mosto, tanto antes como después de la fermentación; y se compararon estos valores con datos teóricos obteniendo porcentajes de error.

Se obtuvo promedio y desviación estándar de las mediciones de azúcares presentes antes de fermentar y se compararon estos valores con datos teóricos obteniendo porcentajes de error. Los datos teóricos son característicos de una cerveza IPA. Se obtuvo promedio y desviación estándar de las mediciones de alcoholes presentes después de fermentar y se compararon estos valores con datos teóricos obteniendo porcentajes de error. Los datos teóricos son característicos de una cerveza IPA y siguen los límites permitidos de la norma COGUANOR NGO 33006. Se utilizó como referencia esta norma frente a la Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017 mencionada en la sección de antecedentes, dado que la planta piloto de producción de cerveza está instalada en territorio guatemalteco. Además, los límites establecidos en la norma mexicana no difieren significativamente de los límites establecidos en la norma guatemalteca.

b. Generación de modelo cinético

Para iniciar con el análisis de los resultados obtenidos, se graficó la curva de concentración de sustrato contra el tiempo utilizando los datos de cada una de las muestras; así como la curva de concentración de microorganismos y productos.

Dado que las gráficas debían analizarse por separado en dos fases, la de crecimiento y la de decrecimiento celular; se construyeron nuevamente las curvas de sustrato, microorganismos y productos para cada fase.

Se calcularon las derivadas dC_s/dt , dC_n/dt y dP/dt , las cuales representan los diferenciales de concentración en función del tiempo de sustrato, microorganismos y productos. Dado que las curvas no presentaron un comportamiento lineal, se realizaron ajustes polinomiales para las curvas de concentración de sustrato y microorganismos en la fase de crecimiento celular y ajustes potenciales para las curvas de concentración de sustrato, microorganismos y producto en la fase de decrecimiento celular. La curva de producto en la fase de crecimiento celular mostró un comportamiento favorable para la generación del modelo por lo que no se necesitó hacer ningún ajuste.

Se calculó el tiempo promedio correspondiente a cada uno de los puntos y con la derivada de las ecuaciones resultantes de los ajustes realizados, se valuó el tiempo promedio en las ecuaciones. Fue así como se obtuvieron los nuevos diferenciales de concentración dC_s/dt , dC_n/dt y dP/dt .

Se calculó el rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato utilizando el diferencial de concentración de microorganismos y el del sustrato.

Se realizó la linealización de Lineweaver-Burk. Para esto, se calcula primero $1/C_s$ y $dt/dC_s \cdot C_n$; se grafica $1/C_s$ en el eje x y $dt/dC_s \cdot C_n$ en el eje y. Con la pendiente e intercepto, se calculan los parámetros cinéticos de reacción: la velocidad máxima de crecimiento celular y la constante de afinidad al sustrato.

Dado que la ecuación es compleja, se dividió el procedimiento del cálculo en dos pasos. Al primer paso se le asignó el nombre de X, y con los parámetros cinéticos obtenidos de la linealización Lineweaver-Burk, se calculó esta variable.

Al segundo paso se le asignó el nombre de Y, y nuevamente con los parámetros cinéticos, se calculó esta variable. También se utilizó el rendimiento de los microorganismos con respecto al sustrato en este paso.

Con base en las variables X y Y, se obtuvo dt/dC_s .

Con dt/dC_s se calculó dC_s/dt , dividiendo 1 sobre dt/dC_s .

Se multiplicó dC_s/dt por el diferencial de tiempo, para obtener únicamente el diferencial de concentración de sustrato.

Para obtener la concentración de sustrato del modelo, se realizó la suma de los diferenciales de concentración de sustrato con la concentración de sustrato inicial.

Para obtener el diferencial de concentración de microorganismos, se multiplicó el diferencial de concentración de sustrato con el rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato.

Para obtener la concentración de microorganismos del modelo, se realizó la suma de los diferenciales de concentración de microorganismos con la concentración de microorganismos inicial.

Se calculó el rendimiento de los microorganismos con respecto al sustrato, dividiendo el diferencial de concentración de producto sobre el diferencial de concentración de sustrato.

Para obtener el diferencial de concentración de producto, se multiplicó el diferencial de concentración de producto con el rendimiento de producto con respecto al sustrato.

Para obtener la concentración de producto del modelo, se realizó la suma de los diferenciales de concentración de producto con la concentración de producto inicial.

Se generaron las curvas de concentración de sustrato, microorganismos y productos haciendo referencia a los datos del modelo y los datos experimentales. Para realizar un ajuste de los datos se modificó la velocidad máxima de crecimiento celular y la constante de afinidad al sustrato. Se colocaron barras de error utilizando Excel.

Para generar la ecuación que predice la concentración del sustrato se utilizaron los parámetros cinéticos de reacción, la concentración de sustrato y microorganismos y el rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato que fueron obtenidos previamente. Estos se valoraron en la ecuación de Monod.

Para la fase de decrecimiento celular, el proceso fue similar. Sin embargo, se toma en cuenta otro parámetro cinético de reacción: la constante de afinidad al producto.

Se realizó nuevamente la linealización de Lineweaver-Burk para obtener los parámetros cinéticos de reacción con la pendiente e intercepto, y se estimó un valor de la constante de afinidad al producto.

Se calculó dC_n/dt en función de las variables mencionadas en el paso anterior y se obtuvo el diferencial de concentración multiplicando dC_n/dt por el diferencial de tiempo.

Para obtener la concentración de microorganismos, sustrato y producto del modelo, se realizó de la misma forma que para la fase de crecimiento celular.

c. Determinación de variables de operación del fermentador

Se realizó una investigación para determinar los principales equipos auxiliares que se utilizan en un reactor y se seleccionaron los necesarios para un proceso de fermentación.

Se determinó que las principales variables de operación para un proceso de fermentación de cerveza son: temperatura, pH, velocidad de agitación, la luz, el aislamiento del sistema para evitar el ingreso de oxígeno y la presión dentro del reactor.

d. Selección de equipos auxiliares

Al reactor, se le colocó un adaptador para un termómetro y se instaló este equipo. Sin embargo, se decidió seleccionar un sensor de temperatura digital con vaina de acero inoxidable para mantener un registro de la temperatura del mosto durante todo el proceso de fermentación y maduración.

Se seleccionó un sensor de pH de proceso en línea de acero inoxidable para mantener un registro del pH del mosto durante todo el proceso de fermentación.

Se propuso un sistema de agitación para mantener homogenizado el mosto mientras se encuentra en proceso de fermentación. Para esto, se calcularon las dimensiones principales utilizando semejanzas geométricas para el diseño estándar de un agitador mecánico. Para estos cálculos, fue necesario medir el diámetro del tanque. Se calculó el número de Reynolds con la densidad promedio obtenida previamente, un dato teórico de viscosidad del mosto de cerveza, el diámetro de agitación y la velocidad de agitación de 80 rpm por ser un proceso que, en la industria, no utiliza agitación. Se calculó la potencia y se realizó la corrección considerando una eficiencia del 80% del motor con pérdidas por fricción de 35%.

Se seleccionó una válvula de alivio o válvula de seguridad que se abre al llegar a una presión determinada principalmente para el proceso de esterilización del medio de cultivo ya que se lleva el sistema a una temperatura de 85°C. A esta se le debe colocar un acople para manguera y la manguera debe conducir al desagüe.

Se fabricó un niple de aproximadamente 20cm de acero inoxidable de 1" y se instaló en el tanque utilizando un accesorio "T" de hierro galvanizado. Para esto, se utilizó una cierra de arco, una tarraja y una lima de metal. En la parte superior de la "T", se colocaron dos reductores para instalar un manómetro. Se instaló una válvula de bola y después, un reductor de 1" a ½" de hierro galvanizado. Seguido de esto, se instaló un acople para manguera y se colocó 1m de manguera de vinil reforzado que conduce a una cubeta con agua. Este es el sistema de salida del gas. Se propuso una válvula de retención soldable para que el gas salga en una sola dirección y evitar que regrese al sistema.

Se utilizaron alrededor de 20.8m para conducir agua fría desde un reservorio que se encuentra conectado al sistema de enfriamiento del laboratorio de Operaciones Unitarias a la chaqueta del reactor. Para esto, se hicieron 4 niples de ½" que se instalaron utilizando dos codos de 90° de ½", dos accesorios "T" de ½" y un acople universal de ½". El material de los accesorios es de hierro galvanizado. En la parte superior de la "T" se colocó un manómetro.

La manguera se cubrió con neopreno que funciona como aislante para disminuir la transferencia de calor del ambiente.

Se realizaron pruebas enfriando agua con el sistema y se hizo pasar el flujo de agua fría por la chaqueta utilizando una bomba que estaba ya instalada de 745.7 W (1 hp). Se realizaron tres corridas para determinar la diferencia de temperatura de agua fría a la salida de la chaqueta y a la entrada a la chaqueta del reactor.

Se realizó un balance de energía tomando en cuenta la transferencia de calor del ambiente, la de la reacción y la de la salida del agua fría de la chaqueta.

Para la transferencia de calor del ambiente, se calculó el coeficiente convectivo de transferencia de calor haciendo uso de las propiedades del aire a 1 atm y obteniendo los números de Grashof y Nusselt. También se calculó el área de transferencia de calor.

Para la transferencia de calor de reacción, se obtuvo primero la entalpía de reacción con la ley de Hess con las reacciones de combustión de glucosa y etanol. Después se obtuvo la velocidad de reacción con los parámetros cinéticos de reacción calculados previamente en el punto en el que la velocidad de crecimiento celular es máxima. Por último, se determinó el volumen de maltosa generado en ese punto y se calculó el calor de reacción.

Con lo calculado anteriormente, se obtuvo el flujo másico de agua fría requerido para mantener la temperatura regulada durante la fermentación.

Se calculó el calor que debe ser removido con la suma del calor de reacción y el calor del ambiente para compararlo con la capacidad del sistema de enfriamiento. Se comprobó que el equipo puede utilizarse.

Se obtuvo el volumen de líquido que ocupa el reactor al nivel de la chaqueta y con este dato, se obtuvo un flujo másico para el mosto de cerveza tomando en cuenta que la maduración dura una semana: aproximadamente 168 horas. Se calculó el calor específico del mosto de cerveza tomando como referencia la concentración de sólidos disueltos (°Brix) promedio de las mediciones realizadas.

Se tomó un cambio de temperatura de 23°C para el mosto de cerveza, ya que pasaría de estar a aproximadamente 25°C a una temperatura de 2°C para madurar. El cambio de temperatura del agua es similar al del cálculo para el proceso de fermentación, con un valor de 2°C.

Nuevamente, con el balance de energía se obtuvo el flujo másico de agua fría para el proceso de maduración con lo calculado anteriormente.

El reactor tiene una línea de vapor, por lo que fue necesario calcular el flujo másico de vapor requerido para llegar a la temperatura de esterilización, que es 85°C.

Se obtuvo un flujo másico para el mosto de cerveza tomando en cuenta el volumen del líquido que ocupa el reactor al nivel de la chaqueta y un tiempo de 0.33 horas. La esterilización requiere aproximadamente 20 minutos.

Con las tablas de vapor saturado, se obtuvo la entalpía de vaporización a 85°C y se utilizó el mismo calor específico para obtener el flujo másico de vapor que se necesita para esterilizar.

Se obtuvo el dato experimental del flujo másico de vapor de la caldera y se determinó que si se puede utilizar este sistema de calentamiento en el reactor.

Se propuso un empaque nuevo para el reactor, seleccionando como material neopreno con un rango de temperaturas de -40°C a 120°C.

e. Prueba de funcionamiento del fermentador

Se aseguró que el sistema no tuviera fugas, para lo cual fue necesario realizar una inyección de aire con el sistema cerrado hasta que aumentase la presión indicada por el manómetro. Se dejó de inyectar aire y se determinó que no había fugas en el sistema ya que la presión se mantuvo constante.

Para terminar la prueba, se colocó agua con jabón en la tapadera del reactor y en las uniones de tubería para comprobar la ausencia de fugas.

Con la misma solución de hidróxido de sodio al 1% m/v, la de ácido fosfórico al 1% v/v y la de desinfectante, se limpió el sistema utilizándolas en ese mismo orden. Finalmente, se limpió con una solución de alcohol al 70% v/v.

Se prepararon 35 L de una solución al 14% m/v de sacarosa y se agregó este volumen al reactor para realizar una primera prueba de funcionamiento.

Se pesaron 12.0g de levadura en una balanza digital utilizando un beaker de 50 mL. Con una probeta, se midieron 25 mL de agua a 20°C y se agregó al beaker para hidratar la levadura.

Esta solución se agregó al reactor y se cerró inmediatamente el sistema para dar inicio a la reacción.

Se tomó una muestra cada día utilizando el puerto de muestreo que ya tiene instalado el reactor, y de cada muestra se obtuvo la concentración de sólidos disueltos (°Brix) a 20°C utilizando el refractómetro ATAGO RX-5000i. Asimismo, se obtuvo el porcentaje de alcohol utilizando un densímetro. La fermentación se detuvo después de una semana.

Para la segunda prueba del fermentador, se realizó el mismo procedimiento de limpieza con las soluciones de hidróxido de sodio, ácido fosfórico y desinfectante. Por último, se utilizó nuevamente la solución de alcohol.

Se colocó un volumen aproximado de 10 L de mosto de cerveza con una concentración inicial de sólidos disueltos de 11.61% °Brix.

Se pesaron 5.0g de levadura en una balanza digital utilizando un beaker de 50 mL. Con una probeta, se midieron 25 mL de agua a 20°C y se agregó al beaker para hidratar la levadura.

Se agregó este volumen al reactor con el mosto y se cerró inmediatamente el sistema para dar inicio a la fermentación del mosto.

Se tomó una muestra cada día utilizando el puerto de muestreo que ya tiene instalado el reactor, y de cada muestra se obtuvo la concentración de sólidos disueltos (°Brix) a 20°C utilizando el refractómetro ATAGO RX-5000i. Asimismo, se obtuvo el porcentaje de alcohol utilizando un densímetro. La fermentación se detuvo después de una semana.

E. REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

1. Determinación de filtro a utilizar

Se extrajo cuatro muestras de 20 mL de pruebas de fermentado con levadura de plan, realizadas a escala laboratorio para hacer pruebas de filtración y se cada una se colocó en un beaker de 50 mL. Se realizó los análisis de turbidez a las cuatro muestras anteriores colocando 5 mL de fermentado en una de las celdas del turbidímetro portátil marca Hanna modelo HI 98703 (ver Figura 268 en anexos, página 558).

Con estos datos se determinó que se debía reducir la turbidez del fermentado porque se quería tener una cerveza sin sólidos suspendidos y sedimentando al momento de embotellar. Se regresó cada muestra de 5 mL a su beaker original para contar con 20 mL nuevamente. Se cortó papel de 20, 10, 5 y 1 micras para filtrar al vacío, en forma circular, con diámetro de 10 cm.

Se armó un sistema de filtrado al vacío con un embudo Buchner y una conexión al sistema de vacío.

Se determinó la masa de cada papel cortado para determinar posteriormente la cantidad de retenido.

Se vertió una de las muestras de 20 mL de fermentado sobre el papel de 20 micras ya colocado sobre la superficie perforada del embudo del sistema de filtración al vacío.

Se abrió la válvula de vacío y se esperó a que se filtrara el fermentado, cerrando la válvula del sistema de vacío una vez terminara de pasar el líquido por el embudo.

Se esperó a que el papel se secara para determinar la masa del mismo y la del filtrado, restando las taras iniciales.

Se repitió el procedimiento usando el papel de 10, 5 y 1 micra.

Se determinó que la cantidad de masa retenida por los filtros de 20 y 10 micras eran muy pequeñas ya que retenían 31% y 46% menos masa que el filtro de 5 micras.

Se determinó que usar el papel filtro de 1 micra sería un proceso muy tardado para el volumen de trabajo, filtrando los 20 mL trabajados en aproximadamente 10 segundos lo que, a capacidad máxima de 35 L, significaría un tiempo mayor a una hora, asumiendo linealidad. Esto hizo que se descartara este filtro, dejando como opción más viable al de 5 micras.

Una vez seleccionado el tamaño del poro del filtro, se determinó la forma en que la cerveza sería circulada por un filtro con esas características.

Se decidió filtrar la cerveza fermentada usando un sistema de cartuchos y accionado con una bomba y se procedió a determinar cuál podría usarse.

Se analizó una bomba aurora de 1.5 kW y una bomba centrífuga de 0.45 kW, que se encontraban dentro del laboratorio de operaciones unitarias.

Se descartó el uso de la bomba aurora ya que las presiones que esta generaba eran demasiado elevadas para las características de la planta.

Se decidió utilizar una bomba centrífuga para bombear la cerveza por disponibilidad y funcionamiento, además de tener las características de trabajo y potencia necesarias.

Se calculó una bomba centrífuga utilizando la ecuación de Bernoulli. Cálculo 18, disponible en cálculos de muestra en anexos página 346.

Una vez seleccionada la bomba, se determinó la tubería que conectaría la bomba y el filtro, analizando el uso de tubería de hierro galvanizado, de acero inoxidable y de mangueras.

La manguera presentó problemas en el transporte de líquido verticalmente, que sería la manera en que se debía trabajar.

Se descartó el uso de hierro galvanizado por conocimiento teórico de su posible oxidación y no ser adecuado para trabajo con alimentos.

Se seleccionó trabajar con tubería de acero inoxidable por descarte de las otras opciones y que presentaba las características correctas para trabajar con alimentos, en sentido vertical y con producto caliente.

2. Instalación de filtro

Se determinó el área a utilizarse por la estructura que soportaría la unidad del filtro de cartuchos con una cinta métrica de 3 m de largo.

Se determinó que la estructura que soportaría la unidad de filtración contendría dentro de ella la bomba centrífuga, el filtro de cartuchos y un tanque de posible uso en carbonatación.

Se determinó que una altura de 2.00 m con un ancho de 0.90 m y una longitud de 1.85 m sería adecuada para la estructura de soporte de la unidad de filtración.

Se dibujó los planos isométricos de la estructura (ver Figuras 46, 47 y 48 en Resultados, página 202 a 204).

Se seleccionó un tubo cuadrado de 3cm por 3cm, de hierro negro, porque lograrían soportar el peso del sistema de filtrado y por disponibilidad en el laboratorio de operaciones unitarias.

Se cortó doce piezas de tubo cuadrado de hierro negro de 3 por 3 cm para armar la estructura con las siguientes mediciones: cuatro de 2 m, cuatro de 1.79 m y cuatro de 0.84 m.

Se soldó la tubería formando una estructura rectangular con soporte a la mitad de la altura (ver Figura 47, página 203).

Se cortó cuatro planchas de 10 cm por 10 cm, de lámina de hierro negro con espesor de 1 mm, y cada una se soldó al fondo de las patas de la estructura para apoyarlas en el suelo.

Se cortó dos vigas angulares, de 1.90 m de hierro negro de 0.017 m ($\frac{1}{2}$ in) ancho y se barrenó dos hoyos, a 0.99 y 1.06 m de un extremo, a cada una de las vigas, para colgar el filtro.

Se soldó una de estas vigas a la parte superior de la estructura, a 18 cm del extremo derecho y la otra viga se soldó con 5.5 cm de separación.

Se trasladó la estructura del área de metalmecánica del laboratorio de operaciones unitarias al área de la planta de cerveza.

Se colocaron tarugos a los agujeros que el filtro tenía para colgarse y este se sostuvo haciendo que estos agujeros estuvieran alineados con los hoyos barrenados en las vigas angulares diseñadas para soportar el filtro.

Se colocó clavos busca rosca uniendo las vigas a los tarugos dentro del filtro y este se soltó para comprobar que el peso del filtro no fuera demasiado para los tarugos y los clavos.

Se instaló la bomba centrífuga previamente seleccionada bajo la estructura del filtro (ver Figura 271 en anexos, página 560) atornillando la base de la bomba al suelo.

Se realizó una instalación eléctrica de la bomba, empalmando los cables de la bomba a cableado paralelo y colocando tubería de protección para cableado eléctrico.

Se empalmó un interruptor encendido y apagado que se colocó en una columna cercana para facilidad de uso, junto a una espiga.

Se seleccionó trabajar con tubería de 1 in ya que este era el diámetro en la entrada y salida de la bomba.

Se cortó un tubo de acero inoxidable de 38 centímetros de largo y de 1 in de diámetro para colocarse en la salida de la bomba, al cual se le hizo rosca de ambos lados con una tarraja para poder acoplar un extremo a la bomba y un reductor de 1 in a $\frac{3}{4}$ in en el otro extremo.

Se modificó el diámetro de la tubería por cantidad de tubería de acero inoxidable en el laboratorio de operaciones unitarias y para incrementar la presión con la que se movería el flujo en el sistema de filtrado.

Se instaló un niple de $\frac{3}{4}$ in a la tubería, seguida por un acople universal del mismo diámetro.

Se cortó, realizó rosca y acopló un tubo de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ in, seguido por una T de acero inoxidable. A la salida vertical de la T se añadió un niple de acero inoxidable seguido por una válvula de globo de $\frac{3}{4}$ in.

Se cortó un tubo de $\frac{3}{4}$ in de acero inoxidable de 13 cm al que se le hizo rosca de ambos lados y se instaló seguido de la válvula de globo. Al otro extremo del tubo se acopló un codo de 90°.

Se cortó y realizó rosca de ambos lados a un tubo de 23 cm de acero inoxidable que se acopló al codo de 90°, seguido por un accesorio T.

Se instaló un manómetro de 0 a 100 psi junto a un reductor de $\frac{3}{4}$ in a $\frac{1}{8}$ in en la parte superior del accesorio en T acoplado.

Se cortó y realizó rosca de ambos lados a un tubo de 23 cm de acero inoxidable que se acopló a la salida del accesorio en T. El extremo del tubo fue unido a un reductor de $\frac{3}{4}$ in a $1\frac{1}{2}$ in para conectarse a la entrada del filtro.

Se instaló un reductor de $1\frac{1}{2}$ in a $\frac{3}{4}$ in en la salida del filtro, seguido por un tubo de 23 cm de acero inoxidable, al que se le hizo rosca de ambos lados.

Se añadió un accesorio en T donde se colocó, en la salida superior, un reductor de $\frac{3}{4}$ in a $\frac{1}{8}$ in para acoplar un manómetro de 0 a 100 psi.

Se cortó y realizó rosca de ambos lados a un tubo de 20 cm que se acopló a la salida del accesorio T. En el otro extremo se acopló un codo de 90° .

Se cortó y realizó rosca a un tubo de 15 cm, que se acopló al codo de 90° donde se recogería la cerveza filtrada.

3. Pruebas de tamizaje

Se molió la malta para pruebas de cocción en un molino de rodillos.

Se realizó un análisis de turbidez a la suspensión resultante de dicha cocción. Debido a la alta turbidez, reportada en tabla 14, en Anexos, se decidió tamizar la malta molida para determinar si la turbidez de la suspensión resultante de la cocción disminuía.

Se molió cebada en un molino de rodillos y se recolectó.

Se determinó la masa de dicha cebada con una balanza previamente tarada.

Se armó la tamizadora del laboratorio de operaciones unitarias, ver Figura 30 en Anexos, colocando los tamices en orden decreciente en número de tamiz finalizando con un plato recolector de finos. Se limpió estos tamices previamente con aire comprimido.

Se colocó la cebada molida en el primer tamiz y se colocó la tapadera para sellarlo. En caso fuese mucha masa de cebada, se realizaron diversas corridas.

Se ajustó el tiempo de tamizaje a 10 minutos y se esperó a que este transcurriera. Una vez finalizado se levantó cuidadosamente la tapadera del tamiz.

Se procedió a pesar los sólidos retenidos en cada número de tamiz en una balanza previamente tarada.

Se hizo los cálculos de porcentaje de retención de sólidos en cada número de tamiz utilizado junto al plato de retención de finos.

Se repitió el proceso en otras tres corridas.

Se repitió el proceso en cuatro corridas para la malta base y en cuatro corridas para la malta caramel.

Se realizó una prueba de cocción a escala laboratorio utilizando la malta tamizada. Se realizó pruebas de turbidez a la suspensión resultante.

4. Pruebas de sedimentación

Se tomó ocho muestras de 50 mL cada una de cerveza del lote 2, una vez la fermentación de la misma hubiera concluido.

A cuatro muestras se les sacó turbidez, densidad y viscosidad en ese mismo momento.

Se hizo pruebas de turbidez igual a las descritas en el apartado A de la metodología.

Se realizó pruebas de densidad pesando un volumen conocido de muestra en una balanza tarada.

Se realizó pruebas de viscosidad con una copa de viscosidad marca EZ Zahn (ver Figura 270 Anexos, página 559). Se utilizó llenando la copa hasta el borde y tomando el tiempo en que esta se vació por completo.

Se dejaron reposar las cuatro restantes muestras por un periodo de siete días.

Transcurrido el tiempo, se realizó pruebas de turbidez, densidad, viscosidad, velocidad de sedimentación y de cantidad de sedimentado y sobrenadante.

Se hizo las pruebas de cantidad de sedimento y sedimentado decantando el líquido sobrenadante de los sólidos sedimentados, y pesando cada uno por separado.

Se utilizó la ecuación 4 para realizar las pruebas de velocidad de sedimentación.

El resto del lote se dejó reposar por 14 días desde la finalización de la fermentación.

Una vez transcurrido el tiempo, se efectuó las mismas pruebas que a las muestras de siete días: turbidez, densidad, viscosidad, velocidad de sedimentación y cantidad de sedimentado y sobrenadante.

Se graficó la turbidez inicial, a 7 días de reposo y a 14 días de reposo para corroborar si existía tendencia en el comportamiento.

5. Pruebas de centrifugado

e. Pruebas de centrifugado por lotes

Se tomó cuatro muestras de 100 mL del lote de cerveza uno ya fermentada.

Se realizó pruebas de densidad y turbidez a cada una de las cuatro muestras con un procedimiento igual al descrito en el apartado A y D de la metodología, respectivamente.

Se colocó 45 mL de cerveza en cada uno de los ocho viales que van dentro de la centrífuga por lotes (ver Figura 274 en anexos, página 562).

Se conectó la centrífuga por lotes a una corriente trifásica y se encendió ajustando a una velocidad de 1277 revoluciones por minuto durante 10 minutos.

Una vez transcurrido el tiempo, se retiró las muestras de cerveza y se hizo pruebas de turbidez, densidad y cantidad de centrifugado y sobrenadante siguiendo la misma metodología que en las pruebas de sedimentación.

Se repitió el proceso para el lote de cerveza dos, igual con cuatro muestras de 100 mL.

f. Pruebas de centrifugado continuo

Se acopló un embudo a la entrada de la centrífuga continua (ver Figura 273 en anexos, página 561) que se encontraba disponible en el laboratorio de operaciones unitarias.

Se trasladó la centrifuga continua al área de la planta de cerveza dentro del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Se conectó la centrífuga a una toma de corriente trifásica y se midió que trabajaba a 3000 revoluciones/min con un tacómetro.

Se corrió agua dentro del tambor rotatorio de la centrifuga continua y se notó que tenía fugaz y residuos sólidos de usos pasados dentro del tambor.

Se lavó el tambor, por dentro, lo mejor posible utilizando agua para tratar de remover los sólidos que se encontraban retenidos dentro del tambor.

Se determinó que, en caso el funcionamiento para centrifugar cerveza era correcto, se arreglarían las fugas que tenía la centrífuga continua.

Se corrió el lote 1 de cerveza fermentada por la centrifuga continua.

Al líquido resultante se le hizo pruebas de turbidez y densidad con la misma metodología que en las pruebas de la centrifuga por lotes.

Se continuó tratando de lavar el tambor rotatorio por dentro para sacar los sólidos que se encontraban retenidos.

Se repitió el proceso para el lote de cerveza 2.

Se observó que los resultados no presentaban mejoras considerables por lo que se descartó el uso del equipo.

F. PRUEBAS DE FILTRADO

Se llenó el tanque conectado a la bomba de agua.

Se removió el filtro de cartuchos, dejando solamente el contenedor del filtro conectado a la tubería.

Se determinó la masa del filtro de cartuchos.

Se corrió agua por la tubería instalada en el apartado B de metodología, encendiendo la bomba centrífuga instalada para ver si existían fugas y lavar la tubería de cualquier material residual generando al momento de cortar y hacer la rosca en los tubos.

Se desechó el agua que no salió por la tubería y porque se mantuvo en la carcasa de filtro.

Se mojó el filtro para su correcto funcionamiento y se regresó al sistema colocándose dentro de su carcasa.

Se determinó la masa de la cantidad de cerveza que iba a introducirse en el filtro, junto al envase donde se encontraba.

Se tomó cuatro muestras de cerveza de 50 mL cada una.

Se realizó pruebas de turbidez y densidad a las muestras, luego se regresó al lote.

Se trasvasó la cerveza al tanque conectado a la bomba centrífuga instalada.

Se determinó la masa del envase vacío, el cual contenía la cerveza, para conocer la masa de cerveza a filtrarse.

Se aseguró que las válvulas correspondientes estuvieran abiertas.

Se bombeó la cerveza a través del filtro de cartuchos de 5 micras.

Se recolectó la cerveza filtrada al final de la tubería.

Se esperó a que la espuma generada se asentara.

Se extrajo otras cuatro muestras de 50 mililitros de cerveza filtrada.

Se realizó pruebas de densidad y turbidez correspondientes.

Se determinó la masa de la cantidad de cerveza que salió del filtro, en un contenedor ya tarado, donde se recibió la cerveza. y la cantidad de sólidos que se retuvieron en el filtro.

Se removió la carcasa del sistema de filtración y se extrajo el filtro.

Se determinó la masa del filtro con la pared de sedimento formado.

Se hizo el cálculo de cantidad de cerveza retenida y cantidad de cerveza filtrada.

G. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL PRODUCTO FINAL

1. Toma de muestra

a. Toma de muestra para análisis fisicoquímico y microbiológico

Se tomaron 3 botellas de cada lote producido luego de haber pasado 2 días de haber sido carbonatadas y selladas. Es decir, un total de 9 botellas que ya habían pasado por todos los procesos debidos.

De cada una, se dejaron a temperatura ambiente y se tomaron aproximadamente 50 mL de muestra para realizar los análisis fisicoquímicos respectivos.

Además de ello, se tomaron muestras de 110 mL, también a temperatura ambiente, para realizar los análisis microbiológicos respectivos.

Como control negativo se utilizó la cerveza final filtrada nuevamente con filtro de 0.45µm para garantizar la inocuidad del control (cada filtro utilizado fue cultivado en cajas Petri con agar EMB a 37°C durante 24h) y como controles positivos se utilizaron cepas de *E. coli* y *Klebsiella spp* proporcionadas por el departamento de Bioquímica y Microbiología.

b. Toma de muestra para análisis de viabilidad de levaduras

Se tomaron 2 muestras de aproximadamente 10 mL del mosto; una al inicio y otra al final del proceso de fermentación para determinar la cantidad de levaduras presentes y cuántas de éstas eran viables. Esto se realizó para el segundo y el tercer lote elaborados.

Del lote 1 no fue posible obtener la viabilidad debido a que, por complicaciones de tiempo, no se lograron obtener las muestras necesarias en los tiempos de fermentación propios para dicho conteo.

2. Análisis fisicoquímicos

a. Medición de pH

Se realizó la calibración del potenciómetro marca: Fisher Scientific, accumet® BASIC modelo: AB15 Plus utilizando 3 soluciones amortiguadoras: con pH ácido, con pH básico y con pH neutro.

Se encendió el equipo y se midieron las soluciones amortiguadoras de la siguiente manera: primero la solución amortiguadora con pH ácido, luego la solución amortiguadora con pH neutro y por último la solución amortiguadora con pH básico.

Posteriormente se realizó la medición del pH del control y de las muestras. Se obtuvo el promedio y desviación estándar del parámetro evaluado para ser comparado según la norma COGUANOR NGO 33 006.

b. Medición de turbidez

Se utilizó el equipo marca HACH®, modelo: DR/890 para medir la turbidez.

Se ingresó el programa 95 al equipo, se agregaron 10 mL de agua destilada al tubo de muestra, se colocaron en el equipo y se presionó el botón ZERO para determinar el blanco.

Se llenó otro tubo con 10 mL de la muestra a medir y se colocó en el equipo presionando luego el botón READ para que se realizara la medición.

Los resultados obtenidos tuvieron NTU como dimensional. Se obtuvo el promedio y desviación estándar del parámetro evaluado para ser comparado según la norma COGUANOR NGO 33 006.

c. Medición de conductividad

Se utilizó el conductímetro marca: Fisher Scientific, accumet® BASIC modelo: AB15 Plus para medir la conductividad.

Se lavó con agua destilada el electrodo antes y después de medir cada muestra. Se utilizó como control agua destilada y se midieron cada una de las muestras.

Los resultados obtenidos tuvieron como dimensional $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se obtuvo el promedio y desviación estándar del parámetro evaluado para ser comparado según la norma COGUANOR NGO 33 006.

d. Medición de oxígeno disuelto

Se utilizó el equipo marca HACH®, modelo: DR/890 para medir el oxígeno disuelto.

Se ingresó el programa 71 al equipo, se agregaron 10 mL de agua destilada al tubo de muestra, se colocaron en el equipo y se presionó el botón ZERO para determinar el blanco.

En un beaker de 50 mL se agregaron aproximadamente 40 mL de muestra y se colocó dentro una ampolla de oxígeno disuelto de rango bajo para que se llenara de la muestra.

Se colocó inmediatamente la ampolla dentro del equipo y se presionó el botón READ para que se realizara la medición.

Los resultados obtenidos tuvieron como dimensional $\mu\text{g}/\text{L}$. NOTA: Luego de 30 segundos de haber llenado la ampolla, ésta puede absorber oxígeno del aire por lo que es importante realizar rápido la medición. Se obtuvo el promedio y desviación estándar del parámetro evaluado para ser comparado según la norma COGUANOR NGO 33 006.

3. Análisis microbiológicos

a. Petrifilm™ 3M

Se realizaron diluciones seriadas de las muestras a evaluar utilizando 3 tubos por muestra, en el primero se colocaron 9.0 mL de agua destilada estéril y 1.0 mL de la muestra pura para obtener una dilución 1:10, se cerró y mezcló homogéneamente el tubo. En el segundo tubo se colocaron 9.0 mL de agua destilada estéril y 1.0 mL de la dilución 1:10 para obtener una dilución 1:100, se cerró y mezcló homogéneamente al igual que el primero y en el último tubo se realizó el mismo procedimiento, agregando esta vez, 1.0 mL de la dilución 1:100 para obtener una dilución 1:1000.

*Esto se realizó también con los controles positivos.

Se colocó la placa Petrifilm™ 3M EC en una superficie plana, se levantó el film superior de la misma.

Se agregó, con una pipeta, 1 mL de la muestra en el centro del film inferior de la placa y se bajó lentamente el film superior de manera que no se formaran burbujas durante ese procedimiento.

Con un aplicador, se ejerció presión directamente sobre la placa, se removió el aplicador y se dejó gelificar el medio durante 1 minuto.

Se repitió el proceso para cada muestra en una placa diferente.

Se apilaron las placas boca arriba en una incubadora durante 24 h a 37°C; transcurrido ese tiempo se realizó un conteo de las colonias rojas obtenidas productoras y no productoras de gas. Los resultados obtenidos se presentaron con una dimensional de UFC/mL. Se obtuvieron los valores de promedio y desviación estándar para ser comparados según los límites presentados por la norma COGUANOR NGO 29 001.

b. Número más probable (NMP) utilizando Colitag™

Se agregó el reactivo Colitag™ a la muestra de 100 ml que se iba a analizar.

Se mezcló y luego se distribuyó en 10 tubos de 10 mL cada uno con su tapadera.

Los tubos se incubaron a 35°C durante 24 h; luego de transcurrido el tiempo, se analizó el cambio de coloración a amarillo para determinar presencia de coliformes totales.

Utilizando una lámpara de luz Ultravioleta (365nm) se determinó si existía fluorescencia o no. Para determinar el número más probable de microorganismos presentes, se anotan los tubos positivos obtenidos y se comparan según las tablas control de la norma COGUANOR NGO 29 001 para determinar si la cerveza final cumple o no con los parámetros establecidos por dicha norma.

c. Crecimiento en agar EMB

Se prepararon 10 cajas Petri con agar EMB marca Merck® agregando 7.2 g de medio en 200 mL de agua destilada en un Erlenmeyer de 500 mL.

Se colocó el Erlenmeyer con la solución preparada en una estufa y se calentó con agitación hasta punto de ebullición.

Posteriormente, se tapó con papel aluminio y se colocó en la autoclave durante 15 minutos a 121°C.

Con ayuda de un mechero, se distribuyó el medio que salió de la autoclave en las 10 cajas Petri que fueron debidamente rotuladas.

Se esterilizaron asas en argolla para estriar en cada caja de Petri, una muestra del producto final obtenido en cada lote. Las tres cajas Petri inoculadas, fueron incubadas a 37°C durante 24h.

d. Tinción Gram

Se agregó una gota de agua destilada en un portaobjetos limpio; con mechero encendido, se esterilizó un asa en punta y se picó una colonia que se diluyó en la gota de agua destilada. Se dejó secar la muestra agitándola suavemente sobre el mechero hasta ya no observar agua y se dejó enfriar.

Se agregaron gotas de cristal violeta hasta cubrir toda la muestra y se dejó reposar el portaobjetos durante 1 minuto.

Se lavó el portaobjetos con agua destilada y luego se le agregaron gotas de lugol hasta cubrir la muestra y nuevamente se dejó reposar durante 1 minuto.

Se lavó con agua destilada y luego se agregaron 3 gotas de una solución alcohol:acetona que se lavaron inmediatamente con agua destilada.

Se agregaron gotas de safranina hasta cubrir la muestra y se dejó reposar durante 1 minuto. Se lavó con agua destilada y se dejó secar.

Se observaron las muestras en el microscopio y se identificaron.

4. Análisis de viabilidad de levaduras

a. Citometría de flujo

Para el conteo de levaduras se utilizó el equipo marca Millipore Sigma, Guava® Muse® Cell Analyzer.

Se encendió el equipo y se procedió a calibrar el mismo, para ello se preparó una solución formada por dos reactivos proporcionados ya con el equipo. Se midieron 380 μ L del primer reactivo y 20 μ L del segundo con una micropipeta y se agregaron en un microtubo con tapadera para luego ser agitados vigorosamente.

Para calibrarlo se seleccionó la pestaña “Chequeo de sistema” y se procedió a calibrar según lo pedía el equipo. Una vez calibrado, se seleccionó el programa “Ensayo de Conteo y Viabilidad”, se colocó y llenó primero un microtubo de 1.0 mL sin tapa con agua destilada para medir el blanco en el equipo.

Paralelo, se realizó una dilución 1:1 de la muestra a medir y agua destilada y se colocó en un nuevo microtubo de 1.0mL sin tapa para realizar la medición de la muestra. Se colocó la muestra y se ajustó la gráfica que aparece en la pantalla para adaptar la viabilidad según cómo van apareciendo las células. Una vez ajustada, se colocó el nombre de la muestra y se volvió a colocar en el equipo la misma para que se cuantificara.

El resultado se obtuvo en unidades de células por mililitro y en porcentaje de viabilidad. Finalizado el análisis, se seleccionó el programa de “Limpieza Completa” y se apagó el equipo.

b. Cámara de Neubauer

Para realizar el conteo celular en la cámara de Neubauer se realizaron diluciones seriadas de las muestras a analizar que fueron 1:10, 1:100 y 1:1000. Inicialmente se prepararon 3 microtubos de 1.7mL, en el primer tubo se colocaron 900 μ L de agua destilada estéril y 100 μ L de la muestra de levadura a medir para obtener una dilución 1:10 y se mezclaron de manera homogénea. En el segundo microtubo se colocaron 900 μ L de agua destilada estéril y 100 μ L de la dilución 1:10 para obtener una dilución 1:100 y se mezcló de igual manera. Para el tercer microtubo se colocaron también 900 μ L de agua destilada estéril y 100 μ L de la dilución 1:100 para obtener una dilución 1:100 mezclando homogéneamente.

Se prepararon nuevamente 3 microtubos y a cada uno se les agregaron 400 μL de muestra, o dilución según el caso, y 40 μL de azul de metileno, se dejó reposar y luego se homogenizó. Se tomaron 50 μl de cada dilución teñida y se colocaron en la cámara de Neubauer para el recuento.

Se colocó la cámara en el microscopio y se hizo un conteo de las células vivas y muertas encontradas en cada cuadrante.

Se realizó un promedio de células vivas y muertas obtenidas y se calculó la viabilidad de las levaduras.

VII. RESULTADOS

A. ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

Cuadro 25. Cumplimiento de parámetros físicos y organolépticos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR NGO 29001.

Parámetro	COGUANOR NGO 29001		Resultados			Cumplimiento					
			Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua	Lote 1 de agua		Lote 2 de agua		Lote 3 de agua	
	LMA ²	LMP ³				SI	NO	SI	NO	SI	NO
Temperatura (°C)	NA ⁵		24.57 ± 0.25	24.40 ± 0.36	24.47 ± 0.40	X		X		X	
Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.0-7.5	6.5-8.5	7.00 ± 0.20	7.00 ± 0.20	7.00 ± 0.20	X		X		X	
Conductividad eléctrica (µs/cm)	750.0	1500.0	676.33 ± 22.85	678.33 ± 19.73	667.67 ± 22.50	X		X		X	
Olor	NR ⁴	NR	NR	NR	NR	X		X		X	
Color Real (Pt/Co)	5.0	35.0	2.23 ± 0.42	1.97 ± 0.20	2.10 ± 0.30	X		X		X	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	500.0	1000.0	7.27 ± 0.29	8.17 ± 0.20	8.27 ± 0.47	X		X		X	
Turbidez (UNT ⁶)	5.0	15.0	3.00 ± 0.50	3.00 ± 0.50	3.00 ± 0.50	X		X		X	

Notas:

1. Se utilizó la desviación estándar como parámetro de precisión para los datos de temperatura, conductividad eléctrica, color real y sólidos disueltos totales. Para los datos de pH y turbiedad se utilizó la incertidumbre calculada como parámetro de precisión. Para el lote 3 de agua se realizó una excepción, ya que se tomó la incertidumbre como valor de precisión para los datos de color real y sólidos disueltos totales.
2. LMA: Límite Máximo Aceptable
3. LMP: Límite Máximo Permisible
4. NR: No Rechazable
5. NA: No Aplica
6. UNT: Unidad Nefelométrica de Turbidez
7. Todas las mediciones se realizaron en las siguientes condiciones: 25°C, 60% humedad y una presión atmosférica de 990 mbar.
8. Se utilizó la norma COGUANOR NGO 29001 como parámetro de cumplimiento debido a que esa es la norma que exige el Ministerio de Salud.

Cuadro 26. Cumplimiento de parámetros químicos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR 29001.

Parámetro	COGUANOR NGO 29001		Resultados			Cumplimiento					
			Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua	Lote 1 de agua		Lote 2 de agua		Lote 3 de agua	
	LMA ²	LMP ³				SI	NO	SI	NO	SI	NO
Calcio (mg/L)	75.0	150.0	0.03 ± 1.71x 10 ⁻²	0.03 ± 1.71x 10 ⁻²	0.02 ± 1.71x 10 ⁻²	X		X		X	
Magnesio (mg/L)	50.0	100.0	3.83 ± 0.33	4.10 ± 0.85	4.74 ± 0.04	X		X		X	

Parámetro	COGUANOR NGO 29001		Resultados			Cumplimiento					
			Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua	Lote 1 de agua		Lote 2 de agua		Lote 3 de agua	
	LMA ²	LMP ³				SI	NO	SI	NO	SI	NO
Dureza total (mg/L)	100.0	500.0	3.89 ± 0.32	4.13 ± 0.86	4.75 ± 0.03	X		X		X	
Cloruro (mg/L)	100.0	250.0	13.93 ± 0.91	12.30 ± 0.35	12.43 ± 0.58	X		X		X	
Cloro residual (mg/L)	0.5	1.0	0.04 ± 1.71×10^{-2}	0.04 ± 1.71×10^{-2}	0.02 ± 1.71×10^{-2}	X		X		X	
Nitratos (mg/L)	---	50.0	8.03 ± 0.14	8.13 ± 0.14	8.38 ± 0.15	X		X		X	
Nitritos (mg/L)	---	3.0	0.42 ± 1.71×10^{-2}	0.43 ± 1.71×10^{-2}	0.47 ± 1.71×10^{-2}	X		X		X	
Sulfatos (mg/L)	100.0	250.0	3.00 ± 0.62	3.00 ± 0.62	3.00 ± 0.62	X		X		X	

Notas:

1. Se utilizó la desviación estándar como parámetro de precisión para los datos de magnesio, dureza total y cloruro. Para los datos de calcio, cloro residual, nitratos, nitritos y sulfatos se utilizó la incertidumbre calculada como parámetro de precisión. Para el lote 3 de agua se realizó una excepción ya que se tomó la incertidumbre como parámetro de precisión para los datos de magnesio y dureza total.
2. LMA: Límite Máximo Aceptable
3. LMP: Límite Máximo Permisible
4. Todas las mediciones se realizaron en las siguientes condiciones: 25°C, 60% humedad y una presión atmosférica de 990 mbar.
5. Se utilizó la norma COGUANOR NGO 29001 como parámetro de cumplimiento debido a que esa es la norma que exige el Ministerio de Salud.

Cuadro 27. Cumplimiento de parámetros microbiológicos de acondicionamiento del agua para proceso según norma COGUANOR 29001.

Parámetro	COGUANOR NGO 29001	Resultados								
	LMP ¹	Lote 1 de agua	Cumplimiento		Lote 2 de agua	Cumplimiento		Lote 3 de agua	Cumplimiento	
			SI	NO		SI	NO		SI	NO
Coliformes fecales (UFC ² /100mL)	Un microorganismo en una muestra de 100 mL	ND ³ /100 Ml	X		ND/100 mL	X		ND/100 mL	X	
Coliformes totales (UFC/100mL)	Un microorganismo en una muestra de 100 mL	ND/100 mL	X		ND/100 mL	X		ND/100 mL	X	
<i>E. Coli</i> (UFC/100mL)	No detectable en ninguna muestra de 100 mL	ND/100 mL	X		ND/100 mL	X		ND/100 mL	X	

Notas:

1. LMP: Límite Máximo Permisible

2. UFC: Unidad Formado de Colonias

3. ND: No Detectable

4. Todas las mediciones se realizaron en las siguientes condiciones: 25°C, 60% humedad y una presión atmosférica de 990 mbar.

5. Se utilizó la norma COGUANOR NGO 29001 como parámetro de cumplimiento debido a que esa es la norma que exige el Ministerio de Salud.

B. PERFILES DE AGUA PARA ELABORAR CERVEZA

Cuadro 28. Cumplimiento de parámetros de perfil del agua para proceso según la norma BJCP 2008.

Parámetro (mg/L)	BJCP ¹ 2008	Resultados								
		Lote 1 de agua	Cumplimiento		Lote 2 de agua	Cumplimiento		Lote 3 de agua	Cumplimiento	
			SI	NO		SI	NO		SI	NO
HCO ₃ ⁻	50.0 – 150.0	7.01		X	0.00		X	0.00		X
Ca ⁺²	50.0 – 150.0	0.03		X	0.03		X	0.02		X
Mg ⁺²	0.0 – 10.0	3.83	X		4.10	X		4.74	X	
Na ⁺	0.0 – 50.0	5.34	X		0.00	X		0.00	X	
Cl ⁻	0.0 – 75.0	13.93	X		12.30	X		12.43	X	
SO ₄ ⁻²	100.0 – 350.0	3.00		X	3.00		X	3.00		X

Notas:

1. BJCP: Beer Judge Certification Program.

Cuadro 29. Calificación del perfil de agua utilizada para elaboración de cerveza según el nivel de cumplimiento establecido por la BJCP 2008.

Parámetro	Valoración establecida en la BJCP 2008	Puntos por cumplimiento	Puntaje total
HCO_3^-	12.5	0.00	37.5/100.0
Ca^{+2}	25.0	0.00	
Mg^{+2}	12.5	12.5	
Na^+	12.5	12.5	
Cl^-	12.5	12.5	
SO_4^{-2}	25.0	0.00	

C. SISTEMA DE FILTRACIÓN

Cuadro 30. Propuesta de sistema de acondicionamiento de agua específico para la fabricación de cerveza.

Equipo	Especificaciones importantes		Foto
Bomba dosificadora de cloro	Marca	PULSAtron®	
	Modelo	LPK2	
	Capacidad nominal máxima de NaClO	$11.36 \frac{\text{L}}{\text{día}}$	
	Dosis de hipoclorito de sodio	$2.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$	
	Concentración de solución de NaClO	0.5 % (p/v)	
	Flujo de diseño	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left(5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)$	

Filtro de sedimentos (Multicapa)	Marca	STRUCTURAL Pentair Water	
	Modelo	Polyglass Pentair® Structural	
	Dimensiones	Diámetro	Largo
		0.254 m (10 in)	1.37 m (54 in)
	Material de construcción	Carcasa de polietileno de alta de densidad	
	Área de filtro	0.05 m ² (0.54 ft ²)	
	Volumen de filtro	0.062 m ³ (2.19 ft ³)	
	Volumen de material filtrante	0.042 m ³ (1.50 ft ³)	
	Material filtrante	Tipo	Antracita
		Cantidad	22.7 $\frac{\text{kg}}{\text{bulto}}$
		Volumen	0.03 $\frac{\text{m}^3}{\text{bulto}}$ (1.00 $\frac{\text{ft}^3}{\text{bulto}}$)
		Densidad	1.2 – 1.8 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
		Porosidad	0.60 – 0.80 mm
	Flujo de diseño	3.40x10 ⁻⁴ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ (5.40 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$)	
	Flujo de retrolavado	5.10x10 ⁻⁴ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ (8.10 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$)	
	Marca	STRUCTURAL Pentair Water	
	Modelo	Polyglass Pentair® Structural	



Filtro de carbón activado	Dimensiones	Diámetro		Largo
		0.254 m (10 in)		1.37 m (54 in)
	Material de construcción	Carcasa de polietileno de alta de densidad		
	Área de filtro	0.05 m ² (0.54 ft ²)		
	Volumen de filtro	0.062 m ³ (2.19 ft ³)		
	Volumen de material filtrante	0.042 m ³ (1.50 ft ³)		
	Material filtrante	Tipo	Carbón activado mineral	
		Cantidad	25.0 $\frac{\text{kg}}{\text{bulto}}$	
		Volumen	0.06 $\frac{\text{m}^3}{\text{bulto}}$ $\left(2.00 \frac{\text{ft}^3}{\text{bulto}}\right)$	
		Porosidad	Microporos: 2 nm Mesoporos 2-50 nm Macroporos: > 50 nm	
	Flujo de diseño	3.40x10 ⁻⁴ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $\left(5.40 \frac{\text{gal}}{\text{min}}\right)$		
	Flujo de retrolavado	3.40x10 ⁻⁴ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $\left(5.40 \frac{\text{gal}}{\text{min}}\right)$		
Marca	VIQUA® Simply Safe Water			
Modelo	S5Q-PA			





Lámpara de luz UV	Material de construcción	Acero inoxidable 304			
	Volumen de la cámara	$1.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ (0.062 ft ³)			
	Dosis de radiación UV	$30 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}$			
	Flujo de diseño	$3.80 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left(6.00 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)$			
Filtro pulidor	Marca	VERTEK®			
	Modelo	BB			
	Dimensiones	Diámetro	Largo		
		0.114 m (4.5 in)	0.254 m (10.0 in)		
	Material de construcción	Vaso	Porta cartucho		
		Polipropileno	Polipropileno reforzado		
	Cartucho	Material	Fibra de polipropileno		
		Dimensiones	Diámetro		Largo
			0.060 m (2.38 in)		0.251 m (9.88 in)
			Micra		1
	Flujo de diseño	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left(5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)$			
Dimensiones	Diámetro	Alto			
	0.50 m	1.00 m			

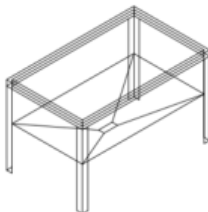
Tanque de almacenaje de agua	Material de construcción	Acero Inoxidable	
	Capacidad máxima	200 L (0.20 m³)	
	Observaciones	Recirculación a lámpara UV	

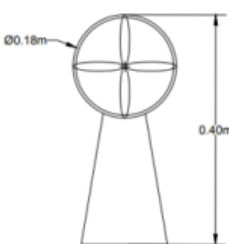
Notas:

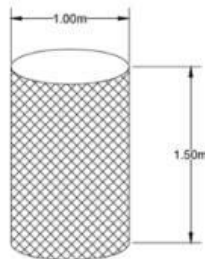
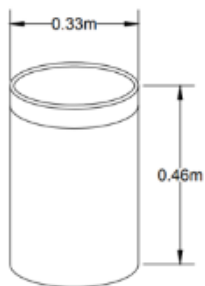
1. Las especificaciones detalladas de los equipos se encuentran en las respectivas fichas técnicas en la página 416 de Anexos .
2. Las especificaciones del material filtrante tanto para el filtro de sedimentos, como el para el filtro de carbón activado se encuentran en las Figuras 59 y 60 de Anexos, páginas 418 y 419. Las especificaciones del cartucho utilizado para el filtro pulidor se encuentran en las Figura 62 de Anexos, página 421.
3. El esquema general del sistema de acondicionamiento, de la tubería y la conexión de los equipos se encuentra en la Figura 243 de Anexos, página 542.

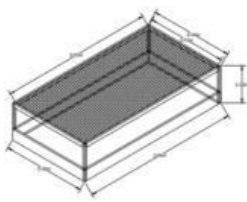
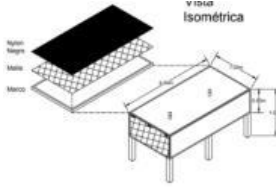
D. PROCESO DE MALTEADO

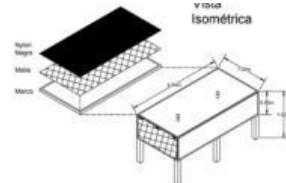
Cuadro 31. Equipo necesario para realizar el proceso de malteado de cebada

Tratamientos previos				
Separador 1				
Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	
	0.47 m	0.29 m	0.28 m	
Dimensiones de la malla de separación	Largo	Alto	Ancho	
	0.45 m	0.02 m	0.26 m	
Dimensiones de la tolva de descarga de impurezas	Largo	Alto	Ancho	
	0.47 m	0.06 m	0.28 m	
Angulo de la tolva de descarga impurezas	15°			

Material de construcción	Malla		Estructura general		
	Acero		Acero galvanizado		
Mesh de la malla de separación	2.00 mm (Mesh 10)				
Tipo de impurezas que remueve el separador	Materias gruesas				
Cantidad de cebada que puede procesar	0.23 kg/10 min (0.54 lb/10 min)				
Separador 2					
Dimensiones	Caja separadora		Ventilador		
	Largo	0.20 m	Diámetro rejilla	0.20 m	
	Alto	0.20 m			
	Ancho	0.10 m	Alto	0.40 m	
Material de construcción	Caja separadora	Estructura general	Rejilla y ventilador		
	Cartón piedra	Polietileno de alta densidad	Acero inoxidable		
Velocidad de la corriente de aire	167.0 m/min (10.0 km/h)				
Tipo de impureza que remueve el separador	Partículas ligeras				
Cantidad de cebada que puede procesar	6.80 kg/min (15.0 lb/min)				

Separador 3			
Dimensiones	Alto	Diámetro	
	1.50 m	1.00 m	
Material de construcción	Malla de polietileno de alta densidad		
Mesh la malla de separación	2.50 mm (Mesh 7)		
Tipo de impureza que remueve el separador	Granos descartados		
Cantidad de cebada que puede procesar	6.80 kg/5 min (15.0 lb/5 min)		
Tanque de remojo			
Dimensiones	Alto	Diámetro	
	0.46 m	0.33 m	
Material de construcción	Polietileno de alta densidad		
Volumen máximo general del tanque (Agua + Cebada)	3.50x10 ⁻² m ³		
Volumen máximo de cebada	2.700x10 ⁻² m ³		
Cantidad de cebada que puede procesar	17.0 kg (37.5 lb)		
Plancha de germinado			

Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	
	0.85 m	0.20	0.45 m	
Dimensiones de la malla de germinado	Largo	Alto	Ancho	
	0.83 m	0.02 m	0.43 m	
Material de construcción	Malla	Estructura general		
	Acero	Acero galvanizado		
Mesh de la malla de germinado	2.50 mm (Mesh 7)			
Capacidad máxima de cebada que puede germinar	9.00 kg (20.0 lb)			
Tamaño de la capa de cebada	0.01 m			
Caja de germinado				
Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	
	2.00 m	1.00 m	1.00 m	
Dimensiones de la caja de germinado	Largo	Alto	Ancho	
	2.00 m	0.50 m	1.00 m	
Mesh de la malla de germinado	2.50 mm (Mesh 7)			
	Estructura interna	Estructura intermedia	Estructura externa	



Material de construcción	Acero galvanizado		Acero		Polipropileno de alta densidad	
Sistema de iluminación	Foco LED	Cantidad	Consumo		Potencia	
		2	0.4 kWh		40 W	
		Color de luz		Luminiscencia		
		Blanco cálido (400-800 nm)		13.8±0.06 klux (I) 0.08±0.01 klux (O)		
Capacidad máxima de cebada que puede germinar	18.00 kg (40.0 lb)					
Tamaño de la capa de cebada	0.01 m					

Nota:

1. El diagrama de los equipos se encuentra en las Figuras 96 - 103 de Anexos página 450 a 457.
2. Las fichas técnicas de los equipos se encuentran en las páginas 414 en adelante.

Figura 34. Modelos que determinan la cantidad de azúcares fermentables de la cebada, según el tiempo de germinado.

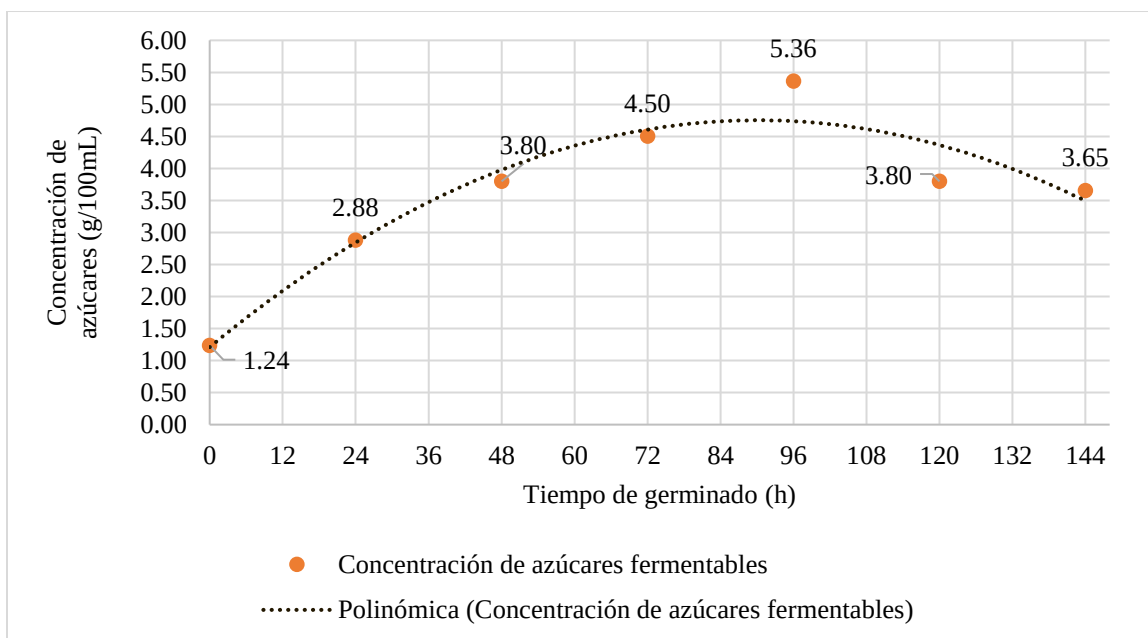
Modelo 1 (predecir la cantidad de azúcares fermentables, rango de 0-72 horas)

$$-0.0004x^2 + 0.0785x + 1.2098$$

$$R^2 = 0.9226$$

Condiciones de germinado para el Modelo 1		Condiciones de macerado para el Modelo 1	
Temperatura	25.0°C	Temperatura de macerado	66.0°C
Humedad	45.0 – 47.0 %	Tiempo de macerado	60.0 min
Tipo de cebada	Mezcla 2 y 6 hileras	Temperatura agua de lavado de granos	75.0°C
Espesor de capa de cebada	0.01 m	Tipo de azúcares medidos	Totales

Gráfica 2. Comportamiento de concentración de azúcares fermentables en función del tiempo



Modelo 2 (predecir la cantidad de azúcares fermentables, rango de 72-120 horas)

$$-0.0021x^2 + 0.3893x - 12.615$$

$$R^2 = 1.00$$

Condiciones de germinado para el Modelo 1		Condiciones de macerado para el Modelo 1	
Temperatura	25.0°C	Temperatura de macerado	66.0°C
Humedad	45.0 – 47.0 %	Tiempo de macerado	60.0 min
Tipo de cebada	Mezcla 2 y 6 hileras	Temperatura agua de lavado de granos	75.0°C
Espesor de capa de cebada	0.01 m	Tipo de azúcares medidos	Totales

Gráfica 3. Concentración de azúcares fermentables en función del tiempo

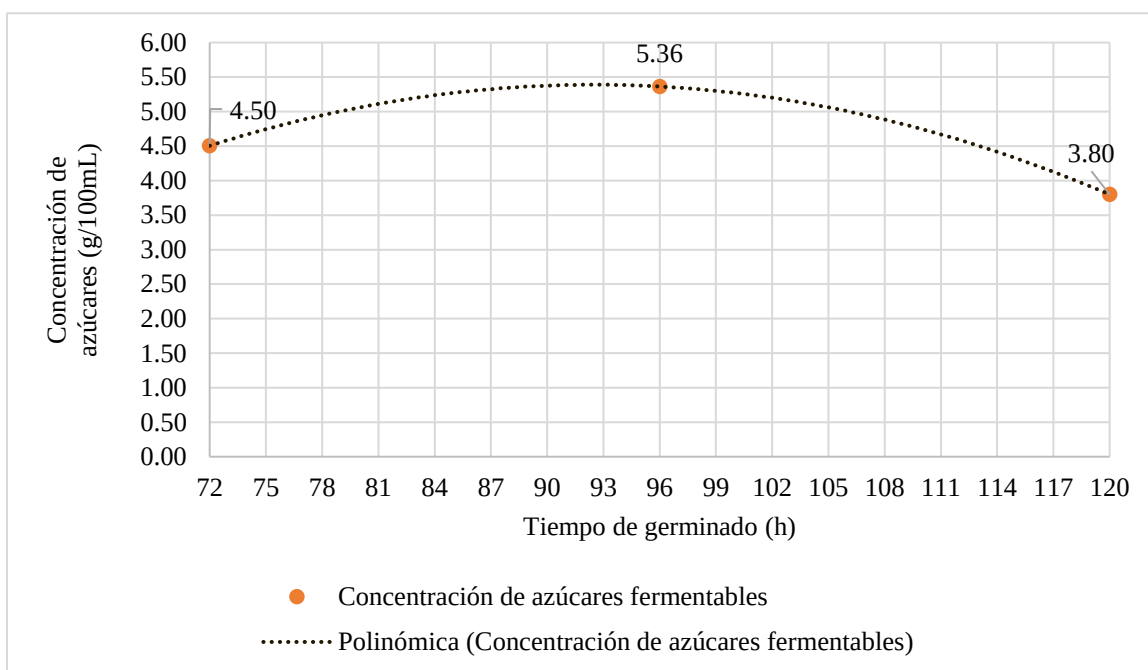
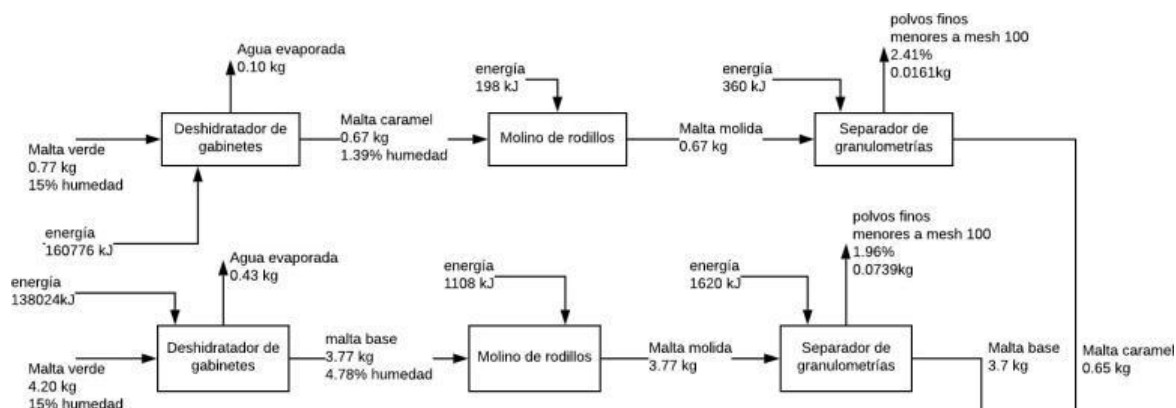
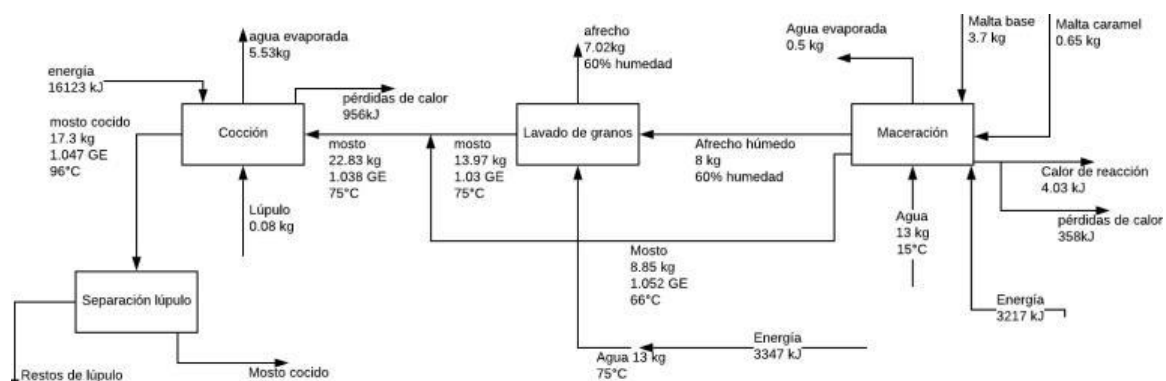


Figura 35: Balance de masa y energía de secado, molienda y tamizaje de malta base y malta caramel.



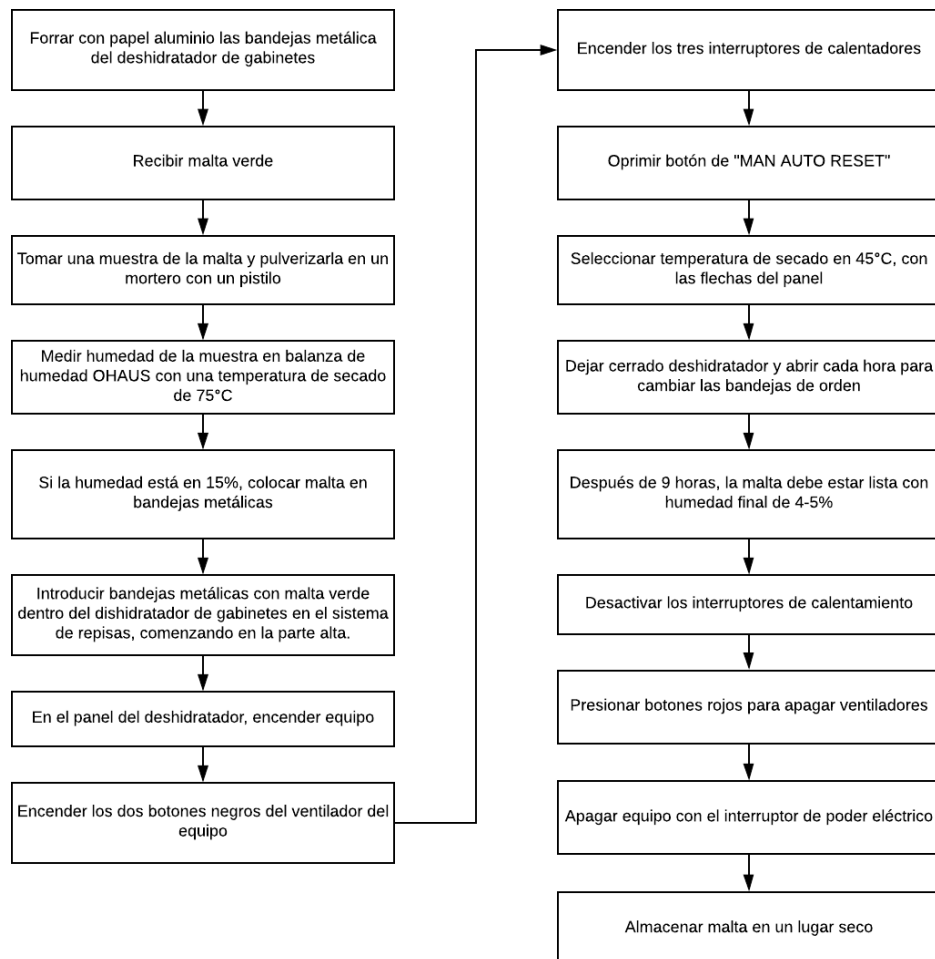
Balance de masa y energía para producción de 16 litros de mosto. Datos promedio de 3 lotes producidos. Ver anexos para ver cálculos de masa y energía.

Figura 36: Balance de masa y energía de maceración, lavado de granos y cocción



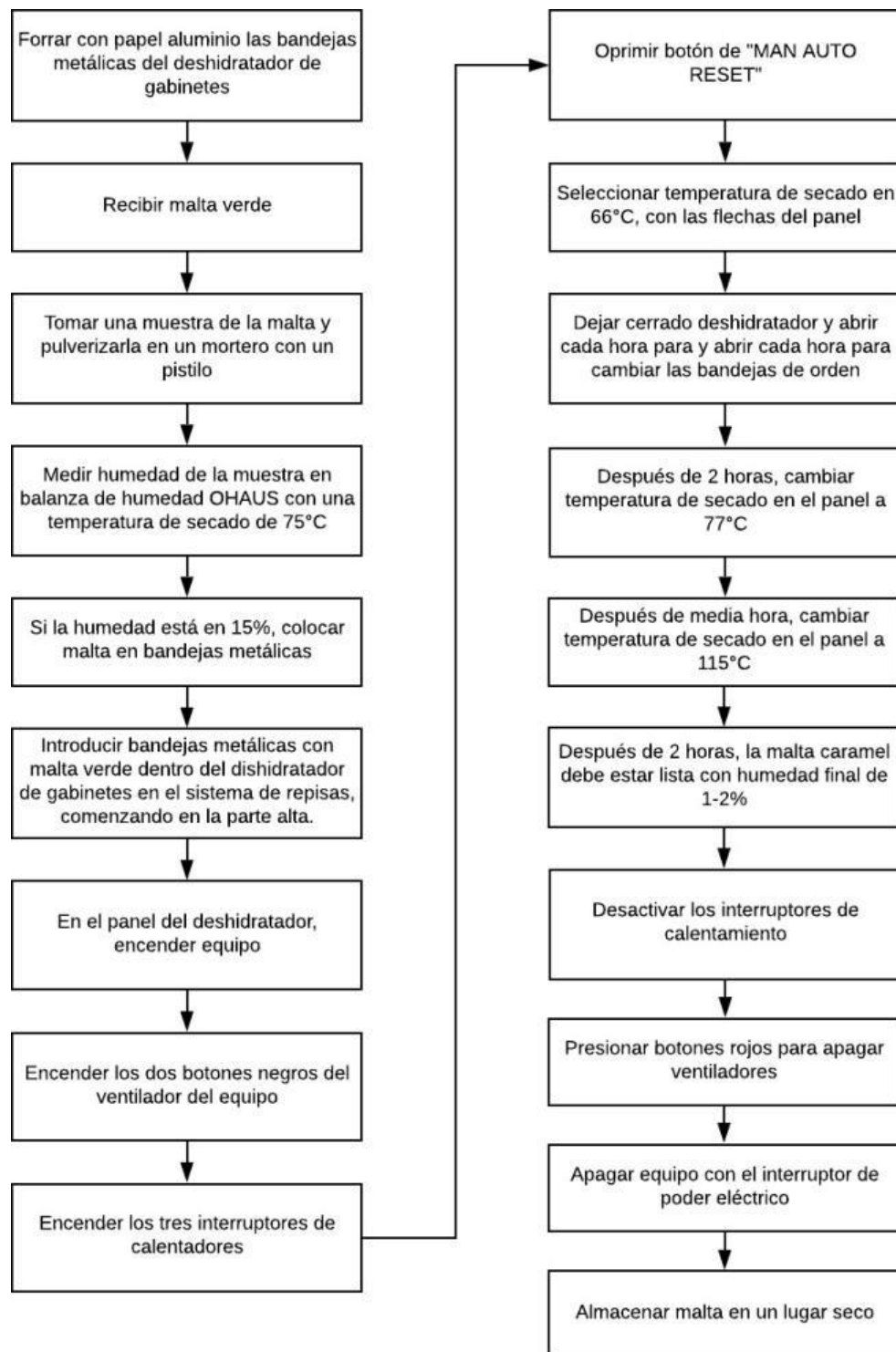
Balance de masa y energía para producción de 16 litros de mosto. Datos promedio de 3 lotes producidos. Ver anexos para ver cálculos de masa y energía.

Figura 37: Diagrama de procesos para el secado de malta base en el deshidratador de gabinetes



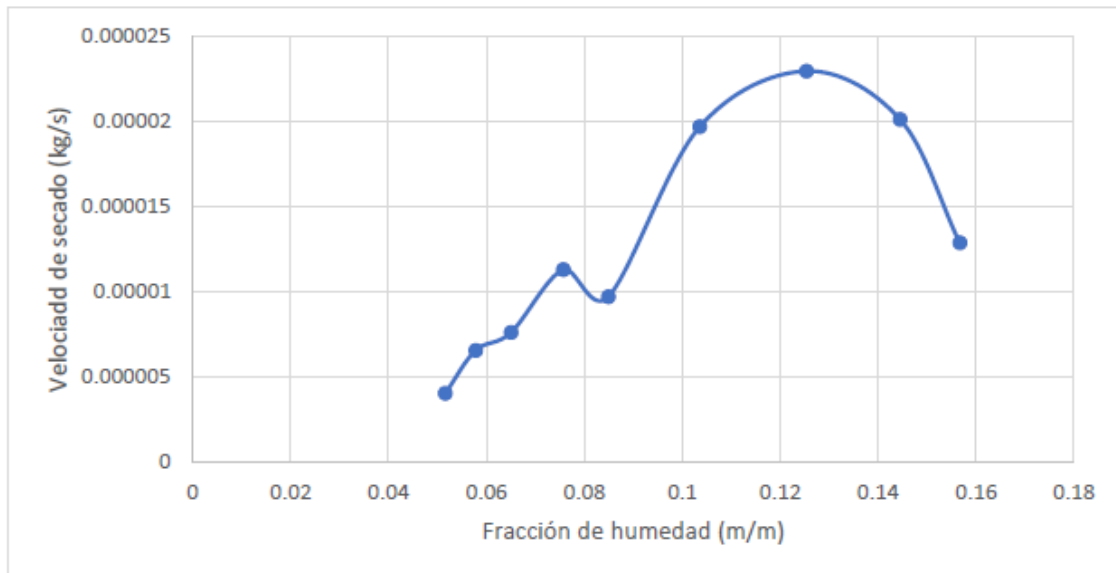
Ver metodología y anexos para ver materiales y equipos con datos técnicos

Figura 38: Diagrama de procesos para el secado y tostado de malta caramel en el deshidratador de gabinetes



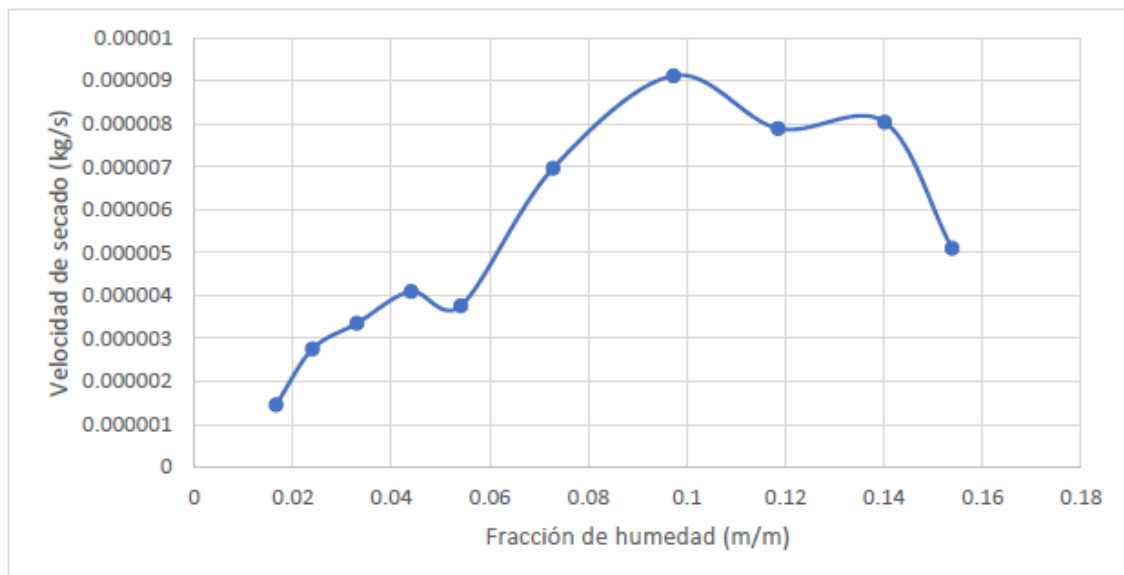
Ver metodología y anexos para ver materiales y equipos con datos técnicos

Gráfica 4. Curva de secado en el deshidratador de gabinetes de malta base



Humedad medida en balanza de humedad OHAUS en programa de secado de 75°C y finalización de 1 mg/ 90 s. Velocidad de secado calculada en base a masa de malta en cada lote promedio.

Gráfica 5. Curva de secado en el deshidratador de gabinetes de malta caramel



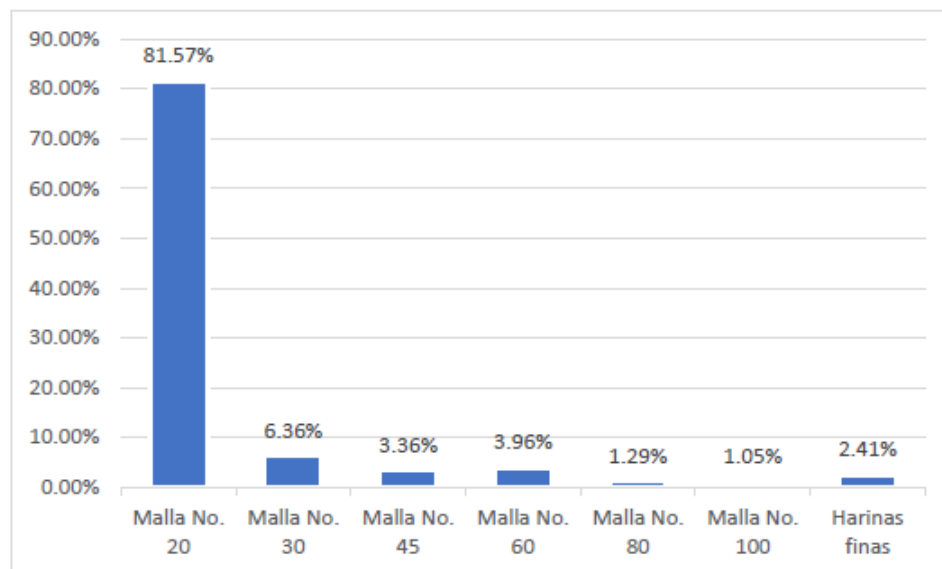
Humedad medida en balanza de humedad OHAUS en programa de secado de 75°C y finalización de 1 mg/ 90 s. Velocidad de secado calculada en base a masa de malta en cada lote promedio.

Cuadro 32. Humedad final en porcentaje másico de los dos tipos de maltas producidos

Tipo de Malta	Humedad promedio	Desviación estándar media
Malta base	4.78%	0.18%
Malta caramel	1.27%	0.33%

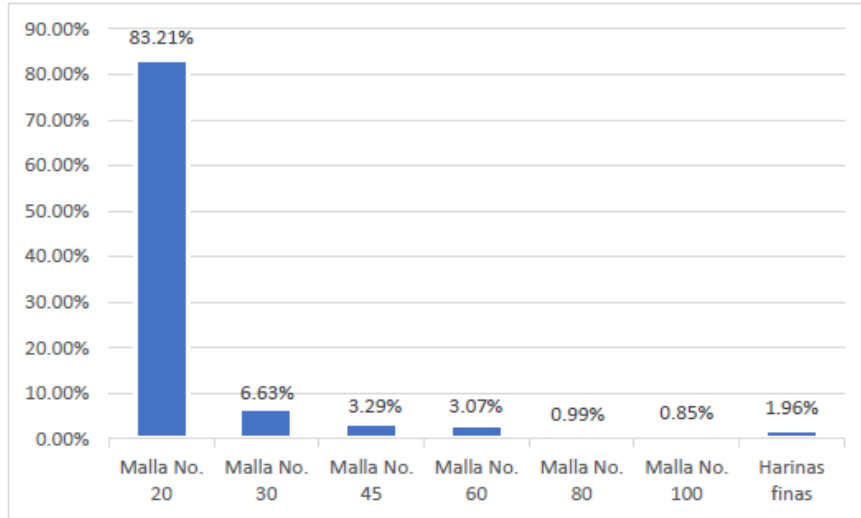
Medido en balanza de humedad OHAUS en programa de secado de 75°C y finalización de 1 mg/90s. Humedad en porcentaje másico. Humedad promedio de 3 lotes de producción.

Gráfica 6. Porcentajes en masa de análisis granulométrico a malta caramel, utilizando 2mm de separación entre rodillos en un secador de rodillos, en un solo paso



Análisis granulométrico obtenido en tamiz rotap W. S. Tyler. Programa de tamizaje de cinco minutos. Datos promedio de tres lotes producidos. Ver metodología para más detalles.

Gráfica 7. Porcentajes en masa de análisis granulométrico a malta base, utilizando 2mm de separación entre rodillos en un secador de rodillos, en un solo paso



Análisis granulométrico obtenido en tamiz rotap W. S. Tyler. Programa de tamizaje de cinco minutos. Datos promedio de tres lotes producidos. Ver metodología para más detalles.

Cuadro 33. Relación de distancia de rodillos fija en 2 mm y finos generados en la molienda de malta

Tipo de Malta	Porcentaje de harinas finas retiradas (menores a malla 100)	Desviación estándar
Malta base	1.96%	0.05%
Malta caramel	2.41%	0.02%

Porcentajes obtenidos de separación en tamiz rotap W.S. Tyler Programa de tamizaje de cinco minutos. Datos promedio de tres lotes producidos.

Cuadro 34. Color de cerveza final reportado en escala Lovibond

Color de cerveza promedio	Desviación estándar
4.67	2.08

Colores ubicados en escala colorimétrica Lovibond. Tres lotes producidos en total.

Cuadro 35. Cuadro comparativo entre programa de maceración experimental empleando malta fabricada en el laboratorio comparado con referencias empleando malta comercial

Programa de maceración	Dato Experimental	Dato teórico
Agua en maceración ($\text{m}^3 * 10^3$)	12.54	15
Agua en lavado de granos ($\text{m}^3 * 10^3$)	12.54	15
Temperatura en maceración ($^{\circ}\text{C}$)	66	66
Cantidad de malta (kg)	4.35	5.25
Tiempo de maceración (h)	1	1
Tiempo de cocción (h)	1	1
Gravedad específica	1.047	1.056

Utilizando datos promedio de maceración y cocción. Datos teóricos obtenidos de rendimiento de maltas comerciales en programa de cerveza Brewers Friend ®. Gravedad específica hace referencia a concentración de azúcares. Ver datos en anexos para ver datos de cada lote.

Cuadro 36. Amargor de la cerveza utilizando método Rager

Amargor de cerveza promedio (IBU)	Desviación estándar (IBU)
64.87	2.35

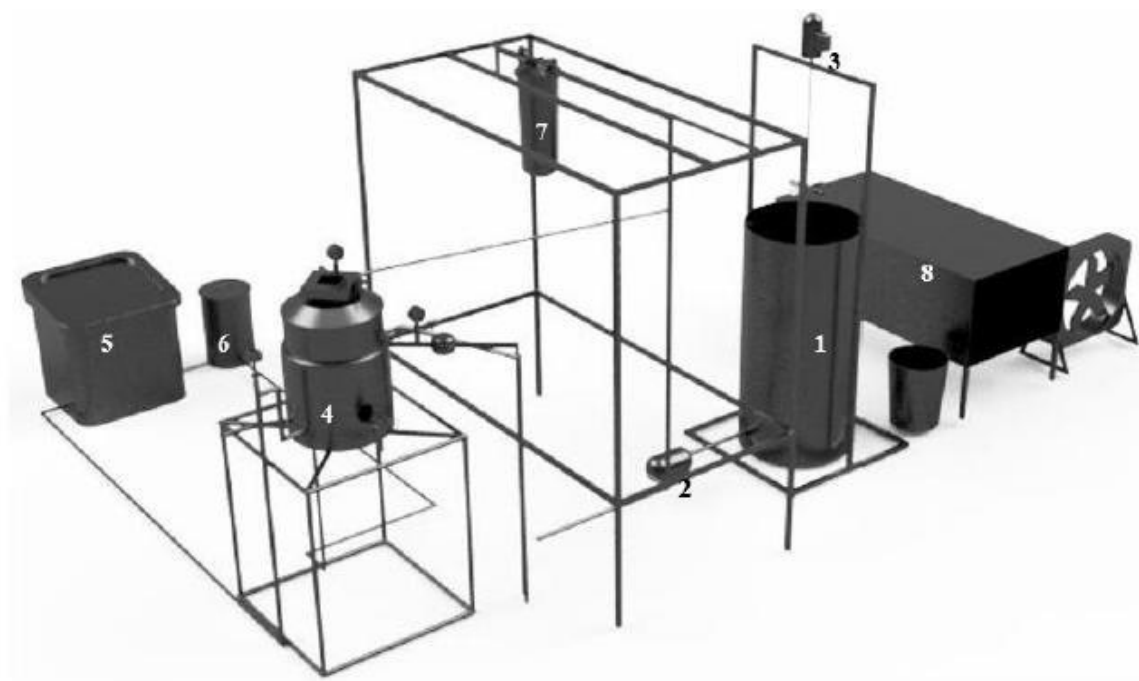
Utilizando el método Ranger para el cálculo de amargor de cerveza.

Cuadro 37. Concentración de azúcares analizados en HPLC presentes en el mosto

Parámetro	Maltosa	Sacarosa	Glucosa	Fructosa
Concentración (g/L)	52.9312	18.6571	39.0980	4.3342
Desviación estándar (g/L)	9.0349	15.7338	21.8138	0.9007

Azúcares fermentables obtenidos en promedio a partir de análisis de cada lote. Ver metodología para más detalles.

Figura 39. Diagrama de planta piloto con equipos disponibles



Cuadro 38. Equipos disponibles dentro del área de la planta piloto

Equipo	Descripción	Especificaciones
1*	Tanque de acero inoxidable cilíndrico vertical	Volumen máximo: 0.255 m ³ Válvula de salida: 0.483 m (1 ½ pulgadas)
2*	Bomba centrífuga de acero inoxidable	Motor: 450 W Cabeza máxima: 38 m
3*	Agitador	Motor: 1500 W Marca: WEG
4*	Fermentador enchaquetado de acero inoxidable	Capacidad de operación: 40 L
5	Enfriador	Marca: Tempstar Capacidad: 5216.67 W Rango de Temperatura: 1°C – 25°C

Equipo	Descripción	Especificaciones
6	Bomba de enfriador	Potencia: 1 hp Marca: National Filter Corp Flujo: 125 L/min
7	Filtro de cartuchos	Apertura: 5 micras Marca: Pentair Modelo: Big Blue
8	Cámara de germinado	Dimensiones: 2m * 1m * 1m Material: acero galvanizado malla de 5 cm Recubrimiento: polietileno Capacidad máxima: 18 kg de cebada

Ver anexos para ver fichas técnicas de equipos. *Equipos evaluados.

Cuadro 39. Equipos existentes en el laboratorio y auxiliares a la planta piloto

Equipo	Especificaciones	Foto
Deshidratador de gabinetes	Dimensiones: 1.93 m alto, 1.73 m ancho, 2.28 m profundidad Temperatura Máxima: 115°C Marca: Corbett Industries Modelo: EC-404-6 Potencia del motor del ventilador: 1 hp	
Secador de rodillos	Potencia del motor: 4 Kw Diámetro de rodillos: 0.10 m Diámetro de volantes: 0.17 m Velocidad máxima de rodillos: 359.8 rpm Fabricante: Talleres Hernández	
Tamiz rotap	Marca: W. S. Tyler Modelo: RX – 29 Tipo: Rotap Capacidad máxima: 450 g	

Balanza de humedad	Marca: OHAUS Modelo: MB 120 Capacidad máxima: 120 g Capacidad mínima: 0.1 g Precisión: 0.01% Voltaje: 110 V	
Balanza analítica	Marca: OHAUS Modelo: V31XH2 Capacidad máxima: 2000 g Capacidad mínima: 0.0001 g Precisión: 0.0001 g Voltaje: 110 V	
Balanza móvil	Marca: OHAUS Modelo: T31P Capacidad máxima: 150 kg Capacidad mínima: 1 kg Precisión: 0.01 kg Voltaje: 110 V	

Cuadro 40. Equipos requeridos para la operación de la planta piloto

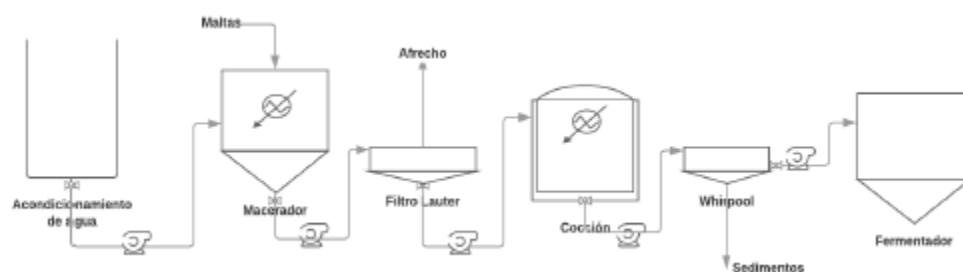
Equipo	Especificaciones	Función
Molino de rodillos	Marca: Roskamp Champion Modelo: FX 1600 Apertura entre rodillos ajustable Rodillos de 40.64 cm de diámetro (16 pulgadas) Potencia: No especificada	Moler debidamente el grano de malta de cebada a una hojuela y sustituir el secador de rodillos.
Serpentín de calentamiento con vapor	Largo de serpentín: 6.5 m Diámetro externo del tubo del serpentín: 0.021m (1/2 pulgadas diámetro nominal) Número de vueltas: 5	Proveer el calor necesario durante la cocción del mosto de cerveza en el tanque de la planta piloto de volumen de 0.255 m ³

	Diámetro de vueltas: 50 cm Flujo de vapor: $0.22 - 4.26 \cdot 10^3$ kg/s Material: acero inoxidable	
Válvula	De compuerta Diámetro de 0.021 m Diámetro externo (1/2 pulgada) Cuerpo acero al carbono	Controlar el flujo de entrada de vapor en el serpentín
Trampa de vapor	De cubierta invertida Presión máxima: 1.4 MPa Flujo de vapor máximo: $4.23 \cdot 10^3$ kg/s	Condensar vapor de salida del serpentín
Manómetro	Rango de Presión: 0 kPa – 150 kPa Carátula: 7 cm de diámetro Carátula con glicerina	Controlar la presión de vapor en la entrada y salida al serpentín
Termocupla	Rango de Temperatura: 0°C - 110°C Carátula: 7 cm de diámetro Carátula con glicerina	Controlar temperatura de mosto durante la maceración y cocción
Bombas	De rodete centrifugo helicoidal Marca Netzsch Modelo: Nemo ® Temperatura: -30°C - 350°C Caudal variable máximo: 400 m ³ /h Presión diferencial máxima: 24 bar	Bombeo de mosto caliente en las tuberías de la sala de cocimiento. Capacidad de bombeo de mosto con afrecho.
Macerador	Volumen de 0.191 m ³ Marca: Ziemann ® Agitador helicoidal Colibri ® Material: acero inoxidable	Mantener temperatura homogénea dentro del tanque. Agitación sin mayor esfuerzo cortante.
Cuba filtro	Volumen: 0.191 m ³ Marca: Ziemann ® Filtro Lauter modelo: LOTUS ® Fondo cónico	Separación de mosto y afrecho. Lavado de grano con rociadores de agua caliente.

	Material: acero inoxidable	
Tanque sedimentador Whirlpool	Volumen: 0.175 m ³ Marca: Ziemann ® Modelo: Diamond ® Fondo cónico y rotatorio Material: acero inoxidable	Separar sedimentos del mosto como restos de lúpulo.

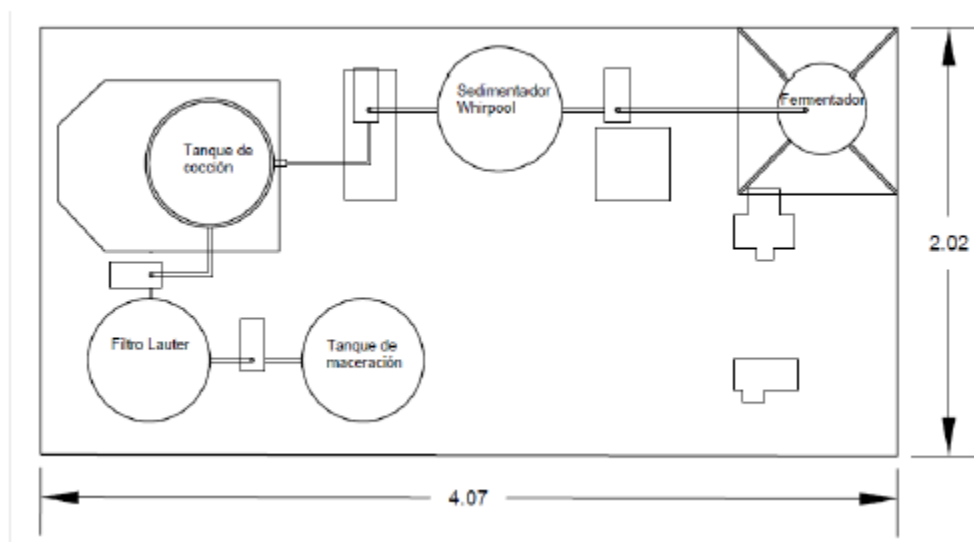
Ver en anexos especificaciones de equipos.

Figura 40: Equipos recomendados en casa de cocimiento



Equipos encontrados en casa de cocimientos en cervecerías industriales según literatura

Figura 41: Equipos requeridos en sala de cocimientos dispuestos en el área de la planta piloto



Propuesta en planta piloto con equipos recomendados. Unidad de medida: m

E. EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE FERMENTACIÓN

Cuadro 41. Comparación de condiciones de fermentación teóricas y experimentales en sistema escala laboratorio

Parámetros	Rango recomendado	Resultado experimental		SI CUMPLE / NO CUMPLE
		Promedio	Desviación estándar	
Temperatura (± 0.5 °C)	15 - 25	21.5	0.3	SI CUMPLE
pH (± 0.001)	3 - 6	5.144	0.989	SI CUMPLE

*Los datos del cuadro anterior hacen referencia a tres corridas de experimentación y a mediciones periódicas de los parámetros; los rangos recomendados corresponden a las especificaciones de la levadura Saf-Ale S-04.

Cuadro 42. Características iniciales y finales del mosto antes de fermentar en sistema escala laboratorio

Parámetros	Límites permitidos	Características iniciales		Características finales		SI CUMPLE / NO CUMPLE
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
Densidad (kg/m ³)	-	998.000	1.045	977.85	1.53	-
Concentración de sólidos disueltos ($\pm 0.01\%$ m/v °Brix)	-	9.96	1.38	6.20	1.28	-
pH del mosto (± 0.001)	3.9 – 4.5	5.848	0.181	4.445	0.052	-

Parámetros	Límites permitidos	Características iniciales		Características finales		SI CUMPLE / NO CUMPLE
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
Maltosa (±0.00001% m/v)	-	5.05976	0.52540	0.00000	0.00000	-
Sacarosa (±0.00001% m/v)	-	1.86041	0.23780	0.69709	0.91148	-
Glucosa (±0.00001% m/v)	-	3.62912	0.11480	1.72264	2.14563	-
Fructosa (±0.00001% m/v)	-	0.43342	0.09011	0.59271	1.02661	-
Etanol (±0.0001% v/v)	0.5 – 9.0	0.8	0.2	5.9	2.3	SI CUMPLE
Metanol (mg/L)	3	0	0	41	21	NO CUMPLE

*Se tomó como referencia un estudio realizado del contenido de los principales azúcares presentes en el mosto de cerveza. Los rangos en este cuadro hacen referencia a la norma COGUANOR NGO 33006 para bebidas alcohólicas fermentadas.

F. PARÁMETROS CINÉTICOS DE REACCIÓN Y RENDIMIENTOS DE MICROORGANISMOS Y PRODUCTO

Cuadro 43. Parámetros cinéticos de reacción

Fase	Ks (g/L)	$\mu_{\text{máx}}$ (L/g*h ⁻¹)	Kp (g/L)
Crecimiento celular	-74.00	-0.26	-
Decrecimiento celular	-25.00	-0.50	-0.70

En el cuadro anterior, Ks es la constante de afinidad al sustrato, $\mu_{\text{máx}}$ es la velocidad máxima de crecimiento celular y Kp es la constante de afinidad al producto. Estos parámetros se obtienen con la ecuación de Lineweaver-Burk y tomando el modelo de Monod. Los resultados corresponden al análisis del comportamiento de la levadura Saf-Ale S-04, cuya especie es denominada *Saccharomyces Cerevisiae*.

Cuadro 44. Rendimiento de microorganismos y producto respecto al sustrato

Fase	Rendimiento de microorganismos $Y_{X/S}$ (g levadura / g azúcares fermentables)		Rendimiento de producto $Y_{P/S}$ (g etanol / g azúcares fermentables)	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Crecimiento celular	-0.352	0.037	-0.674	0.989
Decrecimiento celular	70.570	22.802	-0.436	0.092

*En el cuadro anterior se muestran los resultados del rendimiento de levadura y etanol con respecto a los azúcares fermentables en las fases de crecimiento y decrecimiento celular. Se hace referencia al etanol como el producto principal obtenido en la reacción. El único valor positivo es el rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato en la fase de decrecimiento celular; los valores negativos se presentan en función de la disminución de la concentración de sustrato. Sin embargo, esto no es relevante para el resultado obtenido. Se obtuvieron los resultados a condiciones de temperatura entre 15°C y 25°C y a presión atmosférica.

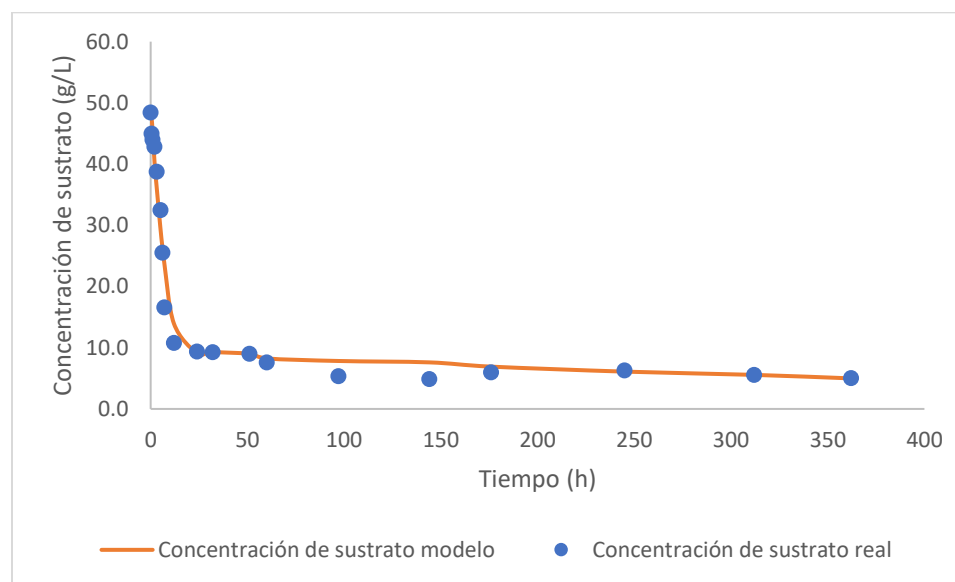
G. MODELO CINÉTICO DE FERMENTACIÓN MICROBIANA DE MOSTO DE CERVEZA

Cuadro 45. Ecuaciones de modelo cinético de predicción con respecto al sustrato

Fase	Ecuación
Crecimiento celular	$\frac{dC_s}{dt} = \frac{0.04 C_s C_N}{-74 + C_s}$
Decrecimiento celular	$\frac{dC_s}{dt} = \frac{-0.5 C_s C_N}{-25 + C_s} \left(\frac{-0.7}{-0.7 + C_p} \right)$

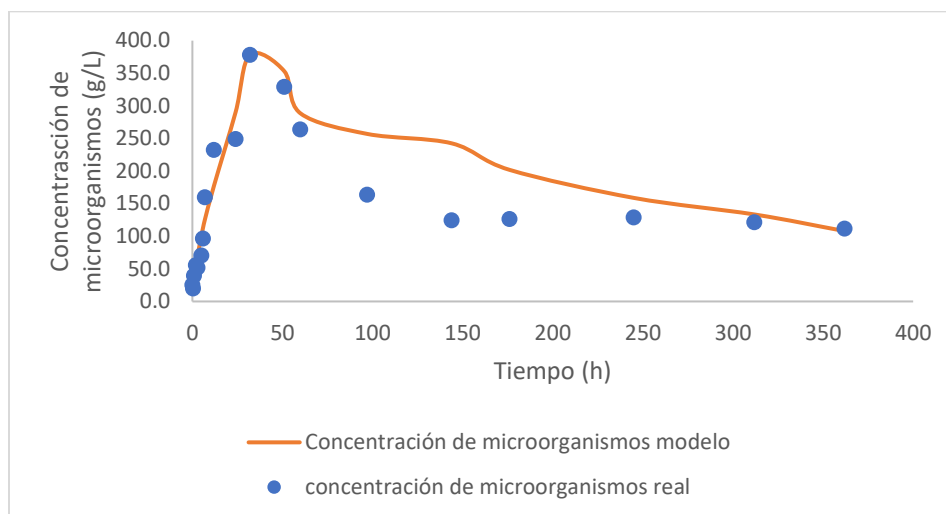
*En el cuadro anterior, se encuentran las ecuaciones de predicción generadas con respecto al sustrato a partir de los parámetros cinéticos de reacción obtenidos. C_s es la concentración de sustrato (azúcares fermentables), C_N es la concentración de microorganismos (levaduras) y C_p es la concentración del producto (etanol). Las ecuaciones del modelo cinético de predicción se obtuvieron a condiciones de temperatura entre 15°C y 25°C y a presión atmosférica.

Gráfica 8. Modelo cinético para predecir concentración de sustrato



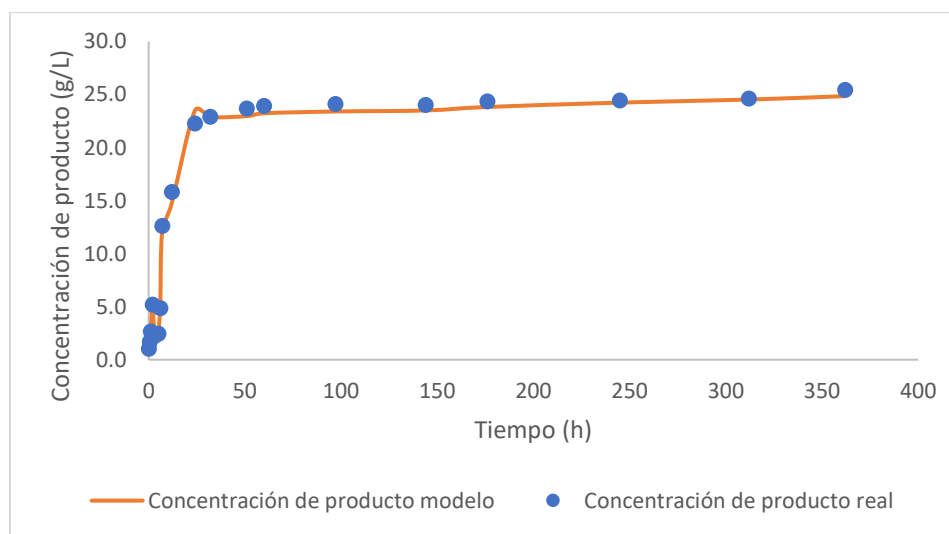
*En la gráfica anterior se observa el comportamiento de la concentración de sustrato para el modelo y el comportamiento de la concentración de sustrato real que se obtuvo de la experimentación. Además, se observa la disminución en la concentración de sustrato o azúcares totales en función del tiempo durante el curso de la reacción.

Gráfica 9. Modelo cinético para predecir concentración de microorganismos



*En la gráfica anterior se observa el comportamiento de la concentración de microorganismos para el modelo y el comportamiento de la concentración de microorganismos real que se obtuvo de la experimentación. Además, Se observan las fases de crecimiento exponencial, el punto de inflexión que marca el decrecimiento y la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 10. Modelo cinético para predecir concentración de producto



*En la gráfica anterior se observa el comportamiento de la concentración de producto para el modelo y el comportamiento de la concentración de producto real que se obtuvo de la experimentación. Además, se observa la disminución de formación de producto justo en el tiempo en el que se empieza a agotar el sustrato y cuando inicia el decrecimiento celular.

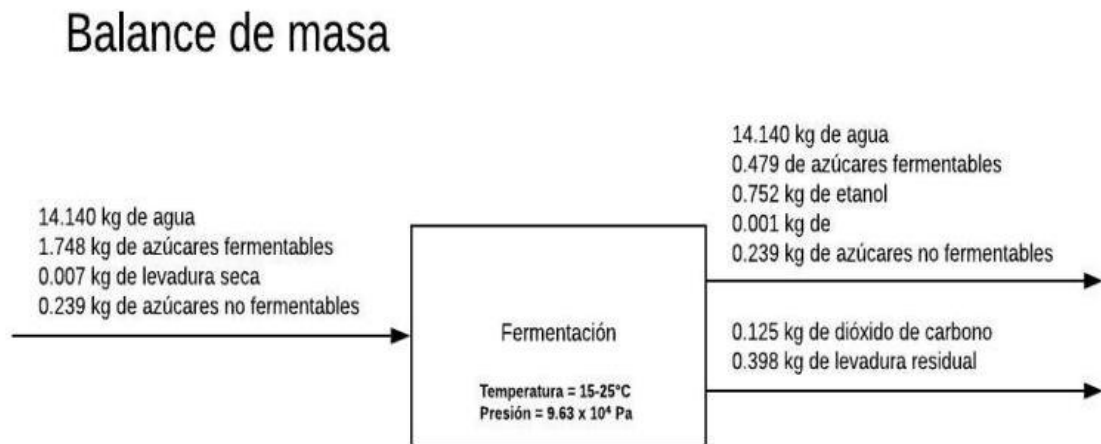
Cuadro 46. Porcentajes de error de comportamiento experimental y del modelo generado

Fase	Concentración de sustrato	Concentración de microorganismos	Concentración de producto
Crecimiento celular	2.39%	2.65%	0.25%
Decrecimiento celular	9.90%	17.51%	1.83%

*En el cuadro anterior se muestran los porcentajes de error de los datos experimentales de concentración de sustrato, microorganismos y productos con los datos del modelo generado utilizando la ecuación del modelo de Monod.

H. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

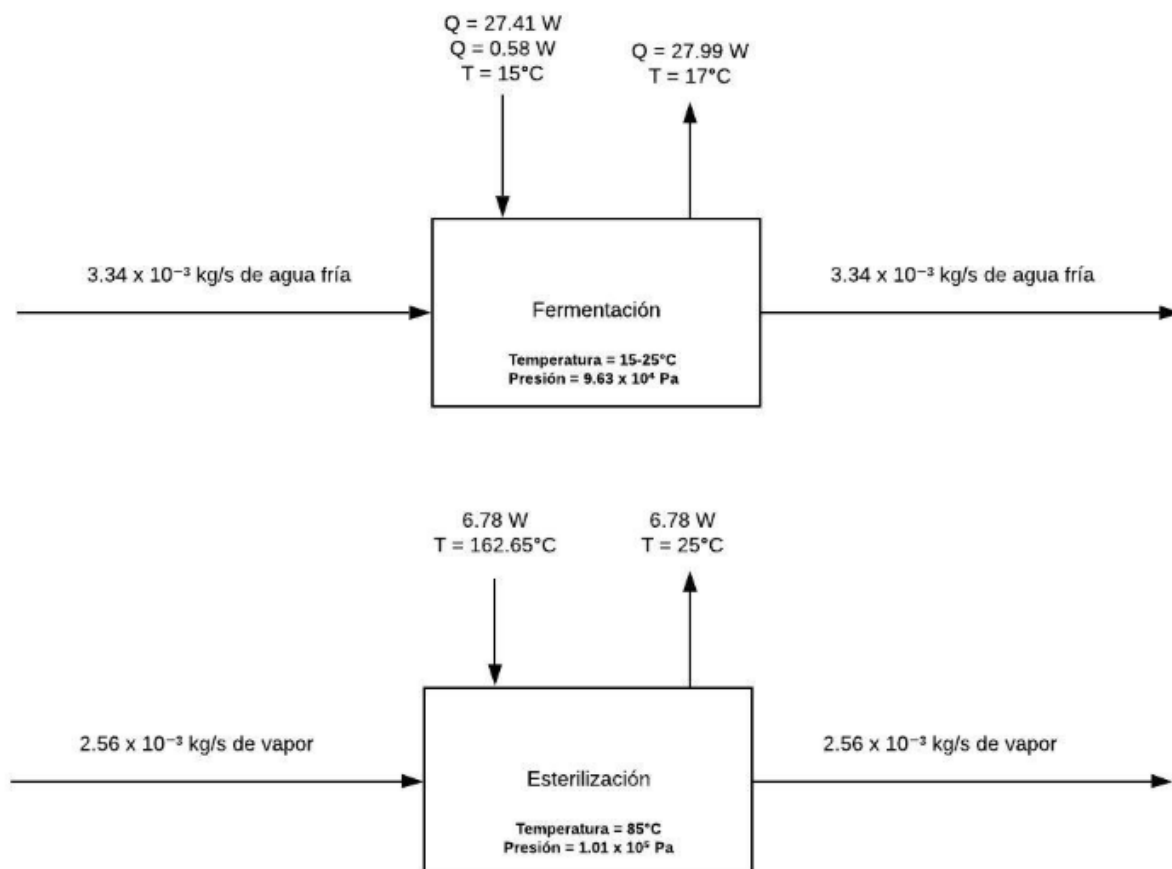
Figura 42. Balance de masa del proceso de fermentación de mosto de cerveza



*En la Figura anterior, se muestra el balance de masa del proceso de fermentación de mosto de cerveza. Los cálculos para el balance de masa se realizaron con base en los datos de concentración de azúcares fermentables, etanol producido y levadura obtenida después de cada lote realizado.

Figura 43. Balance de energía del proceso de fermentación de mosto de cerveza y de esterilización del medio de cultivo

Balance de energía



*En la Figura anterior, se muestra el balance de energía del proceso de fermentación de cerveza con levadura tipo Ale. En el balance de energía, se observa el calor de entrada que representa la transferencia de calor del ambiente al reactor y el calor generado que es producto de la reacción ya que es exotérmica. Asimismo, se muestra el calor de salida que representa la transferencia de calor de salida del agua fría que ingresa a la chaqueta.

I. EQUIPOS AUXILIARES NECESARIOS

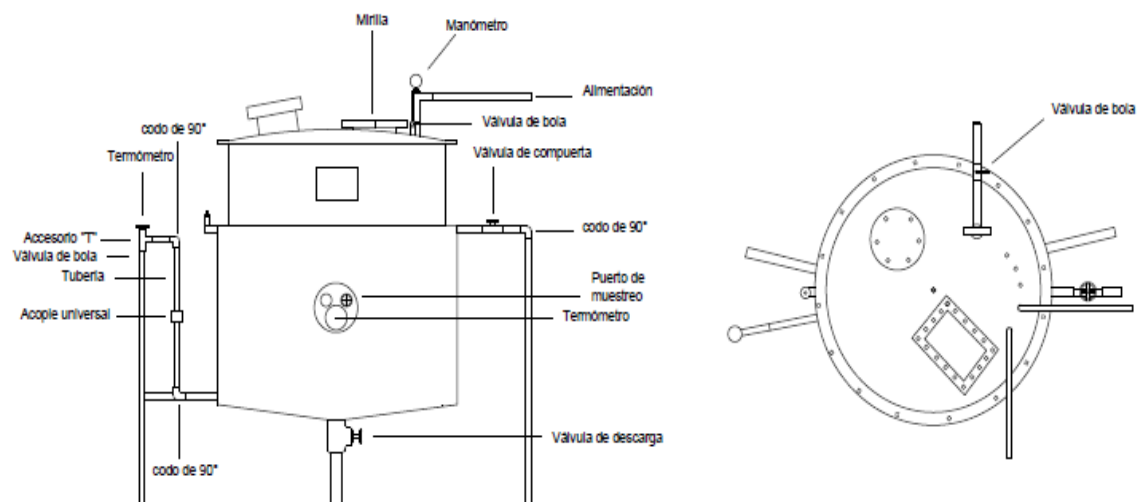
Cuadro 47. Equipos, tubería y accesorios implementados al fermentador disponible

Equipo / Material	Cantidad	Especificaciones generales	
Manómetro	1	Rango de medición	0 – 15 psi
		Diámetro nominal	0.00635m (1/4’')
Tubería	-	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')
Tubería	-	Material	Acero inoxidable
		Diámetro nominal	0.0254m (1’')
Termómetro	2	Rango de medición	0°C – 120°C
		Rango de presión	0 – 15 psi
		Diámetro nominal	0.00635m (1/4’')
Codo de 90°	3	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')
Accesorio “T”	2	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')
Válvula de compuerta	1	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')
Válvula de descarga / válvula de fondo	1	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0381m (1 ½’')
Válvula de bola	2	Material	Hierro galvanizado
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')

Equipo / Material	Cantidad	Especificaciones generales	
Válvula de bola	1	Material	Hierro galvanizado
Válvula de bola	1	Diámetro nominal	0.0254m (1'')
Acople universal	1	Material	Hierro galvanizado
Acople universal	1	Diámetro nominal	0.0254m (1'')
Manguera	1	Material	Vinil
Manguera	1	Diámetro	0.0127m (1/2'')
Sistema de enfriamiento	1	Capacidad	5216.67 W (17800 Btu/h)
Sistema de enfriamiento	1	Rango de temperaturas	1°C - 25°C
Bomba del sistema de enfriamiento	1	Tipo de bomba	Centrífuga
Bomba del sistema de enfriamiento	1	Potencia de la bomba	746 W (1 hp)

*En el cuadro anterior, se muestra un listado de los equipos, tubería y accesorios implementados en el fermentador disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias con especificaciones generales. Lo descrito en este cuadro forma parte del sistema sobre el que se realizaron las pruebas de funcionamiento del fermentador. En la sección de anexos, se encuentran las especificaciones y fichas técnicas completas de los equipos.

Figura 44. Equipos, tubería y accesorios implementados al fermentador disponible



*En la Figura anterior, se encuentran los equipos, accesorios y tubería implementados en el fermentador disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

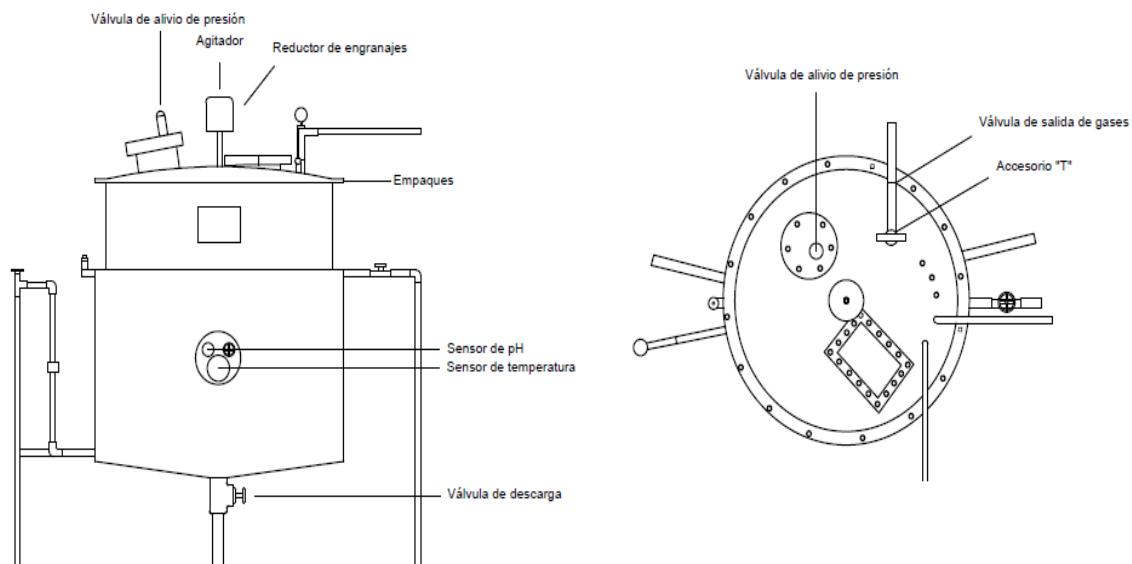
Cuadro 48. Equipos, tubería y accesorios propuestos para el fermentador disponible

Equipo / Material	Cantidad	Especificaciones generales	
Sensor de temperatura	1	Rango de medición	-50°C a 100°C
		Consumo energético	5W
Sensor de pH	1	Rango de medición	0 a 14 (pH)
		Precisión	± 0.02
		Material de carcasa	Acero inoxidable
Controlador digital	1	Condiciones de almacenamiento	-20°C a 70°C
		Voltaje	100V – 240V
Sistema de agitación mecánica	1	Tipo de impulsor	Turbina de discos
		Material del eje o impulsor	Acero inoxidable

		Potencia del motor	186.5 W
		Velocidad de agitación	1500 rpm
Equipo / Material	Cantidad	Especificaciones generales	
Reductor de engranajes	1	Relación de tipo	150:1
		Voltaje de funcionamiento	6V
Válvula de seguridad o alivio de presión	1	Material	Acero inoxidable
		Temperatura máx. de operación	121°C
Accesorio “T”	2	Material	Acero inoxidable
		Diámetro nominal	0.0127m (1/2’')
Válvula de descarga / válvula de fondo	1	Material	Acero inoxidable
		Tipo de válvula	Compuerta
		Diámetro nominal	0.0381m (1 ½’')
Válvula de salida de gases	1	Material	Acero inoxidable
		Tipo de válvula	Retención
		Diámetro nominal	0.0254m (1’')
Empaques	2	Material	Neopreno
		Rango de temperatura	20°C a 105°C

*En el cuadro anterior, se muestran los equipos y accesorios propuestos para implementar en el fermentador. Las especificaciones completas se encuentran en la sección de anexos.

Figura 45. Equipos, tubería y accesorios propuestos para el fermentador disponible



Cuadro 49. Requerimiento de agua fría para el proceso de fermentación

Q_R (W)	27.987 ± 0.0039
Temperatura de entrada (°C)	15
Temperatura de salida (°C)	17
$\dot{m}_1$ (kg/s)	0.0033 ± 0.0001

*En el cuadro anterior, Q_R es el calor que debe ser removido con el ingreso de agua fría a la chaqueta del reactor y $\dot{m}_1$ es el flujo másico necesario para llevar a cabo esta operación. Se comprobó el funcionamiento del sistema de enfriamiento disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 50. Requerimiento de agua fría para el proceso de maduración

Temperatura de entrada (°C)	2
Temperatura de salida (°C)	4
$\dot{m}_2$ (kg/s)	$6.168 \times 10^{-4} \pm 7.520 \times 10^{-5}$

*En el cuadro anterior, se muestra la temperatura a la que entrará el agua fría a la chaqueta y la temperatura a la que saldrá de la misma. $\dot{m}_2$ es el flujo másico de agua fría.

Cuadro 51. Requerimiento de vapor para el proceso de fermentación

$\dot{m}_3$ (kg/s)	0.003 ± 0.008

*En el cuadro anterior se muestra el flujo másico de vapor requerido para esterilizar el medio de cultivo previo a la fermentación. $\dot{m}_3$ es el flujo másico de vapor.

J. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL FERMENTADOR

Cuadro 52. Comparación de condiciones de fermentación teóricas y experimentales en fermentador disponible

Parámetros	Rango teórico	Solución de sacarosa 14% m/v		Mosto de cerveza 11 % °Brix		SI CUMPLE / NO CUMPLE
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
Temperatura (± 0.5 °C)	15 – 25	23.2	1.2	23.3	1.6	SI CUMPLE
pH (±0.001)	3 – 6	5.090	0.246	4.876	0.398	SI CUMPLE

*Los datos del cuadro anterior corresponden a la prueba del fermentador con una solución de sacarosa al 14% m/v al nivel de la chaqueta y a la prueba con un volumen determinado de mosto de cerveza.

Cuadro 53. Características iniciales y finales de concentración de sólidos disueltos en pruebas en fermentador disponible

Condiciones	Parámetros	Solución de sacarosa 14% m/v		Mosto de cerveza 11 % °Brix	
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Iniciales	Concentración de sólidos disueltos (°Brix)	13.12	0.01	11.27	0.03
Finales	Concentración de sólidos disueltos (°Brix)	8.95	0.04	5.08	0.01

*Los datos del cuadro anterior corresponden a la prueba del fermentador con una solución de sacarosa al 14% m/v al nivel de la chaqueta y a la prueba con un volumen determinado de mosto de cerveza.

Cuadro 54. Características iniciales y finales de contenido alcohólico en pruebas de fermentador disponible

Condiciones	Límites permitidos (%v/v de etanol)	Solución de sacarosa 14% m/v		Mosto de cerveza 11 % °Brix		SI CUMPLE / NO CUMPLE
		Contenido alcohólico (%v/v)	±	Contenido alcohólico (% v/v)	±	
Iniciales	0.5 – 9.0	0.0	0.5	0.0	0.5	-
Finales	0.5 – 9.0	2.0	0.5	4.0	0.5	SI CUMPLE

*Los límites permitidos del cuadro anterior hacen referencia a la norma COGUANOR NGO 33006 para bebidas alcohólicas fermentadas.

K. ANÁLISIS Y RAZONAMIENTO PARA EVALUACIÓN DE EQUIPO PRINCIPAL Y AUXILIAR PARA REMOCIÓN DE SÓLIDOS

Cuadro 55. Equipo analizado para remoción de sólidos y razonamiento para evaluación de posible uso

Equipo	Especificaciones	Pros	Contras
Papel filtro**	10 y 20 micras	La muestra que se lograba filtrar ocurría en 3 segundos. Un valor menor a comparación de los 10 segundos del filtro de 1 micra.	La masa de sólidos que la porosidad de 10 y 20 micras retenía eran del 69.85% y el 54.02% de la masa retenida por el papel de 5 micras, respectivamente.
Papel filtro**	1 micra	La masa de sólidos retenidos por papel con porosidad de 1 micra representó 4.02% más que la masa retenida por el papel de 5 micras.	Se notó visualmente que el filtro se obstruía con las partículas sólidas presentes en la solución. También que era un proceso bastante tardado, 10 segundos aproximadamente, lo que se traduciría en más de una hora para los 35 L de la planta.
Filtro de cartuchos*	5 micras	Redujo considerablemente, 593 NTU, la turbidez de la cerveza al ser pasada por el filtro.	La cerveza generó una gran cantidad de espuma al pasar por el sistema de filtración, aproximadamente, un 80% v/v de la cantidad de cerveza que salía del filtro.
Tamizaje*	> Tamiz N° 100	Retiró los polvos finos que se produjeron durante el proceso de molienda.	Las pérdidas de materia prima llegaron a ser de 2.03%, una cantidad de malta que sería aprovechada en caso se contara con un sistema de molienda adecuado.

Equipo	Especificaciones	Pros	Contras
Centrífuga**	Por lotes	Permite una separación correcta entra la cerveza y los sólidos suspendidos, reduciendo su turbidez en 55%.	Tiene una capacidad de trabajo de 360 mL por lote, un valor muy pequeño en comparación a la capacidad de la planta de 35 L.
Centrífuga**	Continua	Es posible acoplar la centrífuga a la planta ya que trabaja de manera continua y se puede centrifugar el lote en cuestión de minutos.	La centrífuga está diseñada para la separación de aceites por lo que no trabaja correctamente para la separación de suspensiones sólido-líquido.

Notas:

Los detalles de estos equipos se encuentran en la sección de anexos: Especificaciones técnicas de equipo página 414 en adelante.

Análisis realizado a 990 mbar, 22.9 °C y 58% de humedad relativa.

Malta tamizada contaba con 4.78% de humedad para estilo base y 1.27% de humedad para estilo caramel.

* Equipos seleccionados para la planta

** Equipos no seleccionados para la planta

Cuadro 56. Equipo auxiliar analizado para instalación de remoción de sólidos suspendidos y razonamiento para evaluación de posible uso

Equipo	Especificaciones	Pros	Contras
Manguera**	Diámetro de 0.01905m (¾ in)	La manguera presenta una opción flexible y de fácil instalación.	Las mangueras pueden llegar a quebrarse, requieren un mantenimiento complejo al momento de lavarse, y las mangueras disponibles no eran las adecuadas para soportar la temperatura y brindar el grado de alimenticio necesario.

Equipo	Especificaciones	Pros	Contras
Tubería**	Hierro galvanizado de 0.01905m (¾ in)	El costo del hierro galvanizado es menor al de otras aleaciones como el caso de la tubería de acero inoxidable.	Es un material propenso a oxidación al estar en contacto con agua y ya que se trabaja con un producto alimenticio no se consideró adecuado.
Tubería*	Acero inoxidable de 0.01905 m (¾ in)	La tubería de acero inoxidable, junto a los acoples utilizados, fue útil para transportar la cerveza y era el tipo de tubería con el mayor grado alimenticio con la que se contaba en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.	La tubería de acero inoxidable tiene un costo más elevado que otros tipos de tubería.
Bomba aurora**	1.50 kW (2.0 hp)	Es útil para mover grandes cantidades de líquido por las presiones elevadas con las que trabaja.	La cantidad de líquido con la que se trabaja en la planta de cerveza no era la suficiente para requerir el trabajo de una bomba aurora de estas dimensiones.
Bomba centrífuga*	0.45 kW (0.5 hp)	Una bomba centrífuga de 0.45 kW tenía la suficiente potencia para transportar la cerveza por la tubería y hacer que pasara por el medio filtrante de 5 micras.	La bomba centrífuga genera espuma en la cerveza.

Notas:

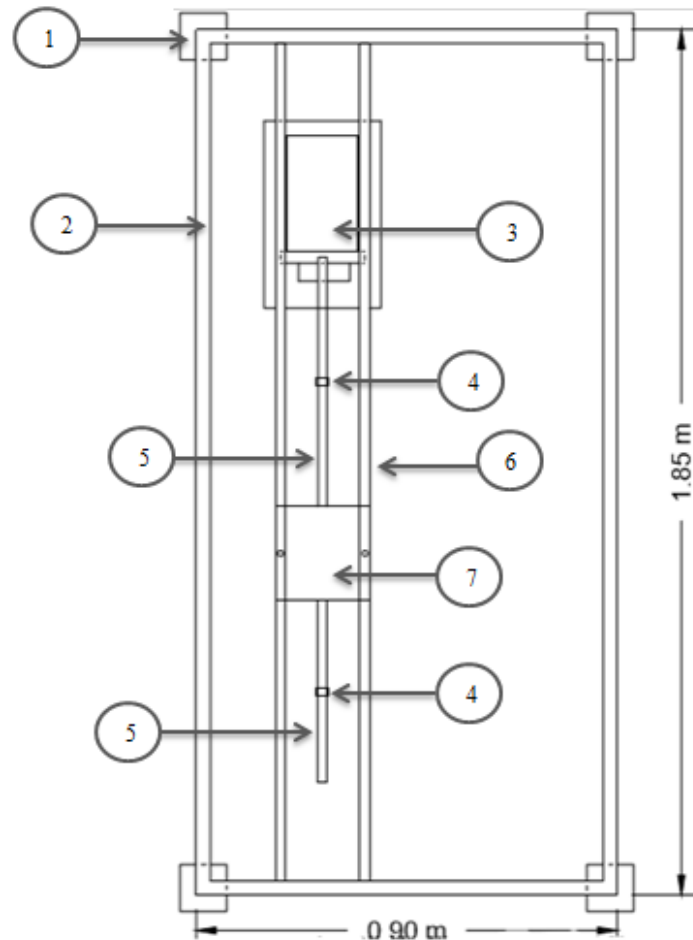
1. Los detalles de estos equipos se encuentran en la sección de anexos: Especificaciones técnicas de equipo página 414 en adelante.
2. Análisis realizado a 990 mbar, 22.9 °C y 58% de humedad relativa.

* Equipos seleccionados para la planta

** Equipos no seleccionados para la planta

L. DISEÑO DE INSTALACIÓN PARA EQUIPO DE FILTRACIÓN

Figura 46. Vista de planta de la instalación del equipo de filtración

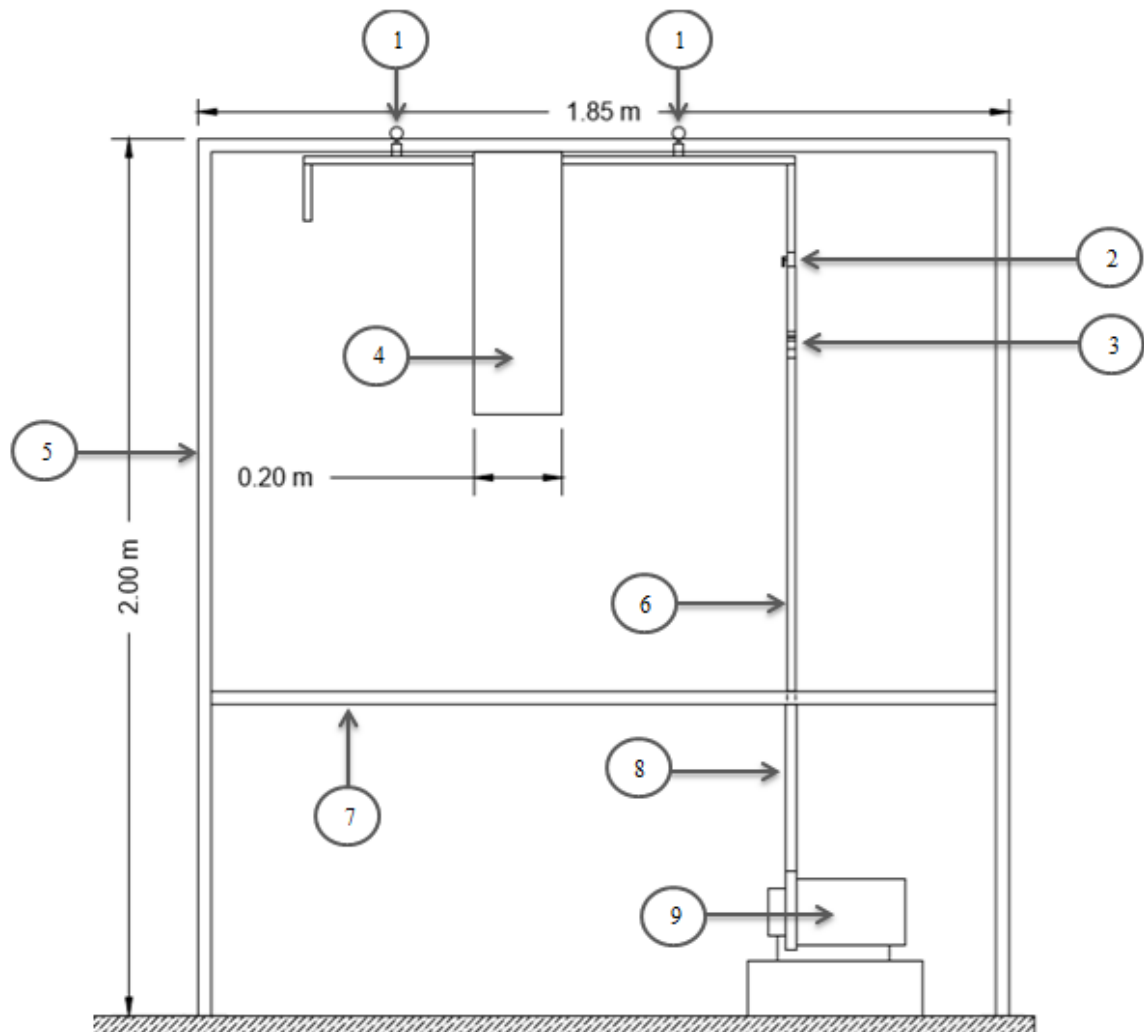


1	Base de soporte de hierro negro de 10x10 cm
2	Estructura de hierro negro de 3x3 cm
3	Bomba centrífuga marca Aquastrong de 0.45Kw
4	Manómetro de 0 a 100 psi
5	Tubería de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in)
6	Viga angular de acero negro de 185 cm de largo y 2.5 cm de ancho
7	Filtro de cartuchos de marca PENTAIR modelo Big Blue de 5 micras

Notas:

Los detalles de estos equipos se encuentran en la sección F de anexos: Especificaciones técnicas de equipo

Figura 47. Vista de perfil de la instalación del equipo de filtración



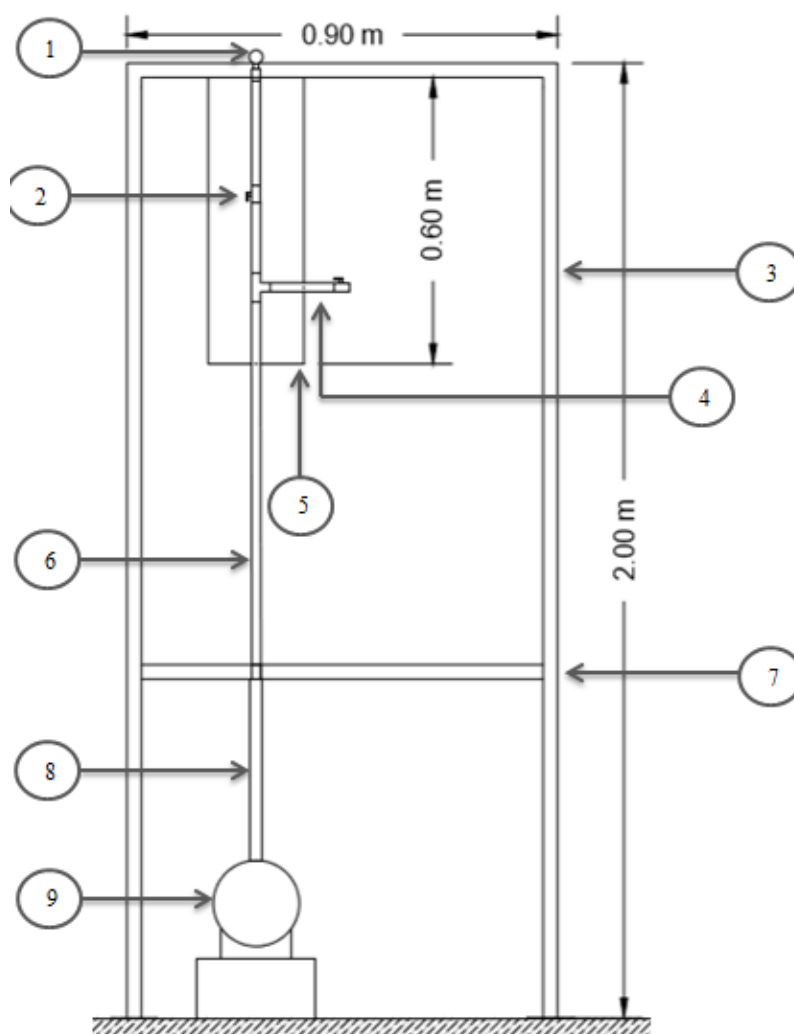
1	Manómetro de 0 a 100 psi
2	Válvula de globo de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in)
3	Accesorio T de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in) con conexión a proceso de fermentación.
4	Filtro de cartuchos de marca PENTAIR modelo Big Blue de 5 micras

5	Estructura de hierro negro de 3x3 cm
6	Tubería de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in)
7	Tubería de acero inoxidable de 0.02540 m (1 in)
8	Estructura de hierro negro para soporte de 3x3 cm
9	Bomba centrífuga marca Aquastrong de 0.45kW

Notas:

Los detalles de estos equipos se encuentran en la sección de anexos: Especificaciones técnicas de equipo página 414 en adelante.

Figura 48. Vista de elevación de la instalación del equipo de filtración



1	Manómetro de 0 a 100 psi
2	Válvula de globo de acero inoxidable de 0.01905 m (¾ in)
3	Estructura de hierro negro de 3x3 cm
4	Accesorio T de acero inoxidable de 0.01905 m (¾ in) con conexión a proceso de fermentación
5	Filtro de cartuchos de marca PENTAIR modelo Big Blue de 5 micras
6	Tubería de acero inoxidable de 0.01905 m (¾ in)
7	Estructura de hierro negro para soporte de 3 x 3 cm
8	Tubería de acero inoxidable de 0.02540 m (1 in)
9	Bomba centrífuga marca Aquastrong de 0.45kW

Notas:

Los detalles de estos equipos se encuentran en la sección de anexos: Especificaciones técnicas de equipo página 414 en adelante.

M. TAMIZAJE DE CEBADA, MALTA BASE Y MALTA CARMEL

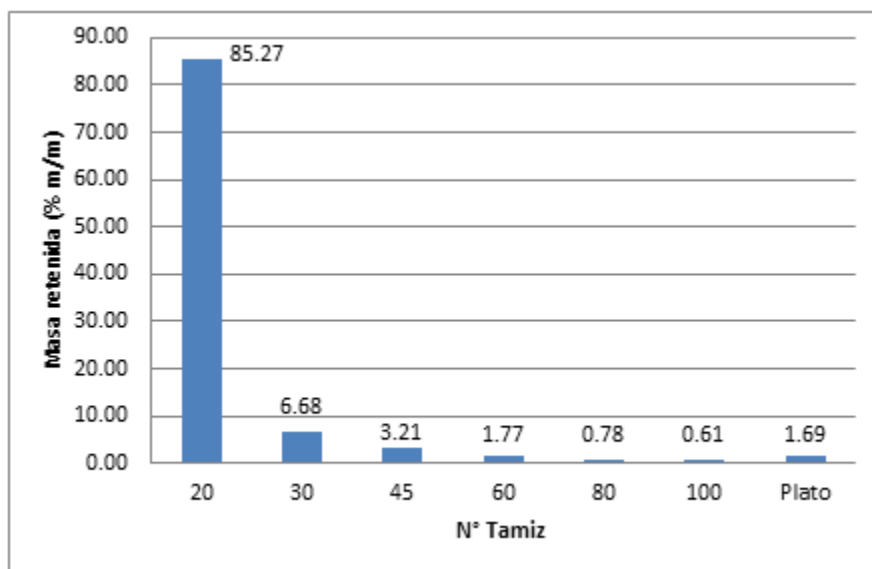
Cuadro 57. Tamaño de partícula de granos y maltas después de utilizar el molino de rodillos con separación de 2 mm y velocidad de giro de 30.8 rpm

	Tamiz N°	Corrida No.1	Corrida No.2	Corrida No.3	Corrida No.4	Promedio	Desviación Estándar
Cebada	20	85.07%	85.51%	85.16%	85.34%	85.27%	0.20
	Finos	1.37%	1.84%	1.82%	1.71%	1.69%	0.22
Malta Base	20	82.74%	83.44%	82.11%	84.56%	83.21%	0.01
	Finos	1.97%	1.87%	2.04%	1.97%	1.96%	0.00
Malta Caramel	20	81.30%	81.92%	81.17%	81.87%	81.57%	0.00
	Finos	2.45%	2.41%	2.43%	2.37%	2.42%	0.00

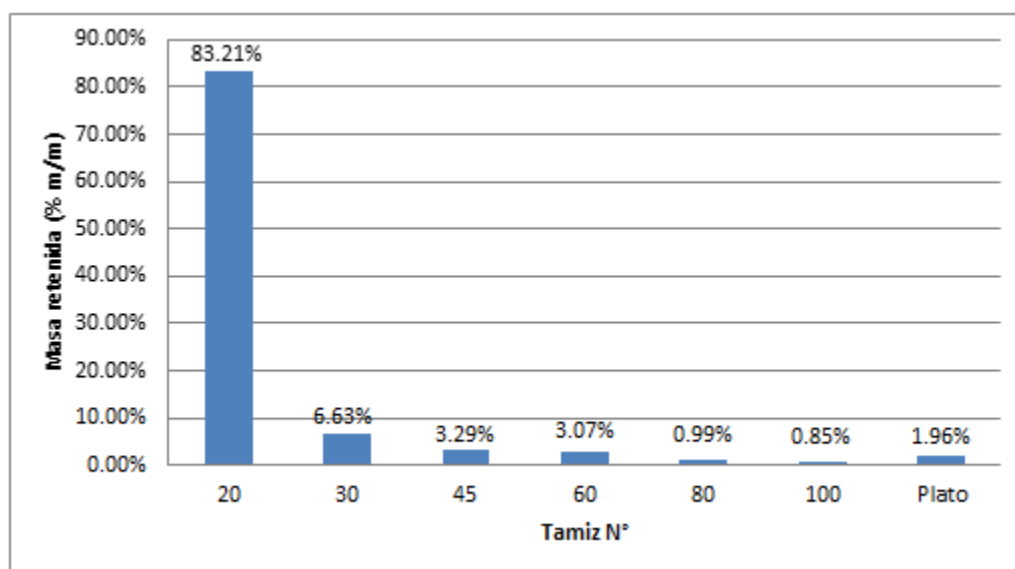
Notas:

1. El molino de rodillos usado fue diseñado por talleres Hernández, Figura 79 en anexos página 438.
2. Se indica el tamiz N° 20 ya que en él se retuvo más del 80% de la masa de las muestras.

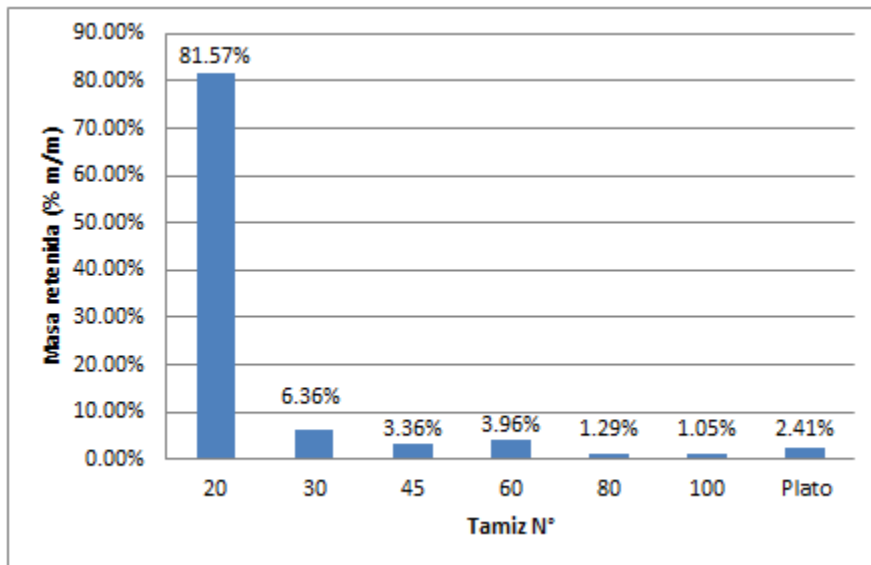
Gráfica 11. Porcentajes promedio retenidos de cebada molida en los tamices utilizados



Gráfica 12. Porcentajes promedios retenidos de malta base en los tamices utilizados



Gráfica 13. Porcentajes promedios retenidos de malta caramel en los tamices utilizados



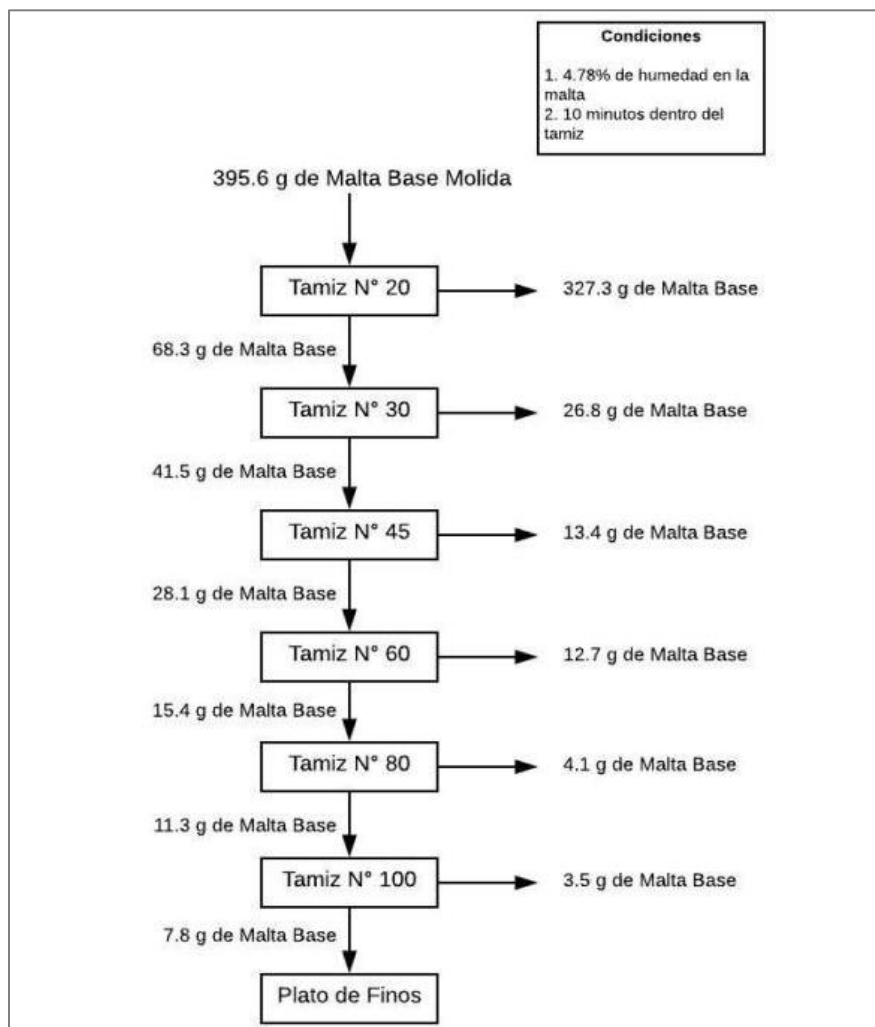
Cuadro 58. Prorratio de cantidad de alcohol no producido por finos retirados

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Masa de malta utilizada (g)	929.4 ± 0.1	903.8 ± 0.1	927.1 ± 0.1
Etanol producido (g/L)	28.8697 ± 0.0001	65.0805 ± 0.0001	47.8203 ± 0.0001
Masa de malta retirada (g)	21.4 ± 0.1	20.2 ± 0.1	21.5 ± 0.1
Etanol no producido (g/L)	0.6647 ± 0.0001	1.4545 ± 0.0001	1.1090 ± 0.0001

Notas:

1. Análisis de prorratio para determinar cantidad de alcohol perdido al retirar polvos finos tamizados

Figura 49. Balance de masa del tamizaje realizado a malta base



Notas:

1. El balance de masa es el mismo para las otras 3 corridas de malta base y para las 4 corridas de cebada y de malta caramel.

N. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN

Cuadro 59. Promedio de parámetros medidos para pruebas de sedimentación

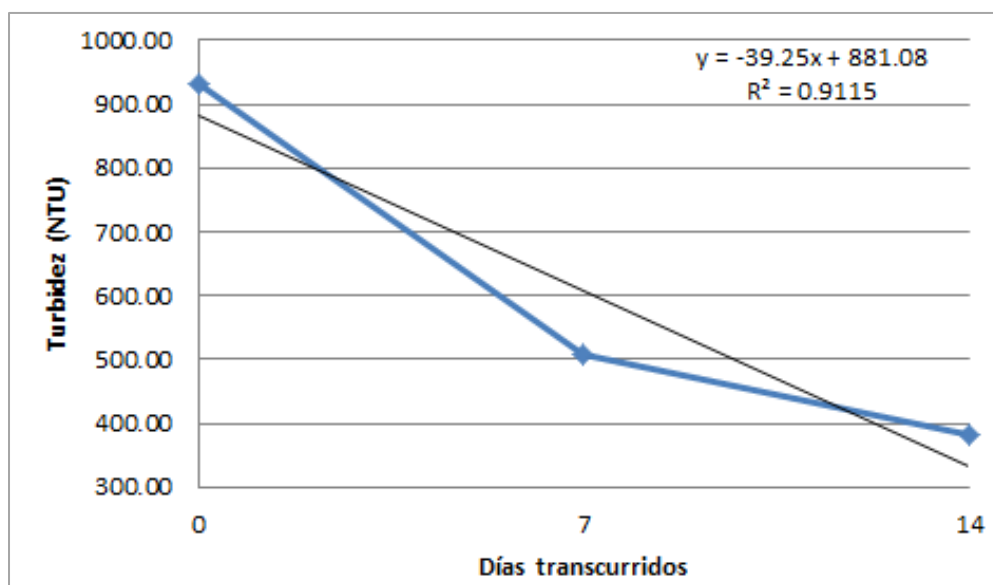
	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
Turbidez (NTU)	930.50 ± 18.63	507.50 ± 10.17	381.00 ± 7.64
Densidad (g/mL)	0.997 ± 0.016	0.989 ± 0.016	0.986 ± 0.016
Viscosidad (m ² /s)	$774.31 \pm 7.13^*$	$679.56 \pm 3.45^*$	$655.14 \pm 4.46^*$
Velocidad de sedimentación (m/s)	$1.760 \times 10^{-12} \pm 0.030 \times 10^{-12}$	$2.005 \times 10^{-12} \pm 0.034 \times 10^{-12}$	$2.080 \times 10^{-12} \pm 0.035 \times 10^{-12}$
Velocidad de sedimentación teórica (m/s)	3.47×10^{-9}	6.12×10^{-8}	2.11×10^{-7}

Notas:

1. El cálculo de la viscosidad es el cálculo 2 en Anexos.
2. El cálculo de la velocidad de sedimentación es el cálculo 3 en Anexos.
3. El cálculo de la velocidad de sedimentación teórica es el cálculo 4 en Anexos.

* Se muestra valor de viscosidad con desviación estándar en lugar de incertidumbre.

Gráfica 14. Tendencia de la turbidez de la cerveza respecto al tiempo de sedimentado usando los valores promedio de las muestras analizadas.



Notas:

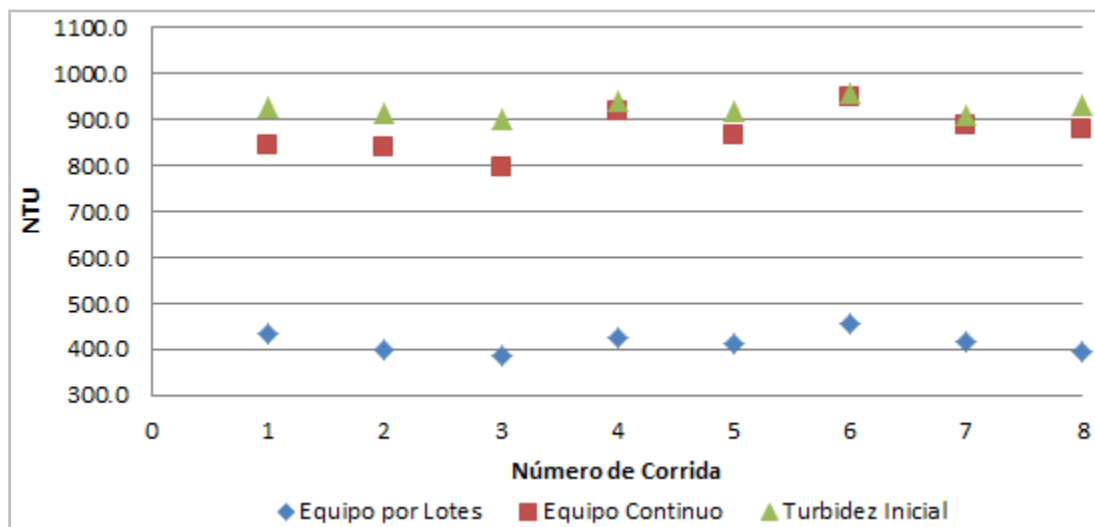
1. Se muestra la turbidez analizada y la tendencia lineal de los resultados.

Cuadro 60. Porcentaje másico de sedimentos y sobrenadantes en pruebas de sedimentación usando los datos de lote N° 2

	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
Sobrenadante	91.42 ± 0.0017 % m/m	90.98 ± 0.0014 % m/m
Sedimentado	8.58 ± 0.0012 % m/m	9.02 ± 0.0010 % m/m

O. PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN

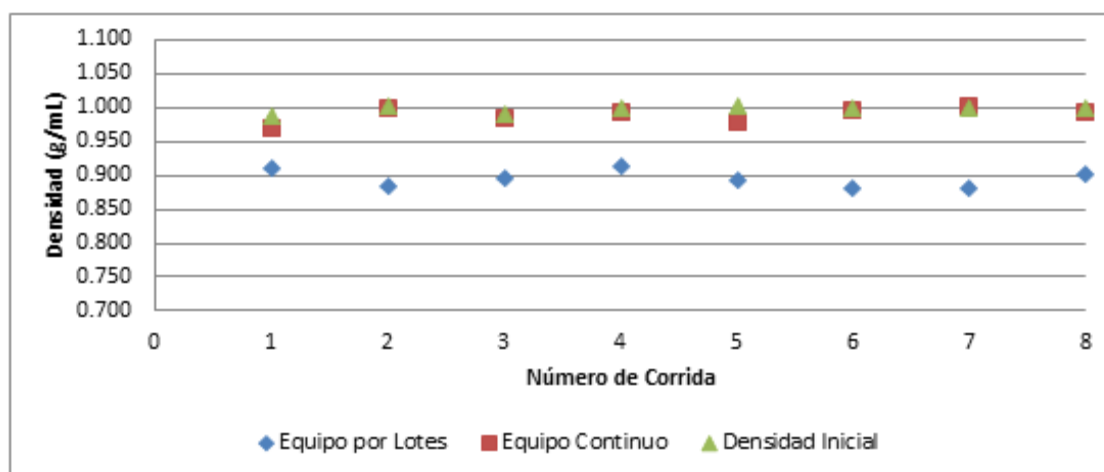
Gráfica 15. Comparación de turbidez resultante del centrifugado por lotes y continuo de las muestras del lote N° 1



Notas:

1. Las corridas corresponden al lote 1. Cada corrida corresponde a muestras de 45 mL para análisis.
2. Las muestras tratadas con la centrífuga continua presentan disminuciones en la turbidez de 53.3 NTU, en promedio.

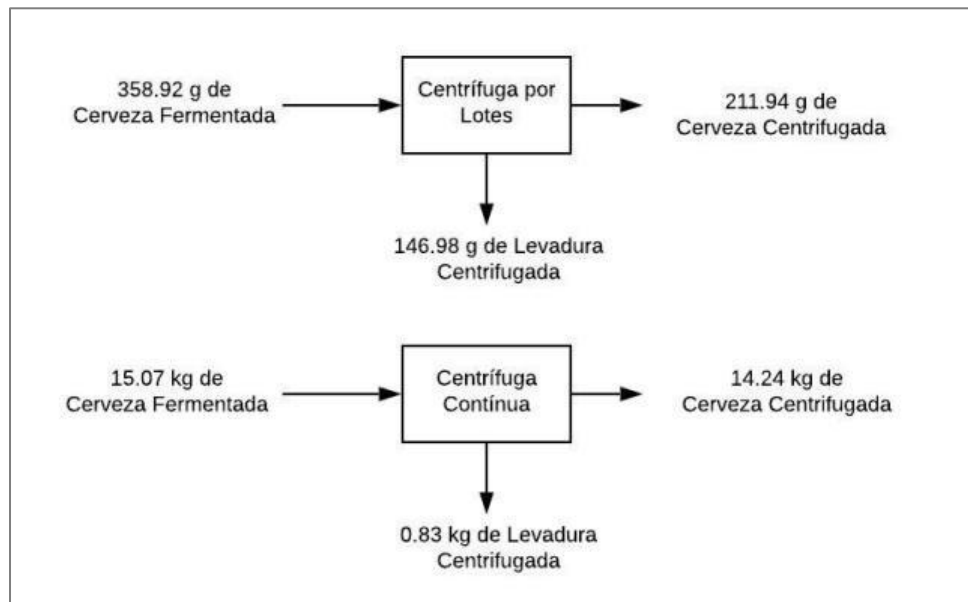
Gráfica 16. Comparación de densidad resultante del centrifugado por lotes y continuo de las muestras del lote N° 1



Notas:

1. Las corridas corresponden al lote 1. Cada corrida corresponde a muestras de 45mL para análisis.
2. Las muestras tratadas con la centrífuga continua presentan disminuciones en la densidad de 0.008 g/mL, en promedio.

Figura 50. Balance de masa del centrifugado por lotes y continuo de la cerveza fermentada



Notas:

1. El balance de masa hace referencia a los 360 mL de la centrífuga por lotes y al resto del lote de producción para la centrífuga continua.
2. Operación realizada a una densidad de 0.997 g/mL de la cerveza y a temperatura ambiente.

P. PRUEBAS DE FILTRACIÓN

Cuadro 61. Parámetros promedios, medidos al filtrado, para pruebas de filtración con el equipo instalado, usando los datos del lote N° 3

	Inicial	Filtrado
Turbidez (NTU)	926.25 ± 18.55	$333.25 \pm 11.24^*$
Densidad (g/mL)	0.998 ± 0.018	0.993 ± 0.018
Viscosidad (m^2/s)	$772.50 \pm 5.37^{**}$	$638.62 \pm 6.75^{**}$

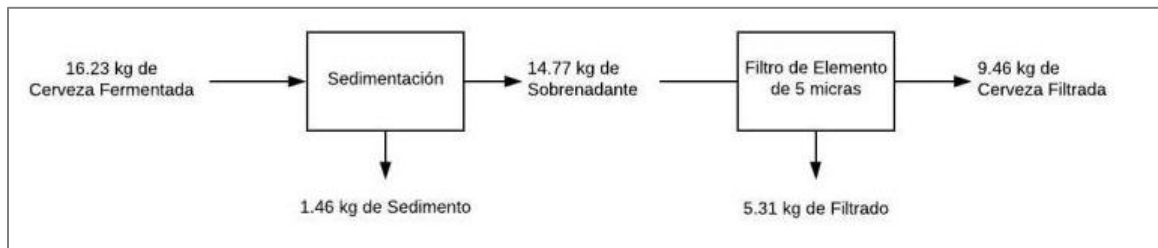
Notas:

1. Se trabajó a las siguientes condiciones de operación: temperatura de 4.4 °C.
3. El cálculo de la viscosidad es el cálculo 2 en Anexos.
4. Se produjo un 80% v/v de espuma después del filtrado.

* Se muestra valor de turbidez con desviación estándar en lugar de incertidumbre de equipo.

** Se muestra valor de viscosidad con desviación estándar en lugar de incertidumbre.

Figura 51. Balance de masa del proceso de sedimentado y filtrado de la cerveza fermentada



Notas:

1. El balance de masa hace referencia al segundo lote de cerveza producida.
2. Operación realizada a una densidad de 0.997 g/mL de la cerveza y a temperatura ambiente.

Cuadro 62. Comparación de turbidez de la cerveza IPA producida con cervezas IPAs presentes en el mercado

Cerveza Analizada	Turbidez (NTU)
Cerveza producida	333.25 $\pm$ 11.24*
Cerveza comercial N° 1	220.10 $\pm$ 4.42
Cerveza comercial N° 2	401.50 $\pm$ 8.05
Cerveza comercial N° 3	315.30 $\pm$ 6.33

Notas:

1. La cerveza producida hace referencia a la cerveza analizada de la planta de producción instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

2. Las cervezas comerciales son 3 cervezas estilo IPA que ya se encuentran dentro del mercado guatemalteco.

* Se muestra valor de turbidez con desviación estándar en lugar de incertidumbre de equipo.

Cuadro 63. Reducción de turbidez de equipos y procesos seleccionados para implementar en la planta de producción de cerveza IPA

Equipo	Turbidez reducida (NTU)	Porcentaje de reducción	¿Implementación?
Centrífuga por lotes	416.20 $\pm$ 11.01	55.01%	No
Centrífuga continua	874.30 $\pm$ 17.51	5.48%	No
Sedimentación	375.53 $\pm$ 8.34	59.05%	Sí
Filtro de 5 micras	217.24 $\pm$ 11.86	35.98%	Sí

Notas

1. Valores disponibles en Cuadros 61 y 62 de Resultados, páginas 213 y 214.

Cuadro 64. Reducción de turbidez total de la cerveza IPA con el equipo implementado

Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Porcentaje de Reducción
926.25 ± 18.55	333.25 ± 11.24	64.02%

Q. ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DEL PRODUCTO FINAL

Cuadro 65. Análisis fisicoquímico de la cerveza final producida

Parámetro	Rango de muestras	Resultado promedio	Desviación estándar	Valores esperados	SI CUMPLE/NO CUMPLE
Ph	4.14 – 4.99	4.46	0.40	3.9 - 4.5	SI CUMPLE
Turbidez (NTU)	326.67 – 338.33	330.74	14.86	N/A	SI CUMPLE
Conductividad (µS/cm)	125.06 – 174.06	153.39	21.21	50.00 - 199.90	SI CUMPLE
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.1	1.1	0	0.1 - 20.0	SI CUMPLE

En el cuadro 65 se muestran los resultados obtenidos para las evaluaciones fisicoquímicas de la cerveza producida luego de ser carbonatada y embotellada, de los 3 lotes que se llevaron a cabo. Los valores esperados corresponden a la norma COGUANOR 33 006 y especificaciones de la cerveza IPA producida.

R. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL PRODUCTO FINAL

Cuadro 66. Análisis microbiológico por método de Petrifilm™ 3M EC de la cerveza final producida

Mx de Lote	Coliformes totales (UFC/mL)	<i>E coli</i> (UFC/mL)	SI CUMPLE/ NO CUMPLE
Control negativo	<1.1	<1.1	N/A
Control positivo Dilución 1 /10	MNPC	MNPC	N/A
Control positivo Dilución 1 /100	MNPC	MNPC	N/A
Control positivo Dilución 1 /1000	MNPC	MNPC	N/A
1 Dilución 1 /10	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
1 Dilución 1/100	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
1 Dilución 1/1000	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
2 Dilución 1 /10	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
2 Dilución 1 /100	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
2 Dilución 1 /1000	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
3 Dilución 1/10	<20	<1.1	NO CUMPLE
3 Dilución 1/100	<100	<1.1	NO CUMPLE
3 Dilución 1/1000	<1.1	<1.1	SI CUMPLE

*MNPC = Muy Numerosas Para Contar. Se realizó la corrección por factor de dilución

En el cuadro 66 se observan los resultados obtenidos de las evaluaciones microbiológicas por medio del método de Petrifilm 3M EC para detección de coliformes totales en la cerveza producida luego de ser carbonatada y embotellada, de los 3 lotes realizados.

Cuadro 67. Análisis microbiológico por método de número más probable (NMP) utilizando Colitag™ de la cerveza final producida

Lote	NMP/100mL coliformes totales	NMP/100 mL <i>E. coli</i>	Valor esperado (NMP/100 mL)	SI CUMPLE/ NO CUMPLE
1	<1.1	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
2	<1.1	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
3	<1.1	<1.1	<1.1	SI CUMPLE
Control Negativo	<1.1	<1.1	N/A	N/A
Control Positivo	5.1	5.1	N/A	N/A

En el cuadro 67 se observan los resultados obtenidos de las evaluaciones microbiológicas por medio del método de número más probable utilizando Colitag™ para detección de coliformes totales y *E. coli* en la cerveza producida luego de ser carbonatada y embotellada, de los 3 lotes que se llevaron a cabo.

S. VIABILIDAD DE LEVADURA DURANTE FERMENTACIÓN

Cuadro 68. Viabilidad de la levadura al inicio y final de la fermentación por técnica de citometría de flujo

Etapas	Total de células viables/mL	Total de células /mL	Porcentaje (%) de viabilidad
1	$2.2 \cdot 10^5$	$2.2 \cdot 10^5$	100%
2	$2.08 \cdot 10^5$	$2.08 \cdot 10^5$	100%

En el cuadro 68 se observan los resultados obtenidos de la viabilidad de las levaduras al inicio y al final de la fermentación del lote 2.

Cuadro 69. Viabilidad de la levadura al inicio y final de la fermentación por técnica de cámara de Neubauer

Etapas	Total de células viables/mL	Total de células/mL	Porcentaje (%) de viabilidad
1	$4.0 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^5$	80.00%
2	$2.2 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$	78.57%

En el cuadro 69 se observan los resultados obtenidos de la viabilidad de las levaduras al inicio y al final de la fermentación del lote 3.

T. CRECIMIENTO EN AGAR EMB

Cuadro 70. Crecimiento de bacterias, mohos y levaduras en Agar EMB

Posible crecimiento	Presencia / Ausencia
Levaduras	PRESENCIA
Mohos contaminantes	PRESENCIA
Bacterias	AUSENCIA

U. ANÁLISIS HACCP

Cuadro 71. Análisis HACCP con peligros y puntos de prevención o control en cada proceso de la elaboración de cerveza final

Procedimiento	Peligro	Punto de control o prevención
MATERIA PRIMA		
Introducción de materias primas	Peligro químico: metales pesados, sólidos no deseados, residuos de pesticidas o sólidos. Peligro biológico: hongos filamentosos, micotoxinas.	Tamizado o remojo en agua para eliminación de contaminantes. Control de humedad y desinfección apropiada.
Tratamiento de agua potable	Peligro químico: metales pesados, impurezas, cloruros, etc. Peligro biológico: presencia de coliformes totales, <i>E. coli</i> , virus.	Control de metales pesados, conteo en placa y NMP para bacterias, luz UV para eliminación de microorganismos. Tratamiento para mejorar condiciones de ser necesario.
Almacenamiento de materias primas	Peligro químico: Adición de coadyuvantes. Peligro físico: Deterioro, fecha de vencimiento cercana. Peligro biológico: Presencia de hongos u otros microorganismos.	Separación física de las áreas destinadas para cada materia prima. Sellar e identificar correctamente cada una. Limpieza constante de las áreas. Control de humedad, fecha de vencimiento, cantidad de coadyuvantes (determinar si son necesarios) y plagas.

Procedimiento	Peligro	Punto de control o prevención
ELAROBACIÓN DE CERVEZA		
Germinación	Peligro biológico: Formación de mohos por humedad	Controlar humedad y aireación
Secado y tostado de granos	Peligro químico: Formación de nitrosaminas por óxido del aire	Calentamiento directo, cámara para secado que evite contacto directo con aire.
Cocción	Peligro biológico: Crecimiento de microorganismos no deseados.	Controlar temperatura de ebullición, humedad y tiempo de cocción.
Fermentación	Peligro biológico: Crecimiento de microorganismos no deseados.	Limpieza exhaustiva del tanque a utilizar. Control estricto de temperatura y pH.
Maduración	Peligro químico: Oxidación en equipo.	Determinar un equipo especializado que no se vaya a oxidar, envases de plástico u otro. Control de humedad y temperatura.
Filtración	Peligro físico: Contaminación de etapas previas. Peligro químico: Adición de sustancias no deseadas. Peligro biológico: Contaminación de microorganismos en etapas anteriores que no fueron filtrados correctamente.	Determinar el tamaño de poro adecuado para la filtración correcta (evitando pase de microorganismos u sólidos no deseados).
Traspaso de cerveza por tuberías	Peligro físico: Adición de sólidos o cuerpos no deseados presentes en tuberías no lavadas correctamente. Peligro químico: Contaminación por detergentes.	Control de tuberías de grado alimenticio, constante limpieza y desinfección.
Limpieza manual de la planta	Peligro físico: Residuos de sólidos u materia sobrante en lugares pequeños. Peligro químico: Restos de detergentes u otros químicos utilizados para la limpieza. Peligro biológico: Crecimiento de microorganismos no deseados.	Definir con claridad los pasos de limpieza exhaustiva de cada tanque u material a utilizar, control de volúmenes de detergentes y agentes de desinfección a agregar, restregar correctamente con equipos y materiales adecuados a cada tipo de tanque y material a limpiar. Y uso de agua limpia.

Procedimiento	Peligro	Punto de control o prevención
ENVASADO Y DISTRIBUCIÓN		
Inspección de envases	Peligro físico: Presencia de cuerpos extraños incorporados en los envases. Deterioro o desperfecto en los envases.	Análisis individual de cada uno de los envases, control de rajaduras, rayones, sólidos encontrados, entre otros. Seguir una lista de cotejo para determinar utilización o rechazo de los envases a utilizar.
Lavado de envases	Peligro físico: No eliminación adecuada de los cuerpos extraños encontrados. Peligro químico: Restos de agentes desinfectantes dentro de las botellas. Peligro biológico: Presencia de microorganismos no deseados.	Seguir estrictamente los manuales de limpieza. Realizando un lavado adecuado con detergentes, antimicrobianos, limpieza a presión y posterior esterilización con vapor a los envases a utilizar. Realizar un hisopado y crecimiento en agar nutritivo para determinar presencia de microorganismos.
Carbonatación y envasado	Peligros químicos: Sobre carbonatación. Peligros físicos: Presencia de cuerpos ajenos al producto final.	Control de cantidad de CO ₂ y producto final agregado a cada envase. Análisis de pruebas organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados del módulo 1 se puede observar que en el Cuadro 25 de la sección de resultados, página 157, se muestra el cumplimiento de los parámetros físicos y organolépticos de los distintos lotes de agua. Se observa que todos los lotes cumplieron con los parámetros establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 para agua potable, ya que ningún parámetro sobrepasa el Límite Máximo Aceptable y el Límite Máximo Permisible. Por otro lado, en el Cuadro 26, página 158 se observa el cumplimiento de parámetros químicos de los distintos lotes de agua. Se observa que todos los lotes cumplen con los parámetros establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 para agua potable, ya que ningún parámetro sobrepasa el Límite Máximo Aceptable y el Límite Máximo Permisible. En el Cuadro 27, página 160 se observa el cumplimiento de parámetros microbiológicos de los distintos lotes de agua. Se observa que todos los lotes cumplen con los parámetros establecido por la norma COGUANOR NGO 29001 para agua potable ya que ningún parámetro sobrepasa el Límite Máximo Aceptable. La excelente calidad del agua se debe al sistema de filtración presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Este sistema permite regular las características fisicoquímicas y organolépticas del agua que sale del pozo, mediante un filtro de sedimentos y carbón activado, a tal nivel que los parámetros finales dan resultados positivos en el cumplimiento según la norma. Las características microbiológicas también se ven reguladas gracias a la acción de una lámpara de luz UV, la cual deja el agua de salida en condiciones favorables para evitar la presencia de microorganismos que afecten o contaminen el proceso de fabricación de cerveza. Aunque el agua de la salida del sistema de filtración sea de excelente calidad, no se le puede catalogar como agua potable, ya que nunca pasó por un sistema de desinfección por medio de cloro, pedido por la norma COGUANOR NGO 29001. Todos los lotes de agua analizados presentaron resultados similares, lo cual indica que el sistema de filtración utilizado no cuenta con alteraciones o contaminantes que afecten su desempeño. En los Cuadros 136, 138 y 140 de la sección de Anexos, páginas 375, 377 y 378 se observa la comparación de la norma COGUANOR NGO con la guía de la calidad de agua potable de la OMS; se observa que los límites establecidos para los parámetros físicos, organolépticos, químicos y microbiológicos son mucho más exigentes en la guía de la OMS. Se tomó la decisión de colocar la norma COGUANOR NGO 29001 para los límites de cumplimiento de las distintas muestras de agua

debido a que esta es la norma exigida por el Ministerio de Salud en Guatemala a la hora de realizar una auditoría.

En el Cuadro 28, página 161, se muestra el cumplimiento de los parámetros del perfil de agua según la norma BJCP 2008. Se observa que los parámetros de bicarbonatos, calcio y sulfatos están fuera del rango establecido por la norma, mientras que los parámetros de magnesio, sodio y cloruro si cuentan con el nivel de cumplimiento establecido por la norma. Este cumplimiento de parámetros equivale a una puntuación de 37.5 puntos (Ver Cuadro 29, página 161) para el agua utilizada en la elaboración de la cerveza. Dicha puntuación es realizada de acuerdo al rango de parámetros que debería de tener el agua según el estilo de cerveza a fabricar, por lo tanto, al no cumplir los parámetros de bicarbonato, calcio y sulfatos, no es posible obtener buenos resultados en la puntuación. Esto no quiere decir que el agua sea de mala calidad o que no se pueda utilizar para realizar el tipo de cerveza, simplemente no cuenta con un buen puntaje de perfiles de agua a la hora de participar en algún concurso que sea calificado por la BJCP, por lo que la cerveza realizada tendrá deficiencias a la hora de recibir la evaluación de la norma. El resultado del cumplimiento de los perfiles de agua según la norma se mantuvo constante a lo largo de todos los lotes de cerveza, por lo que no fue posible obtener una puntuación mayor, a menos que se realice un acondicionamiento posterior con los reactivos necesarios para subir los parámetros que presentaron un cumplimiento negativo. Con la implementación del tanque de almacenaje de post acondicionamiento de agua se puede adicionar para poder aumentar los parámetros establecidos en la BJCP, para aumentar la puntuación del agua para cerveza.

El sistema de filtración propuesto para el acondicionamiento del agua que ingresa al proceso de fabricación de la cerveza constó de una bomba dosificadora de cloro, un filtro de sedimentos, un filtro de carbón activado, un filtro pulido, una lámpara de luz UV y un tanque de almacenaje de agua.

Se determinó que la bomba dosificadora de cloro debería funcionar para un flujo de diseño de 3.30x, dosificando una cantidad de 2.5 correspondiente a un volumen de 1.8x de hipoclorito de sodio al 0.5%. p/v (Ver Cuadro 142, Anexos, página 379). El volumen de hipoclorito de sodio fue calculado para un volumen de 35L, 70L y 140L de agua a tratar, debido a que se consideró la posibilidad de un incremento en la producción de cerveza (el doble y triple de producción) por lo que, al flujo de diseño estipulado, se necesita un mayor volumen de hipoclorito de sodio con un tiempo de retención no mayor a seis horas, para desinfectar el agua del proceso y dejar una

concentración de cloro residual libre al final del proceso de acondicionamiento de agua acorde a lo establecido por la norma COGUANOR NGO 29001 (Ver Cuadro 142, Anexos, página 379). De esta manera se obtiene una desinfección del agua de proceso sin realizar una modificación (cambio de sabor, cuerpo y sensación en la boca) al producto final obtenido en la fabricación de cerveza. En el Cuadro 29, página 162, se observa que el equipo seleccionado cumple con todas las especificaciones calculadas ya que permite un flujo de 3.30x, con un sistema de dosificación graduable, a un volumen máximo de 11.36 de solución hipoclorito de sodio. Es importante mencionar que el volumen máximo de hipoclorito de sodio que se puede dosificar al día es mucho mayor al requerido según el volumen de agua a tratar, sin embargo, el sobre dimensionamiento de la bomba es necesario ya que, si en el futuro se desea desinfectar una cantidad de agua más grande (140L), no se tendrá que cambiar la bomba dosificadora.

Por otro lado, se determinó que el filtro de sedimentos debería de ser de 0.249 m de diámetro, con un área de 4.90. Esto obedece a un flujo de diseño de 3.30x y un flujo de retrolavado de 5.01x (Ver Cuadro 143, Anexos, página 380). En el Cuadro 30, página 162 se muestra que el filtro de sedimentos seleccionado cumple con todas las especificaciones determinadas ya que cuenta con dimensiones de 0.254 m de diámetro y 1.37 m de largo, con un área y volumen de 0.05 y 6.20, respectivamente para un volumen de 4.2 de material filtrante. Esto para un flujo de diseño máximo de 3.40x y un flujo máximo de retrolavado de 5.10x. Se seleccionó antracita como material filtrante debido al contenido de materia flotante en el análisis de agua de pozo. La antracita es adecuada ya que permite una mayor capacidad de retención de sólidos y partículas finas. También, el desempeño superior del material filtrante puede llegar a reducir la frecuencia de los retrolavados. Otro factor importante es que la antracita, debido a su densidad, puede funcionar como medio de soporte para posteriores materiales filtrantes dentro del filtro. Debido a que es necesario reducir la concentración de materia flotante a los valores establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001, la antracita cumple dicha función y, al flujo de diseño que se está trabajando, no genera arrastre de partículas. El flujo de retrolavado para este filtro tiene que ser mayor al flujo de diseño debido a que es necesario expandir el material filtrante para que este funcione adecuadamente. Sin embargo, la razón principal radica en que el material filtrante cuenta con una alta densidad, por lo que el flujo debe de ser mayor para poder pasar a través de todas las capas.

El filtro de columna de carbón activado debería ser de 0.254 m de diámetro y 1.37 m de largo, con un área y volumen de 0.05 y 0.062, respectivamente. Esto obedece a un flujo de diseño de 3.30x y un flujo de retrolavado de 3.30x (Ver Cuadro 144, Anexos, página 380). En el Cuadro

30, página 162, se muestra que el filtro de carbón activado seleccionado cumple con todas las especificaciones determinadas ya que cuenta con dimensiones de 0.254 m de diámetro y 1.37 m de largo, con un área y volumen de tanque de 0.05 y 6.20, respectivamente para un volumen de 4.2 de material filtrante. Esto para un flujo de diseño máximo de 3.40x y un flujo máximo de retrolavado de 3.40x. Se seleccionó carbón activado mineral como material filtrante debido a que este permite una alta capacidad de adsorción y presenta una estructura de poros altamente desarrollada. La función principal del filtro escogido es declorinar el agua que sale del sistema de dosificación de cloro, ya que esta puede traer trazas altas de cloro residual. Con esto se evita que el agua que sale del proceso de acondicionamiento se salga de los parámetros de cloro residual establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 para agua potable. Por otro lado, el filtro también puede cumplir con la función de eliminar olores y colores desagradables presentes en el agua de pozo. Para este filtro del flujo de retrolavado es igual al flujo de diseño ya que el carbón activado no es tan denso como la antracita, por lo que no se necesita de un flujo mayor para hacer pasar el agua a través del material filtrante.

Se determinó que la lámpara de luz UV debería funcionar proporcionando una dosis de radiación de 21.6 para una reducción del 99.99% de microorganismos, a un flujo de diseño de 3.30 (Ver Cuadro 145, Anexos, página 381). En el Cuadro 30, página 162 se observa que lámpara de luz UV seleccionada cumple con todos los requisitos determinados ya que genera una dosis de radiación de 30.0 para un flujo de diseño de 3.80. Debido a que la lámpara seleccionada tiene un excedente de 8.40 de dosis de radiación UV, es posible lograr una mayor reducción de microorganismos (99.999%) lo cual hace que el proceso de desinfección sea más eficiente. A pesar de que ya se utiliza la bomba dosificadora de cloro como sistema de desinfección, se consideró pertinente el uso de una lámpara de luz UV ya que esta, a diferencia del cloro, si puede esterilizar el agua de cierto tipo de esporas presentes en bacterias comunes (*Bacillus subtilis*, *pseudomona*, *clostridium tetani*, *streptococcus fecalis*) y evitar el crecimiento posterior de una cantidad considerable de microorganismos sin generar ningún tipo de residuo. El conjunto clorador-lámpara de luz UV en el sistema de acondicionamiento, aumenta la eficiencia del proceso de desinfección, permitiendo altos estándares de calidad de agua potable para su uso en la fabricación de cerveza.

Para el filtro pulidor se determinó que este cuenta con un porta-cartucho de 0.114 m de diámetro y 0.254 m de largo para un flujo de diseño de 3.30x (Ver Cuadro 146, Anexos, página 381). El material seleccionado tanto para el vaso como para el porta-cartucho es de polipropileno reforzado. En lo que respecta al cartucho filtrante se seleccionó fibra de polipropileno con

dimensiones de diámetro de 0.060 m de diámetro y 0.251 m de largo; el filtro es de una micra debido a que su función principal es remover de la corriente de agua las trazas de carbón activado que se pueden desprender del filtro de columna de carbón activado. Otro factor determinante a la hora de la sección del filtro es que las pequeñas trazas de carbón pueden dañar la lámpara de luz UV, por lo que es necesario remover dichas partículas.

Por último, el tanque de almacenaje de agua acondicionada tiene dimensiones de 0.50 m de diámetro y 1.00 m de alto, para un volumen de 0.20 (Ver Cuadro 147, Anexos, página 382). El tiempo de llenado del tanque es de 10.0 minutos según el flujo calculado. El tanque cuenta con una línea de recirculación hacia la lámpara de luz UV, para poder aumentar el tiempo de retención de agua en el mismo (24 horas) y asegurar una desinfección constante de microorganismos dentro del tanque. La bomba determinada para el flujo de recirculado puede suplir el flujo necesario (Ver Cuadro 148, Anexos, página 382). El volumen de tanque se dimensionó tomando en cuenta distintas cantidades de agua a tratar y utilizar en el proceso de fabricación de cerveza (70L para el proceso de macerado y cocción, 50L para el proceso de lavado de botellas, 40L de agua de lavado de equipo y 20L para el proceso de malteado). Este tanque también puede servir para post acondicionar el agua que ingresa al proceso de fabricación de la cerveza para aumentar la puntuación obtenida según la BJCP.

En el esquema del nuevo proceso de acondicionamiento de agua (Ver Figura 243, Anexos, página 542), se puede observar el tipo de conexión que todos los equipos tienen entre sí. Se seleccionó tubería de acero inoxidable 304 de 0.025 m (1) para la mayoría del sistema, debido a que este, a comparación con otro tipo de aceros, no cuenta con una superficie porosa; esto hace que ningún microorganismo se instale dentro de los poros y pueda reproducirse, afectando así, el sistema de tratamiento de agua. El flujo en todas las líneas es el mismo (3.20x), a excepción de la línea seis en donde el flujo tiene que ser mayor (5.10x) debido a que el retrolavado del filtro de sedimentos exige un flujo mayor para poder expandir la capa de material filtrante. Las líneas 24 y 25 tienen conexión con tuberías de PTFE de 0.009 m (3/8) debido a que en estas líneas se realiza la dosificación de la solución hipoclorito de sodio, por lo que tienen que ser tuberías muy pequeñas y con un flujo mucho menor a los anteriores (7.00x). Por último, para las líneas 14,15 y 16 se seleccionó tubería de acero inoxidable 304 de 0.019 m (3/4) debido a que la conexión con la lámpara UV es de un diámetro menor para que esta pueda realizar una desinfección adecuada del agua (desinfección de microorganismos).

En los que respecta a los valores de precisión en los datos del cumplimiento de los parámetros físicos y organolépticos del agua, se tomó como parámetro de precisión la desviación estándar para los datos de temperatura, conductividad eléctrica, color real y sólidos disueltos totales, mientras que para los datos de pH y turbiedad se tomó la incertidumbre calculada. Esto se debe a que en muchos de los casos el valor de desviación estándar era cero, debido que las mediciones en cada corrida eran iguales. Para el lote dos de agua se realizó una excepción, ya que se tomó como parámetro de precisión la incertidumbre, para los valores de color real y sólidos disueltos totales, ya que este parámetro ofrecía el peor escenario posible.

Por otro lado, para valores de precisión en los datos del cumplimiento de los parámetros químicos del agua, se utilizó la desviación estándar para los datos de magnesio, dureza total y cloruro, mientras que, para los datos de calcio, cloro residual, nitritos, nitratos y sulfatos se utilizó el valor calculado de incertidumbre. Para el lote tres de agua se realizó una excepción ya que se tomó como parámetro de precisión el valor dado por la incertidumbre para los datos de magnesio y dureza total. Se realizó dicha excepción debido a que la incertidumbre ofrecía el peor escenario posible.

En el Cuadro 31, página 166 se observa el dimensionamiento del equipo necesario para llevar a cabo el proceso de malteado. Los equipos seleccionados son de vital importancia ya que cada uno cumple una función primordial para preparar la cebada y acondicionarla para que, al finalizar el proceso se obtenga una malta verde de alta calidad (14%-17% humedad y un largo de 6.0 mm-6.6mm del acrospire). Se determinó que para realizar el proceso de malteado se necesitan: tres tipos de separadores (tratamientos previos) un tanque de remojo y un equipo de germinado (plancha o caja de germinado).

El primer separador del proceso de tratamientos previos tiene dimensiones generales de 0.47 m de largo, 0.29 m de alto y 0.28 m de ancho. Cuenta con una malla removible de 0.45 m de largo, 0.02 m de alto, 0.26 m de ancho y un mesh de 2.00 mm. Usando un sistema de vibración, las impurezas pueden ser descargadas a una tolva con 15° de inclinación y dimensiones de 0.47 m de largo, m de 0.06 alto, m de 0.28 ancho. La tolva de descarga tiene un fondo hueco con 0.05 m de largo y 0.02 m de ancho. Gracias al tamaño de mesh (mesh 7) es posible remover las materias gruesas (2.00 mm) de un lote de 0.23 kg de cebada. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 64, Anexos, página 424.

El segundo separador es un ventilador con dimensiones de 0.20 m de alto y un diámetro de rejilla de 0.18 m. El ventilador cuenta con una caja acoplada a la rejilla. Esta caja tiene dimensiones de 0.20 m largo, 0.20 m de alto y 0.10 m de ancho. La cara frontal y trasera de la caja son de fondo hueco en forma de círculo con diámetro de 0.18 m. la cara superior e inferior son de fondo hueco con dimensiones de 0.20 m de largo y 0.10 m de ancho. Gracias al flujo de aire del ventilador (10 km/h) este separador permite la remoción de partículas ligeras de la cebada. La cebada entra por la cara superior de la caja y sale por la inferior. Las impurezas salen por el hueco frontal de la caja a un recipiente circular. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 65, Anexos, página 425.

El tercer separador es una malla en forma de bolsa de macerado. La malla cuenta con un mesh de 2.50 mm. Las dimensiones de la bolsa son 1.50 m de alto y 1.00 m de diámetro. La capacidad máxima de cebada que puede ingresar al separador es de 18.00 kg. Gracias al mesh es posible remover todos los granos descartados (2.5 mm) de la cebada que ingresó. La entrada y salida de material se realiza por el mismo lado. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 66, Anexos, página 426.

Para el tanque de remojo se utilizó una cubeta de con dimensiones de 0.33 m de diámetro y 0.46 m de alto, para un volumen máximo general de 3.50x (agua + cebada). El volumen adecuado de cebada a utilizar en el tanque de remojo tiene que ser de 2.70x. Se escogió dicho volumen de cebada ya que es necesario dejar que el agua este 10 cm por encima del nivel de la cama de cebada, de esta manera la cebada queda sumergida completamente y se pueda llevar a cabo un proceso de remojo favorable ya que la cebada puede alcanzar el porcentaje de humedad necesario (45-47%) para iniciar el proceso germinativo. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 67, Anexos, página 426.

La plancha de germinado cuenta con dimensiones de 0.85 m de largo, 0.20 m de alto y 0.45 m de ancho. Cuenta con una malla removible de 0.83 m de largo, 0.02 m de alto, 0.43 m de ancho y un mesh de 2.50 mm. La cantidad máxima de cebada que se puede germinar en la plancha de germinado es de 9.00 kg. Esto es así debido a que con esa cantidad se logra una capa de cebada de no más de 1 cm distribuida a lo largo de toda la malla y se evita que la cebada se salga por los lados. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 68 de Anexos, página 427. Este equipo ya no fue utilizado después debido a que se realizó la caja de germinado, la cual es más eficiente en términos de porcentajes de conversión.

La caja de germinado cuenta con dimensiones generales de 2.00 m de largo, 1.00 m de alto y 1.00 de ancho. Las dimensiones del área de germinado son de 2.00 de largo, 0.50 m de alto y 1.00 de ancho. El área de germinado está cubierta por 1) malla de acero de 2.00 de largo, 0.50 m de alto y 1.00 de ancho y 2) una pared de nylon de 2.00 m de largo, 0.50 m de alto y 1.00 metro de ancho. El conjunto malla-nylon permite una buena protección contra roedores o cualquier tipo de animal que desee entran dentro de la caja de germinado. Por otro lado, el nylon hacer que se conserve la humedad del grano dentro de la caja de germinado, logrando así un ambiente idóneo para iniciar un proceso germinativo. La caja cuenta con dos focos LED los cuales proporcionan luz las veinticuatro horas del día, durante todo el proceso de germinado. La función de las luces es ayudar al crecimiento del embrión. La parte inferior del área de germinado, a diferencia de las demás caras solamente tiene una malla de acero de mesh de 2.5 mm y una pared de nylon perforada. La malla ayuda a que no entre ningún roedor o animal a la caja y el nylon ayuda a que la cebada no esté en contacto directo con dicha malla para no contaminarse. La cantidad máxima de cebada que se puede germinar en la caja de germinado es de 18.00 kg. Esto es así debido a que con esa cantidad se logra una capa de cebada de no más de 1 cm distribuida a lo largo de toda la cara inferior del área de germinado. Es importante que la capa de cebada no sea mayor al valor mencionado anteriormente ya que, si fuera aumentada, se corre el riesgo de sofocar los granos de cebada que están hasta el fondo de la cama y parar su proceso germinativo. La cara frontal y trasera de la caja de germinado cuentan con bisagras para poder abrir y cerrarse, de esta manera se puede ingresar la cebada y puede ser sacada cuando el proceso se haya completado. Las especificaciones completas se encuentran en la Figura 69 Anexos, página 428.

Durante el proceso de tratamientos previos, se puede observar en el balance de masa (Ver Cuadro 185, Anexos, página 411), que la cantidad de cebada que entra al proceso disminuye. Eso se debe a que durante cada etapa de limpieza ciertas impurezas son eliminadas (Ver Cuadro 149, Anexos, página 382). En la primera separación se obtuvo que el porcentaje promedio de impurezas eliminadas para los lotes de cebada fue de 30.80%, 0.80%, mientras que en la segunda separación el porcentaje fue de 5.91%, 0.90% y en la tercera separación el porcentaje fue de 63.29%, 0.95% (Ver Gráfica 46, Anexos, página 474). De todas las etapas de limpieza, la que más impurezas elimina es la tercera separación, ya que, durante esta se descartan los granos que no cumplen con el estándar requerido (2.2 mm) o que están quebrados. Es importante remover todos esos granos ya que, al no cumplir con el tamaño adecuado, su proceso germinativo será más lento. Por otro lado, los granos quebrados no podrán iniciar el proceso de germinado ya que el embrión no contará con

un ambiente adecuado dentro del grano para empezar crecer. La etapa de limpieza que menos impurezas elimina es la segunda separación, debido a que durante esta etapa las partículas ligeras son removidas (polvos finos). Estas no cuentan con una masa significativa comparada con las demás impurezas, sin embargo, es imperativo que sean removidas ya que la presencia de partículas ligeras en la cáscara del grano puede ser un ambiente que favorezca el crecimiento de microorganismos que afecten los procesos posteriores del malteado. Por último, la primera separación es la etapa de limpieza que remueve una cantidad intermedia de impurezas, debido a que durante este proceso las materias gruesas son removidas (piedras pequeñas, pequeños insectos, granos huecos). Es importante realizar un buen proceso de limpieza en los tratamientos previos, ya que, si no se eliminan las materias gruesas, las partículas ligeras y los granos descartados, el proceso de remojo sufre un alto riesgo de contaminación debido a que muchas impurezas se pueden disolver en el agua y crear un ambiente lleno de bacterias que estresen al grano de cebada a tal punto, que este no pueda germinar.

En el Cuadro 151, Anexos página 383 se puede observar que el porcentaje de humedad presente en la cebada aumentaba conforme transcurre el tiempo de remojo. Los porcentajes de humedad denotaron un aumento aproximadamente de 10%/día conforme el proceso era llevado a cabo. Los valores presentes en la Gráfica 47, Anexos, página 475 demuestran que el proceso de remojo se ve completado en 72 horas, comparado con el valor teórico (72-96 horas). Estos valores denotan un porcentaje de humedad promedio a las 0,24,48 y 72 horas de remojo para los lotes de cebada de 15.01%, 0.63%, 24.35%, 0.37%, 38.39%, 0.78% y 46.40%, 1.41%, respectivamente. Fue importante cambiar el agua de remojo cada seis horas, ya que, de no ser así, el oxígeno disuelto en el agua se agotaba y la cebada corría el riesgo de ahogarse, eliminando la posibilidad de un proceso germinativo. Asimismo, la agitación constante de la cebada dentro del tanque permitió una mejor aireación del agua y un proceso homogéneo de remojo para el lote completo de cebada.

En el Cuadro 152, Anexos, página 385 se observa que, para el proceso de germinado, el largo del acrospire (embrión) del grano de cebada aumenta conforme pasa el tiempo. Esto se debe a que durante este proceso el grano de cebada cuenta con el porcentaje de humedad necesario (45%-48%) y el embrión está listo para romper la testa y llevar a cabo el proceso germinativo. Las mediciones de humedad del grano durante este proceso fueron importantes ya que si el porcentaje de humedad disminuía a valores muy bajos (15%-20) el grano corría el riesgo de secarse y detener su proceso germinativo antes del tiempo estipulado (96 horas). La Gráfica 48 de Anexos, página 476 muestra el porcentaje del largo del acrospire según el tiempo de germinado para los lotes 1,2,4

y 5. Se puede observar que el largo promedio del acrospire para las 0,24,48,72 y 96 horas fue de 0.0mm, 0.9mm, 0.3mm, 2.5mm, 0.3mm, 3.9mm, 0.3mm y 6.3mm, 0.3mm, respectivamente. Se puede ver que el largo tiene un incremento casi lineal, lo cual es bueno ya que esto demuestra que el grano estaba germinando bajo condiciones bajas de estrés. Para el lote tres de cebada se puede observar un mal crecimiento del acrospire, comparado con los valores de los demás lotes. Los valores dados para las 0,24,48,72 y 96 horas fueron de 0.0mm, 0.6mm, 0.2mm, 1.2mm, 0.3mm, 1.8mm, 0.9mm y 4.7mm, 1.2mm respectivamente. Esto se debe a que, durante la germinación de este lote, la cebada estuvo sometida a demasiado estrés y contaminantes externos. Estos contaminantes afectaron el desarrollo del embrión y no permitieron que este pudiera alcanzar un tamaño óptimo. Además, los contaminantes externos (orina y excremento de rata) hicieron que todo el lote de cebada se llenara de microorganismos, los cuales son dañinos para el grano de cebada ya que tienen inhibir su crecimiento. Respecto a los porcentajes de humedad de la cebada durante el proceso de germinación, se puede observar en el Cuadro 151, Anexos, página 383 que dicho valor disminuía conforme iban pasando las horas de germinado. Esto es normal ya que durante este proceso se consume parte del agua presente del grano para que el embrión pueda seguir creciendo; es por esta razón que era necesario regar el grano constantemente para evitar que este se secara y se detuviera el proceso germinativo. Para el lote 3 se puede observar en el Cuadro 151, Anexos, página 383 que esta disminución era más pronunciada que para los lotes 1,2,4 y 5. Esto se debe a que los mismos contaminantes presentes en dicho lote hacía que la cebada se secara más rápido, por lo que era más difícil mantener el grano húmedo y con condiciones aptas para seguir germinando ya que no podía llevar a cabo un proceso de hidrólisis. Es importante mencionar que a partir de las 72 horas de sedó de regar la cebada para que esta empezara un proceso de secado natural hasta llegar a porcentajes de humedad (15%) que paró el proceso de germinado (Ver Cuadro 152, Anexos, página 385).

En lo que respecta al porcentaje de rendimiento de la cebada en el proceso de germinado, se puede observar que, para el lote 1 de cebada, se obtuvo un 79.71%, 0.18%, lo cual equivale un indicador regular según el valor teórico (51%-80%). Para el lote 2 se obtuvo un rendimiento del 62.01%, lo cual también equivale a un indicador regular según el valor teórico. Debido a que para los lotes 1 y 2 se utilizó una plancha de germinado, los porcentajes de rendimiento fueron relativamente bajos. Para el lote 3 se obtuvo un rendimiento del 17.35% %, lo cual equivale a un indicador pobre según el valor teórico (51). El bajo rendimiento se debe a que este lote en específico sufrió una contaminación severa de agentes externos (orina y excremento de rata) los cuales inhibieron el proceso germinativo de la cebada y dejaron un alto porcentaje (mayor al 80%) de

granos sin germinar. Este lote tuvo que ser descartado ya que no podía ser utilizado para realizar el mosto debido a la poca cantidad de azúcares que podía aportar y al alto riesgo de agentes contaminantes presentes, los cuales suponen un riesgo para la salud. Para el lote 4 se obtuvo un rendimiento de 78.63%, lo cual equivale a un indicador regular según el valor teórico (51%-80%). Debido a que los lotes 3 y 4 se germinaron utilizando una caja de germinado, se esperaban resultados de conversión más altos que los obtenidos en la plancha. Sin embargo, la caja no estaba terminada en su totalidad cuando se realizaron estos procesos, lo cual provocó que la cebada estuviera sometida a todos los contaminantes externos y las situaciones de estrés mencionadas con anterioridad. Por otro lado, el lote 5 si se germinó con la caja de germinado totalmente terminado. Gracias a esto se obtuvo un rendimiento de 92.99% %, lo cual equivale a un indicador excelente según el valor teórico (91.00%). Este rendimiento fue el más grande obtenido, sobrepasando incluso a los obtenidos en la plancha de germinado, lo cual indica que la caja de germinado puede llevar a cabo del proceso de germinado en condiciones favorables para la cebada (humedad, temperatura y protección de agentes contaminantes). Los rendimientos reportados con anterioridad se pueden observar en el Cuadro 153, Anexos, página 386. La luminiscencia obtenida para los focos LED (13.8 kLux) es favorable ya que esta intensidad lumínica permite un color de luz blanco cálido (400-800 nm) por lo que no hay riesgo de que el porcentaje de agua en el grano de cebada (45-47%) disminuya (Ver Cuadro 76, Anexos, página 291). Una intensidad lumínica mayor haría que el agua presente en el grano de cebada disminuyera debido a que la temperatura dentro de la caja de germinado incrementaría, evaporando el agua presente en el grano de cebada. La cebada que no germinó no podía ser utilizada en una germinación secundaria ya que esta perdió sus propiedades germinativas al no contar con ninguna reserva de almidón y terminar con un porcentaje de humedad no favorable (15%) para poder iniciar un nuevo proceso germinativo. Debido a esto fue necesario descartar toda la cebada no germinada.

En los que respecta a los valores de precisión en los datos de promedio de la cantidad de impurezas removidas para los lotes de cebada y largo del acrospire de cebada para los lotes 1,2,4 y 5 de cebada, se utilizó la incertidumbre como parámetro de precisión. Para el porcentaje de humedad promedio de los lotes de cebada y el largo del acrospire del lote de 3 de cebada se utilizó la desviación estándar como parámetro de precisión.

En la Figura 34, página 170 se observa el modelo calculado para predecir la cantidad de azúcares fermentables en el mosto de cerveza, según el día de germinado de cebada. En el Cuadro 81 Anexos, página 295, se muestra que la concentración de azúcares fermentables en el mosto

aumenta conforme aumenta el tiempo de germinado. El modelo 1 funciona adecuadamente para el rango de 0-72 horas de germinado, sin embargo, para el rango de 72-120 no es tan preciso. Debido a esto, la gráfica se delimitó a el rango de 0-72 horas para obtener así el modelo 2. Este proporciona datos bastante precisos, ya que se obtuvo un valor de 1. Se determinó que alrededor del cuarto día de germinado se puede obtener la mayor cantidad de azúcares fermentables (5.36 mg/100mL) a la hora de realizar el mosto. A partir de los días cinco y seis se puede ver un decrecimiento en las concentraciones de azúcares, lo cual indica que dichos días no son idóneos para detener el germinado. Esto se debe a que, después de cierto tiempo, el mismo grano de cebada empieza a consumir sus reservas de almidón para poder seguir germinando. Las ecuaciones propuestas pueden dar valores aproximados de días de germinado y concentración de azúcares en el mosto, por lo que pueden ser de vital ayuda si una cervecería realiza el proceso de malteado.

Para el análisis de resultados del módulo 2 es necesario mencionar que el primer proceso involucrado en el módulo es el secado y tostado de malta. Después del proceso de germinado es preciso detenerle con una reducción de humedad dentro del grano. Se considera la malta base como secada y la malta caramel como primero secada y luego tostada, puesto a que llega en un punto hasta temperaturas de 115°C. En el secado de malta utilizando el deshidratador de gabinetes del laboratorio, se obtuvo una humedad final promedio de 4.78% (m/m) para la malta base y 1.27% (m/m) para la malta caramel. La desviación estándar se reportó de 0.18% y 0.33% respectivamente. El proceso de secado y tostado se llevó a cabo en el deshidratador de gabinetes de la universidad. El secado de malta en el deshidratador de gabinetes fue útil debido al control de temperatura que posee. Un horno para malta de cebada tiene como finalidad la uniformidad en el secado de cada tipo de malta. Con la metodología actual se usaron las existentes bandejas del deshidratador, pero las mismas no permiten el flujo del aire caliente por la parte inferior del grano. Una mejora para el proceso, podría ser el uso de bandejas perforadas que permitan el paso del aire caliente por toda la superficie del grano y creen más uniformidad en cada lote de secado de malta. Además de esto, el tiempo de secado podría ser menor. Se puede ver en el Cuadro 35, página 179, como es que la temperatura va cambiando con respecto a la altura dentro del equipo. Las bandejas en posiciones altas dentro del deshidratador estuvieron a una temperatura más alta. Es importante estar cambiando de posición las bandejas para obtener un tiempo de secado igual en todas las bandejas producidas. Una mejora en el proceso puede ser el estudio del secado de malta en un secador rotatorio con control de temperatura para producir lotes de malta más uniformes.

La relación entre malta base y caramelo durante la experimentación se mantuvo en 85%-15%. Siempre es importante mantener mayor cantidad de malta base que de cualquier otro tipo de malta. El color de la cerveza, en teoría está ligado al nivel de tueste de las maltas a emplear. En nuestro caso, a pesar de aplicar el mismo programa de secado para la malta base y el mismo programa de secado y tostado para la malta caramelo, se obtuvieron distintos colores finales en la cerveza. El color promedio fue de 4.67 grados Lovibond. La desviación estándar fue de 2.08 grados Lovibond. Esta diferencia de color en la cerveza final es notoria visualmente (Cuadro 34, página 179) y se puede deber al nivel de germinación de cada lote, puesto que ello afecta a su reacción con el calor del deshidratador. Esta distinta coloración también se puede deber a la presencia de almidones en el producto final, que afectan en turbidez (sólidos suspendidos) a la apreciación del color en la cerveza. Con el uso de un filtro con menor tamaño de partícula (tierra de diatomeas, por ejemplo) se podría ver un color diferente debido a la ausencia de sólidos suspendidos.

Según referencias, se basó en que la molienda fina y molienda gruesa tienen sus ventajas y desventajas. En el caso de nuestra malta, no se tuvo una germinación tan uniforme en la malta, por lo que una molienda fina sería la aplicada. Por otra parte, la molienda fina causa problemas de fluidez y turbidez en el mosto, que es un inconveniente en el proceso de fermentación y filtración. En base a la medición del grano de malta de cebada, se encontró que tiene un tamaño promedio de 3.83mm (ver Cuadro 33, página 178). La molienda se fijó en 2mm para trabajar en un punto medio entre molienda fina y gruesa. La molienda de la malta generó una cantidad de harinas finas menores a la malla No. 100 (tamaño de partícula de 0.150 mm) correspondiente al 1.96% (m/m) en malta base y 2.41%(m/m) en malta caramelo. Estas partículas finas fueron retiradas del proceso de producción de cerveza debido a su capacidad de generar turbidez en el mosto y la cerveza. En antecedentes, se puede ver como la remoción de harinas finas producto de molienda hace que la turbidez disminuya en la cerveza final (Ver Cuadro 11, página 89). Un estudio sobre la reducción de tamaño de la malta y el rendimiento en la maceración es importante para realizar mejoras al proceso de elaboración de cerveza. Para la reducción de tamaño del grano de malta se adaptó el secador de rodillos debido a su capacidad de regular la apertura de sus rodillos. Es importante incorporar un molino de rodillos como tal al proceso. Un molino de rodillos tiene la ventaja de tener rugosidad en sus rodillos y así realizar más rápidamente el proceso de molienda. El secador de rodillos tuvo el inconveniente de tener rodillos lisos, por los cuales muchas veces la malta resbaló en vez de ser molida. El molino de rodillos propuesto para sustituir el secador de rodillos es marca Roskamp Champion, modelo FX 1600 y es especializado para crear hojuelas en la molienda, lo cual es conveniente para el proceso de cerveza.

La malta una vez molida, está lista para el proceso de maceración y cocción. A partir de estos procesos, nuestro producto de interés pasa a ser el mosto, que es un líquido rico en azúcares. En la elaboración de cerveza es común medir la gravedad específica como un parámetro que indica la concentración de azúcares disueltos, puesto a que es una forma rápida. Para la caracterización de dichos azúcares es más común emplear cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC). Durante la maceración se mantuvo una temperatura constante de 66°C por una hora, junto con agitación y relación de agua de 3 litros por cada kg de malta. En el primer lote (Cuadro 35, página 179), se encontró una diferencia entre las azúcares extraídas según la metodología y lo indicado en literatura. Esto, se puede deber a la diferencia entre malta fabricada en el laboratorio y malta producida por casas de malteo. La relación de agua y malta empleada en el primer lote pretendía llegar a una gravedad específica de 1.056 (para llegar a un grado alcohólico de 5-6 % en volumen) según literatura sobre cerveza, pero solamente llegó a 1.036. Esta baja cantidad de azúcares en el mosto con respecto a la literatura, se pudo deber a varios factores. Un factor pudo ser el malteo, que se observó poco uniforme. El nivel de germinación (largo del acróspire) en la malta verde obtenida se podía ver desigual entre los granos. El nivel de germinación está íntimamente ligado a la disponibilidad de enzimas amilasas dentro del grano de malta. Una germinación deficiente se traduce en baja conversión de almidón en azúcares y alta presencia de almidones en el mosto obtenido. El segundo factor, la maceración. Un detalle importante es que la maceración se fijó a 66°C por lo que puede ser que otro programa de temperaturas favorezca la conversión de almidón en azúcares. Un estudio sobre la actividad enzimática durante el proceso de maceración a distintas temperaturas sería de gran ayuda a mejorar el proceso. Las azúcares no fermentables (dextrinas límite) no pudieron ser determinadas, por lo que se recomienda adquirir una columna de dextrinas para poder medir en cromatografía el contenido de este componente en el mosto.

Después de la maceración se obtiene un líquido llamado mosto y un subproducto llamado afrecho. El afrecho el residuo sólido de la malta después de la maceración. En el lavado de granos se vuelve a circular agua en el afrecho para aprovechar mayor cantidad de azúcares. La cantidad de agua de lavado de granos también pudo ser un factor en la baja concentración de azúcares final. La cantidad de agua de lavado se fijó a 3 L/kg de malta procesada, al igual que el agua en la maceración, siguiendo literatura del proceso cervecero. La temperatura del agua de lavado se mantuvo en 75°C para la extracción de azúcares sobrantes en el afrecho de malta, puesto que a temperaturas mayores se extraen compuestos que no son de interés. Pese a que este es un proceso que se hace en muchas cervecerías para aumentar la cantidad de azúcares a extraer, sería importante

analizar si es conveniente hacerlo con la malta producida en el laboratorio, para no comprometer la concentración de azúcares en el mosto producido.

El afrecho es el principal residuo del proceso cervecero. En las cervecerías industriales se aprovecha este residuo, debido a su alto volumen, como ingreso económico por la venta de alimento de ganado. Al ser la cebada un cereal, se tienen muchos nutrientes que son útiles como alimento. Es importante mencionar que debe ser dispensada de manera rápida debido a la humedad a la que sale (aproximadamente 60%), ya que puede ser propensa a contaminación microbiana. En el caso del proceso evaluado en el módulo se produjo aproximadamente 7 kg de afrecho a partir de 4.35kg de malta. Una alternativa, es secar el afrecho para poder almacenarlo y dispensarlo después. Otro desecho del proceso, son los restos de lúpulo. Debido a que estos restos son menores en cantidad que el afrecho, muchas veces no se investiga que hacer con los mismos. Los restos de lúpulo terminan siendo una pasta que es difícil de filtrar y muchas veces se llevan parte de mosto. El secado de los restos de lúpulo podría evaluarse para verificar si se puede reingresar al proceso.

La concentración de azúcares en el mosto fue de 50.5979 g/L para la maltosa, 36.2912 g/L para la glucosa, 26.5685 g/L para la sacarosa y 4.3342 g/L para la fructosa. La desviación estándar fue de 5.2548 g/L para la maltosa, 1.1480 g/L para la glucosa, 2.3777 g/L para la sacarosa y 0.9007 g/L para la fructosa. Esta desviación nos indica que existió cierta variación sobre la concentración de las distintas azúcares fermentables en el mosto producido. Para mantener constante un valor de grado alcohólico es necesario mantener constante un valor de concentración total de azúcares. El total de azúcares fermentables determinadas reportaron un promedio de 113.45 g/L y desviación estándar de 6.10 g/L. Esta variabilidad en la concentración de azúcares puede deberse a la distinta actividad enzimática durante la maceración. En las producciones de cerveza, el parámetro de gravedad específica es un dato útil para medir la concentración de azúcares, puesto que es un dato fácil de medir. La gravedad específica del mosto antes de fermentar fue de 1.047 en promedio, lo cual es menor a la gravedad específica de 1.050 para una cerveza tipo IPA. Es por esto que para la planta piloto sería de mucha utilidad mantener almacenado un concentrado de azúcares provenientes de malta. Este concentrado podría regular muy bien la concentración de azúcares antes de fermentar y evitar el uso de azúcar (sacarosa), que provocaría mutaciones en el consumo de azúcares de la levadura a utilizar o aumentar el tiempo de cocción, que agregaría más amargor a la cerveza final.

En los cromatogramas (Figuras 179, 180, 181, 182, 183, 184 y 185 de Anexos, páginas 509 a 512) de los lotes producidos se puede ver como existe un pico en concentración que no es ningún azúcar para analizar. Esta presencia es muy posiblemente almidón en el medio. Un estándar de almidón para la cuantificación del mismo en la cerveza sería importante para el control de la conversión del almidón en azúcares. Esto puede sugerir ya sea que existe baja actividad enzimática en el macerado o que el tiempo de macerado fue muy corto. Actualmente, existen aditivos de amilasa comercialmente que pueden ser agregados para favorecer la conversión de almidón en azúcares. Este tipo de aditivos podría aumentar la eficiencia de extracción de azúcares en el macerado.

Los cálculos de amargor se realizaron con el método Rager. En promedio el grado de amargor fue de 64.87 IBU que corresponden a un rango por el cual se manejan el tipo de cerveza IPA americana (Ver Cuadros 13 y 14, página 90). El espectro de cervezas IPA es muy amplio, que se puede dividir en varios tipos y varios gustos de amargor, siendo más amarga la tipo americana y menos amarga la de tipo inglés. En las adiciones de lúpulo se puede ver como las primeras adiciones proporcionan altos niveles de amargor y las demás no. De igual forma se hacen varias adiciones debido a que las adiciones tardías agregan aromas deseados. El método Rager una forma común de calcular el amargor de la cerveza para el cervecero artesanal, pero sería de mucha ayuda la instalación de un espectrofotómetro UV junto con la metodología que incluya un solvente apto, longitud de onda deseada para medir grados de amargor en la cerveza final.

Los procesos del módulo como secado, tostado, molienda y tamizaje, fueron identificados como equipos disponibles para la planta piloto. Aunque estos equipos no están confinados dentro del espacio de la planta piloto, son útiles para la obtención de materia prima para la planta piloto (Ver Cuadro 31, de Resultados, página 166). Se recomienda adquirir un molino de rodillos en vez del secador de rodillos para tener un mejor proceso. De igual forma, el deshidratador de gabinetes cuenta con un perfil de temperaturas poco homogéneo dentro de su sistema de repisas, por lo que un secador más homogéneo puede mejorar la uniformidad del producto. El tamiz rotap, tiene una capacidad de 450 gramos, por lo que adquirir un equipo con capacidad mayor puede hacer el proceso de separación granulométrica más corto.

El tanque de acero inoxidable de forma cilíndrica vertical y capacidad máxima de 0.255 m³ (Ver Figura 76, página 435) se puede adecuar como tanque en sala de cocimiento. El tanque existente puede funcionar como tanque de cocción, si se acopla el serpentín calculado. Para lograr

operar la planta piloto, es necesario adquirir los equipos que se especifican en el Cuadro 31, página 166. La sala de cocimiento es el nombre con el que se conoce al área destinada a la maceración, lavado de granos y cocción. Las cervecerías cuentan con tanque de almacenamiento de agua, tanque de maceración, tanque de filtrado de afrecho, tanque de cocción y tanque Whirlpool para separar sedimentos. Con la adquisición de estos nuevos equipos, se puede alimentar de forma debida el mosto hacia el fermentador.

La bomba que se instaló en la planta piloto cumplió con las necesidades de transporte del fluido a lo largo de las tuberías. Esto, debido a que la potencia requerida calculada fue de 0.011 kW y la potencia de la bomba instalada fue de 0.45 kW. Su potencia actual es suficiente como para elevar el fluido hasta 1.20m de altura, cantidad requerida para bombear al tanque de fermentación. Las curvas características de la bomba no fueron encontradas en el manual de operación, por lo que se trabajó en un escenario de una potencia baja (55%). Un inconveniente fue la dificultad de encontrar su valor por parte del proveedor del NPSH. Este valor define la capacidad a la cual se puede bombear un fluido con presión de vapor alta (un fluido caliente como el mosto). Para el proceso de la cerveza existen bombas especiales para manejo de mosto, con capacidad de operación a temperaturas altas, como bombas Netzsch ®. Además de esto, están diseñadas para trabajar con fluidos viscosos y no viscosos, con presencia de sólidos o no. El modelo NM201 es el más adecuado para la planta piloto, con potencia de 1.1kW, estas bombas serían de utilidad en caso de adquirir los equipos de la casa de cocimientos.

En la demanda térmica de la maceración y cocción se calculó que se requiere un sistema que varíe su transferencia de calor hasta llegar a 8.03 kW y 27 kg de vapor de caldera en total (Ver Figuras 54 y 55, páginas 343 y 344). Esto, para lograr producir hasta 35 litros de mosto cocido. Para llegar a este nivel de calor, lo más recomendable es la instalación de un serpentín con vapor dentro del tanque de cocción y tanque de maceración. El uso de vapor de la caldera del laboratorio puede proveer el calor necesario, empleando un flujo de vapor de hasta 4.26×10^{-3} kg/s y temperatura de vapor de 162.14°C, como lo es el vapor producido por la caldera del laboratorio. La presión del vapor producido por la caldera es de 652.7 kPa (80 psig), pero siempre se debe de colocar una válvula para regular la entrada de vapor al sistema y un manómetro para trabajar en rangos seguros para el equipo. La presión de operación podría variar entre 0-200kPa (0-15 psig). Un serpentín con área de 0.439 m² lo cual podría ser un serpentín de acero inoxidable de 0.021m de diámetro externo ($\frac{1}{2}$ in diámetro nominal) y 6.55 m de largo. Al final del recorrido del vapor

una trampa de vapor es necesaria de igual forma para condensar el vapor que no ha cambiado de fase.

Para el análisis de resultados del módulo 3, evaluar las condiciones de fermentación es fundamental para que la reacción sea lo más eficiente posible en cuanto a la producción de etanol. En el Cuadro 41, página 185, se observan las principales variables que afectan el rendimiento de la reacción: temperatura y pH. Para el tipo de cerveza que produjo, se necesitaba mantener el mosto en un rango de temperatura entre 15°C y 25°C. Las mediciones periódicas de temperatura durante el proceso de fermentación permitieron calcular un promedio de temperatura de $21.47 \pm 0.34^\circ\text{C}$; este resultado se encuentra dentro del rango de temperatura establecido en la literatura. Asimismo, las especificaciones de la levadura utilizada, Saf-Ale S-04, indican un rango de temperatura específico para asegurar un alto rendimiento en relación con la formación de producto. Por esto, puede decir que la fermentación se mantuvo en las condiciones térmicas adecuadas. En las Gráficas 17, 18 y 19, páginas 300 y 301 se observa la fluctuación de la temperatura en función del tiempo. En algunas secciones se observan cambios drásticos debido a que el sistema no se pudo controlar todo el tiempo.

En el caso del pH, el valor promedio de las tres corridas realizadas fue de 5.24 ± 0.52 . Dado que los límites establecidos en la literatura son 3 y 6, se puede decir que el pH se mantuvo dentro del rango permitiendo que la levadura estuviera en un medio adecuado para su reproducción y mantenimiento. En la Gráfica 20, página 306 se puede observar, de igual forma, el comportamiento del pH en función del tiempo medido durante la cinética de reacción. Nuevamente, mantuvo dentro del rango adecuado para la levadura utilizada y se pudo observar una pequeña disminución con el tiempo. Esta variabilidad se debe a la liberación de enzimas por parte de la levadura durante la reacción de fermentación, además, es posible que el crecimiento de la concentración de etanol en el mosto también afecte el pH. Es fundamental que el pH se mantenga dentro del rango adecuado ya que, si el valor es muy básico, los microorganismos tienden a producir glicerol en lugar de alcohol. Por otro lado, si el pH es muy ácido la velocidad de reproducción celular disminuye y esto afecta directamente en la formación del producto principal.

En la Gráfica 27, página 395, se observa el comportamiento de la concentración de sustrato, es decir, maltosa y sacarosa. Para el estudio cinético, se tomó como sustrato únicamente la sumatoria de estos dos azúcares ya que se encuentran en mayor proporción y su comportamiento es similar en función del tiempo, lo cual se muestra en la Gráfica 27, página 395. Este supuesto se

toma en cuenta posteriormente para realizar el análisis de la cinética según la concentración de azúcares totales.

En la Gráfica 28, página 396, se observa el comportamiento de los microorganismos donde se pueden apreciar las fases de crecimiento celular siendo la fase de decrecimiento la más evidente. La fase de latencia es corta comparada con el resto de las fases de crecimiento que se pueden apreciar en la gráfica. Esto se debe a que se preparó un inóculo para que los microorganismos se reprodujeran y mantuvieran su actividad al ingresar al mosto de cerveza para iniciar con la producción de etanol. Después de 5 horas en el punto de inflexión, inicia la fase exponencial que se extiende hasta las 24 horas de haber iniciado la fermentación. Es en este punto donde se observa nuevamente un punto de inflexión de la curva. En esta gráfica no se puede observar claramente la fase estacionaria, ya que el decrecimiento celular inició precipitadamente a las 32 horas. Esto se debe principalmente a la ausencia de maltosa desde este punto, siendo la cepa seleccionada, selectiva para este azúcar.

En la Gráfica 29, página 396, se observa el comportamiento del producto. Después de un día, la producción de etanol disminuye de forma drástica, lo cual se debe principalmente a la disminución del crecimiento celular que fue causado proporcionalmente por la disminución de la concentración de azúcares en el mosto.

En el Cuadro 61, página 213, se observa la densidad inicial del mosto resultando en un valor de $998.000 \pm 1.045 \text{ kg/m}^3$; este valor se considera bajo en comparación con el dato teórico inicial que debería tener el mosto en función del rendimiento que tendrá la reacción que es de 1050 kg/m^3 . Se encontró en la literatura la concentración en °Brix inicial que debe tener el mosto con un valor de 12.370%, el cual se comparó con el valor experimental de $9.958 \pm 1.377\%$. Esta concentración inicial de sólidos disueltos es baja comparada con el valor teórico, por lo que se considera que el mosto no presentó el contenido adecuado para asegurar una alta producción de etanol por ser una cerveza artesanal.

Como se mencionó anteriormente, el pH no puede ser menor a 3 ni mayor a 6 para asegurar el rendimiento de los microorganismos. Este parámetro debe ser controlado principalmente porque puede variar en función de la actividad enzimática durante la reacción. Además, es posible que una pequeña cantidad de dióxido de carbono se quede en el sistema formándose ácido carbónico y, por tanto, se acidifique levemente el medio. El contenido inicial de maltosa en el mosto fue de 50.598

± 5.254 g/L y, comparado con los otros azúcares, es el que se encuentra en mayor proporción en el mosto previo a la fermentación. La levadura que se utilizó en el procedimiento experimental es selectiva para este sustrato por lo que es el primero en acabarse. Después de quedarse sin maltosa el medio de cultivo, los microorganismos comienzan a consumir el resto de azúcares en función de la complejidad de su estructura. Es decir, que estos preferirán los monosacáridos como la glucosa y la fructosa, sobre la sacarosa.

De igual forma, en el Cuadro 61, página 213, se observan los resultados obtenidos de las características finales del mosto fermentado de cerveza. Se obtuvo un valor teórico de densidad final que debe tener la cerveza en función de la cantidad de etanol producida y se obtuvo un valor experimental de 977.854 ± 1.534 kg/m³. Se observa una disminución significativa en la densidad comparada con la inicial, lo cual se debe a la presencia del etanol producido. La concentración en °Brix fue de $6.202 \pm 1.275\%$. Comparando con la concentración inicial se observa un cambio 3.756% que muestra la disminución de azúcares presentes para la reproducción y mantenimiento celular y para la formación de producto. El pH del mosto se mantuvo dentro de los límites establecidos en la norma resultando en un valor de 4.445 ± 0.052 . Para obtener el dato teórico de etanol se obtuvo un promedio del rango de contenido alcohólico para una cerveza IPA. El contenido alcohólico final de la cerveza producida fue de 47.257 ± 18.111 g/L. Este valor se debe a que la cebada utilizada no siempre fue la misma y las condiciones de malteado no fueron ideales, por lo que hubo variaciones en el contenido de azúcares fermentables en el mosto. En el caso del contenido de metanol, fue mínimo y apenas se acercó al límite establecido por la norma.

En el Cuadro 43, página 186, se muestran los resultados de análisis de azúcares para la cinética. En el caso de las corridas de fermentación, se observa que la fructosa no está presente tanto al inicio como al final de este proceso bioquímico. Sin embargo, en los resultados obtenidos para la cinética se detectó una presencia, en baja concentración, de fructosa. Esto puede deberse a un proceso conocido como “hidrólisis” de la sacarosa, la cual consiste en la división de este azúcar en los monosacáridos glucosa y fructosa.

En los datos de cinética, en el Cuadro 43, página 186, se observa cómo la maltosa, el azúcar con mayor proporción, se empieza a consumir rápidamente en comparación con los otros azúcares y esto se debe a que la levadura es específica para cerveza tipo Ale y, por lo tanto, tiene afinidad por la maltosa. Por otro lado, el segundo azúcar en mayor proporción en el mosto fue la sacarosa. Su concentración disminuyó durante el curso de la reacción. Sin embargo, al haberse acabado el

resto de azúcares, su concentración permaneció constante hasta el fin de la fermentación. Esto puede deberse a la selectividad de la cepa por la maltosa.

En la Gráfica 23, página 309, se observa el comportamiento del metanol con respecto al tiempo en las mediciones de cinética. La norma COGUANOR NG33006 establece que las cervezas, como bebidas alcohólicas fermentadas, no deben tener una concentración mayor a 3 mg/L de metanol. El comportamiento de este subproducto de la fermentación, tanto en las mediciones de cinética como en la evaluación final del producto en cada una de las corridas, es mayor al valor especificado. Por lo anterior, se determinó que la bebida no cumple con el límite permitido de concentración de metanol. Es posible que el sistema utilizado para llevar a cabo la fermentación haya tenido residuos y contaminantes que pudieron haber provocado que durante la reacción se formara metanol. Además, el mosto que fue preparado para ser fermentado se hizo utilizando una mezcla de granos de cebada de dos y seis hileras que pudo haber tenido contaminantes denominados como sustancias pécticas, las cuales se encuentran en astillas de madera, pulpas, entre otros. Es importante mencionar que la bebida obtenida sí cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017 para bebidas alcohólicas, que establece que el límite máximo permitido es de 3000 mg/L.

Para generar un modelo matemático a partir de la cinética de reacción, se analizó inicialmente la Gráfica 9, página 189. Esta muestra el comportamiento de la concentración de los microorganismos en función del tiempo. La fase exponencial de crecimiento celular no se observa claramente. En la Gráfica 37, página 400, se muestra el comportamiento del logaritmo natural de la concentración de microorganismos donde se extienden un poco las fases para una mejor visualización en especial la fase exponencial y el punto en el que inicia el decrecimiento celular. Según lo anterior, el modelo de Monod no se puede utilizar para la fase decrecimiento celular ya que su ecuación no toma en cuenta parámetros como la constante de afinidad al producto (K_p). Es por esto que se decidió dividir la cinética en dos fases: la de crecimiento celular y decrecimiento celular.

Analizando ambas fases por separado se tiene una mejor percepción de los datos y de las fases del comportamiento celular. En la Gráfica 28, página 396 se observa el comportamiento de microorganismos en la fase de crecimiento celular. Se puede observar que, en el tiempo de 6 horas, la velocidad de reacción es máxima teniendo el punto de inflexión como evidencia al cambiar la pendiente. En la Gráfica 27, página 395 se observa el comportamiento del sustrato en esta misma

fase y se ve cómo la concentración empezó a disminuir por su utilización como fuente de energía para producir etanol. Por último, Gráfica 29, página 396 muestra que en ese mismo tiempo se marca el incremento en la formación de producto. Esto indica que, al haberse reproducido los microorganismos con la máxima velocidad, les fue posible mantenerse activos y en fase de crecimiento para dar lugar a la formación del producto.

La fase de crecimiento celular finaliza en el tiempo de 24 horas, esto significa que después del primer día la reproducción celular empezó a disminuir a pesar de que se siguió produciendo etanol. Lo anterior podría deberse al hecho de que el contenido de azúcares iniciales en el mosto utilizado para la cinética de reacción fue bajo comparado con el valor teórico que debería haber tenido. Después de analizar los cronogramas, se observaron dos picos grandes en un tiempo de retención entre 6 y 7 minutos el primero y entre 14 y 15 minutos el segundo, cuya identificación en términos de compuestos químicos no se pudo realizar inicialmente. Es posible que haya habido un problema durante el proceso de germinado o bien, durante el proceso de malteado donde se transforma el almidón, un polisacárido, en azúcares fermentables. Se realizaron pruebas en el equipo y se confirmó que el primer pico representa el contenido de almidón en las muestras y el segundo representaba el contenido alcohólico, como se puede observar en la Figura 240, página 539.

En el Cuadro 43, página 186, se encuentran los parámetros cinéticos de reacción: la constante de afinidad al sustrato K_s , la velocidad máxima de crecimiento celular $\mu_{\max}$ y la constante de afinidad al producto K_p . En el caso de K_s , mientras más pequeño sea su valor, mayor es la afinidad al sustrato. Los valores son de -74g/L y -25g/L para las fases de crecimiento celular y decrecimiento celular, respectivamente. Estos valores muestran que la levadura utilizada muestra afinidad por maltosa y sacarosa, considerados como el sustrato principal en la reacción. En las gráficas de comparación de los datos del modelo con los datos experimentales de la fase de crecimiento celular, se observa un porcentaje de error menor ya que se está utilizando el modelo de Monod mientras que en las gráficas de la fase de decrecimiento celular se observan porcentajes de error mayores por la inclusión de la constante de afinidad al producto.

En el Cuadro 44, página 187, se observan los resultados del rendimiento de los microorganismos y producto con respecto al sustrato, tanto en la fase de crecimiento celular como en la de decrecimiento. Estos rendimientos son una medida de la capacidad de conversión de un sustrato de crecimiento en material celular y en productos. Los valores en el cuadro representan la

masa de microorganismos que se generó por gramo de sustrato y la masa de producto formado por gramo de sustrato. La diferencia entre la fase de crecimiento celular y la fase de decrecimiento celular es significativa. Esto comprueba que el rendimiento del producto se vio afectado debido a que el sustrato se consumió rápidamente y, por consiguiente, los microorganismos dejaron de reproducirse para continuar con la producción de etanol. Es importante mencionar que los rendimientos del producto tanto para la fase de crecimiento como para la fase de decrecimiento tienen valores negativos en función de la disminución en la concentración de sustrato, sin embargo, esto no repercute en el valor del rendimiento real.

Para la fase de crecimiento celular, se puede observar en las gráficas 40, 42 y 44 páginas 402, 403 y 404, que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales obtenidos para la cinética. Los porcentajes de error resultantes para el comportamiento experimental de la concentración de sustrato, microorganismos y producto son 2.39%, 2.65% y 0.25, respectivamente. Para la fase de decrecimiento celular, se puede observar en las gráficas 41, 43 y 45 páginas 402, 403 y 404, que, de igual forma, el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales. Sin embargo, los porcentajes de error comparados con la fase de crecimiento celular son mayores en función del comportamiento de microorganismos que decreció de forma abrupta, estos valores son 9.90%, 17.51% y 1.83%. En el Cuadro 45, página 188, se muestran las ecuaciones generadas para el modelo que predice la concentración del sustrato, difiriendo ambas ecuaciones en su estructura y en la inclusión de la constante de afinidad al producto (K_p). Estas ecuaciones predicen el comportamiento de concentración de sustrato (azúcares totales), microorganismos (levaduras) y producto (etanol), todo a partir de la concentración de sustrato en función del tiempo.

En las Figuras 42 y 43, páginas 190 y 191, se muestran diagramas de bloques con los balances de masa y energía del proceso de fermentación del mosto de cerveza y el proceso de esterilización del medio de cultivo previo a la fermentación. Para obtener las entradas y salidas en el balance de masa, se utilizaron las concentraciones promedio obtenidas durante la experimentación de los azúcares fermentables y alcoholes presentes. Para el dato de los azúcares no fermentables, se tomó una concentración teórica inicial de aproximadamente 15 g/L. Para el balance de energía del proceso de fermentación, se observa un flujo de entrada y salida de agua fría de 3.34×10^{-3} kg/s. Los valores de entrada de calor hacen referencia a el calor generado por la reacción dado que es exotérmica y la transferencia de calor del ambiente hacia el sistema. La transferencia de calor de salida está dada por el agua fría que sale de la chaqueta al realizar el proceso de enfriamiento del sistema. Por otro lado, en el balance de energía del proceso de

esterilización se muestra un flujo de vapor de 2.56×10^{-3} kg/s teniendo como transferencia de calor de entrada la generada por el vapor que ingresa a la chaqueta y como transferencia de calor de salida la referente al mosto de cerveza.

Con base en la investigación realizada y en los resultados experimentales obtenidos, se determinaron las variables de operación que afectan el rendimiento de la reacción de fermentación: control y regulación de temperatura, control de pH, velocidad de agitación, presión dentro del tanque y aislamiento del sistema para evitar el ingreso de oxígeno ya que se trata de una reacción anaeróbica.

En el Cuadro 47, página 192, se muestran los equipos, tubería y accesorios implementados en el reactor disponible. Estos fueron necesarios para poder realizar pruebas posteriores de funcionamiento. En la Figura 44, página 194 se muestra un esquema que muestra cómo está colocado lo anterior en el reactor. Por otro lado, en el Cuadro 48, página 194 se muestran los equipos, tubería y accesorios que forman parte de una propuesta para asegurar la calidad en la producción de cerveza y, por consiguiente, la inocuidad del proceso. En la Figura 45, página 196, se muestra el esquema con lo especificado en el cuadro anterior con el fin de mostrar cómo estarían ubicados e instalados los equipos.

Se instaló un termómetro analógico para medir la temperatura del mosto en el interior del tanque. Para el control de la temperatura, se seleccionó un termostato digital COEL TLE 20 con vaina de acero inoxidable para instalarse directamente en el fermentador. Es esencial que el material sea de acero inoxidable para asegurar la inocuidad del proceso. Con este equipo se pretende registrar los datos de temperatura a lo largo de la reacción para tener un control del proceso permitiendo que el rendimiento del producto sea alto con respecto a la concentración de sustrato. Este sensor también permitirá tener un registro de temperatura al momento de la esterilización, un paso fundamental para asegurar que el mosto esté libre microorganismos de otro tipo que puedan interferir con el proceso de fermentación.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que la variación de pH no es muy marcada ya que, como se observa en los cuadros de resultados de la evaluación de condiciones de fermentación, los valores se mantuvieron dentro del rango establecido en la literatura. Sin embargo, el cambio es significativo comparado con el rango en el que debe permanecer el pH para cumplir con la norma COGUANOR NGO 33006 ya que ésta establece que los límites son 3.9 y 4.5 para el

producto terminado. Debido a lo anterior, se decidió seleccionar un sensor de pH para mantener un control de esta variable y determinar si durante el proceso, en algún momento es necesario acidificar el medio o, por el contrario, agregar una base para nivelar el pH al rango al cual la levadura tiene su mayor rendimiento (pH entre 3 y 6). El equipo seleccionado es un sensor de pH de proceso en línea de acero inoxidable, cuyo material, nuevamente, ayuda a asegurar la inocuidad del proceso y también para evitar la corrosión y formación de agentes contaminantes en las tuberías y válvulas instaladas. Para utilizar este sensor, se necesita un controlador digital para lo cual se propuso uno marca Hach SC 200, del cual también se muestran sus especificaciones en la Figura 41, página 184. Se seleccionó este ya que es un controlador universal que permite el uso de sensores analógicos y digitales y tiene varios puertos, por lo que se podría usar posteriormente para otro tipo de sensores como: de conductividad, oxígeno disuelto, entre otros.

La velocidad de agitación es una variable de operación importante en este tipo de procesos bioquímicos. Sin embargo, con la investigación realizada previamente, se determinó que en general las empresas que producen cerveza artesanal no utilizan agitadores mecánicos en sus biorreactores ya que la agitación debería ser muy baja y, por lo tanto, son equipos en los que prefieren no invertir. En otras palabras, la homogenización del mosto de con los microorganismos se da únicamente por diferencia de densidades a lo largo de la reacción. Sin embargo, la agitación es un factor que puede contribuir al rendimiento de la reacción y, por consiguiente, disminuir el tiempo de fermentación. Esto podría representar una disminución de costos de producción de la cerveza. Por lo anterior, se realizó una propuesta de agitador para el reactor disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Este fue diseñado a partir de semejanzas geométricas establecidas para el diseño estándar de un agitador. Las dimensiones principales del agitador y especificaciones finales se encuentran en la Figura 77, Cuadro 200, página 436.

La viscosidad del mosto de cerveza no difiere significativamente de la viscosidad del agua que es aproximadamente 1 cP (centipoise) a 25°C. Con este dato, es conveniente utilizar dos tipos de impulsores: el de hélice y el de turbina. Se escogió un impulsor de turbina de 6 palas ya que, se determinó que es el más recomendable por su funcionalidad a diferentes viscosidades de un líquido. Además, este podría ser utilizado posteriormente para acelerar el proceso de enfriamiento del mosto para dar lugar a la carbonatación de la cerveza. El cálculo de la potencia del motor tiene como factor determinando el número de potencia, que depende del número de Reynolds a las condiciones de agitación del mosto en el interior del reactor. El número de Reynolds depende de la viscosidad y densidad del líquido, el diámetro de agitación calculado previamente y la velocidad de agitación.

Debido a que los microorganismos son sensibles a una alta velocidad de agitación, se fijó una velocidad de 80rpm. El número de Reynolds obtenido fue de 3,559.82, lo cual indica que el régimen de flujo es de transición. Con este valor, se obtuvo el número de potencia para 6 palas de 5.9 y, por consiguiente, la potencia del motor. En la literatura, se recomienda asumir una eficiencia de 80% del motor y al menos 35% de pérdidas por fricción. Se obtuvo un valor de potencia final del motor de 0.005 W (6×10^{-6} hp) y se seleccionó un motor con potencia nominal de 186.5 W (0.25 hp) para el agitador. Por las medidas requeridas, se recomienda ordenar la fabricación del agitador mecánico con el proveedor especificado para asegurar el buen funcionamiento en el fermentador disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Para reducir la velocidad de agitación de modo que se pueda utilizar el agitador mecánico para el sistema de fermentación, se propuso un reductor de frecuencia genérico modelo 040-63B5. Este es necesario ya que el motor seleccionado para el agitador tiene una potencia de 186.5W (0.25 hp), el cual es un valor muy alto con la potencia calculada necesaria que es de 0.005W (6×10^{-6} hp), mencionado anteriormente. La relación del reductor es de 150:1 por lo que se considera adecuado para la velocidad de agitación de 1500 rpm correspondiente a la potencia del motor.

En un reactor, es indispensable contar con una válvula de alivio de presión o también conocida como válvula de seguridad. Esta válvula se abre automáticamente en el momento en el que la presión de un fluido supera un límite preestablecido. La principal función de esta válvula es evitar una explosión por generación de exceso de presión en el sistema. Por eso se seleccionó una válvula de seguridad de acero inoxidable con una presión máxima de trabajo de 2×10^5 Pa (2 bar) de 1'' soldable, que se pueda adaptar al fermentador. Las especificaciones de la válvula seleccionada se encuentran en la Figura 120, página 470. En el caso de este proceso, su funcionalidad radica en el proceso de esterilización del medio de cultivo ya que se realiza a una temperatura de 85°C en un sistema cerrado y en que no se pueden tener altas presiones en el interior del reactor durante la fermentación porque se podría ver afectada la reacción. Se seleccionó esta válvula con esa presión máxima ya que en el sistema fermentativo no se manejarán altas presiones además de que ya se contempló una trampa de dióxido de carbono.

En la reacción de fermentación de cerveza además de etanol, se produce dióxido de carbono y este debe ser expulsado del reactor ya que es posible que se forme ácido carbónico al entrar en contacto con el agua del mosto. Esto podría disminuir el pH del medio y afectar el rendimiento de la reacción; así como aumentar la presión dentro del reactor. Para esto, se armó un sistema de salida

de gas con tubería y una manguera que conduce a una cubeta con agua que funciona como trampa del gas. Se propuso una válvula de retención soldable TAINOX de 1'' de acero inoxidable, ya que este tipo de válvula solo permite que el gas fluya en una sola dirección. Esta válvula de salida de gases se deberá conectar a una manguera que conducirá al desagüe con el fin de conducir el líquido en caso de ser necesario, es decir, por la naturaleza de la reacción.

En el fermentador, es necesario instalar una válvula de descarga para extraer el mosto fermentado una vez finalizado el proceso. Se seleccionó una válvula de compuerta de acero inoxidable de 0.031m (1.5'') cuyo material tiene como función asegurar la inocuidad del proceso realizado. Además, se seleccionó este tipo de válvula ya que se pretende remover por completo el fluido, por lo que no será necesario regular el flujo en este punto.

Dado que la temperatura del reactor debe regularse para asegurar un alto rendimiento de la reacción, se necesita un sistema de enfriamiento para nivelar la temperatura en cuanto esta suba ya sea por el calor que libera la reacción por ser exotérmica o por la transferencia de calor del ambiente; principalmente cuando la temperatura en el Laboratorio de Operaciones Unitarias más alta registrada es de 39°C. Se calculó el requerimiento de agua fría proveniente del sistema de enfriamiento disponible para mantener la temperatura regulada dentro del tanque; obteniendo un flujo másico de 0.0033 ± 0.0001 kg/s en el caso de que la temperatura del ambiente se encuentre a 39°C, el cual sería el peor de los casos. La transferencia de calor del ambiente se calculó en función de la temperatura más alta registrada en el laboratorio, dado que la evaluación de las condiciones de fermentación debía hacerse con las condiciones de esta área de trabajo. Por otro lado, la transferencia de calor de reacción se obtuvo a partir del volumen del sustrato en mayor proporción en el mosto obtenido, en el punto en el que la velocidad de reacción es máxima al igual que la temperatura. El sistema de enfriamiento es capaz de cumplir con este requerimiento dado que, según sus especificaciones enlistadas en las Figuras 118 y 120 páginas 468 y 470 tiene una capacidad de 5,216.67W (17,800 Btu/h) y el calor que debe ser removido es de 27.99W (95.51 Btu/h), correspondientes al calor generado por la reacción y a la transferencia de calor del ambiente al sistema.

Para madurar la cerveza, se necesitan temperaturas aún menores: entre -1°C y 3°C para que se desarrollen sabores y aromas en el producto final que son determinantes para la calidad del producto final. Se calculó el requerimiento de agua fría desde el sistema de enfriamiento para llevar el sistema a 2°C con el fin de dar lugar al proceso de maduración, que dura una semana

aproximadamente. El flujo másico requerido es de $6.168 \times 10^{-4} \pm 7.520 \times 10^{-5}$ kg/s teniendo una temperatura inicial del mosto de aproximadamente 25°C. Este resultado se muestra en el Cuadro 50, página 197.

El reactor tiene instalada una línea de vapor conectada a la chaqueta cuya función es calentar el sistema para la esterilización. Para llegar a una temperatura de 85°C, se necesita un flujo de vapor de 0.003 ± 0.008 kg/s. La capacidad de la caldera es de 0.084 ± 0.008 kg/s; este dato fue determinado experimentalmente realizando mediciones de condensados en las principales secciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias que utilizan vapor: la planta de biodiesel, el evaporador, el tanque de ahogamiento de la caldera y el manifold.

En la tapadera del tanque, es necesario colocar empaques para evitar fugas del líquido en el interior o, por el contrario, la entrada de contaminantes. Dado que esta reacción es anaeróbica, el oxígeno se toma como un posible contaminante que podría entrar al sistema. Se observó que más adelante será necesario sustituir el empaque disponible por uno nuevo. Para esto se propuso un empaque de neopreno que resiste condiciones de temperatura entre -20°C y 105°C, además, se le considera un buen aislante térmico y es resistente al efecto de componentes químicos que pudiesen vulnerar su estructura.

La implementación del proceso implicó la realización de pruebas de funcionamiento del fermentador modificado cuyos resultados se encuentran tabulados en los Cuadros 52, 53 y 54, páginas 197 y 198. En el Cuadro 53, página 198 se observan las condiciones de fermentación: temperatura y pH. La temperatura promedio fue de 23.2 ± 1.2 °C para la prueba con la solución de sacarosa y 23.3 ± 1.6 °C para la prueba con mosto de cerveza. Esto indica que la temperatura se mantuvo dentro del rango establecido para la levadura utilizada en el proceso. Utilizando agua para enfriar y mantener el mosto a la temperatura adecuada, se determinó que el sistema de enfriamiento podría utilizarse en días con altas temperaturas. Por otro lado, para la maduración este sistema sí sería indispensable. El pH se mantuvo igualmente dentro del rango, obteniendo los siguientes valores: 5.090 ± 0.246 y 4.876 ± 0.398 . Estos datos demuestran que el fermentador permite que el medio de cultivo se encuentre en las condiciones adecuadas para asegurar el rendimiento de la levadura.

En el Cuadro 54, página 198, se observan los resultados obtenidos de concentración de sólidos disueltos (°Brix) con las mediciones realizadas de las muestras que se tomaron durante la

fermentación de una solución de sacarosa y mosto de cerveza. En los resultados de la solución de sacarosa, se puede observar que la disminución de la concentración es más lenta comparada con el comportamiento de la concentración en el mosto de cerveza. Esto se debe principalmente a que la levadura es selectiva para maltosa, como se había mencionado con anterioridad. Seguidamente, en el Cuadro 53, página 198, se encuentran los resultados de etanol obtenido con un densímetro. De igual forma, se observa que la formación de producto es más lenta con la solución de sacarosa que con el mosto de cerveza. El contenido alcohólico final para la solución de sacarosa y el mosto fue de 8.95 ± 0.04 % v/v y 5.08 ± 0.01 % v/v, respectivamente. En las gráficas 21 y 22, página 308 se observa el comportamiento de concentración de sólidos disueltos (°Brix) y el contenido alcohólico en función del tiempo, observándose la disminución de la concentración en °Brix como representación del consumo de sustrato y el aumento de la concentración de etanol como representación de la formación del producto.

Una de las principales fuentes de error tiene relación con las características iniciales del mosto antes de fermentar ya que se determinó que los azúcares iniciales no están en las proporciones que se deberían encontrar para iniciar el proceso de fermentación como resultado de la baja conversión de almidón en azúcares fermentables. Dado que la temperatura es un factor determinante en el rendimiento de los microorganismos para producir etanol, se identificó otra posible fuente de error que pudo haber afectado el proceso en las corridas realizadas. La temperatura no pudo controlarse el 100% del tiempo por no contar con un sistema de regulación de temperatura constante por lo que pudo haber afectado el resultado final de contenido alcohólico obtenido. Otra fuente que pudo haber afectado los resultados del presente trabajo, es el sistema de fermentación ya que es posible que no haya quedado completamente sellado y se haya visto afectado el medio de cultivo con agentes bacterianos que pueda interferir al contacto con la levadura y por ende, en la producción de etanol en la cerveza.

Para el análisis de resultados del módulo 4, la serie de pruebas realizadas para la disminución de la turbidez final de la cerveza fueron: un tamizaje de la malta molida previo a su cocción para la generación del mosto, porque las primeras pruebas realizadas posterior a la cocción tenían niveles de turbidez muy altos, mayores a los 1000 NTU. También se realizó una sedimentación de la cerveza ya fermentada durante la etapa de maduración, principalmente para conocer la velocidad a la que se sedimentaban los sólidos suspendidos y por aprovechar el tiempo en que el proceso de la cerveza se encontraba detenido. Se realizó una centrifugación de la cerveza ya madurada debido a que los antecedentes describían a este proceso como uno de los más eficientes

para la remoción de sólidos suspendidos. Finalmente se realizó una filtración con un elemento de cartucho de cinco micras ya que se determinó de la literatura que sería de las mejores formas de reducir la turbidez de la cerveza final.

El primer paso para la implementación de un sistema adecuado de filtración para la cerveza producida consistía en seleccionar un equipo de filtración que se pudiera instalar junto a los equipos con los que se cuenta en la planta. Se realizó diferentes pruebas a escala laboratorio para determinar el tamaño de filtro adecuado para tratar el líquido obtenido del proceso de fermentación. Estas pruebas consistieron en la evaluación del desempeño de papel filtro actuando como el medio filtrante y el uso de vacío en un embudo Buchner que actuaría como la fuerza que obligaría a la suspensión a ser filtrada. Estas pruebas, como se puede ver en el Cuadro 113 de anexos, página 314, presentaron retención de masa correspondientes a 0.0414 g, 0.0398 g, 0.0278 g y 0.0215g para los filtros de 20, 10, 5 y 1 micra, respectivamente. Estos datos másicos son pequeños ya que la cantidad de suspensión utilizada fue solo de 20 mL al ser pruebas a escala laboratorio. Sin embargo, se determinó, como se esperaba, que el filtro con porosidad de 1 micra era el que más sólidos retenía, seguido por el de 5, 10 y 20 micras respectivamente. Los filtros de 10 y 20 micras, al compararse con la masa retenida por el filtro de 5 micras, fueron descartados ya que solo retuvieron un 69.85 % m/m y 54.02 % m/m respectivamente. De igual manera un análisis cualitativo de la suspensión filtrada demostraba que la turbidez de esta aún era muy elevada para los resultados deseados. A simple vista se observó que estas no tenían una turbidez adecuada. Al descartar estas opciones, las opciones para la remoción de sólidos suspendidos con papel filtro de 1 y 5 micras fueron las seleccionadas. A pesar de que la masa retenida por el filtro de 5 micras era ligeramente menor a la del filtro de 1 micra, 0.0016 g menos, se optó por utilizar el filtro de 5 micras. El valor de 0.0016 g de diferencia solo representa un porcentaje de 4.02 % m/m de mayor retención. La razón de esta decisión recae en que, al filtrar la muestra de la suspensión fermentada con el papel de 1 micra, no toda la suspensión pudo moverse a través del medio filtrante. Este fenómeno se puede explicar analizando que las partículas sólidas en la suspensión taparon una alta cantidad de los poros presentes en el filtro o que la fuerza que el vacío estaba ejerciendo al papel filtro no era lo suficientemente elevada para lograr que toda la fase líquida lograra a travesar el medio filtrante sin tener problemas por obstrucción.

Ya con el tamaño de poro determinado, se determinó que el medio filtrante debía tener esta porosidad. Se seleccionó un filtro de elemento con medio filtrante de 5 micras ya que este era el tipo de filtro que más se asemejaba a las pruebas de laboratorio seleccionadas y que el departamento

tenía la capacidad de comprar. Con el sistema de filtración seleccionado, se analizó de qué manera se podría conducir el flujo de cerveza al sistema de filtración. Este sistema debía permitir que la cerveza llegara al sistema de filtración, venciera la caída de presión de 15 psi y pasara a través de los medios filtrantes. Debido a que no se podía utilizar un sistema de vacío, como se hizo para las pruebas a escala laboratorio, se optó por utilizar un sistema de bombeo, que se calculó según el cálculo 1 en el anexo C. Se analizó el uso de dos tipos de bombas, una Aurora y una centrífuga, por disponibilidad dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias. La bomba Aurora se descartó rápidamente por ser un tipo de bomba útil para trabajos de altas presiones y cómo se conoce que la presión requerida era de 0.0231 kW, no era necesaria. De igual manera la bomba que se encontraba disponible estaba oxidada y muy deteriorada por lo que su uso, especialmente tratándose de producto alimenticio, no era recomendado, si no se hacía un tratamiento previo de la misma. Se seleccionó la bomba centrífuga debido a que esta era de 0.45 kW y con los cálculos realizados, se determinó que la misma llenaba los requisitos establecidos.

Finalmente se seleccionó la forma en que los dos equipos anteriores, el filtro de cartuchos de 5 micras y la bomba centrífuga de 0.45 kW, debían ser conectados. Para esto se analizó el posible uso de mangueras, tubería de hierro galvanizado (HG) y tubería de acero inoxidable. El uso de manguera fue el primero en descartarse ya que estas experimentan una caída de presión mayor al de tuberías rígidas. De igual manera, por el diseño general de la planta, parte de las conexiones que se realizarían para el sistema de filtración, también se utilizarían para el bombeo del mosto al fermentador. Un mosto que se encuentra a temperaturas elevadas, algo que no sería aconsejable transportar con mangueras de plástico. Aunque se conoce que existen mangueras sanitarias que resisten temperaturas y presiones elevadas, no se contaba con estas dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias y no se contaba con el capital para adquirirlas. Descartando esta opción, se procedió a analizar los dos tipos de tubería con los que se contaba en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Se seleccionó la tubería de acero inoxidable ya que, al trabajar con producto alimenticio, era imperativo que la tubería no fuera a corroerse u oxidarse con el paso del tiempo y/o contaminara el producto, algo que sería posible al utilizar tubería de hierro galvanizado (HG). La caída de presión también es menor en las tuberías de acero inoxidable que en las tuberías de hierro galvanizado (HG).

Una vez se determinó que el equipo de filtración a utilizar sería un filtro de elementos, se debía realizar las instalaciones necesarias para llevar la cerveza fermentada al filtro. De igual manera, se debía construir una estructura que sostuviera el filtro para poder conectar la tubería a la

entrada y salida de este. Los planos de la estructura seleccionada se encuentran en las Figuras 46, 47 y 48 en las páginas 202, 203 y 204 de la sección de Resultados y la estructura ya construida se puede ver en la Figura 269 en Anexos, página 559.

Las medidas de la estructura construida fueron: 2.00 m de altura, 1.85 m de largo y 0.90 m de ancho. Estas medidas fueron calculadas con el propósito de alojar dentro de la estructura la bomba, el filtro con su carcasa y un tanque para la carbonatación de la cerveza. Aunque la cerveza ya no fue carbonatada en dicho tanque, el espacio sigue disponible para acoplar otro proceso a dicho tanque. La estructura también cuenta con bases cuadradas de soporte en cada paral, para dar estabilidad a las patas y tensores para dar estabilidad a la estructura. Es importante resaltar que el filtro no está centrado, si se observa en la vista de elevación (Figura 48, página 204). Esto se debe a que, por una parte, ya existía una base donde se colocaría la bomba, ver Figura 267, página 558, y por motivos de prácticos, la tubería iría en un sentido totalmente vertical por lo que el filtro debía ir alineado a la posición de la bomba. Aparte de esto, la estructura tuvo que desplazarse debido a que, si el centro de la estructura se alineaba con la salida de la bomba, la estructura no permitía que sistema de agitación del tanque adyacente pudiera moverse acorde al uso necesario. Por estos motivos la estructura se desplazó alejándola del tanque mencionado y el filtro se colocó alineado verticalmente con la bomba.

Ya con la estructura posicionada en el lugar definido, se procedió a la instalación de la bomba y la tubería necesaria para trasladar el líquido hasta el filtro. Como se mencionó, se utilizó una bomba centrífuga y tubería de acero inoxidable de 0.0254 m para la succión y de 0.01905 m para el tramo de tubería posterior a la descarga. La bomba se fijó a la base previamente mencionada con el uso de tornillos de 10 cm. Posteriormente, se hizo la instalación eléctrica incluyendo un interruptor de encendido y apagado, a una toma de corriente monofásica cercana con un cableado paralelo. Con tal de proteger la integridad de la bomba, los cables fueron recubiertos con manguera flexible para cableado eléctrico.

La descarga de la bomba usada tiene un diámetro de 0.0254 m (1 in). Se instaló un tramo de tubería de 38 cm de largo de 0.0254 m (1 in) de diámetro, seguido por un reductor de diámetro de 0.0254 m a 0.01905 m (1 a $\frac{3}{4}$ in). El motivo de esta reducción era asegurar que la presión de la bomba fuera la suficiente para filtrar la cerveza, además de la disponibilidad de tubería presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Continuando con la instalación se utilizaron diferentes acoples a lo largo del tramo, incluyendo: niples, acoples universales, accesorios en T, válvulas de

globo, codos de 90°, manómetros de 0 a 100 psi y reductores de 0.0381 m a 0.01905 m (1 ½ a ¾ in). A 85 cm desde la descarga de la bomba, la tubería se divide usando uno de los accesorios en T mencionados. Esto se debe a que la tubería es utilizada por el sistema de filtración y para transportar el mosto al fermentador. Es en este punto, a 85 cm de la descarga de la bomba, que el flujo puede moverse verticalmente en caso sea para filtrado, u horizontalmente en caso sea para el fermentador.

En caso el sistema de filtrado se quisiera expandir, las dimensiones de la estructura instalada lo permitirían. En lugar de cambiar el filtro de 5 micras por uno de 1 micra, se podría colocar un sistema de filtrado en serie sobre la misma estructura, solamente modificando los largos de tubería. Esto se haría con el propósito de reducir la turbidez final de la cerveza colocando un filtro con porosidad menor. El motivo de colocar el sistema de filtrado en línea y no de cambiar el filtro es para no saturar los filtros y tener que cambiarlos más seguido que cada 6 meses como especifica el fabricante.

Durante las primeras pruebas de cocción de la malta, se determinó que la cantidad de finos producidos durante la molienda de esta estaba produciendo un líquido, a simple vista, demasiado turbio y viscoso, por lo que se optó por realizar un tamizaje de la malta molida para disminuir este efecto. Todas las pruebas de tamizaje realizadas con cebada, malta base y malta caramel fueron hechas después de que el grano fuera molido por un molino de rodillos con separación de dos milímetros entre cada rodillo. Únicamente se optó por remover los finos que llegaban al plato final del tamiz con una granulometría menor a la del tamiz No. 100 con el propósito de no generar tantas pérdidas de materia prima en esta etapa del proceso.

Como se puede ver en el Cuadro 57, página 205, la cebada molida sin maltear generó, en promedio, un 1.69 % m/m de polvos finos que llegaron al plato final. Este porcentaje de polvos finos en el plato corresponde al menor porcentaje obtenido, de los análisis de cebada, malta base y malta caramel. Esto se debe a que la cebada, a diferencia de la malta, aún no ha pasado por un proceso de secado y tostado, y presenta un porcentaje de humedad cercano al 15 % m/m. La malta base, que representa 85 % m/m de la malta usada en la receta de la cerveza IPA producida, generó, en promedio, 1.96 % m/m de polvos finos que llegaron al plato final del banco de tamices. Este incremento en la generación de polvos finos puede deberse a la reducción en humedad de la malta, que para una malta base llega a ser de 4.78 % m/m. Dentro de la receta, el restante 15 % m/m de malta utilizada es malta caramel. Este tipo de malta tiene un color más oscuro debido a la mayor temperatura a la que es sometida durante el proceso de secado y tostado, llegando a un porcentaje

de humedad del 1.39 % m/m. Acorde a la tendencia que se había observado previamente, esta malta más tostada presentó una generación de finos mayor a la obtenida con la malta base. Como se puede observar en la tabla No. 5 el porcentaje de finos fue, en promedio, 2.41 % m/m.

La separación de los polvos finos, tomando en cuenta la proporción de malta base y malta caramel utilizada en la receta de la cerveza IPA producida, representa un 2.03 % m/m de toda la malta molida. Ya que estos finos todavía tienen azúcares fermentables y no fermentables que, en caso de no ser retirados, aportarían al contenido alcohólico de la cerveza, remover 2.03 % m/m de la masa total de la malta representa un desperdicio de materia. Según el análisis de prorratio realizado, disponible en el Cuadro 58, página 207 en la sección de resultados, por la malta retirada se perdió, en promedio, 1.0761 g/mL de etanol en la cerveza. Esto representa pérdidas de etanol del 2.27%, en promedio. Establecer un proceso de molienda adecuado sería la manera correcta para aprovechar todas las azúcares presentes en la malta. Este proceso adecuado se basaría en que la malta se volviese una hojuela al momento de ser molida y no que fuera quebrada liberando polvos finos. Establecer un proceso de sedimentación o de filtración posterior a la cocción podría ser otra solución al problema de la presencia de sólidos en el mosto.

Las primeras pruebas de remoción de sólidos suspendidos de la cerveza ya fermentada consistieron en la sedimentación de esta. Se realizaron dos tipos de pruebas de sedimentación con el análisis respectivo de cada una. La diferencia consistió en el tiempo en que las muestras reposaron, variando la cantidad de sólidos que se llegaban a sedimentar. Para las primeras pruebas la cantidad de tiempo fue de 7 días, mientras que se dejó reposar por 14 días el resto de la cerveza. Para las pruebas de sedimentación de 7 días solo se extrajo cuatro muestras de, aproximadamente 8 g de cerveza, dejando el resto del lote de producción sedimentar 14 días. Esta diferencia en la cantidad de masa utilizada para las pruebas, especialmente para los porcentajes de sedimentado y sobrenadante, pudo afectar la precisión de los valores obtenidos, de una manera en que los valores de 7 días de sedimentado no sean totalmente representativos del lote.

En general, los resultados a siete días de sedimentación presentaron mejoras en todos los análisis realizados: turbidez, densidad y cantidad de sedimentado y sobrenadante. Por supuesto, a los catorce días de sedimentación los resultados fueron mejores ya que el porcentaje de reducción de turbidez a 7 días fue de 45.5 % m/m mientras que a 14 días fue de 59.1 % m/m. En términos de la turbidez de la cerveza, al momento de terminar la fermentación esta contaba con 930.50 ± 18.63 NTU, en promedio. A siete días de sedimentación esta turbidez se redujo en 423.00 NTU mientras

que, con un periodo de sedimentación de 14 días, la turbidez se redujo en 549.50 NTU, en promedio. La densidad también fue reducida una vez transcurrieron los tiempos de sedimentación respectivos a siete y catorce días, llegando a 0.989 ± 0.016 g/mL y 0.986 ± 0.016 g/mL de una densidad original promedio de 0.997 ± 0.016 g/mL. La viscosidad presentó el mismo tipo de tendencia que la turbidez y la densidad, reduciendo con el paso del tiempo. Los resultados se encuentran expresados en viscosidades cinemáticas de m^2/s , por lo que el valor obtenido una vez finalizada la fermentación fue, en promedio, 774.31 ± 7.13 , siendo este valor la desviación estándar de las muestras ya que era mayor a su incertidumbre. Al cabo de siete días de sedimentación, como resultado de la disminución de sólidos presentes en el líquido, la viscosidad se redujo en $94.75 \text{ m}^2/\text{s}$ llegando a un valor promedio de 679.56 ± 3.45 , manteniendo el uso de desviación estándar. Al cabo de catorce días la diferencia de viscosidad respecto al valor inicial fue de $119.18 \text{ m}^2/\text{s}$, presentando un valor promedio de 655.14 ± 4.46 , continuando con el uso de desviación estándar. Es importante la reducción de la viscosidad de la cerveza ya que una vez entre al proceso de filtrado, esta afectará la eficiencia con la que el medio filtrante logre trabajar.

Se determinó la velocidad de sedimentación, acorde a la ecuación 2, en los tres tiempos analizados, finalizando la fermentación, a 7 y a 14 días de fermentado. Las velocidades fueron de $1.760 \times 10^{-12} \pm 0.030 \times 10^{-12} \text{ m/s}$, $2.005 \times 10^{-12} \pm 0.034 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ y $2.080 \times 10^{-12} \text{ m/s} \pm 0.035 \times 10^{-12}$, respectivamente. El hecho que las velocidades de sedimentación de la levadura sean de un orden de 10^{-12} m/s , está relacionado directamente con su naturaleza pequeña, es debido a esto que es imperativo dejarlas reposar por un periodo largo de tiempo. Analizando gráficamente, Gráfica 15, en Resultados página 211, los resultados de la turbidez inicial, a 7 días de sedimentado y a 14 días de sedimentado, se observa una tendencia ligeramente lineal a la que se le hizo regresión. La linealidad de estos datos presentó un R^2 de 0.9115 siguiendo la ecuación $y = -39.25x + 881.08$. Interpretando los resultados de los análisis de sedimentación se demuestra que esta operación ayuda a la reducción de turbidez en la cerveza por la disminución en la concentración de sólidos suspendidos y densidad. Hay que hacer notar que es muy importante determinar el tiempo adecuado para sedimentar la cerveza tomando en cuenta factores microbiológicos y organolépticos, ya que esta puede deteriorarse si el tiempo es muy prolongado, aunque se mantenga guardada en frío. Se conoce que un periodo de siete días no afecta las características de la cerveza ya que este es el tiempo en que la mayoría de cervecerías artesanales maduran la cerveza. Sin embargo, la adición de otra semana a este tiempo de madurado sí puede llegar a repercutir negativamente en los estándares de la cerveza, sin mencionar que es incrementar el tiempo total de la producción de cerveza, algo que puede llegar a repercutir en la parte económica. Para acortar el tiempo de espera

e incrementar la velocidad de sedimentación, la adición de un floculante al proceso sería recomendado. El floculante comúnmente utilizado en la industria cervecera son las pastillas de “PROTOFLOC” que también funciona como clarificante y ayuda a incrementar la velocidad de sedimentación que tiene la suspensión de cerveza y levaduras, acortando el tiempo de espera.

Ya que la operación de sedimentación genera resultados positivos en cuanto a la reducción de sólidos suspendidos, su implementación permanente dentro de la línea de producción de cerveza es aconsejable. Sin embargo, esta operación genera una cantidad considerable de material orgánico residual. Estos sólidos, que son el material suspendido que se sedimenta de la suspensión formada al terminar la fermentación, deben ser descartados de manera adecuada. Al ser material orgánico, estos residuos todavía poseen gran cantidad de proteínas que podrían ser utilizadas en otros procesos. Las opciones principales para su uso se encuentran en la producción de composta o en usar estos residuos como concentrado animal.

Continuando con la serie de análisis, el tercer método de remoción de sólidos suspendidos consistía en acoplar una centrífuga continua a la planta de producción de cerveza posterior al madurado y previo al filtrado. Se realizó pruebas de centrifugación de cerveza a escala laboratorio, en una centrífuga por lotes, en corridas con duración de 10 minutos a 1277 revoluciones/min, dato obtenido usando el tacómetro disponible. Las pruebas, como se puede observar en el Cuadro 63, página 219, consistieron en las mediciones de la turbidez de la solución en NTU y la densidad. La turbidez promedio posterior al centrifugado fue de 416.2 ± 8.34 NTU y una densidad promedio de 0.895 ± 0.020 g/mL. Una vez las pruebas a escala laboratorio fueron finalizadas, se trabajó con una centrífuga continua, que presentó una turbidez promedio de 874.3 ± 17.51 NTU, más del doble de turbidez que la centrífuga por lotes produjo. En cuanto a la densidad promedio de las pruebas realizadas en la centrífuga continua, esta fue de 0.992 ± 0.020 g/mL. La diferencia entre la densidad de la centrífuga por lotes y la centrífuga continua no fue tan grande como en el caso de la turbidez, pero igual tenía una densidad de 0.097 g/mL mayor.

Analizando los resultados obtenidos en función de la turbidez y densidad de la cerveza centrifugada, se puede observar que el proceso de centrifugado sí es útil para la remoción de sólidos suspendidos como se puede observar en los bajos niveles de turbidez y en la ligera disminución en la densidad de la cerveza. Sin embargo, este análisis es acorde a los resultados obtenidos por la centrifugación en lotes. La centrifugación continua no presentó los resultados esperados que las pruebas de laboratorio habían producido. Por una parte, la centrífuga continua no tenía un regulador

de velocidad para determinar y ajustar la velocidad que era más conveniente, solo se podía trabajar a 3000 revoluciones/minuto. Por su diseño, la limpieza interna del equipo era muy complicado ya que el tambor de centrifugación era cerrado y tendía a retener sólidos, visible por los restos de cal que salían de la centrifuga mientras se trataba de lavar la parte interna del equipo. Por último, el equipo tenía diversas fugas en la parte inicial y final del tambor giratorio por lo que se perdería producto en caso se hubiera acoplado. Esto, junto a que la centrifuga por lotes no tenía ni la capacidad ni la habilidad de conectarse directamente al resto de la planta son los motivos por los que no se optó por centrifugar. Los resultados obtenidos, sin embargo, sí demuestran que una centrifuga adecuada para el tipo de proceso que se tiene ayudaría a reducir la turbidez de la cerveza y removería una gran cantidad de sólidos suspendidos.

Los análisis de remoción de sólidos suspendidos finales realizados a la cerveza fueron las pruebas corridas usando el equipo de filtración instalado, realizados al último lote de cerveza producida. Las pruebas consistieron en la cantidad de turbidez removida por el filtro de cartuchos, así como el diferencial de viscosidad y densidad generado al pasar el producto por el filtro. Mientras que la turbidez se redujo, en promedio, 593.00 ± 11.86 NTU pasando de un valor de 926.25 ± 18.55 a 333.25 ± 6.69 NTU, la densidad disminuyó de igual manera llegando, en promedio, a 0.993 ± 0.018 g/mL de la original de 0.998 ± 0.018 g/mL. Finalmente, la viscosidad presentó el mismo comportamiento de reducción que experimentó en los procesos de sedimentación al reducirse en $133.88 \pm m^2/s$, de un valor inicial de 772.50 ± 5.37 y una posterior al filtrado de 638.62 ± 6.75 m^2/s , es importante mencionar que los valores de viscosidad presentaron valores de desviación estándar más elevados que los de incertidumbre por lo que estos son los comentados previamente.

Se debe hacer la mención que la velocidad de la filtración no se pudo calcular debido a que los manómetros acoplados, previo y posterior al filtro, no generaron lecturas al momento en que la cerveza fue desplazada por la tubería. Se trató de arreglar la conexión que los manómetros tenían con la tubería removiéndolos y conectándolos de nuevo, pero esto no hizo que generaran lecturas al momento de pasar agua, solo con el propósito de verificar si funcionaban o no. Los otros valores necesarios, viscosidad de la suspensión y la capa de sólido generado en la superficie del filtro, para el uso de la ecuación 1 sí eran valores conocidos, por lo que al arreglar este inconveniente se podría calcular la velocidad de filtración.

Durante las pruebas de filtración con cerveza se notó que al momento de ser filtrada esta salía de la tubería con una gran cantidad de espuma. Debido a que la espuma generaba interferencia

con el turbidímetro se debió esperar a que se asentara la cerveza para realizarle las pruebas correspondientes. No obstante, no se conoce si la creación de espuma en la cerveza afecta la turbidez de la final de esta. Un estudio para el análisis de los efectos de creación de espuma en la turbidez y calidad de la cerveza sería adecuado para entender si es necesario modificar el sistema de filtración actual a uno que no genere esos niveles de espuma tan elevados.

Después de todos los análisis realizados, las reducciones de turbidez junto a otros factores como la capacidad del equipo, determinaron que el proceso de sedimentación y el equipo de filtrado se iban a implementar mientras las dos centrífugas no lo serían, cómo se puede ver en el Cuadro 63, página 214. Con estos dos equipos la reducción total de turbidez en la cerveza fue de 64.02%, llegando la turbidez a 333.25 NTU, como se puede ver el Cuadro 64, página 215. Este valor se encuentra dentro de los rangos de turbidez de cervezas estilo IPA que ya se encuentran dentro del mercado guatemalteco. Según las cervezas comerciales analizadas este rango se encuentra entre 401 y 220 NTU por lo que la cerveza producida se encuentra dentro de este rango comercial.

Para el análisis de resultados del módulo 5, que consistió en determinar el control de calidad de la cerveza final producida, se realizó una comparación de los resultados obtenidos según los parámetros de la norma COGUANOR NGO 33 006 para cerveza, se observa que los resultados se encuentran dentro de los valores esperados por dicha norma. Dentro de los parámetros fisicoquímicos (Cuadro 65, página 215) se observa que el pH se encuentra ligeramente por encima del valor deseado por un valor de 0.49. Se mide el pH de la cerveza, debido a que éste es un factor que afecta durante la fermentación para permitir el óptimo crecimiento y trabajo de la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) y porque permite controlar otros factores como la contaminación bacteriana y el porcentaje de alcohol que se producirá. Según estudios presentados por García-Bazante, 2015, se obtuvo un pH para cerveza artesanal en un rango de 3.89 – 4.48 que según las normativas del país de procedencia cumple con los requisitos. Si se realiza un promedio de los datos obtenidos, se obtiene un valor de 4.46 por lo que, se puede determinar que el valor de pH cumple con el requisito presentado por la norma COGUANOR NGO 33 006. A pesar de ello, los valores del primer lote son mayores al parámetro establecido; por lo que se debería realizar un análisis a dicho lote y determinar la razón por la que éste valor salió más alto de lo esperado. Según Freccia, 2014, la cerveza puede obtener pH más altos cuando la levadura está agotada, esto quiere decir que hay una posibilidad de que el citoplasma se libere de la levadura provocando el aumento en el pH. Es importante recalcar que algunas características del producto final cambian según el tipo de cerveza que se produce, en este caso, el pH no es un factor que cambie por lo que se deben

tomar en consideración los parámetros establecidos por las leyes locales, en este caso, la norma COGUANOR NGO 33 006.

Otros parámetros que se deben tener en consideración son la conductividad y el oxígeno disuelto, que según los resultados obtenidos (Cuadro 65, página 215) no presentan valores que salgan del rango esperado y por lo mismo, cumplen con la norma anteriormente mencionada. El oxígeno disuelto, es una medida que se realiza para determinar si existe posibilidad de que crezcan microorganismos no deseados dentro de la cerveza. También es importante la medida de oxígeno disuelto en la cerveza ya que según menciona Lovisoa y Libkind, 2018 se ha determinado que los ésteres son la principal causa para producir perfiles aromáticos en la cerveza, estos son formados por una reacción entre Acetil-CoA y un alcohol que se propicia en ausencia de oxígeno. En presencia de oxígeno y de ácidos grasos, el Acetil-CoA se utiliza para la formación de triglicéridos que son necesarios para el desarrollo de las levaduras y por lo mismo, se inhibe la reacción de formación de ésteres. Además de inhibir la formación de ésteres, Depraetere *et al* 2008 menciona que la presencia de oxígeno propicia la oxidación de diversos compuestos presentes en la cerveza, como lo podrían ser los polifenoles provocando a su vez, un deterioro en las características organolépticas, es decir, el sabor de las cervezas producidas incluyendo también que un alto contenido de oxígeno en el mosto afecta su calidad y provoca el envejecimiento más rápido de la cerveza.

En la cerveza artesanal, es común que se deje un poco de levadura en la botella final para que siga fermentando posteriormente. El oxígeno disuelto, en este proceso juega un papel importante debido a que permitirá que los azúcares restantes se oxiden y se produzca dióxido de carbono lo que da lugar a la carbonatación de la cerveza hasta por 1 mes más (Freixes y Punsola, 2018).

Por último, se toma en cuenta también la turbidez en la cerveza, según comenta Bamforth, 2009, debido a los procesos que se realizan normalmente en la elaboración de cerveza artesanal, es muy común que ésta tenga un aspecto turbio. Según Cortés-Montaña, 2017 los valores obtenidos de turbidez superan por mucho el valor esperado esto debido a que las cervezas artesanales no son pasteurizadas provocando que no exista un valor teórico o esperado para la cerveza a evaluar, esperándose resultados elevados como lo fue en este caso.

Por otro lado, se deben tomar en consideración los parámetros microbiológicos para determinar que es permitida la cerveza para consumo humano. En dichos análisis se debe determinar que no haya presencia de *E. coli* ni de coliformes totales. Según los resultados obtenidos por la metodología de Petrifilm™ 3M (Cuadro 66, página 216), no hay presencia tanto de coliformes totales como de *E. coli* para los lotes 1 y 2. Al realizar los análisis respectivos por primera vez, se tuvo una sospecha de contaminación por coliformes totales, esto debido a que luego de la incubación, se observaba una coloración significativamente rosada en el medio en comparación al control negativo utilizado (agua destilada estéril) (Figura 248 sección de Anexos, página 549). Se realizó nuevamente el procedimiento, esta vez realizando diluciones seriadas de las muestras y tomando como control negativo la cerveza final, filtrada nuevamente con un filtro 0.45µm para eliminar cualquier organismo o material que pudiera contaminarla, nuevamente el control negativo con agua destilada estéril y también se colocaron controles positivos de *E. coli* y *Klebsiella spp* (Figura 249 sección de Anexos, página 549). Comparando dichos resultados, luego de la incubación, se determinó que el cambio de coloración en el medio se debió al pH bajo medido en la cerveza producida y no por la presencia de coliformes totales. Según Beloti *et al* 2003, el pH de la muestra si puede influir en el cambio de coloración del medio, por lo que se recomienda, antes de inocular las muestras, ajustar el pH a neutro con soluciones de NaOH 1N o HCl 1N según sea necesario. Se observó también la formación de pequeñas burbujas en el medio (Figura 250 sección de Anexos, página 550), se realizó una comparación entre una de las muestras con el control negativo de agua destilada estéril y se observó la presencia de las mismas burbujas, aunque considerablemente mayor cantidad en las muestras, esto debido a que la muestra colocada estaba carbonatada y por lo mismo, pudo haber formado dichas burbujas.

En el Cuadro 66, página 216, también se observa que para el lote 3, se encontró presencia de coliformes totales a un valor <120 UFC/mL (Figura 251, página 550) el cual sobrepasa el valor esperado de <1.1 UFC/mL expresado en la norma COGUANOR 29 001 (COGUANOR 1985). Es importante, por lo mismo, tomar en consideración los posibles puntos de contaminación para realizar el debido seguimiento. Dentro de ellos se pueden mencionar: al inicio del proceso, la adquisición de materias primas y materiales que están en contacto con las mismas, como lo puede ser la cebada o bien, el agua que se utilizará. Según los estudios realizados en esta investigación, el agua cumple con las normas especificadas por COGUANOR 29 001 por lo que no presenta un riesgo significativo en la contaminación por bacterias de la cerveza producida pero no se tiene seguridad de que la cebada esté libre de microorganismos ya que, por lo que se observó al momento de realizar la germinación y malteado de los granos de cebada, se encontraron ácaros y otros sólidos

y materiales ajenos a los granos deseados. Debido a que es el inicio del proceso, quizá no haya complicaciones de contaminación posterior, pero de igual manera, sería recomendable realizar un lavado y filtrado de la cebada antes de ser procesada para determinar que está libre de aquellos posibles contaminantes no solo de microorganismos sino causantes de cambios fisicoquímicos también (COGUANOR 1985).

Otro punto para tomar en cuenta es el uso de los equipos, fermentador, caldera y otros que se vayan a utilizar durante todo el proceso. Antes de comenzar con el proceso, es indispensable que se realice un lavado y desinfección de estos con uso de detergentes o disolventes con acción mecánica como lo puede ser la soda cáustica, los bicarbonatos y jabones. Por otro lado, es importante también para la desinfección utilizar compuestos como cloro, amonio cuaternario, vapor de agua u otros componentes que permitan eliminar a cualquier tipo de microorganismo o material adherido que pueda contribuir a la contaminación del producto al estar en contacto directo. Se deben tomar en consideración las tuberías, ya que, si el producto o subproducto debe ser enviado de un equipo a otro, éstas deben ser de grado alimenticio o bien pasar por un proceso de limpieza y desinfección según lo mencionado anteriormente para evitar que al estar en contacto puedan contaminarse de alguna manera (Hughes, 2003).

Se ha determinado por González, 2017 que frecuentemente las impurezas que provocan mayor crecimiento bacteriano son los almidones y azúcares, por lo que se debe tomar un especial cuidado en el proceso de elaboración de cerveza luego de realizado el paso de cocción. Debido a que se está iniciando con la elaboración de cerveza artesanal, se utilizaron botellas recicladas, las cuales, se determinó que únicamente fueron lavadas con agua y jabón. A pesar de que ésta es una buena forma de limpiarlas, es posible que no haya sido suficiente para eliminar completamente los restos de residuos de bebidas anteriores y por lo mismo, el producto final se haya contaminado. Estas impurezas pueden eliminarse según lo mencionado o bien buscando que el equipo se remoje cierto tiempo en el agente de lavado o que se tenga que realizar un trabajo mecánico de frotamiento. Por último, debido a que, por el momento se está realizando el procedimiento de embotellamiento en botellas utilizadas previamente, se recomienda no lavar únicamente con agua y jabón sino buscar otros métodos químicos como podría ser agregar una solución de cloro que permita eliminar cualquier microorganismo que pueda afectar el producto final que será agregado o bien un método básico como esterilización con calor húmedo, en un autoclave, para asegurar que no existe ningún tipo de contaminación. Además, durante todo el proceso de elaboración, es indispensable el uso de

medidas de seguridad, especialmente guantes y bata lo que permite evitar cualquier contacto directo con el producto final y que la inocuidad de este no sea perjudicada.

El otro método para realizar análisis microbiológicos fue el método de Número Más Probable utilizando Colitag™. En el Cuadro 67, página 217 se observan los resultados obtenidos, de los cuales se obtuvieron resultados negativos para todas las muestras y positivos únicamente los controles. (Figura 252, página 551). Colitag™ está relacionado con el cambio de coloración en los tubos de muestra luego de ser incubados, pero debido al color que tiene la cerveza producida, y en especial por ser cerveza artesanal que tiene un mayor grado de turbidez, es difícil identificar correctamente la presencia de coliformes totales. A pesar de que en la metodología empleada según el manual de Colitag™ (Palintest, 2019) no las utiliza, se recomienda agregar a la misma, el uso de campanas de Durham, ya que según menciona Internacional, 2005, en la metodología de Número Más Probable, es más sencillo determinar la presencia de gas producido por las coliformes con este material.

Por otro lado, se decidió realizar un cultivo de microorganismos en agar EMB. Se eligió este agar, debido a que es un medio de cultivo selectivo y diferencial para aislar bacilos gram-negativo, específicamente de la familia Enterobacteriaceae, que para la investigación permitía identificar presencia o ausencia de coliformes y *E. coli* (Scharlau 2012). En las cajas Petri sembradas para los lotes 2 y 3 (Cuadro 70, página 218), se observó un crecimiento de colonias moradas, por lo que se decidió hacer una tinción Gram para identificar al microorganismo (Figura 253 y Figura 255, sección de anexos, páginas 551 y 552) que resultó ser levadura. Por otra parte, se decidieron sembrar los filtros utilizados para el control negativo ya que en éstos se esperaba que quedaran los microorganismos presentes en el producto final. Se observó entonces, la presencia de un hongo contaminante (Figura 254, 256 y 257, sección de anexos, páginas 552 y 553) que no logró ser identificado hasta especie, pero se cree que es *Penicillium spp* (Cuadro 70, página 218). Este es un moho filamentoso que es común encontrar como principal contaminante en diversas bebidas y alimentos (Isitua, 2018). Este hongo se expone principalmente en los cereales, aunque también se ha determinado como contaminante en uvas, café, pasas y chocolate. En la cerveza, es posible encontrarlo debido a que uno de los ingredientes para su producción es la cebada, un cereal. El hongo es capaz de producir diversas micotoxinas, como por ejemplo la Ocratoxina A por lo que es importante su eliminación en el proceso de elaboración del producto final y como se mencionaba anteriormente, la mejor forma de evitar la contaminación por dicho organismo es con la desinfección adecuada en la cebada (Sanchis *et al* 2000). El valor permitido para el conteo de

mohos y levaduras es de 20 UFC/mL por lo que se debe realizar una metodología de conteo en placa y determinar si éste cumple o no con dichos parámetros establecidos.

Según lo mencionado anteriormente, sería necesario realizar un HACCP el cual consiste en determinar los puntos críticos de control de todo el proceso de elaboración de productos; además de tomar en consideración los peligros y medidas preventivas o de control para evitar riesgos químicos, biológicos y físicos (Motimore & Wallace, 2001). El proceso de elaboración de cerveza se divide en tres grandes procesos para dicho análisis HACCP los cuales son: Materias primas, elaboración de la cerveza, envasado y distribución. En el Cuadro 71, página 218 se pueden observar los posibles peligros o daños, pero también los puntos de control o prevención propuestos para evitar dichos problemas. Con dicha propuesta se espera que al iniciar el procedimiento ya en la planta piloto construida, sea más sencillo determinar los puntos de control y tener un adecuado registro de los procedimientos a realizarse.

Por su parte, se observa que en algunos análisis realizados por los módulos anteriores los cuales determinan algunas de las pruebas organolépticas a realizarse en el producto final envasado. De dichas características, la mayoría cumplen con los estándares establecidos para una cerveza IPA producida, pero se observa que 2 pruebas no cumplen las cuales fueron Color (SRM) con un valor de 4 y la densidad final (g/ML) con un valor de 0.9925. Esto podría ser debido a la naturaleza de la cebada obtenida y el proceso de malteado ya que, según Mencia *et al* 2016, es un principal factor en la coloración del producto final.

Por último, se observa en el Cuadro 68, página 217, que se realizó un análisis de viabilidad de las levaduras al iniciar y al finalizar la fermentación para determinar la posibilidad de reutilizarlas. Según los valores obtenidos por la técnica de citometría de flujo, se observa que existe un porcentaje de viabilidad del 100% al inicio y al final de la fermentación, con una disminución de cantidad de células de 0.12, en la cual no hubo un cambio de notación científica y por lo mismo hay posibilidad de que se realizara una recuperación de la levadura luego de finalizar la fermentación y antes de iniciar el siguiente lote. Según un estudio realizado por Tapia-Villacrés 2016, se han obtenido resultados positivos al momento de la reutilización de la levadura SAF- ALE S-04, la misma utilizada en el procedimiento para la elaboración de cerveza de esta investigación por lo que se espera que, al utilizar esta técnica, se puedan obtener resultados rápidamente y precisos para determinar la viabilidad de las levaduras y ver hasta qué momento pueden ser reutilizadas. La cantidad de levaduras necesarias para una fermentación adecuada depende del

tamaño del fermentador y la capacidad que éste tiene; por lo que se deben realizar más pruebas para determinar si la levadura sobrante, aunque el rendimiento disminuya, sea suficiente para una fermentación adecuada.

Lamentablemente, durante la experimentación, se tuvieron algunos problemas con el equipo de citometría de flujo, por lo que ya no se pudieron continuar midiendo las muestras para dar un resultado estadísticamente significativo. Por lo mismo, se deben realizar más réplicas y pruebas para determinar si es posible el uso de esta técnica para la identificación de viabilidad en las levaduras de cerveza, además, se decidió realizar una comparación con un método que actualmente se utiliza mucho, la técnica con cámara de Neubauer junto con la tinción con azul de metileno. Esta técnica, según Castellucci, 2010, se utiliza constantemente para determinar la viabilidad de las levaduras ya que los reactivos y los equipos a utilizar son sencillos y económicamente factibles para conseguir. El problema con dicha técnica es que no es muy precisa, ya que depende de la vista del analista y además de todo, requiere de mucho tiempo para poder realizarla correctamente, por lo que realizar un análisis de viabilidad por medio de dicha técnica se vuelve un poco complicado y tedioso. En el Cuadro 69, página 217 se observan los resultados obtenidos por dicho método, en el cual se determinó un 80.00% de viabilidad al inicio y un 78.57% de viabilidad al final de la fermentación. El recuento de células viables y totales obtuvo la misma notación científica en ambos métodos por lo que se puede determinar que ambos son factibles para obtener información de las levaduras. Algo a recalcar, es que, debido al tiempo que se necesita para realizar la metodología con cámara de Neubauer, algunas levaduras pueden morir y teñirse en el proceso y por lo mismo, la viabilidad se ve afectada, esto en la metodología de citometría de flujo es más difícil que se dé, ya que el procedimiento se tarda muy poco (Cruz y Meyer 2019). De igual manera, es necesario realizar una prueba confirmativa, que permita confirmar que el porcentaje de viabilidad de las metodologías realizadas es efectivo y verídico, para lo cual se recomienda realizar diluciones en un caldo o agar nutritivo y dejarlas incubado, esto permitirá determinar si luego de 24 horas, hay crecimiento por medio de turbidez o colonias formadas.

IX. CONCLUSIONES

A. CONCLUSIÓN GENERAL

Se construyó una planta piloto de elaboración de cerveza a partir de equipos y materiales disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la cual se logró producir una cerveza tipo India Pale Ale con un contenido alcohólico de $5.9 \pm 2.3\%$ v/v, aprobado según la norma COGUANOR NGO 33006.

H. PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

1. Se determinó que todos los lotes de agua para proceso cumplen con los Límites Máximos Aceptables y los Límites Máximos Permisibles evaluados establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 para agua potable.
2. Se determinó que todos los lotes de agua para proceso cuentan con una puntuación promedio de 37.5 puntos respecto al nivel de cumplimiento del perfil de agua establecido por la norma BJCP 2008, lo cual indica que el agua utilizada para realizar la IPA no es la más adecuada.
3. Se propuso un sistema de acondicionamiento de agua, compuesto de los siguientes equipos:
 - a. Bomba dosificadora de cloro (para un flujo de 3.30x, dosificación graduable a 2.5, volumen máximo de 11.36 de NaClO al 0.5%).
 - b. Filtro de sedimentos (de 0.254 m x 1.37 m, área y volumen de tanque de 0.05 y 6.20, para un volumen de 4.2 de antracita; flujo de diseño máximo de 3.40x y 5.10x de retrolavado).
 - c. Filtro de columna de carbón activado (de 0.254 m x 1.37 m, área y volumen de tanque de 0.05 y 6.20, para un volumen de 4.2 de carbón activado mineral; flujo de diseño máximo de 3.40x y 3.40x de retrolavado).

- d. Filtro pulidor (0.114 m x 0.254 m, con un cartucho de fibra de polietileno de una micra de 0.060 m x 0.251 m, para un flujo de diseño de 3.20).
- e. Lámpara de luz UV (dosis de radiación de 30.0, reducción del 99.999% de microorganismos, para un flujo de diseño máximo de 3.80).
- f. Tanque de almacenaje de agua (0.50 m x 1.00 m, para una capacidad máxima de 200L y un tiempo de llenado de 10.0 mn aproximadamente).

I. PROCESO DE MALTEADO

- a. Se dimensionó el equipo necesario para llevar a cabo el proceso de malteado, obteniendo:
 1. Separador primario (de 0.47 m x 0.29 m x 0.28 m, una malla con mesh de 2.00 mm).
 2. Separador secundario (de 0.20 m x 0.20 m x 0.10 m, con un ventilador de 0.40 m alto y un diámetro de rejilla de 0.18 m, para un flujo de aire de 10.00).
 3. Separador terciario (de 1.50 m de alto y 1.00 m de diámetro, una malla con un mesh de 2.50 mm).
 4. Tanque de remojo (de 0.33 m de diámetro y 0.46 m de alto, volumen máximo de 3.50x y un volumen de 2.70x de cebada).
 5. Caja de germinado (de 2.00 m x 1.00 m x 1.00 m, capacidad máxima de cebada de 18.00 kg).
- b. Se realizó el proceso de malteado, en donde se obtuvo que:
 1. En la primera separación el porcentaje promedio de impurezas eliminadas para los lotes de cebada fue de 30.80%, 0.80%, mientras que en la segunda separación el porcentaje fue de 5.91%, 0.90 y en la tercera separación el porcentaje fue de 63.29%, 0.95%.
 2. El porcentaje de humedad promedio a las 0,24,48 y 72 horas de remojo para los lotes de cebada fue de 15.01%, 0.63%, 24.35%, 0.37%, 38.39%, 0.78% y 46.40%, 1.41%, respectivamente.
 3. El largo promedio del acrospire según el tiempo de germinado para los lotes 1,2,4 y 5 a las 0,24,48,72 y 96 fue de 0.0mm, 0.9mm, 0.3mm,

2.5mm, 0.3mm, 3.9mm, 0.3mm y 6.3mm, 0.3mm, respectivamente. Para el lote 3 a las 0,24,48,72 y 96 horas fueron de 0.0mm, 0.6mm, 0.2mm, 1.2mm, 0.3mm, 1.8mm, 0.9mm y 4.7mm, 1.2mm respectivamente.

4. Se determinó que el porcentaje de rendimiento más bajo fue de 17.35%, 0.13% (Lote 3) mientras que el mayor fue de 92.99%, 0.14% (Lote 5).
- c. Se obtuvo que los modelos que permiten determinar la cantidad de azúcares fermentables presentes en el mosto, según el tiempo de germinado de cebada corresponde a un valor de 0.9226 para el rango de 0-72 horas de germinado y con un valor de 1.00 para el rango de 72-120 horas de germinado.
- d. El color de cerveza promedio observado fue de 4.67 grados Lovibond y 2.08 grados Lovibond de desviación estándar, empleando relación de 85% malta base y 15% malta caramel. El color reportado es un color menor en la escala Lovibond con respecto al rango de color de cerveza tipo IPA, según BJCP.
- e. Empleando el secador de rodillos para la reducción de tamaño de granos de malta, se fijó una distancia entre los rodillos de 2 mm, lo cual produjo un porcentaje de harinas finas (tamaño de partícula menor a 0.149 mm), del 1.96% para la malta base y 2.41% para la malta caramel. El mayor porcentaje de la molienda se retuvo en la malla No. 20 (mayor a 0.841 mm de tamaño) y fue de un porcentaje de 81.57% en malta caramel y 83.21% en malta base.
- f. Con una maceración de temperatura fija en 66°C por una hora y relación de agua con malta de 3 L/kg, lavado de granos con misma cantidad de agua que la maceración y cocción por una hora, se obtiene una gravedad específica promedio de 1.047, el cual no entra en el rango de concentración de azúcares en el mosto del tipo de cerveza IPA, de por lo menos gravedad específica de 1.050. El volumen de mosto promedio fue de 15.9 litros.
- g. Con la ecuación de Rager se calculó un amargor en cerveza promedio de 64.87 IBU y desviación estándar de 2.35 IBU con las cantidades empleadas de lúpulo Cascade y Fuggles. Que cumple con el grado de amargor según BJCP para el tipo de cerveza producido.
- h. Empleando un análisis en las características, se definió como equipo a utilizar en la planta instalada del megaproyecto, en el presente módulo: el deshidratador de gabinetes de temperatura máxima de 115°C, secador de rodillos con potencia de motor de 4 kW, tamiz rotap de capacidad de 450 gramos, tanque de 0.255 m³, agitador WEG con motor de 1.5kW y bomba centrífuga Aquastrong ® modelo EJm61C, con potencia máxima de motor de 0.450 kW.

- i. Para lograr cumplir con los equipos que requiere una casa de cocimientos, y llevar a cabo la maceración, separación de afrecho, lavado de granos y cocción, se requiere un tanque de maceración, un filtro Lauter, un serpentín de calentamiento de 6.5m de largo para acoplar al actual tanque y llevar a cabo la cocción en él, y un tanque sedimentador Whirlpool.
- j. La bomba centrífuga actual no puede operar a altas temperaturas por lo que una bomba Netzsch de rodete centrífugo helicoidal es más apta para movilizar el mosto a través de las tuberías, debido a su capacidad de tratar con soluciones con sólidos presentes y trabajar a temperaturas altas.

J. PROCESO DE FERMENTACIÓN

- a. Se obtuvo una cerveza tipo Ale producida bajo las condiciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, cuya fermentación se realizó con una temperatura promedio de 21.5 ± 0.3 °C y un pH promedio de 5.144 ± 0.989 ; manteniéndose ambas condiciones dentro del rango recomendable entre 15°C y 25°C para temperatura y entre 3 y 6 para pH.
- b. El contenido alcohólico final de la cerveza producida cumple con la norma COGUANOR NGO 33006 para bebidas alcohólicas fermentadas que establece que los límites inferior y superior son 0.5% v/v y 9.0% v/v de etanol, teniendo una concentración resultante de $5.9 \pm 2.3\%$ v/v de etanol. Asimismo, el contenido de azúcares iniciales (maltosa, sacarosa, glucosa y fructosa) fue de 10.98 ± 0.59 % m/v.
- c. El rendimiento promedio del producto con respecto al sustrato es de 0.674 ± 0.989 g producto/g sustrato para la fase de crecimiento celular y 0.436 ± 0.092 g producto/g sustrato para la fase de decrecimiento celular, lo que implica que en la fase de crecimiento celular se consumió más sustrato para la producción de etanol que para el mantenimiento celular.
- d. Las ecuaciones que presentan el modelo cinético de fermentación microbiana del mosto de cerveza para la fase de crecimiento celular y la fase de decrecimiento celular son $\frac{dC_s}{dt} = \frac{0.04 C_s C_N}{-74 + C_s}$ y $\frac{dC_s}{dt} = \frac{-0.5 C_s C_N}{-25 + C_s} \left(\frac{-0.7}{-0.7 + C_p} \right)$, respectivamente; para las condiciones utilizadas en la reacción.
- e. El flujo másico de agua fría requerido para mantener la temperatura dentro del tanque de fermentación entre 15°C y 25°C es de 0.0033 ± 0.0001 kg/s, el flujo másico de agua fría requerido para mantener la temperatura para la maduración es de $6.168 \times 10^{-4} \pm 7.520 \times 10^{-5}$ kg/s utilizando el sistema de enfriamiento disponible y el flujo másico de vapor requerido para esterilizar el mosto previo a la fermentación es de 0.003 ± 0.008 kg/s utilizando vapor proveniente de la caldera.

- f. El sistema de agitación propuesto es un agitador mecánico con impulsor de turbina de disco de 6 palas, el cual tiene un diámetro de agitación de 0.16m, un diámetro de eje de 0.009m, un largo de pala de 0.040m y un ancho de pala 0.032m. La potencia del motor calculada para el agitador mecánico, tomando un número de Reynolds de $3,559.82 \pm 0.64$, es de 0.005W (0.000006 hp). Se sugiere instalar un motor de 186.5W (0.25 hp). Además, se seleccionó un termostato digital COEL TLE20 con vaina de acero inoxidable, un sensor de pH de proceso en línea de acero inoxidable marca Hach, un controlador digital marca Hach SC 200, una válvula de seguridad de acero inoxidable soldable, una válvula de descarga de compuerta de acero inoxidable, una válvula de retención soldable TAINOX, un reductor de frecuencia genérico modelo 040-63B5 y empaques de neopreno para sellar el sistema. Bajo las condiciones monitoreadas de temperatura con un valor promedio de $23.33 \pm 1.63^{\circ}\text{C}$ y pH con un valor promedio de 4.876 ± 0.398 operando en el reactor escala laboratorio disponible, se obtuvo una cerveza de 3.0 ± 0.5 % v/v.

K. PROCESO DE FILTRADO

- a. El filtro de elemento de 5 micras, la bomba centrífuga de 0.45 kW y la tubería de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in) redujeron la turbidez de la cerveza de 926.25 ± 18.55 NTU a 333.25 ± 6.69 NTU, un 64.02 % m/m, a una temperatura de 4.4 ± 0.1 °C, como se puede ver en el cálculo 1.
- b. La instalación realizada para el sistema de filtración, una estructura de hierro negro de tubo cuadrado de 3 cm con planchas cuadradas de 10 cm soldadas a la parte inferior de las patas para brindar estabilidad fue la adecuada ya que sostuvo el filtro que reduciría la turbidez de la cerveza. La tubería de acero inoxidable de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in) y de 0.0254 m (1 in) se armó de manera adecuada ya que no presentó problemas de fugas o derrames al momento de trasladar la cerveza.
- c. El 2.03 % m/m de finos removidos durante el tamizaje reduce el contenido alcohólico final de la cerveza en, promedio, 1.0761 ± 0.0001 g/mL según el análisis de prorratio realizado.
- d. Sedimentar la cerveza es uno de los procesos que más reduce la turbidez de la misma, reduciéndola en 549.50 ± 11.01 NTU equivalente a 59.05 % m/m en comparación con el valor inicial de 930.50 ± 18.63 NTU, en promedio, aunque no llega al valor máximo de turbidez de las cervezas comerciales estilo IPA analizadas.
- e. Mientras que la centrifugación por lotes redujo la turbidez de la cerveza de un valor inicial de 925.03 ± 18.52 NTU a 416.20 ± 8.34 NTU, equivalente a 55.01 %, la centrífuga continua

- solamente redujo la turbidez inicial a 874.3 ± 17.51 NTU, equivalente a 5.48 % m/m. La turbidez final de la centrifugación por lotes sí se encuentra en el rango de las cervezas IPAs comerciales pero la turbidez de la centrifugación continua no se encuentra dentro de este rango.
- f. La filtración de la cerveza presentó una reducción de 593.00 ± 11.86 NTU del valor inicial de 926.25 ± 18.55 NTU, equivalente a 35.98 %. Este valor se encuentra fuera del rango de turbidez de las cervezas IPAs analizadas en el mercado guatemalteco.
 - g. La turbidez final de la cerveza fue de $333.25 \text{ NTU} \pm 11.24 \text{ NTU}$, lo que presenta una reducción del 64.02% de la turbidez resultante de la fermentación. Este valor es el equivalente a que la cerveza se sedimente y se filtre, que fueron los procesos implementados. El valor se encuentra dentro del rango de turbidez de las cervezas IPAs analizadas que ya se encuentran en venta dentro del ámbito guatemalteco.

L. PROCESO DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA

- a. Según los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos evaluados en la cerveza final obtenida dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se obtuvo en el tercer lote, valores de coliformes totales que sobrepasan los límites permitidos por las normas COGUANOR NGO 33 006 y NGO 29 001 además de la presencia de un moho contaminante en el segundo y tercer lote evaluados.
- b. De acuerdo con los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad, turbidez y concentración de oxígeno disuelto evaluados, se puede concluir que la cerveza final producida si cumple con la norma COGUANOR NGO 33 006 establecida; la cual obtuvo valores de 4.46 ± 0.010 , $153.39 \mu\text{S/cm} \pm 8.03 \mu\text{S/cm}$, $330.74 \text{ NTU} \pm 10.39 \text{ NTU}$ y $1.1 \text{ mg/L} \pm 0.0060 \text{ mg/L}$ respectivamente.
- c. De acuerdo con los parámetros microbiológicos evaluados para presencia de coliformes totales y *E. coli*, la cerveza final producida cumple con los parámetros establecidos por las Normas COGUANOR NGO 33 006 y NGO 29 001 para los primeros 2 lotes elaborados, pero no cumple en el tercer lote producido. Obteniendo resultados de $<1.1 \text{ UFC/mL}$ coliformes totales y *E. coli* para los primeros 2 lotes elaborados y $<120 \text{ UFC/mL}$ para coliformes totales y $<1.1 \text{ UFC/mL}$ *E. coli* para el tercer lote elaborado realizados por la metodología de Petrifilm™ 3M EC y un valor de $<1.1 \text{ UFC/100mL}$ de coliformes y *E. coli* para los tres lotes evaluados realizando la metodología de Número Más Probable con reactivo de Colitag™.

- d. Se determinó un porcentaje de viabilidad de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* tipo SafAle™ S-04 al inicio y al final del proceso de fermentación obteniendo valores de 80.00% y 78.57% de viabilidad respectivamente por la metodología de cámara de Neubauer y valores de 100.00% de viabilidad en ambos tiempos por la metodología con citómetro de flujo.

X. RECOMENDACIONES

A. PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

1. Disponer de reactivos para el equipo Hach DR890, que permitan realizar análisis de presencia de metales pesados (plomo, mercurio, arsénico, cobre, níquel, zinc y selenio) en el agua de pozo, para saber si se tiene la necesidad de dimensionar un filtro para reducir o eliminar la presencia de dichos metales en el agua que se utiliza para el proceso de fabricación de cerveza.
2. Acondicionar, adicionando reactivos como cloruro de calcio (aproximadamente 11.8 g), sulfato de magnesio (aproximadamente 7.4 g) y bicarbonato de calcio (aproximadamente 10.0 g) a el agua que sale del sistema filtración de agua, para que esta llegue a los perfiles necesarios establecidos por la norma BJCP 2008, de esta manera se obtendrá una mejor puntuación, cuidando que los nuevos parámetros de los distintos iones (Na, Ca, HCO₃, Cl, SO₄ y Mg) no sobrepasen los límites establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001.
3. Diseñar un sistema de aireación para el tanque de remojo que permita reducir los tiempos de cambio de agua y mantener esta con el suficiente oxígeno disuelto para que la cebada no se ahogue y se logre llegar al porcentaje de humedad requerido (47%) más rápido.
4. Implementar un sistema de riego y aireación dentro de la caja de germinado que permita humedecer la cebada durante la noche. De esta manera el grano contará siempre con un porcentaje óptimo de humedad (45%-47%).
5. Realizar un modelo matemático que permita determinar la cantidad de azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza, según el día de germinado de la cebada para un lote de cebada de 6 hileras y un lote de cebada de 2 hileras, para saber si hay una diferencia significativa en los días de germinado según el tipo de cebada.

B. PROCESO DE MALTEADO

1. Analizar la mejora en la uniformidad de la humedad en el proceso de secado de malta con la construcción de un sistema de bandejas perforadas dentro del deshidratador de gabinetes que permitan mayor contacto de aire seco con el producto
2. Estudiar la relación entre la distancia de rodillos durante la molienda, con un molino de rodillos y la conversión de azúcares en la maceración de cerveza.
3. Estudiar la cinética de reacción enzimática durante la maceración de mosto a distintas temperaturas y tiempos, para analizar una mejora en el proceso de extracción de azúcares.
4. Evaluar la producción de concentrado de malta para ajustar la concentración de azúcares en el mosto de cerveza antes de fermentar para obtener grados alcohólicos constantes en cada producción.
5. Evaluar la instalación de un lazo de control en el tanque de maceración y cocción para controlar temperatura junto con el flujo de vapor que ingresa para calentar.

C. PROCESO DE FERMENTACIÓN

1. Realizar el mismo estudio para la levadura Saf-Ale US-05, la cual también se utiliza para hacer cerveza tipo Ale, y comparar los resultados para determinar cuál es la que tiene mejor rendimiento para este estilo de cerveza y las condiciones empleadas.
2. Estudiar la viabilidad de instalación de un sistema dosificador para nivelar el pH en el fermentador, con soluciones de ácido cítrico e hidróxido de sodio, en caso de ser necesario durante el curso de la reacción de fermentación.
3. Cambiar los accesorios ya instalados en el reactor que sean de hierro galvanizado, por accesorios de acero inoxidable grado sanitario para asegurar la inocuidad del proceso.

D. PROCESO DE FILTRADO

1. Aunque las pruebas a escala laboratorio no presentaban resultados adecuados para el filtro de 1 micra, se recomienda hacer pruebas de filtración con el sistema ya armado cambiando el filtro de 5 micras por el de 1 micra ya que la fuerza ejercida por la bomba sí puede llegar a ser la suficiente para filtrar la cerveza.
2. Implementar un sistema de molienda que no rompa el grano, como el que se tiene actualmente, sino que solamente lo vuelva una hojuela. Esto con el propósito de reducir la producción de polvos finos y no tener que retirarlos para la cocción, haciendo que todas las azúcares presentes en los granos pueden ser aprovechadas.
3. Agregar un floculante, preferiblemente pastillas de “Protofloc”, para aumentar la velocidad de sedimentación de la cerveza y reducir la turbidez del producto en un período de tiempo menor, reduciendo el impacto económico de dejar el producto guardado en planta por 14 días.
4. Realizar un análisis de la turbidez en base al tiempo, con una mayor cantidad de datos tomados en período de tiempo menor para determinar el tiempo que corresponde dejar la cerveza sedimentando en términos de turbidez.
5. Adquirir una centrifugadora continua que se puede adaptar a la planta de producción para remover sólidos suspendidos y reducir la turbidez de la cerveza a valores cercanos o menores de 400 NTU.
6. Hacer la prueba de filtración cambiando el filtro de 5 micras que se encuentra dentro del cartucho por una de 1 micra para determinar si la presión generada por la bomba es lo suficientemente elevada como para filtrar la cerveza y reducir su turbidez aún más.
7. Realizar un estudio para el determinar el efecto de la creación de espuma en la turbidez y calidad de la cerveza y, de ser necesario, encontrar la manera en que la filtración no genere tanta espuma al momento de pasar por la bomba, tubería y filtro.

E. PROCESO DE CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA

1. Se recomienda que al utilizar la metodología de Petrifilm™ 3M EC para la identificación de coliformes totales y *E. coli*; si la muestra tiene un pH básico o ácido, se ajuste a pH neutro antes de ser inoculada e incubada para evitar falsos positivos.
2. Debido al color y turbidez de la cerveza producida, se recomienda que, si se utilizará la metodología de Número Más Probable utilizando Colitag™, se agregue al procedimiento el uso de campanas de Durham el cual permite complementar la identificación de coliformes totales ya que con ellas se pueden observar de manera más sencilla la formación de burbujas de gas.
3. La técnica de citometría de flujo es de mucha utilidad para determinar la viabilidad de las levaduras utilizadas durante el proceso de fermentación, pero se recomienda continuar realizando réplicas y pruebas para determinar que es factible para el análisis de recuperación de la levadura además de realizar una prueba confirmativa de crecimiento de levaduras para determinar que los datos obtenidos son verídicos.
4. Se recomienda crear un equipo de trabajo dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias que se encargue de seguir los parámetros del análisis de peligros y puntos de control críticos (HACCP) que es un proceso sistemático preventivo que busca garantizar la inocuidad alimentaria por lo que permitiría prestar mayor atención a puntos específicos durante el proceso como lo serían el ingreso de materia prima, la elaboración de la cerveza en los procedimientos de cocción y fermentación principalmente y el envasado y carbonatación de la cerveza final producida donde puedan identificarse, evaluarse y prevenirse todos los riesgos de contaminación tanto a nivel biológico, como físicoquímico.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- 3M Corporation (2002). 3M Petrifilm™ Placas para Recuento de *E. coli* y Coliformes. Versión 1.0
- 3M Corporation. (2003). 3M Petrifilm™ Guía de Interpretación TM.
- 3M Corporation. (2006). 3M Placas Petrifilm™ para el Recuento de *E. coli*/Coliformes.
- A. Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. México: Editorial McGrawHill Interamericana. 930 págs.
- Ago, C. (2005). *Types of agitators: design and significance*.
https://www.pharmacalculations.com/2016/05/types_ofagitators.html [Fecha de consulta: 25 de agosto de 2019.
- Anderson, D. and Sweeney, D. (2011). *Estadística para negocios y economía* (11a. ed.). Distrito Federal: CENGAGE Learning.
- Aráoz, J. L., Cárdenas, G., Ruiz, M., & Gusils, C. (2016). Análisis comparativo de colorantes vitales en el estudio de la viabilidad de levaduras. *Revista Ind. y Agríc. de Tecumán*, 93(1), 39–42.
- Asq Food (2003). HACCP Manual del Auditor de Calidad. Acribia. Pp 280.
- Bamforth, C. (2003). *Beer: Tap into de Art and Science of Brewing*. 2nd edition. United Kingdom: Oxford University Press. 246 pages.
- Bamforth, C. (2009). *Beer: A Quality Perspective*. United Kingdom: Academic Press of Elsevier. 278 pages.
- Bamforth, C. (2013). *The Microbiology of Malting and Brewing*. University of California. 18 pages.
- Barquero, M. (2006). *Principios y aplicaciones de la cromatografía de gases*. Costa Rica: Ed. Universidad de Costa Rica. 56 págs.

- Barth, R. (2013). *The Chemistry of Beer: The Science in the Suds*. United States: John Wiley and Sons, Inc. 350 pages.
- Beloti, Vanerli, Souza, Juliana Aparecida de, Barros, Márcia de Aguiar Ferreira, Nero, Luís Augusto, Mattos, Marcos Rodrigues de, Gusmão, Viviane Vieira, & Moraes, Luciane Bilia de. (2003). Evaluation of Petrifilm™ EC and HS for total coliforms and *Escherichia coli* enumeration in water. *Brazilian Journal of Microbiology*, 34(4), 301-304.
- Biotechnologies, A. (2017). La Citometría aplicada a la Microbiología: Pilotaje de la fermentación alcohólica y métodos de seguimiento en rutina.
- BJCP (2018). Programa de certificación para juzgar cervezas. 3ª edición. USA. Pp 93
- Brewer's Friend. 2019. <https://www.brewersfriend.com/> [Revisado el 04/03/2019]
- Briess. 2001. <http://www.brewingwithbriess.com/Products/Default.htm> [Revisado el 01/09/2019]
- Caffaratti, S. (2017) Malteado y tostado. Argentina. <http://somoscervceros.com/2011/03/01/malteado-y-tostado/> [Revisado el 20/04/2019]
- Camacho, A., Giles, M., Ortegón, A., Palao, M., Serrano, B., & Velázquez, O. (2009). Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos. (Segunda ed.). México: Facultad de Química, UNAM.
- Camilo, M. R., Sanchez, R., Alberto, L., Gil, S., & Katherine, L. (2016). Demostración de la presencia de microorganismos en diferentes ambientes.
- Castellucci, Federico. 2010. Análisis microbiológico del vino y del mosto: Recuento de células de levadura-tinción de células de levadura con azul de metileno. Resolución OIV/OENO 206. Pp 25.
- Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Tesis Universidad de Bío-Bío: Chile. 79 págs.
- Cengel, Y. (2007) Transferencia de calor y masa. 3ra edición, McGraw-Hill. Pp510-513
- Cerveza de Argentina. Proceso de elaboración de la cerveza. Recuperado de <http://www.cervezadeargentina.com.ar/articulos/proceso/procesoelaboraci%C3%B3ncerveza.htm> [Revisado el 05/05/2019]

- Cocinista. (2010). *Tabla de conversión de gravedad específica a grados Brix*. <https://www.cocinista.es/web/es/recetas/hacer-cerveza/trucos-y-consejos/tabla-conversion-gravedad-especifica-grados-brix.html>. [Fecha de consulta: 02 de septiembre de 2019]
- COGUANOR 29001. AGUA PARA CONSUMO HUMANO (AGUA POTABLE). 1ª revisión. Comisión Guatemalteca de Normas, Ministerio de Economía. Guatemala, Guatemala.
- COGUANOR (1986). Norma COGUANOR NOG 34 155 h3. Guatemala, Guatemala.
- COGUANOR (2002). Norma COGUANOR NOG 33 006. Guatemala, Guatemala.
- Contreras, P. (2014). *Comparación del método HPLC y método de infrarrojos para la determinación de azúcares en la miel*. Tesis Universidad de la Rioja: España. 111 págs.
- Cornell, M. (2011). *Amber, Gold & Black: The Story of Britain's Great Beers*. Inglaterra: History Press.
- Cortés-Montaña, Daniel (2017). Análisis comparativo de cervezas artesanales extremeñas. Universidad de Extremadura. Pp 61.
- Cruz, Edson; Meyer, Lina. (2019). Evaluación de la reutilización de levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la implementación en un segundo proceso fermentativo de la cerveza tipo Pale Ale Belga producida en la cervecería Moonshine. Fundación Universidad de América. Tesis.
- C. S. (28 de Marzo de 2019). *Pasión Artesanal*. Obtenido de Cerveza Artesanal El Zapote Brewing Company: <http://cervezaelzapote.com/index.php/sample-page/cerveza-artesanal/>
- D. Hall; G. Harris. (1990). *Carbohydrates in malting and brewing v. further studies on the carbohydrates of barley, malt and wort*. Brewing Industry Research Foundation. p. 232 – p. 233.
- De Clerck, Jean. 1958. *A Textbook of Brewing*. 1ª ed. Londres: Chapman Hall. 273 págs.
- Depraetere SA, Delvaux F, De Schutter D, Williams IS, Winderickx J, Delvaux FR. The influence of wort aeration and yeast preoxygenation on beer staling processes. Food Chem. 2008;107:242---9.
- do Pazo, C. (2014). Aplicación de técnicas de genética molecular y citometría de flujo para estudiar el envejecimiento celular de *Saccharomyces cerevisiae*.

- Duarte, I., Barros, A., Almeida, C., Spraul, M., & Gil, A. (2004). Multivariate Analysis of NMR and FTIR Data as a Potencial Tool for the Quality Control of Beer. *J. Agr. Food. Chem*, 52, 1031-1038.
- Esslinger, H. (2009). *Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets*. Germany: Wiley-VCH. 763 pages.
- Freccia, N. (2014). *The power pf pH*. Obtenido de The How to homebrew beer magazine: <https://byo.com/article/the-power-of-ph/>
- Freixes, Sergi; Punsola, Albert. (2018). El mundo de la cerveza artesanal. 3ra edición. Editorial Larousse. Pp 256.
- García, F. (1965). El malteo de la Cebada. "Cereales" (n. 174); pp. 17-20.
- García, J. S., Domenech, F., Blanco, G., & Santiesteban, C. (2000). La Levadura *Saccharomyces* (Tercera ed.). *Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar*.
- García-Bazante, Karina (2015). Elaboración de cerveza artesanal a partir de almidón extraído de tubérculos andinos. Ecuador. Pp 69.
- Gardner, Paul. Viscosity. <https://www.gardco.com/pages/viscosity/vi/ez.cfm>. [Consultado el 23 de septiembre de 2019]
- G. Priest, F. (2006). Manual de elaboración de cerveza. Estados Unidos: Editorial Taylor y Francis. 830 págs.
- González, P. (2019). Paso a paso. Obtenido de Prepara tu cerveza: www.preparatucerveza.com
- González, Marcos (2017). Principios de Elaboración de las Cervezas Artesanales. 1ra Edición. *Lulu Press Inc. Estados Unidos*. Pp 232.
- Girón, E. (26 de Junio de 2017). Cerveza artesanal chapina, una aventura para el paladar. Obtenido de Relato: <https://www.relato.gt/historia-del-dia/cervezaartesanalchapinaunaaventuraparaelpaladar>
- Gutiérrez, J. B. (2000). Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos. *Ediciones Díaz de Santos*.

- Hammond, J., Brennan, M., & Price, A. (1999). The Control of Microbial Spoilage of Beer *, 105(2), 113– 120.
- Harrison, R. (2003). *Bioseparations Science and Engineering*. United Kingdom:Oxford University Press. 443 pages.
- Hein, M. (1998). The State of the Brewing Industry. *Brewers Digest*.
- Hernández, A. (2003). Microbiología industrial. San José, Costa Rica EUNED
- Hill, Keith (2010). Strategy for the historic industrial environment ‘The Brewing Industry’. Brewery History Society, 102 Ayelands, New Ash Green, Longfield, Kent DA3 8JW
- Hough, J., Briggs, D., Stevens, R., & Young, T. (1982). *Malting and Brewing Science* (1 ed.). Springer US.
- Hughes, Paul. (2003). *Cerveza: Calidad, Higiene y Características Nutricionales*. Zaragoza. Acribia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2007. *Turbiedad por Nefelometría en el Equipo Turbiquant 3000 T*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. 9 págs.
- Internacional, C. M. (2005). Microorganismos en comida 6, especificaciones en comida (Segunda ed.). *Chapman & Hall*.
- Isitua, Chinwe-Christi; Ibeh, Isaiah-Nnanna; Ojiezeh, Tony-Ifeanyi. (2018). Contaminación fúngica toxigénica de las bebidas a base de cacao: una posible preocupación de salud pública en un país tropical. *FACSalud. Unemi* 2(2):7-12.
- ISO. (2015). Norma ISO 14001:2015. Manual de sistemas de gestion medioambiental.
- ISO (2015). Norma ISO 9001:2015. Manual de sistemas de gestion de calidad.
- Jackson, Michael. 1994. *El libro de la Cerveza*. 1ª ed. Barcelona: Blume. 304 págs.
- Kehr S., Juan, Morales V., Blanca, Contreras Sch., Paula, Castillo D., Lorian, & Aranda Ch., Waldo. (2004). Calidad microbiológica de una fórmula enteral lista para usar. *Revista chilena de infectología*, 21(4), 312-316.
- Keller, P. (2013). Imaging morphogenesis: technological advances and biological insights. *Science*,

340, 123-168.

Kerby, Clare; Vriesekoop, Frank. 2017. *An Overview of the Utilisation of Brewery By-Products as Generated by British Craft Breweries*. 1ª ed. Newport: Multidisciplinary Digital Publication Institute. 12 págs.

Khizar, P. (2018). *Sistemas de agitación*. https://www.researchgate.net/figure/Viscosity-ranges-for-different-impellers-Doran-2012_fig8_281874599 [Fecha de consulta: 25 de agosto de 2019]

Koolman, J. (2005). *Bioquímica: texto y atlas*. 3ª edición. España: Ed. Médica Panamericana. 488 págs.

Kornachi, J., & J.L., J. (2001). "*Enterobacteriaceae*, Coliformes, y *Escherichia coli* como indicadores de calidad y seguridad. En: Compendio de métodos para la examinación microbiológica de comida (Cuarta ed.). Washington: *Downs F.P & Ito K*.

Kunze, W. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Primera edición VLB Berlín. Alemania. Pp 225-277

Laguado, J. (2007). Aplicaciones de la citometría de flujo en microbiología, veterinaria y agricultura, 12(2), 1077–1095.

Lee, J. M. (2009). *Biochemical Engineering*. Department of Chemical Engineering of the Washington State University. Prentice-Hall Ed. 321 pages.

Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. 3rd edition. John Wiley & Sons Ed. 684 pages.

Libkind, D. (2014). *Manejo de Levaduras Cerveceras : Limpieza y Sanitización*.

Lovisoa, Claudia y Libkind, Diego. (2018). Síntesis y regulación de compuestos del aroma y el sabor derivados de la levadura en la cerveza: ésteres. *Rev Argent Microbiol*. 50(4):436-446.

Llorca, M. (1995) Modelización de la operación de secado de malta, por aire caliente, en lecho fijo y en capa profunda. Universitat de Lleida.

Lynn, M. S. (2002). *Citometría de flujo: Fluorescence-Activated Cell Sorting (FACS)*.

Madigan, M., & Martinko, J. (2006). *Biología de los microorganismos*. (Onceava ed.). *Brock*.

- Madison, B. (2001). Application of strains in clinical microbiology. *Biotech Histochem*, 76, 119-125.
- Maldonado Cardona, E. R. (2012). Estudio de prefactibilidad para la implementación de un laboratorio de análisis fisicoquímico en la planta de producción de una fábrica de bebidas carbonatadas en la ciudad de Guatemala.
- Mártin, Ignacio; Salcedo, R. Font, R. 2011. «Tema 5. Operaciones separación sólido-fluido». *Mecánica de Fluidos*. Alicante: Universidad de Alicante. págs. 243-276.
- Martín, P. (2018) Análisis de la molienda de la malta de cebada y efectos en el rendimiento del macerado. Universidad de Sevilla. Pp 56
- Mencia, Gustavo. *et al.* (2016). Desarrollo de cerveza artesanal ale y lager con malta de maíz (*Zea mays*), cebada (*Hordeum vulgare*), carbonatada con azúcar y miel de abeja. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana. Honduras. Pp 59.
- Mendieta Bojorge, R., & Picardo Rivera, A. E. (2002). Diseño tecnológico de un sistema separador-secador para su utilización en la recuperación de cerveza residual y posterior secado de la levadura sobrante.
- Mensour, N. A., Margaritis, A., Briens, C. L., Pilkington, H., & Russell, I. (1997). New developments in the brewing industry using immobilised yeast cell bioreactor systems. *J. Inst. Brew.*, 103, 363–370.
- McCabe, Warren; Smith, J. Harriot, P. 2007. *Operaciones Unitarias de Ingeniería Química*. 7ª ed. México D.F.: McGraw-Hill. 1211 págs.
- McCabe, W. (2015) Operaciones unitarias en ingeniería química. 7ma edición McGraw-Hill. Pp 104-135.
- Motimore, Sara; Wallace, Carol. (2001). HACCP Enfoque Práctico. Acribia. Pp 448.
- Nero, L., Beloti, V., Barros, M., Ortolani, M., Tamanini, R., & Franco, B. (2006). Comparison of Petrifilm™ Aerobic Count Plates and De Man-Rogosa-Sharpe Agar for Enumeration of Lactic Acid Bacteria. *Journal of Rapid Methods & Automation in Microbiology*, 14, 249-257.
- Netzsch. 2019. <https://bombas.netzsch.com/es/productos-accesorios/bombas-de-tornillo-excentrico-nemo/bomba-nemo-by/> [Revisado el 06/11/2019]

- Novem. (2017). Manual de ingeniería. 3ª Edición. México.
- Olmedo, F. (1965). El malteo de la cebada. 1ª Edición. Madrid, España. 4 págs.
- Olstadt, J., Schauer, J.-J., Standridge, J., & Kluender, S. (2007). A comparison of ten USEPA approved total coliform/*E. coli* tests. *Journal of Water and Health*, 267-282.
- Oregon Water Science Center. 2017. *Turbidity -- Units of Measurment*. United States Geological Service. Estados Unidos. 1 págs.
- Ortiz, M. G. (2010). Diagnóstico del proceso de fermentación con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, desde la etapa de propagación hasta la última generación cosechada, en la planta de producción de cerveza de Productora La Florida S.A. y determinación del punto crítico en el proceso para su corrección y posterior evaluación. Tesis de Licenciatura.
- Otero, M. (1989). *Proteína unicelular para el consumo humano*. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Otero, M., & Almazán, O. (2012). Las levaduras como base de una industria. Diferentes aplicaciones. Madrid: *Editorial Académica Española*.
- Palintest. (2019). ColitagTM. Obtenido de Palintest: <https://www.palintest.com/products/colitag/>
- Pascual Anderson, M., Calderón, V., & Pascual, V. (2000). Microbiología Alimentaria. Madrid: Díaz de Santo.
- Pérez, Luis. 2005. *Teoría de la sedimentación*. 1ª ed. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 25 págs.
- Pires, E. (2015). *Biochemistry of Beer Fermentation*. Springer Briefs in Biochemistry and Molecular Biology. 82 pages.
- Priest, F. (2006). *Manual de elaboración de cerveza*. Estados Unidos: Editorial Taylor y Francis. 830 págs.
- QABrewing. (2016). Controles de calidad en la cerveza. Con acceso el 6 de noviembre de 2019. Visto en: <https://qabrewer.com/controles-de-calidad-en-la-cerveza/>
- Rabin, Dan; Forget, Carl. 2013. *The Dictionary of Beer and Breewing*. 2ª ed. Nueva York: Routledge. 328 págs.

- Restrepo Morales, N., & Cardona-Castro, N. (2018). Métodos de diagnóstico en micología. *Revista CES Medicina*, 32(1), 41–52.
- Rodríguez, E. (2005). *Bacteriología General: Principios y Prácticas de Laboratorio*. Costa Rica: Ed. Universidad de Costa Rica. 475 págs.
- Rodríguez, H. (2003) Determinación de parámetros físico químicos para la caracterización de cerveza tipo Lager elaborada por compañía cervecera Kunstmann S.A. Universidad Austral de Chile.
- Ros, José. 1980. *Estabilidad Coloidal de la Cerveza*. 1ª ed. Pamplona: Laboratorio Industrial de Bioquímica. 80 págs.
- Roskamp Champion. 2019. <https://www.cpm.net/equipment/flaking-mills/fx-1600> [Revisado el 06/11/2019]
- RTCA. (2006). Industria de alimentos y bebidas procesados. Buenas prácticas de manufactura. Principios generales. RTCA 67.01.33:06.
- RTCA. (2013). Alimentos procesados. Procedimiento para otorgar el registro sanitario y la inscripción sanitaria. RTCA 67.01.31:07.
- RTCA (2017). Criterios microbiológicos para la inocuidad de los alimentos. RTCA 67.04.50:17.
- Russell, Inge. (2009). *Cerveza: una perspectiva de calidad*. Inglaterra: Editorial Elsevier. 278 págs.
- Sainz-Polo, M. A. (2013). *The three-dimensional structure of Saccharomyces invertase: role of a noncatalytic domain in oligomerization and substrate specificity*. The Journal of Biological Chemistry. 145 pages.
- Sanchis, Vicente; Marín, Sonia; Ramos, Antonio. (2002). Control de micotoxinas emergentes. Situación legislativa actual. *Rev Iberoam Micol* 17: S69-S75.
- Scharlau Microbiology. (2012). Ficha de datos técnicos: Agar Eosina-Azul de Metileno (EMB) pp 3.
- Siebert, Karl; Carrasco, A. Lynn, P. 1996. *Formation of Protein-Polyphenol Haze in Beverages*. Journal Agricultural Food Chemistry. 44: 1997-2005.

- Silva, B., Caraviello, D., Rodrigues, A., & Ruegg, P. (2005). Evaluación de Petrifilm™ de la isolación de *Staphylococcus aureus* de muestras de leche. *Journal of Dairy Science*, 88, 3000-3006.
- Skoog, D.A., Donald M. W. (2015). *Fundamentos de Química Analítica*. 9ª edición. México: Ed. Cengage Learning. 1090 págs.
- Smith, J. M.; H. C. Van Ness. (2007). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. 7ª edición. México: Ed. McGrawHil Interamericana. 816 págs.
- Solares, R. (2013). Normas DIN. Extraído de: <https://hechasexpresion.wordpress.com/2013/09/13/normas-din/>. [Fecha de consulta: 24 de agosto de 2019]
- Suárez, C.; N. A. Garrido; C.A. Guevara. (2016). *Levadura Saccharomyces Cerevisiae y la producción de alcohol*. Revisión bibliográfica ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. Vol. 50. Núm. 1. Pp. 20-28.
- Suarez, M. (2013) Cerveza: componentes y propiedades. Trabajo a fin de máster en biotecnología alimentaria. Universidad de Oviedo.
- Tapia-Villacrés, Hipatia-Silvana (2016). Estudio de la reutilización de levadura ALE (SAFALE S-04) en la fermentación de cerveza artesanal producida en Cherusker Cervecería Alemana. Universidad Tecnológica Equinoccial. Ecuador. Pp 95.
- The Beer Times. 2018 <https://www.thebeertimes.com/como-calcular-el-amargor-ibu-de-una-cerveza/> [Revisado el 08/03/2019]
- Toledano, M. (2017). *Sobre los estilos de cerveza*. <https://revistaelconocedor.com/sobre-los-estilos-de-cerveza/>. [Fecha de consulta: 25 de julio de 2019]
- Torres, J. (2006) Proceso de secado en lotes de granos de trigo en un sistema de lecho fluidizado. México. UNAM
- Tortora, G., Funke, B., & Gase, C. (2004). *Introducción a la microbiología* (Segunda ed.). Costa Rica: Editorial Médica Panamericana.
- Turc, X. (2018). *Diseño de una planta de fabricación de cerveza artesanal*. Tesis Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Barcelona: España. 76 págs.

- Universidad Nacional Autónoma de México. 2000. *Procesos de Separación*. México. D. F. Facultad de Química. 120 págs.
- Vera Rey, M. A. (2016). *Desarrollo y formulacion de cervezas artesanales*.
- Vi, Sandra. 2016. Cerveza artesanal cobra auge en Guatemala. <https://www.prensalibre.com/economia/cerveza-artesanal/>. [Consultado el 6 de noviembre de 2019].
- Watterworth, L., & Scharft, H. (2005). Enumeration of heterotroughs fecal coliforms, and *Escherichia coli* in water: comparison of 3M Petrifilm™ plates with standard planting procedures. *Journal of Microbiological Methods*, 60, 335-342.
- West Coast Brewer. 2019 <https://www.westcoastbrewer.com/brewing-terms/lovibond/> [Revisado el 20/05/2019]
- Wolrd Health Organization. (2017). WATER QUALITY AND HEALTH - REVIEW OF TURBIDITY: Information for regulators and water suppliers. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf. [Revisado el 09/19/2020]
- Yamada, E., Alvim, I., & Sgabieri, V. (2003). Composición centesimal y valor proteico de la levadura a partir de la fermentación etanólica y sus derivados. *Rev. Nutr. Campinas*, 16(4), 423-432.
- Ziemann. 2019. <https://www.ziemann-holvrieka.com/en/industries/beer/brewhouse> [Revisado el 06/11/2019]

XII. ANEXOS

A. DATOS ORIGINALES

Cuadro 72. Parámetros físicos y organolépticos del agua para proceso de fabricación de cerveza

Lote	Parámetro	Resultados					
		1 ^a Medición	Incertidumbre	2 ^a Medición	Incertidumbre	3 ^a Medición	Incertidumbre
Lote 1	Temperatura (°C)	24.30	± 0.05	24.60	± 0.05	24.80	± 0.05
	Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10
	Conductividad eléctrica (us/cm)	650.00	± 0.10	691.00	± 0.10	688.00	± 0.10
	Olor	NR ¹	NA ²	NR	NA	NR	NA
	Color Real (Pt/Co)	2.70	± 0.10	1.90	± 0.10	2.10	± 0.10
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	7.60	± 0.10	7.10	± 0.10	7.10	± 0.10
	Turbiedad (UNT ³)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30
Lote 2	Temperatura (°C)	24.10	± 0.05	24.80	± 0.05	24.30	± 0.05
	Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10
	Conductividad eléctrica (us/cm)	665.00	± 0.10	669.00	± 0.10	701.00	± 0.10

	Olor	NR	NA	NR	NA	NR	NA
	Color Real (Pt/Co)	1.80	± 0.10	2.10	± 0.10	2.02	± 0.10
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	8.20	± 0.10	8.10	± 0.10	8.20	± 0.10
	Turbiedad (UNT)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30
Lote	Parámetro	Resultados					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
Lote 3	Temperatura (°C)	24.90	± 0.05	24.10	± 0.05	24.40	± 0.05
	Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10	7.00	± 0.10
	Conductividad eléctrica (us/cm)	668.00	± 0.10	690.00	± 0.10	645.00	± 0.10
	Olor	NR	NA	NR	NA	NR	NA
	Color Real (Pt/Co)	2.10	± 0.10	2.40	± 0.10	1.80	± 0.10
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	8.80	± 0.10	7.90	± 0.10	8.10	± 0.10
	Turbiedad (UNT)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30

1. NA: No Aplica

2. NR: No Rechazable

3. UNT: Unidad Nefelométrica de Turbidez

Cuadro 73. Parámetros químicos del agua para proceso de fabricación de cerveza

	Parámetro	Resultados					
		1 ^a Medición	Incertidumbre	2 ^a Medición	Incertidumbre	3 ^a Medición	Incertidumbre
Lote 1	Calcio (mg/L)	0.03	± 0.01	0.04	± 0.01	0.03	± 0.01
	Magnesio (mg/L)	4.21	± 0.04	3.70	± 0.04	3.59	± 0.04
	Dureza total (mg/L)	4.24	± 0.04	3.81	± 0.04	3.62	± 0.04
	Cloruro (mg/L)	13.80	± 0.10	13.10	± 0.10	14.90	± 0.10
	Cloro residual (mg/L)	0.05	± 0.01	0.03	± 0.01	0.05	± 0.01
	Nitratos (mg/L)	7.90	± 0.08	8.10	± 0.08	8.10	± 0.08
	Nitritos (mg/L)	0.42	± 0.01	0.42	± 0.01	0.43	± 0.01
	Sulfatos (mg/L)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30
Lote 2	Calcio (mg/L)	0.01	± 0.01	0.05	± 0.01	0.02	± 0.01
	Magnesio (mg/L)	4.19	± 0.04	4.90	± 0.05	3.21	± 0.03
	Dureza total (mg/L)	4.20	± 0.04	4.95	± 0.05	3.23	± 0.03
	Cloruro (mg/L)	12.70	± 0.10	12.10	± 0.10	12.10	± 0.10
	Cloro residual (mg/L)	0.03	± 0.01	0.05	± 0.01	0.02	± 0.01
	Nitratos (mg/L)	8.20	± 0.08	8.10	± 0.08	8.10	± 0.08
	Nitritos (mg/L)	0.43	± 0.01	0.43	± 0.01	0.42	± 0.01
	Sulfatos (mg/L)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30

Lote	Parámetro	Resultados					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
Lote 3	Calcio (mg/L)	0.01	± 0.01	0.01	± 0.01	0.03	± 0.01
	Magnesio (mg/L)	4.78	± 0.05	4.71	± 0.05	4.72	± 0.05
	Dureza total (mg/L)	4.79	± 0.05	4.72	± 0.05	4.75	± 0.05
	Cloruro (mg/L)	12.10	± 0.10	12.10	± 0.10	13.10	± 0.10
	Cloro residual (mg/L)	0.01	± 0.01	0.01	± 0.01	0.03	± 0.01
	Nitratos (mg/L)	8.40	± 0.09	8.35	± 0.09	8.40	± 0.08
	Nitritos (mg/L)	0.47	± 0.01	0.47	± 0.01	0.46	± 0.01
	Sulfatos (mg/L)	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30	3.00	± 0.30

Cuadro 74. Parámetros microbiológicos del agua para el proceso de fabricación de cerveza

Lote	Parámetro	Resultados		
		1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición
Lote 1	Coliformes fecales (ND/100mL)	ND ²	ND	ND
	Coliformes totales (ND/100mL)	ND	ND	ND
	E. Coli (ND/100mL)	ND	ND	ND
Lote 2	Coliformes fecales (ND/100mL)	ND	ND	ND
	Coliformes totales (ND/100mL)	ND	ND	ND
	E. Coli (ND/100mL)	ND	ND	ND

Lote	Parámetro	Resultados		
		1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición
Lote 3	Coliformes fecales (ND/100mL)	ND	ND	ND
	Coliformes totales (ND/100mL)	ND	ND	ND
	E. Coli (ND/100mL)	ND	ND	ND

1. ND: No Detectable

Cuadro 75. Datos de volumen y tiempo medidos para el cálculo de caudal.

Corrida	Volumen por llenar (L)	Tiempo de llenado (s)
1	1.00 ± 0.05	2.98 ± 0.01
2	1.00 ± 0.05	2.97 ± 0.01
3	1.00 ± 0.05	2.98 ± 0.01

Cuadro 76. Intensidad lumínica de los focos de la plancha de germinado

Corrida	Intensidad directa del foco (klux)	Intensidad en la cama de cebada (klux)
1	14.80 ± 0.85	0.06 ± 0.01
2	11.70 ± 0.68	0.10 ± 0.01
3	11.74 ± 0.69	0.06 ± 0.01

Cuadro 77. Cantidad de cebada según la etapa de limpieza.

Lote de cebada	Masa inicial (kg)	Incertidumbre (kg)	Masa después de la primera separación (kg)	Incertidumbre (kg)	Masa después de la segunda separación (kg)	Incertidumbre (kg)	Masa después de la tercera separación (kg)	Incertidumbre (kg)
1	6.80	± 0.01	6.69	± 0.01	6.68	± 0.01	6.16	± 0.01
2	9.10	± 0.01	8.98	± 0.01	8.95	± 0.01	8.74	± 0.01
3	6.80	± 0.01	6.62	± 0.01	6.61	± 0.01	6.34	± 0.01
4	6.80	± 0.01	6.64	± 0.01	6.58	± 0.01	6.27	± 0.01
5	6.80	± 0.01	6.65	± 0.01	6.62	± 0.01	6.42	± 0.01

Porcentaje de humedad de la cebada según el tiempo de remojo.

Cuadro 78. Mediciones de porcentajes de humedad

Lote de cebada	Tiempo (h)	Porcentaje de humedad (%)					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
1	0	15.17	± 0.01	15.78	± 0.01	14.96	± 0.01
	24	24.11	± 0.01	24.38	± 0.01	24.72	± 0.01
	48	38.29	± 0.01	38.14	± 0.01	38.43	± 0.01
	72	46.71	± 0.01	45.29	± 0.01	45.29	± 0.01
2	0	14.11	± 0.01	15.13	± 0.01	14.74	± 0.01
	24	24.77	± 0.01	24.07	± 0.01	24.09	± 0.01
	48	37.88	± 0.01	39.01	± 0.01	39.43	± 0.01
	72	45.12	± 0.01	45.71	± 0.01	46.11	± 0.01

Lote de cebada	Tiempo (h)	Porcentaje de humedad (%)					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
3	0	15.37	± 0.01	15.68	± 0.01	14.82	± 0.01
	24	24.73	± 0.01	24.76	± 0.01	24.52	± 0.01
	48	39.46	± 0.01	38.67	± 0.01	38.33	± 0.01
	72	46.05	± 0.01	48.36	± 0.01	47.70	± 0.01
4	0	14.22	± 0.01	15.03	± 0.01	14.81	± 0.01
	24	24.36	± 0.01	24.66	± 0.01	24.15	± 0.01
	48	37.75	± 0.01	39.28	± 0.01	39.31	± 0.01
	72	46.11	± 0.01	46.01	± 0.01	46.89	± 0.01
5	0	14.58	± 0.01	15.98	± 0.01	14.79	± 0.01
	24	23.99	± 0.01	24.01	± 0.01	23.98	± 0.01
	48	38.98	± 0.01	39.66	± 0.01	40.77	± 0.01
	72	47.00	± 0.01	46.18	± 0.01	47.5	± 0.01

Cuadro 79. Largo del acrospire del grano de cebada según el tiempo de germinado

Lote de cebada	Tiempo (h)	Largo del acrospire (mm)					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
1	0	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1
	24	0.5	± 0.1	0.9	± 0.1	0.5	± 0.1
	48	2.7	± 0.1	2.5	± 0.1	2.8	± 0.1
	72	3.5	± 0.1	4.1	± 0.1	3.0	± 0.1
	96	6.2	± 0.1	6.6	± 0.1	5.7	± 0.1

Lote de cebada	Tiempo (h)	Largo del acrospire (mm)					
		1ª Medición	Incertidumbre	2ª Medición	Incertidumbre	3ª Medición	Incertidumbre
2	0	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1
	24	1.4	± 0.1	1.0	± 0.1	0.4	± 0.1
	48	2.5	± 0.1	2.8	± 0.1	2.4	± 0.1
	72	4.5	± 0.1	4.3	± 0.1	3.7	± 0.1
	96	6.8	± 0.1	6.9	± 0.1	6.1	± 0.1
3	0	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1
	24	0.5	± 0.1	0.8	± 0.1	0.5	± 0.1
	48	1.2	± 0.1	0.9	± 0.1	1.4	± 0.1
	72	1.9	± 0.1	3.7	± 0.1	2.8	± 0.1
	96	3.4	± 0.1	4.9	± 0.1	5.8	± 0.1
4	0	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1
	24	1.2	± 0.1	0.8	± 0.1	0.9	± 0.1
	48	2.4	± 0.1	2.0	± 0.1	2.5	± 0.1
	72	4.2	± 0.1	3.2	± 0.1	3.7	± 0.1
	96	5.9	± 0.1	6.9	± 0.1	6.9	± 0.1
5	0	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1	0.0	± 0.1
	24	1.2	± 0.1	0.9	± 0.1	1.1	± 0.1
	48	2.4	± 0.1	2.4	± 0.1	2.2	± 0.1
	72	4.3	± 0.1	4.7	± 0.1	4.1	± 0.1
	96	5.9	± 0.1	6.1	± 0.1	5.9	± 0.1

Cuadro 80. Cantidad de cebada al finalizar el proceso de germinado

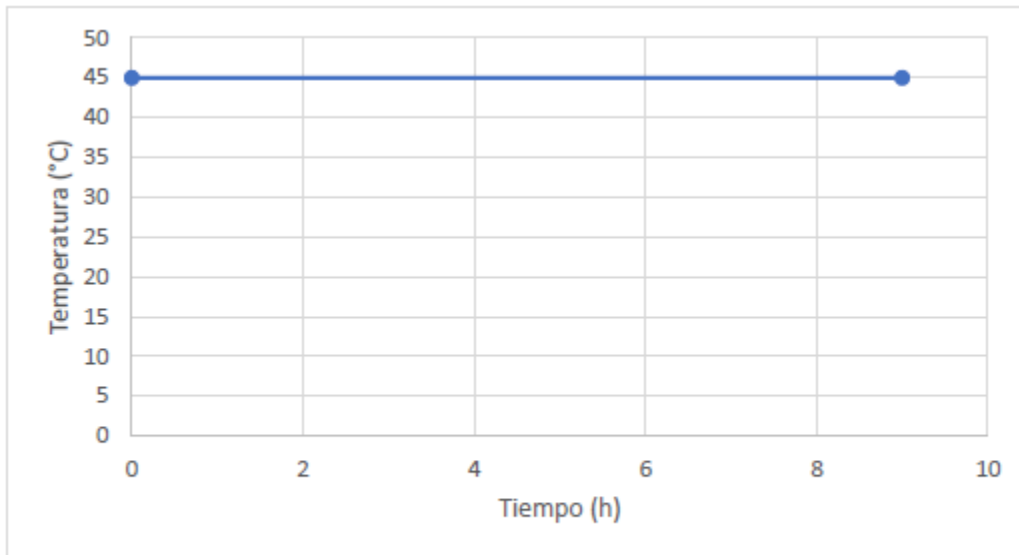
Lote de cebada	Masa de cebada germinada (kg)	Incertidumbre (kg)
1	4.91	± 0.01
2	5.42	± 0.01
3	1.10	± 0.01
4	4.93	± 0.01
5	5.97	± 0.01

Cuadro 81. Concentración de azúcares fermentables según el tiempo de germinado de cebada

Tiempo (h)	Concentración de azúcares fermentables presentes en el mosto (g/100 mL)
0	1.24
24	2.88
48	3.80
72	4.50
96	5.36
120	3.80
144	3.65

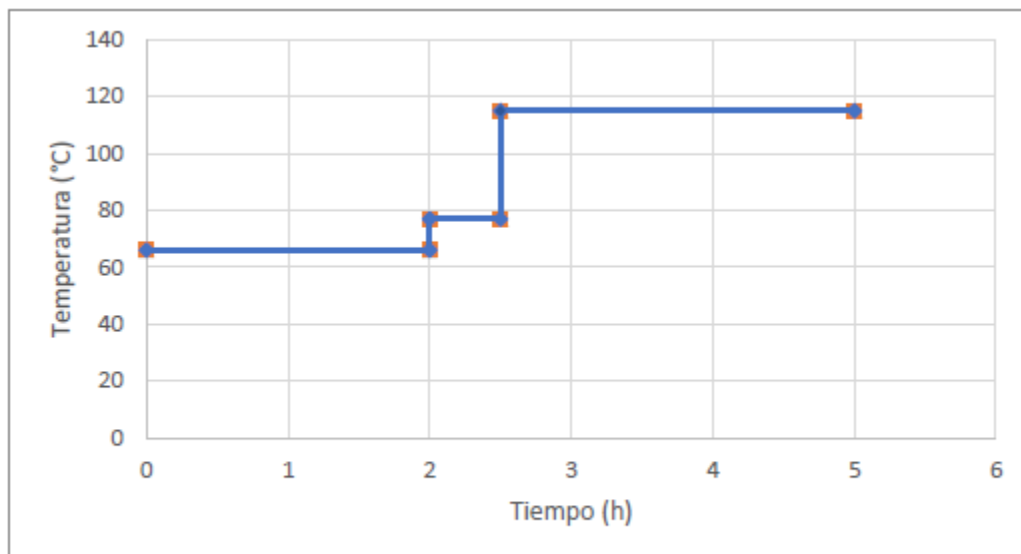
Nota: La concentración de azúcares corresponde al mosto del proceso de macerado

Figura 52. Temperatura vs tiempo en secado de malta base



Curva obtenida en el deshidratador de gabinetes a presión atmosférica de 991 mbar

Figura 53: Temperatura vs tiempo en secado y tostado de malta caramel



Curva obtenida en el deshidratador de gabinetes a presión atmosférica de 991 mbar

Cuadro 82. Perfil de temperaturas dentro del deshidratador de gabinetes

Temperatura de operación (°C)	Parte del deshidratador	Temperatura real medida (°C)
4 5	Superior	42.5
	Media	39.2
	Inferior	32.7
6 6	Superior	57.3
	Media	52.1
	Inferior	44.5
7 7	Superior	66.9
	Media	59.8
	Inferior	48.8
1 1 5	Superior	92.9
	Media	78.0
	Inferior	52.5

Cuadro 83. Tiempos de procesos involucrados en el módulo con equipos actuales

Proceso	Tiempo (h)
Secado malta base	9
Secado y tostado malta caramel	5
Molienda	1
Tamizaje	1
Maceración	1
Cocción	1

Cuadro 84. Tamaños de grano de malta

Corrida	Tamaño del grano (mm)
1	3.70
2	3.52
3	3.86
4	4.16
5	4.08
6	3.74
7	3.83
8	4.06
9	3.72
10	3.66

Medido en vernier Stanley. Midiendo longitud más corta del grano.

Cuadro 85. Humedades de maltas molidas medidas en balanza de humedad OHAUS

Lote	Humedad malta base	Masa malta base final (kg)	Humedad malta caramel	Masa malta caramel final (kg)
1	4.99%	3.64	1.54%	0.64
2	4.70%	3.80	1.38%	0.75
3	4.66%	3.68	0.9%	0.63

Programa de secado en 75°C y finalizar a un cambio de 1 mg cada 90 segundos

Cuadro 86. Porcentaje de harinas finas retiradas después de molienda en secador de rodillos

Prueba	Harinas finas de malta base	Harinas finas de malta caramel
1	1.97%	2.45%
2	1.87%	2.41%
3	2.04%	2.43%
4	1.97%	2.37%

Separación de rodillos de 2 mm y finos retirados (menores a Malla No. 100)

Cuadro 87. Condiciones de maceración

Lote	Malta base (kg)	Malta caramel (kg)	Agua de maceración (l)	Agua de lavado (l)	Gravedad específica antes de fermentar
1	3.56	0.62	12.54	12.54	1.036
2	3.94	0.73	14.00	14.00	1.056
3	3.6	0.61	12.60	12.60	1.048

Tiempo de maceración de 1 hora. Relación de agua de 3 litros/kg de malta.

Temperatura de maceración fija en 66°C. Gravedad específica medida en densímetro Better Brew ®.

Cuadro 88. Cantidades de lúpulo añadidas durante la cocción

Lote	Lúpulos	AA%	Cantidad añadida (g)	Tiempos de adición (min)	Volumen final (m ³)
1	Cascade	6	38.7945	60	0.01512
	Cascade	6	19.8621	30	
	Fuggles	3	19.9314	5	
2	Cascade	6	40.0197	60	0.01628
	Cascade	6	20.1022	30	
	Fuggles	3	19.9452	5	
3	Cascade	6	39.7814	60	0.01634
	Cascade	6	19.1478	30	
	Fuggles	3	20.0549	5	

Tiempo de cocción de 60 minutos

Cuadro 89. Desechos de producción de cerveza

Lote	Afrecho (kg)	Humedad afrecho (m/m)	Lúpulo agotado (kg)	Humedad lúpulo (m/m)
1	6.83	0.6014	0.49	0.9028
2	7.22	0.6127	0.52	0.8844
3	6.78	0.5982	0.50	0.9030

Desechos producidos por lavado de granos (afrecho) y cocción (restos de lúpulo)

Cuadro 90. Colores de cerveza final reportados

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Imagen			
Grados Lovibond	7	4	3

Ver Figura 2 para comparar con escala colorimétrica Lovibond. Ver antecedentes para encontrar rangos de color en cerveza IPA

Cuadro 91. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 1

Nombre	Concentración (g/L)
Glucosa	37.2823
Maltosa	45.4822
Sacarosa	24.2012
Fructosa	3.4332

Proporcionado por cromatografía líquido de alta resolución (HPLC). Ver metodología para ver calibración.

Cuadro 92. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 2

	Concentración (g/L)
Glucosa	36.5580
Maltosa	55.9815
Sacarosa	26.5478
Fructosa	5.2345

Proporcionado por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Ver metodología para ver calibración.

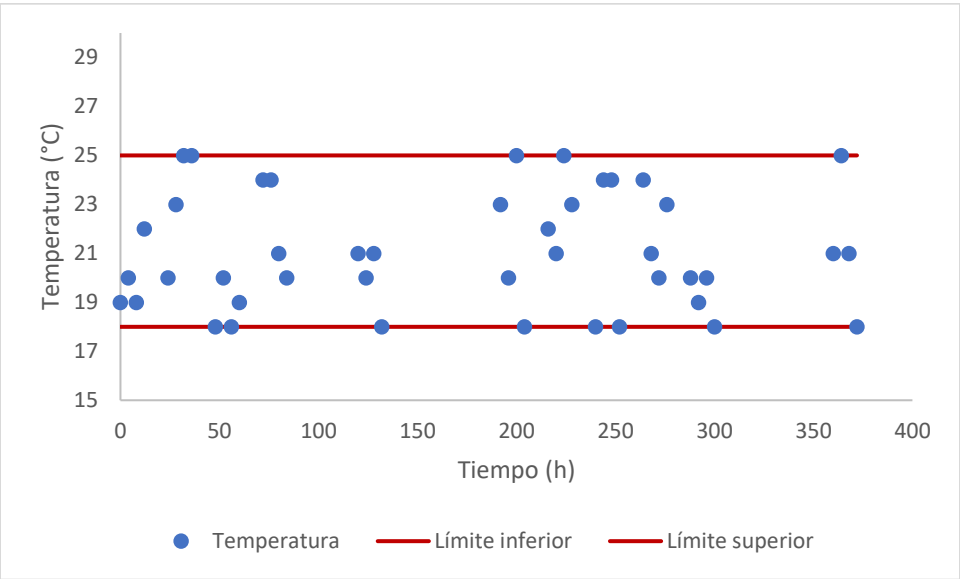
Cuadro 93. Resultados de cromatograma analizando azúcares en mosto antes de fermentar, lote 3

Nombre	Concentración (g/L)
Glucosa	35.0332
Maltosa	50.3299
Sacarosa	28.9564
Fructosa	4.3348

Proporcionado por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Ver metodología para ver calibración.

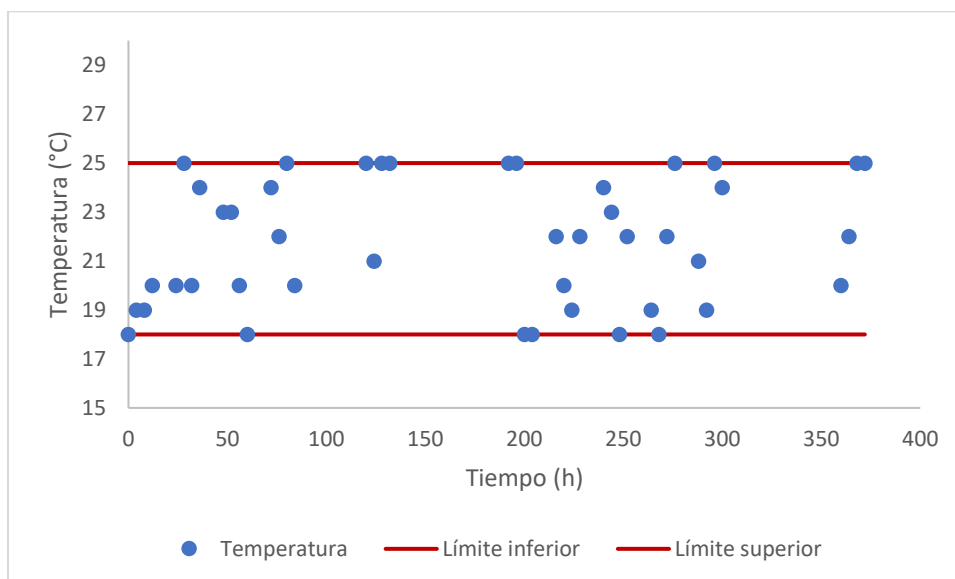
1. Corridas de fermentación de cerveza

Gráfica 17. Registro de valores de temperatura de primera corrida de fermentación



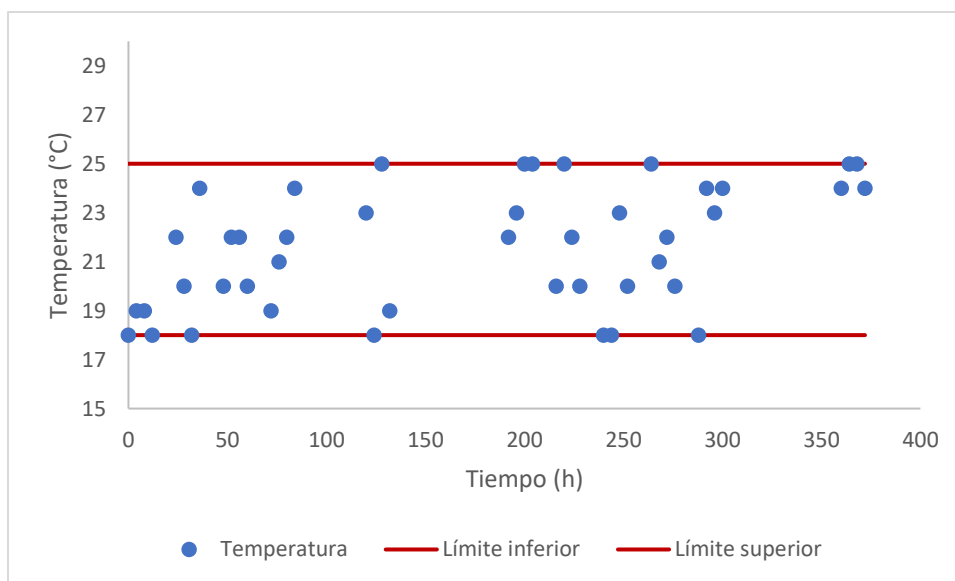
*La gráfica anterior muestra las mediciones de temperatura obtenidos cada 4 horas durante dos semanas de fermentación del mosto durante la primera corrida realizada.

Gráfica 18. Registro de valores de temperatura de segunda corrida de fermentación



*La gráfica anterior muestra las mediciones de temperatura obtenidos cada 4 horas durante dos semanas de fermentación del mosto durante la segunda corrida realizada.

Gráfica 19. Registro de valores de temperatura de tercera corrida de fermentación



*La gráfica anterior muestra las mediciones de temperatura obtenidos cada 4 horas durante dos semanas de fermentación del mosto durante la tercera corrida realizada.

Cuadro 94. Mediciones de características iniciales del mosto para la primera corrida de fermentación

No.	pH	°Brix ($\pm 0.03\%$)
1	5.952	8.93
2	5.943	8.94
3	5.942	8.94

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas previo a la primera corrida de fermentación.

Cuadro 95. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la primera corrida de fermentación cerveza

Etanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Metanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Maltosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Sacarosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Glucosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Fructosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)
0.00293	0.00000	4.54822	2.42012	3.72823	0.34332

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la primera corrida de fermentación.

Cuadro 96. Mediciones de características iniciales del mosto para la segunda corrida de fermentación.

No.	pH	°Brix ($\pm 0.03\%$)
1	5.943	11.15
2	5.951	11.66
3	5.952	11.76

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas previo a la segunda corrida de fermentación.

Cuadro 97. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la segunda corrida de fermentación cerveza

Etanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Metanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Maltosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Sacarosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Glucosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Fructosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)
1.98443	0.00000	5.59815	2.65478	3.65580	0.52345

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la primera corrida de fermentación.

Cuadro 98. Mediciones de características iniciales del mosto en tercera corrida de fermentación cerveza

No.	pH	°Brix ($\pm 0.03\%$)
1	5.732	9.41
2	5.625	9.41
3	5.545	9.42

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas previo a la tercera corrida de fermentación.

Cuadro 99. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la tercera corrida de fermentación cerveza

Etanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Metanol ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Maltosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Sacarosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Glucosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)	Fructosa ($\pm 0.00001\% \text{m/v}$)
0.04551	0.00000	5.03299	2.89564	3.50332	0.43348

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la tercera corrida de fermentación.

Cuadro 100. Mediciones de características finales del mosto para la primera corrida de fermentación

No.	pH	°Brix (±0.03%)
1	4.382	5.14
2	4.432	5.18
3	4.352	5.21

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas después de fermentar el mosto en la primera corrida.

Cuadro 101. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la primera corrida de fermentación cerveza

Etanol (±0.00001% m/v)	Metanol (±0.00001% m/v)	Maltosa (±0.00001% m/v)	Sacarosa (±0.00001% m/v)	Glucosa (±0.00001% m/v)	Fructosa (±0.00001% m/v)
2.88697	0.00389	0.00000	0.00000	0.31479	0.00000

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la primera corrida.

Cuadro 102. Mediciones de características finales del mosto para la segunda corrida de fermentación.

No.	pH	°Brix (±0.03%)
1	4.445	7.65
2	4.438	7.64
3	4.475	7.60

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas después de fermentar el mosto en la segunda corrida.

Cuadro 103. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la segunda corrida de fermentación cerveza

Etanol ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Metanol ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Maltosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Sacarosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Glucosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Fructosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)
6.50805	0.00454	0.00000	0.36277	0.66099	0.00000

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la segunda corrida.

Cuadro 104. Mediciones de características finales del mosto en tercera corrida de fermentación cerveza

No.	pH	°Brix ($\pm 0.03\%$)
1	4.521	5.83
2	4.483	5.78
3	4.474	5.79

*En el cuadro anterior se muestran las mediciones de pH y concentración de sólidos disueltos (°Brix) realizadas después de fermentar el mosto en la tercera corrida.

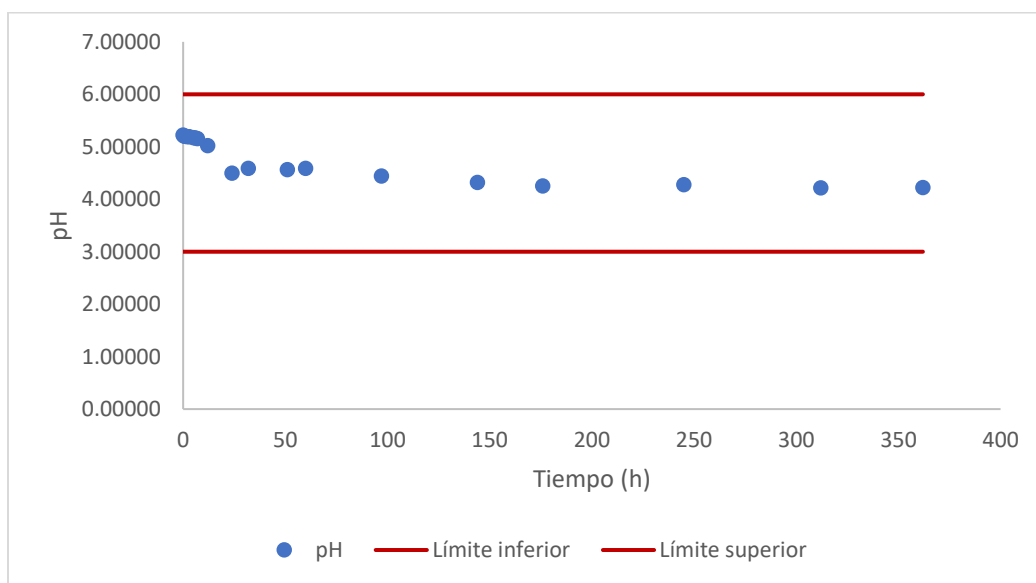
Cuadro 105. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la tercera corrida de fermentación cerveza

Etanol ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Metanol ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Maltosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Sacarosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Glucosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)	Fructosa ($\pm 0.00001\%$ m /v)
4.78203	0.00788	0.00000	1.72853	4.19212	1.77814

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de análisis de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la tercera corrida.

2. Cinética de reacción de fermentación

Gráfica 20. Comportamiento de pH del mosto en mediciones de cinética



*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento del pH durante la fermentación realizada para el estudio de la cinética de reacción.

Cuadro 106. Concentración de azúcares predominantes en el mosto de cerveza

Tiempo (h)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
0	37.0849	14.6580
0.5	31.3905	13.7793
1	31.8986	12.8794
2	33.0121	10.1664
3	29.2373	13.2685
5	24.8012	10.1988
6	10.0022	19.9998
7	9.3678	11.6701
12	2.9036	9.2674
24	0.0000	10.6572
32	0.0000	9.3726
51	0.0000	9.1590
60	0.0000	8.8787
97	0.0000	6.3708

Tiempo (h)	Maltosa (±0.0001g/L)	Sacarosa (±0.0001g/L)
144	0.0000	4.3589
176	0.0000	5.3962
245	0.0000	6.5360
312	0.0000	6.0629
362	0.0000	5.0432

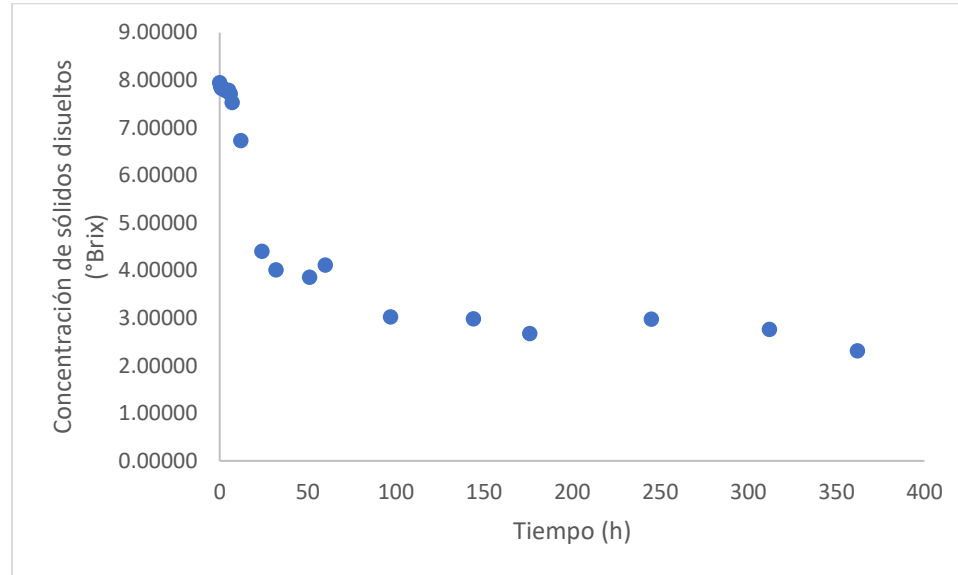
*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de azúcares predominantes en el mosto de cerveza en función del tiempo en el que se fueron analizando las muestras.

Cuadro 107. Concentración de sólidos disueltos (°Brix)

Tiempo (h)	±0.03 °Brix (%)
0	7.95
0.5	7.87
1	7.83
2	7.83
3	7.79
5	7.79
6	7.72
7	7.54
12	6.73
24	4.41
32	4.02
51	3.86
60	4.12
97	3.03
144	2.99
176	2.68
245	2.98
312	2.77
362	2.31

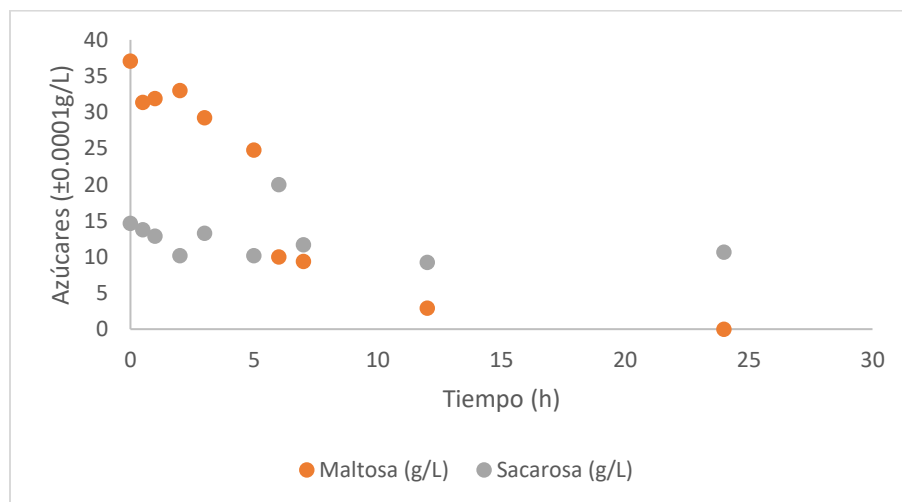
*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de sólidos disueltos (°Brix) en función del tiempo el que se fueron analizando las muestras.

Gráfica 21. Comportamiento de concentración de sólidos disueltos (°Brix)



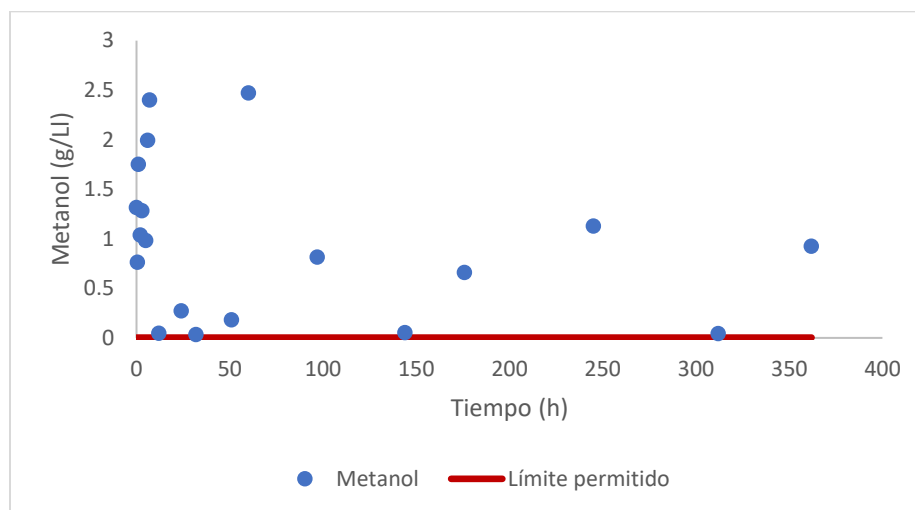
*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento de concentración de sólidos disueltos (°Brix) en función del tiempo en las muestras del estudio cinético de reacción.

Gráfica 22. Comportamiento de azúcares predominantes en el mosto de cerveza con respecto al tiempo durante la fermentación



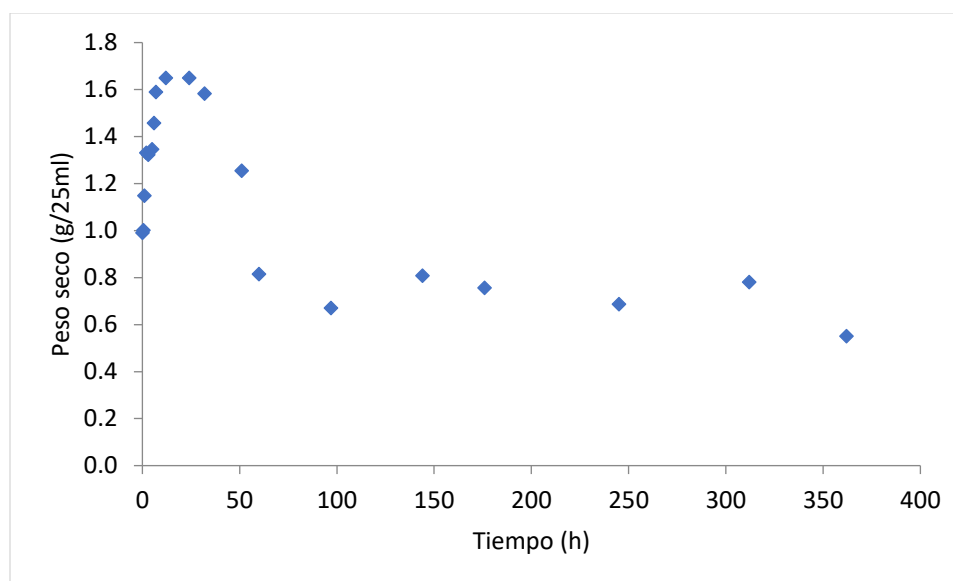
*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento de concentración de los azúcares predominantes en el mosto de cerveza en función del tiempo en las muestras del estudio de cinético de reacción.

Gráfica 23. Comportamiento de metanol con respecto al tiempo



*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento de concentración de metanol en función del tiempo en las muestras del estudio de cinético de reacción.

Gráfica 24. Comportamiento de peso seco en función del tiempo



*En la gráfica anterior, se muestra el comportamiento de peso seco de levaduras en función del tiempo. Estos datos son relevantes para la obtención de la concentración de microorganismos en las mismas unidades que los sustratos y producto principales en la reacción de fermentación.

Cuadro 108. Resultados de análisis de alcoholes y azúcares presentes

Etanol ($\pm 0.00001\%$ m/v)	Metanol ($\pm 0.00001\%$ m/v)	Maltosa ($\pm 0.00001\%$ m/v)	Sacarosa ($\pm 0.00001\%$ m/v)	Glucosa ($\pm 0.00001\%$ m/v)	Fructosa ($\pm 0.00001\%$ m/v)
0.102659	0.131681	3.708490	1.465800	0.456286	0.157638
0.166165	0.076455	3.139050	1.377930	0.780996	0.347482
0.264848	0.175360	3.189860	1.287940	0.551891	0.326631
0.517277	0.103887	3.301210	1.016640	0.216007	0.000000
0.223009	0.128552	2.923730	1.326850	0.518472	0.289856
0.241707	0.098453	2.480120	1.019880	0.583980	0.321951
0.483144	0.199445	1.000220	1.999980	0.362077	0.176749
1.260164	0.240179	0.936777	1.167010	0.253228	0.000000
1.578173	0.004856	0.290363	0.926736	0.249317	0.000000
2.224680	0.027352	0.000000	1.065720	0.000000	0.000000
2.287293	0.003567	0.000000	0.937258	0.000000	0.000000
2.366680	0.018379	0.000000	0.915898	0.000000	0.000000
2.392160	0.247319	0.000000	0.887871	0.000000	0.000000
2.409230	0.081634	0.000000	0.637080	0.000000	0.000000
2.400210	0.005347	0.000000	0.435893	0.000000	0.000000
2.432140	0.066276	0.000000	0.539623	0.000000	0.000000
2.442100	0.113070	0.000000	0.653604	0.000000	0.000000
2.460320	0.004333	0.000000	0.606286	0.000000	0.000000
2.541187	0.092739	0.000000	0.504322	0.000000	0.000000

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcoholes y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza en las muestras del estudio cinético de reacción.

Cuadro 109. Resultados de análisis de conteo de microorganismos utilizando el citómetro de flujo

No.	Corrida	Células totales ($\pm 10\%$ cel/mL)	Células viables ($\pm 10\%$ cel/mL)
0	1	1.94E+05	1.94E+05
	2	1.96E+05	1.96E+05
	3	1.95E+05	1.95E+05
1	1	4.83E+04	4.54E+04
	2	4.02E+04	3.82E+04
	3	4.00E+04	3.90E+04
2	1	8.39E+02	8.39E+02
	2	3.36E+02	3.36E+02
	3	1.17E+05	1.15E+05

No.	Corrida	Células totales (± 10% cel/mL)	Células viáveis (± 10% cel/mL)
3	1	1.89E+05	1.88E+05
	2	1.81E+05	1.81E+05
	3	1.85E+05	1.86E+05
4	1	1.03E+05	1.03E+05
	2	1.02E+05	1.02E+05
	3	1.03E+05	1.03E+05
5	1	8.95E+04	8.92E+04
	2	9.78E+04	9.76E+04
	3	1.19E+05	1.19E+05
6	1	1.65E+05	1.65E+05
	2	1.79E+05	1.79E+05
	3	1.84E+05	1.84E+05
7	1	2.08E+04	2.08E+05
	2	2.03E+05	2.03E+05
	3	2.02E+05	2.02E+05
8	1	4.23E+05	4.23E+05
	2	4.26E+05	4.25E+05
	3	4.25E+05	4.23E+05
9	1	1.20E+05	1.18E+05
	2	8.80E+05	8.65E+05
	3	4.92E+05	4.85E+05
10	1	7.99E+05	7.85E+05
	2	8.28E+05	8.16E+05
	3	8.95E+05	8.87E+05
11	1	6.53E+05	6.52E+05
	2	6.68E+05	6.67E+05
	3	6.56E+05	6.53E+05
12	1	1.18E+06	1.15E+06
	2	7.28E+05	7.28E+05
	3	2.80E+04	2.80E+04
13	1	5.34E+05	5.20E+05
	2	5.44E+05	5.28E+05
	3	5.81E+05	5.71E+05

No.	Corrida	Células totales ($\pm 10\%$ cel/mL)	Células viables ($\pm 10\%$ cel/mL)
14	1	1.16E+05	1.16E+05
	2	1.05E+06	1.05E+06
	3	4.03E+04	4.03E+04
15	1	2.29E+05	2.29E+05
	2	4.95E+05	4.95E+05
	3	3.64E+02	3.64E+02
16	1	2.42E+05	2.36E+05
	2	2.58E+05	2.54E+05
	3	2.57E+05	2.54E+05
17	1	2.48E+05	2.52E+05
	2	2.66E+05	2.60E+05
	3	2.38E+05	2.36E+05
18	1	4.23E+05	4.21E+05
	2	3.34E+05	3.32E+05
	3	2.18E+04	2.15E+04
19	1	2.95E+05	2.92E+05
	2	3.71E+04	3.67E+05
	3	2.52E+02	2.52E+02

*En el cuadro anterior se muestra los análisis realizados de conteo celular para las muestras del estudio cinético de reacción.

3. Equipos auxiliares

Cuadro 110. Tiempos de cada corrida de uso de caldera

No.	Tiempo (s)
1	258
2	210
3	306
4	309
5	309

*En el cuadro anterior se muestran los tiempos de cada corrida para cuantificación de condensados en el uso de la caldera.

4. Pruebas de funcionamiento de fermentador

Cuadro 111. Formación de producto y disminución de concentración de sólidos disueltos en prueba de fermentador disponible

Tiempo	Concentración de sólidos disueltos (°Brix)	±	Etanol (% v/v)	±
0	13.12	0.01	0.0	0.5
24	12.65	0.01	0.0	0.5
48	12.02	0.01	0.0	0.5
72	11.89	0.01	1.0	0.5
96	10.53	0.01	1.0	0.5
168	8.95	0.04	2.0	0.5

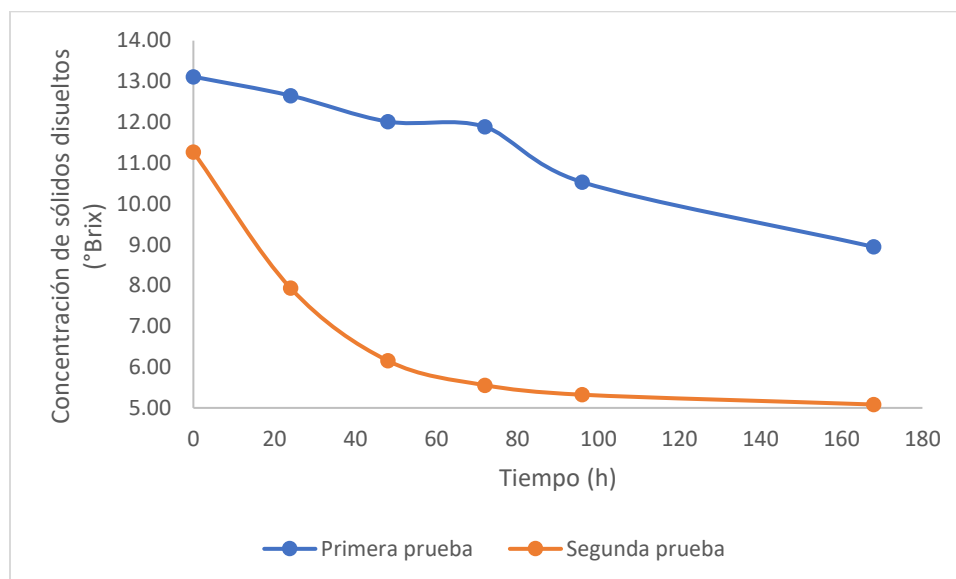
*Los datos del cuadro anterior presentan comportamiento relacionado a la fermentación de una solución al 14% m/v de sacarosa.

Cuadro 112. Formación de producto y disminución de concentración de sólidos disueltos en prueba de fermentador disponible

Tiempo	Concentración de sólidos disueltos (°Brix)	±	Etanol (%v/v)	±
0	11.27	0.03	0.0	0.5
24	7.94	0.01	0.0	0.5
48	6.16	0.02	1.0	0.5
72	5.56	0.02	2.0	0.5
96	5.32	0.02	3.0	0.5
168	5.08	0.01	3.0	0.5

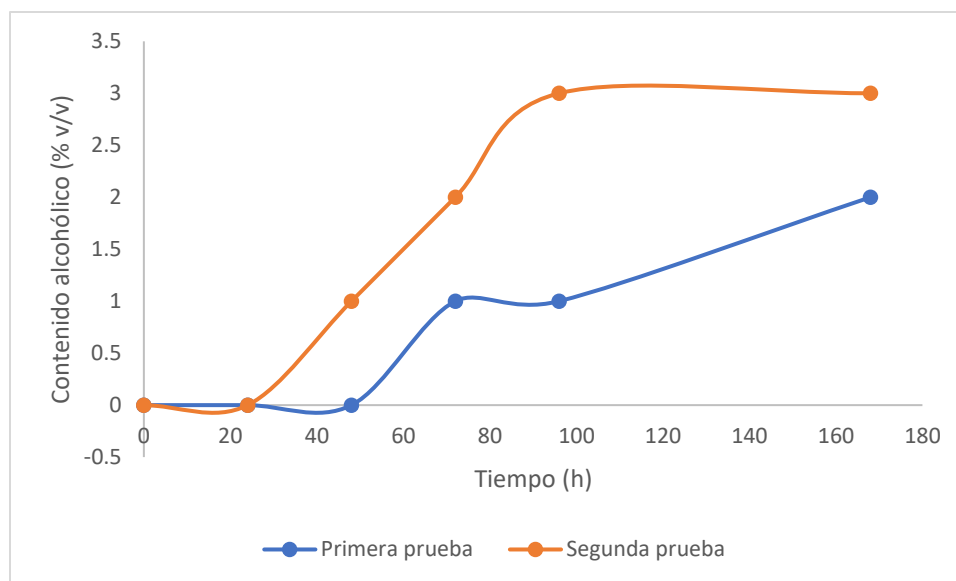
*Los datos del cuadro anterior presentan comportamiento relacionado a la fermentación de mosto de cerveza al 11 % °Brix.

Gráfica 25. Comportamiento de concentración de sólidos disueltos en prueba de funcionamiento



*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento de concentración de sólidos disueltos en función del tiempo en la primera y segunda prueba de funcionamiento del fermentador.

Gráfica 26. Comportamiento de formación de etanol en prueba de funcionamiento



*En la gráfica anterior se muestra el comportamiento de concentración de etanol en función del tiempo en la primera y segunda prueba de funcionamiento del fermentador.

Cuadro 113. Masa retenida en los filtros de papel al momento de determinar filtro a utilizar

Papel Filtro	Masa Retenida
1 micra	$0.0414 \pm 0.0001\text{g}$
5 micras	$0.0398 \pm 0.0001\text{g}$
10 micras	$0.0278 \pm 0.0001\text{g}$
20 micras	$0.0215 \pm 0.0001\text{g}$

Cuadro 114. Resultados de turbidez de la suspensión resultante de la cocción con y sin tamizaje de la malta

Sin Tamizaje	Con Tamizaje
>1000 NTU*	$980 \pm 19.66 \text{ NTU}$

Notas:

*El valor de turbidez de la suspensión resultante de la cocción, sin realizar un tamizaje de polvos finos, excedía el valor superior que el turbidímetro podía leer.

Cuadro 115. Resultados del tamizaje de cebada molida por un molino de rodillos

Tamiz N°	Corrida No. 1		Corrida No. 2		Corrida No. 3		Corrida No. 4		Porcentaje Promedio	Desviación Estándar
	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje		
20	142.4 ± 0.1	85.07%	185.9 ± 0.1	85.51%	196.8 ± 0.1	85.16%	189.2 ± 0.1	85.34%	85.27%	24.54 g
30	11.2 ± 0.1	6.69%	14.6 ± 0.1	6.72%	15.3 ± 0.1	6.62%	14.8 ± 0.1	6.68%	6.68%	1.87 g
45	7.0 ± 0.1	4.18%	6.3 ± 0.1	2.90%	6.6 ± 0.1	2.86%	6.4 ± 0.1	2.89%	3.21%	0.31 g
60	2.5 ± 0.1	1.49%	3.9 ± 0.1	1.79%	4.5 ± 0.1	1.95%	4.1 ± 0.1	1.85%	1.77%	0.87 g
80	1.2 ± 0.1	0.72%	1.6 ± 0.1	0.74%	2.0 ± 0.1	0.87%	1.8 ± 0.1	0.81%	0.78%	0.34 g
100	0.8 ± 0.1	0.48%	1.1 ± 0.1	0.51%	1.7 ± 0.1	0.74%	1.6 ± 0.1	0.72%	0.61	0.42 g
Plato	2.3 ± 0.1	1.37%	4.0 ± 0.1	1.84%	4.2 ± 0.1	1.82%	3.8 ± 0.1	1.71%	1.69%	0.87 g
Total	167.4 ± 0.1	100.00%	217.4 ± 0.1	100.00%	231.1 ± 0.1	100.00%	221.7 ± 0.1	100.00%		

Notas: Corridas de 10 minutos de tamizaje.

Cuadro 116. Resultados del tamizaje de malta mase molida por un molino de rodillos

Tamiz N°	Corrida No. 1		Corrida No. 2		Corrida No. 3		Corrida No. 4		Porcentaje Promedio	Desviación Estándar
	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje		
20	327.3 ± 0.1	82.74%	317.4 ± 0.1	83.44%	325.8 ± 0.1	82.11%	326.3 ± 0.1	84.56%	83.21%	4.58 g
30	26.8 ± 0.1	6.77%	24.8 ± 0.1	6.52%	26.0 ± 0.1	6.55%	25.7 ± 0.1	6.66%	6.63%	0.83 g
45	13.4 ± 0.1	3.39%	12.2g ± 0.1	3.21%	13.6 ± 0.1	3.43%	12.1 ± 0.1	3.14%	3.29%	0.78 g
60	12.7 ± 0.1	3.21%	12.2 ± 0.1	3.21%	15.9 ± 0.1	4.01%	7.1 ± 0.1	1.84%	3.07%	3.64 g
80	4.1 ± 0.1	1.04%	3.8 ± 0.1	1.00%	3.9 ± 0.1	0.98%	3.7 ± 0.1	0.96%	0.99%	0.17 g
100	3.5 ± 0.1	0.88%	2.9 ± 0.1	0.76%	3.5 ± 0.1	0.88%	3.4 ± 0.1	0.88%	0.85%	0.29 g
Plato	7.8 ± 0.1	1.97%	7.1 ± 0.1	1.87%	8.1 ± 0.1	2.04%	7.6 ± 0.1	1.97%	1.96%	0.42 g
Total	395.6 ± 0.1	100.00%	380.4 ± 0.1	100.00%	396.8 ± 0.1	100.00%	385.9 ± 0.1	100.00%		

Notas:

1. Corridas de 10 minutos de tamizaje

Cuadro 117. Resultados del tamizaje de malta caramel molida por un molino de rodillos

Tamiz N°	Corrida No. 1		Corrida No. 2		Corrida No. 3		Corrida No. 4		Porcentaje Promedio	Desviación Estándar
	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje		
20	451.4 ± 0.1	81.30%	445.3 ± 0.1	81.92%	447.9 ± 0.1	81.17%	449.4 ± 0.1	81.87%	81.57%	2.57 g
30	35.3 ± 0.1	6.36%	34.9 ± 0.1	6.42%	35.0g ±0.1	6.34%	34.7 ± 0.1	6.32%	6.36%	0.25 g
45	18.8 ± 0.1	3.39%	17.9 ± 0.1	3.29%	18.6 ± 0.1	3.37%	18.5 ± 0.1	3.37%	3.36%	0.39 g
60	23.0 ± 0.1	4.14%	19.9 ± 0.1	3.66%	23.8 ± 0.1	4.31%	20.5 ± 0.1	3.73%	3.96%	1.89 g
80	7.3 ± 0.1	1.31%	6.9 ± 0.1	1.27%	7.2 ± 0.1	1.30%	7.0 ± 0.1	1.28%	1.29%	0.18 g
100	5.8 ± 0.1	1.04%	5.6 ± 0.1	1.03%	5.9 ± 0.1	1.07%	5.8 ± 0.1	1.06%	1.05%	0.13 g
Plato	13.6 ± 0.1	2.45%	13.1 ± 0.1	2.41%	13.4 ± 0.1	2.43%	13.0 ± 0.1	2.37%	2.41%	0.28 g
Total	555.2 ± 0.1	100.00%	543.6 ± 0.1	100.00%	551.8 ± 0.1	100.00%	548.9 ± 0.1	100.00%		

Notas: Corridas de 10 minutos de tamizaje

Cuadro 118. Mediciones de turbidez en NTU para pruebas de sedimentación

	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
1	927 $\pm$ 18.56	508 $\pm$ 10.18	376 $\pm$ 7.54
2	920 $\pm$ 18.42	506 $\pm$ 10.14	385 $\pm$ 7.72
3	940 $\pm$ 18.82	501 $\pm$ 10.04	380 $\pm$ 7.62
4	935 $\pm$ 18.72	515 $\pm$ 10.32	383 $\pm$ 7.68
DE	8.81	5.80	3.92

Cuadro 119. Mediciones de densidad en g/mL para pruebas de sedimentación

	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
1	0.996 $\pm$ 0.014	0.988 $\pm$ 0.014	0.986 $\pm$ 0.014
2	1.001 $\pm$ 0.020	0.990 $\pm$ 0.020	0.988 $\pm$ 0.020
3	0.993 $\pm$ 0.017	0.986 $\pm$ 0.016	0.982 $\pm$ 0.016
4	0.998 $\pm$ 0.014	0.992 $\pm$ 0.014	0.989 $\pm$ 0.014
DE	0.0034	0.0025	0.0031

Cuadro 120. Mediciones de tiempo en segundos para cálculos de viscosidad en pruebas de sedimentación

	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
1	33.4 $\pm$ 0.1	29.8 $\pm$ 0.1	28.8 $\pm$ 0.1
2	33.8 $\pm$ 0.1	29.9 $\pm$ 0.1	29.1 $\pm$ 0.1
3	34.1 $\pm$ 0.1	29.8 $\pm$ 0.1	28.7 $\pm$ 0.1
4	33.9 $\pm$ 0.1	30.1 $\pm$ 0.1	29.0 $\pm$ 0.1
DE	0.294	0.141	0.183

Cuadro 121. Turbidez y densidad de la cerveza posterior al proceso de fermentación para pruebas de centrifugación

	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
Sedimentado	0.6959 ± 0.0001g	0.88 ± 0.01kg
Sobrenadante	7.4162 ± 0.0001g	8.88 ± 0.01kg

Cuadro 122. Turbidez y densidad de la cerveza posterior al proceso de fermentación para pruebas de centrifugación

Lote	Prueba	NTU	Densidad (g/mL)
1	1	928 ± 18.59	0.986 ± 0.025
	2	915 ± 18.33	1.001 ± 0.020
	3	900 ± 18.03	0.991 ± 0.017
	4	941 ± 18.85	1.000 ± 0.020
2	5	918 ± 18.38	1.001 ± 0.025
	6	956 ± 18.16	0.999 ± 0.014
	7	908 ± 18.20	0.998 ± 0.020
	8	930 ± 18.63	0.999 ± 0.025
Desviación Estándar		18.24	0.0054

Cuadro 123. Turbidez y densidad de la cerveza centrifugada por lotes

Lote	Prueba	NTU	Densidad (g/mL)
1	1	433 ± 8.59	0.912 ± 0.013
	2	400 ± 8.04	0.885 ± 0.018
	3	386 ± 8.77	0.896 ± 0.022
	4	427 ± 8.56	0.913 ± 0.030

Lote	Prueba	NTU	Densidad (g/mL)
2	5	413 ± 8.28	0.894 ± 0.022
	6	457 ± 8.18	0.881 ± 0.015
	7	416 ± 8.34	0.880 ± 0.018
	8	394 ± 7.90	0.901 ± 0.018
Desviación Estándar		23.13	0.0129

Cuadro 124. Turbidez y densidad de la cerveza centrifugada en el equipo continuo

Lote	Prueba	NTU	Densidad (g/mL)
1	1	843 ± 16.88	0.969 ± 0.024
	2	838 ± 16.80	1.000 ± 0.020
	3	795 ± 16.10	0.983 ± 0.020
	4	917 ± 18.36	0.992 ± 0.017
2	5	867 ± 17.37	0.977 ± 0.033
	6	947 ± 18.97	0.995 ± 0.020
	7	885 ± 17.73	1.001 ± 0.017
	8	879 ± 17.61	0.992 ± 0.014
Desviación Estándar		47.59	0.0113

Cuadro 125. Mediciones de turbidez en NTU en pruebas de filtración

	Inicial	Filtrado
1	931 ± 18.64	336 ± 6.74
2	925 ± 18.52	345 ± 6.92
3	928 ± 18.58	334 ± 6.70
4	921 ± 18.44	318 ± 6.38
DE	4.27	11.23

Cuadro 126. Mediciones de densidad en g/mL para pruebas de filtración

	Inicial	Filtrado
1	0.998 ± 0.020	0.992 ± 0.020
2	0.996 ± 0.020	0.989 ± 0.020
3	1.000 ± 0.014	0.996 ± 0.014
4	0.999 ± 0.017	0.993 ± 0.017
DE	0.0017	0.0029

Cuadro 127. Mediciones de tiempo en segundos para cálculos de viscosidad en filtración

	Inicial	Filtrado
1	33.6 ± 0.1	28.5 ± 0.1
2	33.5 ± 0.1	28.1 ± 0.1
3	33.8 ± 0.1	27.9 ± 0.1
4	34.0 ± 0.1	28.4 ± 0.1
DE	0.222	0.275

Cuadro 128. Masa de retenido y sobrenadante para pruebas de filtración

Retenido	Sobrenadante
0.85 ± 0.01kg	8.89 ± 0.01kg

Cuadro 129. Valores de UFC/mL obtenidos por método de Petrifilm™ 3M EC

Mx de Lote	Coliformes totales (UFC/mL)	<i>E coli</i> (UFC/mL)
Control negativo	0	0
Control positivo Dilución 1 /10	350	220
Control positivo Dilución 1 /100	2700	1300
Control positivo Dilución 1 /1000	7000	3000

Mx de Lote	Coliformes totales (UFC/mL)	<i>E coli</i> (UFC/mL)
1 Dilución 1 /10	0	0
1 Dilución 1/100	0	0
1 Dilución 1/1000	0	0
2 Dilución 1 /10	0	0
2 Dilución 1 /100	0	0
2 Dilución 1 /1000	0	0
3 Dilución 1/10	20	0
3 Dilución 1/100	100	0
3 Dilución 1/1000	0	0

*Se realizó corrección por factor de dilución

Cuadro 130. Valores de tubos positivos en método utilizando Colitag™

Mx de Lote	No. Tubos positivos
Control negativo	0
Control positivo	5
Lote 1	0
Lote 2	0
Lote 3	0

Cuadro 131. Valores de parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada lote y réplica

Mx de Lote	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)
1.1.1	5.043	123.0	296
1.1.2	5.034	122.5	327
1.1.3	5.043	122.1	319
1.2.1	5.064	126.1	306
1.2.2	5.071	124.8	324
1.2.3	5.052	126.5	342
1.3.1	4.925	127.5	333
1.3.2	4.820	126.9	363
1.3.3	4.825	126.1	335
2.1.1	4.213	173.8	334

Mx de Lote	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)
2.1.2	4.222	173.0	336
2.1.3	4.253	172.8	338
2.2.1	3.924	173.9	346
2.2.2	3.929	172.8	348
2.2.3	3.957	173.6	341
2.3.1	4.231	177.0	334
2.3.2	4.247	175.6	332
2.3.3	4.249	174.0	336
3.1.1	4.251	164.1	342
3.1.2	4.341	163.8	335
3.1.3	4.211	163.4	321
3.2.1	4.152	158.3	351
3.2.2	4.254	157.4	323
3.2.3	4.362	157.6	331
3.3.1	4.120	161.2	308
3.3.2	4.314	161.4	312
3.3.3	3.246	161.2	317

Cuadro 132. Valores obtenidos de oxígeno disuelto para 3 muestras

Mx de Lote	Oxígeno disuelto (mg/L)
1	1.1
2	1.1
3	1.1

F. CÁLCULO DE MUESTRA

Cálculo 1: Volumen de solución de hipoclorito de sodio al 0.5%, necesaria para desinfectar 35L de agua, a una dosis de $2.50 \frac{mg}{L}$

$$V_{NaOCl} = \frac{35.00L * 2.50 \frac{mg}{L}}{5.00 \times 10^3 \frac{mg}{L} * 10.00} = 1.80 \times 10^{-3} \text{ L de Solución de NaOCl}$$

Cálculo 2: Determinación del caudal de salida de la tubería de los filtros.

$$Q = \frac{1.00 \text{ L}}{2.98 \text{ s}} = 0.33 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Nota:

2. Se utilizó el mismo procedimiento para las demás corridas.

1. Se utilizó el mismo cálculo para determinar los caudales a utilizar para los distintos equipos de acondicionamiento de agua.

Cálculo 3: Determinación del diámetro del filtro de sedimentos.

$$D = \left(\sqrt{\frac{5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}}{10.00 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \text{ft}^2 * \pi}} \right) * 2 = 0.82 \text{ ft}$$

Nota: Se utilizó el mismo cálculo para determinar el diámetro del filtro de columna de carbón activado.

Cálculo 4: Determinación de área del filtro de sedimentos.

$$A = \left(\frac{(0.82 \text{ ft})^2}{4} \right) * \pi = 0.53 \text{ ft}^2$$

Nota: Se utilizó el mismo cálculo para determinar el área del filtro de columna de carbón activado.

Cálculo 5: Determinación del flujo de retrolavado del filtro de sedimentos.

$$FR = 0.53 \text{ ft}^2 * 15.0 \frac{\text{gal}}{\text{min} * \text{ft}^2} = 7.95 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

Nota: Se utilizó el mismo cálculo para determinar el flujo de retrolavado del filtro de columna de carbón activado.

Cálculo 6: Cantidad de impurezas removidas en la primera etapa del proceso de limpieza.

$$I_{1-E} = 6.80 \text{ kg} - 6.69 \text{ kg} = 0.11 \text{ kg}$$

Nota: Se utilizó el mismo procedimiento para los demás lotes de cebada.

Cálculo 7: Cantidad de impurezas removidas en la segunda etapa del proceso de limpieza.

$$I_{2-E} = 6.69 \text{ kg} - 6.68 \text{ kg} = 0.01 \text{ kg}$$

Nota: Se utilizó el mismo procedimiento para los demás lotes de cebada.

Cálculo 8: Cantidad de impurezas removidas en la tercera etapa del proceso de limpieza.

$$I_{3-E} = 6.68 \text{ kg} - 6.16 \text{ kg} = 0.01 \text{ kg}$$

Nota: Se utilizó el mismo procedimiento para los demás lotes de cebada.

Cálculo 9: Porcentaje de conversión de cebada en el proceso de germinado.

$$R = \left(\frac{4.91 \text{ kg}}{6.16 \text{ kg}} \right) * 100 = 79.71 \%$$

Nota: Se utilizó el mismo procedimiento para los demás lotes de cebada.

Cálculo 10: Balance de energía de secado de malta y maceración de granos

Cálculo de consumo energético de equipos

- Deshidratador de gabinetes

$$P = \frac{E}{t}$$

$P = potencia (W)$

$E = energía (J)$

$t = tiempo (s)$

$$P_{a\ 45^{\circ}C} = (26060kWh - 26057kWh) * \left(\frac{1}{42min}\right) * \left(\frac{60min}{1h}\right) = 4.29kW$$

Secado de malta base

$$E = P * t$$

$$E = (4.26kW) * 9h = 38.34 kWh$$

$$E = 38.34 kWh * \left(\frac{3600s}{1h}\right) = 138024 kJ$$

Secado de malta caramel

$$E = P * t$$

$$E = (5.45kW) * 2h = 10.9 kWh$$

$$E = (7.50kW) * 0.5h = 3.75 kWh$$

$$E = (12.0kW) * 2.5h = 30 kWh$$

$$E_{total} = 10.9 + 3.75 + 30 = 44.66 kWh$$

$$E_{total} = 44.66 kWh * \left(\frac{3600s}{1h}\right) = 160776 kJ$$

Secador de rodillos

Velocidad de 30.8rpm

$$P = V * I$$

$$P = \text{potencia (W)}$$

$$V = \text{voltaje (V)}$$

$$I = \text{corriente (A)}$$

$$P = (1.4 \text{ A}) * (220 \text{ V}) = 308 \text{ W}$$

Duración de proceso de 1 hora para moler malta base

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

Duración de proceso de 0.17h para moler malta caramel

$$E = (308 \text{ W}) * (0.17 \text{ h}) = 55 \text{ Wh} * \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} \right) = 198 \text{ kJ}$$

Tamiz Rotap

Potencia Tamiz Rotap

$$P = (5 \text{ A}) * (120 \text{ V}) = 600 \text{ W}$$

$$E = P * t$$

Duración de proceso para malta base.

Capacidad Tamiz Rotap: 450g y 5 minutos de duración.

$$\frac{3.7 \text{ kg}}{0.45 \text{ kg}} = 8.37 \text{ veces} = 9 \text{ veces}$$

$$9 * 5 \text{ min} = 45 \text{ min}$$

Energía consumida

$$E = P * t = 600 \text{ W} * 45 \text{ min} * \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) = 450 \text{ Wh}$$

$$E = 450 \text{ Wh} * \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} \right) = 1620 \text{ kJ}$$

Cuadro 133. Consumo de energía en el deshidratador de gabinetes según temperatura de operación

Tiempo (min)	Contador de energía inicial (kWh)	Contador de energía final (kWh)	T(°C)	P (kW)
42	26,057	26,060	45	4.29
44	26,060	26,064	66	5.45
40	26,064	26,069	77	7.50
40	26,069	26,077	115	12.00

Potencia calculada midiendo consumo energético en determinado tiempo, cambiando la temperatura de operación.

Duración de proceso para malta caramel

Capacidad Tamiz Rotap: 450g y 5 minutos de duración.

$$\frac{0.65kg}{0.45kg} = 1.44 \text{ veces} = 2 \text{ veces}$$

$$2 * 5min = 10 min$$

Energía consumida

$$E = P * t = 600W * 10min * \left(\frac{1h}{60min}\right) = 100Wh$$

$$E = 100 Wh * \left(\frac{3600s}{1h}\right) * \left(\frac{1kJ}{1000J}\right) = 360 kJ$$

Producción de 16 litros de mosto

Maceración

Calculado para una producción final de 35 litros de mosto cocido

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

$$Q_{pérdidas} = h * A * (\Delta T)$$

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

$$A = \text{área superficial, } m^2$$

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

* Pérdidas de calor por convección natural

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

Nu = número adimensional de Nusselt

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

D = diámetro, m

k = 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 = número adimensional de Prandtl

Gr = número adimensional de Grasshof

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

Lc = Largo característico, m

β = coeficiente de expansión volumétrica, $1/K$

ΔT = gradiente de temperatura, $^\circ C$

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

Para un cilindro (olla empleada)

$$L_c = \text{Diámetro}$$

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

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

$$Gr = \frac{(0.345m)^3 * \left(\frac{1}{15 + 273.15}\right) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) * (66^\circ C - 15^\circ C)}{\left(1.470 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2}$$

$$Gr = 3.3 * 10^8$$

$$Ra_L = (3.3 * 10^8) * (0.7296) = 2.41 * 10^8$$

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

$$D = 0.345 \text{ m}$$

$$\frac{35L}{Gr_L^{0.25}} = \frac{35 * (0.34 \text{ m})}{(3.3 * 10^8)^{0.25}} = 0.088 \text{ m}$$

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

$$Nu = 0.59(2.41 * 10^8)^{0.25} = 73.5$$

$$h = k \cdot \frac{Nu}{D} = \frac{\left(0.02476 \frac{W}{m \cdot K}\right) \cdot 73.5}{0.34 \text{ m}} = 5.27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

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

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

$$\pi = \text{número pi, 3.1416}$$

$$D = \text{diámetro cilindro}$$

$$L = \text{largo del cilindro}$$

$$A_{cilindro} = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot (0.345 \text{ m}) \cdot (0.34 \text{ m}) = 0.37 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{pérdidas} = \left(5.27 \frac{W}{m^2 \cdot K}\right) \cdot (0.37 \text{ m}^2) \cdot (66^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 99.45 \text{ W}$$

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

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

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

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

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

Masa olla peltre: 3 kg

$$\begin{aligned} Q_{requerido} &= (13 \text{ kg}) \left(4.187 \frac{kJ}{kg} ^\circ\text{C}\right) (66^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) + (4.35 \text{ kg}) \left(1.674 \frac{kJ}{kg} ^\circ\text{C}\right) (66^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) \\ &\quad + (3 \text{ kg}) \left(\frac{0.456 kJ}{kg} ^\circ\text{C}\right) (66^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 3217.13 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Calor en aproximadamente media hora

$$\dot{Q}_{requerido} = \frac{3217.13 \text{ kJ}}{0.5 \text{ h}} \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 1.79 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{real} = 1.79 \text{ kW} + 0.099 \text{ kW} = 1.89 \text{ kW}$$

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

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

$$Q_{real} = 3217.13 kJ + 99 W \left(\frac{1 \frac{J}{s}}{1 W} \right) * 1.5 h * \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) * \left(\frac{1 kJ}{1000 J} \right) = 3217.7 kJ$$

Energía en lavado de granos. Calculado igual que en maceración.

$$\begin{aligned} Q_{requerido} &= (13 kg) \left(4.187 \frac{kJ}{kg} ^\circ C \right) (75^\circ C - 15^\circ C) + (3 kg) \left(\frac{0.456 kJ}{kg} ^\circ C \right) (75^\circ C - 15^\circ C) \\ &= 3347.94 kJ \end{aligned}$$

Calor en la cocción

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

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

$$\dot{Q}_{p\acute{e}rdidas} = 177 W$$

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

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

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

Mosto de 10 °Brix

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

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

$$\begin{aligned}
Q_{requerido,sensible} &= m * Cp * (\Delta T)(mosto) + mCp\Delta T(metal) \\
&= 23kg * \left(3.93 \frac{kJ}{kg * ^\circ C}\right) * (96^\circ C - 66^\circ C) + (3 kg) \left(\frac{0.456kJ}{kg} ^\circ C\right) (96^\circ C - 66^\circ C) \\
&= 2752.7 kJ
\end{aligned}$$

Asumiendo media hora para cambio de temperatura sensible

$$\begin{aligned}
Q_{requerido,sensible} &= \frac{2752.7 kJ}{0.5 h} \left(\frac{1 h}{3600 s}\right) = 1.53 kW \\
Q_{real,sensible} &= 1.53 kW + 0.177 kW = 1.706 kW
\end{aligned}$$

Para esta producción sería necesario evaporar hasta 5.5 kg de agua.

$$\begin{aligned}
Q_{latente} &= m\lambda_{vap} \\
Q_{latente} &= \text{calor latente de cambio de fase, J} \\
m &= \text{masa, kg} \\
\lambda_{vap} &= \text{calor de vaporización, J/kg}
\end{aligned}$$

$$Q_{requerido,latente} = m\lambda_{vap} = 5.5kg * \frac{2257kJ}{kg} = 12414 kJ$$

Tiempo de cocción de 1 hora

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_{requerido,latente} &= \frac{12414 kJ}{1 h} \left(\frac{1 h}{3600 s}\right) = 3.45 kW \\
\dot{Q}_{real,latente} &= 3.45 kW + 0.177kW = 3.63 kW
\end{aligned}$$

Energía consumida en cocción

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

$$Q_{real} = 0.177kW * (1.5 h) * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right) + 12414kJ + 2752.7kJ = 16123 kJ$$

Cálculo 11: Amargor de cerveza con ecuación Rager

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

Leyendo porcentaje de utilización en el Cuadro No. 6

$$IBU = \frac{38.7945g * (6\%) * 30}{(15.12 l) * (1) * (10)} = 46.18$$

$$IBU = \frac{19.8621g * (6\%) * 24}{(15.12 l) * (1) * (10)} = 18.92$$

$$IBU = \frac{19.9314g * (3\%) * 6}{(15.12 l) * (1) * (10)} = 2.37$$

$$IBU \text{ total} = 46 + 19 + 2 = 67.47 IBU$$

Cálculo 12: Volumen disponible en tanque de planta piloto

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

π = número pi, 3.1416
 D = diámetro interno del tanque, m
 h = altura del tanque, m

$$V_{tanque} = \frac{\pi D^2 h}{4} = \frac{\pi (0.57m)^2 (1m)}{4} = 0.255 m^3 = 255 l$$

Cálculo 13: Volumen disponible en tanque de fermentación

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

π = número pi, 3.1416
 D = diámetro interno del tanque, m
 h = altura del tanque, m

$$V_{tanque} = \frac{\pi D^2 h}{4} = \frac{\pi (0.48m)^2 (0.32m)}{4} = 0.057 m^3 = 57 l$$

Cálculo 14: Volumen de tanque de maceración recomendado

$$V_{fondo\ cónico} = \frac{\pi h(r_1 - r_2)^3}{3 * (r_1 - r_2)}$$

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

$$V_{total} = V_{tanque} + V_{fondo\ cónico}$$

$$V_{fondo\ cónico} = \frac{\pi * 0.145m * (0.285m - 0.0096m)^3}{3 * (0.285m - 0.0096m)} = 0.013\ m^3$$

$$V_{tanque} = \frac{\pi * (0.57m)^2 * 0.7m}{4} = 0.179\ m^3$$

$$V_{total} = 0.013m^3 + 0.179m^3 = 0.191\ m^3$$

Filtro Lauter de igual volumen

Cálculo 15: Volumen de tanque sedimentador Whirlpool recomendado

$$V_{fondo\ cónico} = \frac{\pi h(r_1 - r_2)^3}{3 * (r_1 - r_2)}$$

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

$$V_{total} = V_{tanque} + V_{fondo\ cónico}$$

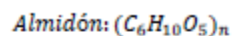
$$V_{fondo\ cónico} = \frac{\pi * 0.25m * (0.285m - 0.0096m)^3}{3 * (0.285m - 0.0096m)} = 0.022\ m^3$$

$$V_{tanque} = \frac{\pi * (0.57m)^2 * 0.6m}{4} = 0.153\ m^3$$

$$V_{total} = 0.022m^3 + 0.153m^3 = 0.175\ m^3$$

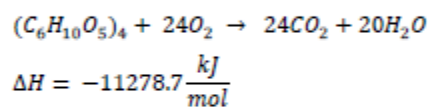
Cálculo 16: Calor de reacción en conversión de almidón en azúcares

Cálculo del calor de reacción de conversión de almidón en azúcares



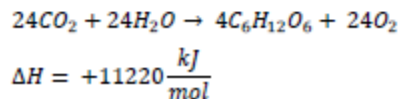
Calor de combustión del almidón

Se asume cadena de almidón con $N = 4$

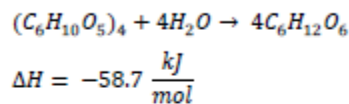


Calor de combustión glucosa

Se asume conversión en principalmente glucosa



Sumando ecuaciones, según ley de Hess



Energía liberada

Asumiendo reservas de 0.6kg de almidón en el grano de malta y conversión total en glucosa. Asumiendo forma de almidón de $(C_6H_{10}O_5)_4$

$$4.35 \text{ kg malta} * \left(\frac{0.60 \text{ kg almidón}}{1 \text{ kg malta}} \right) * \left(\frac{1000g}{1 \text{ kg}} \right) * \left(\frac{1mol}{4 * 162g} \right) = 4.03 \text{ kJ}$$

Cálculo 17: Demanda térmica en planta piloto

Calculado para una producción final de 35 litros de mosto cocido, utilizando tanque de 0.255 m³ en planta piloto

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

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

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

$$A = \text{área superficial, } m^2$$

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

Pérdidas de calor por convección natural

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

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

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

$$D = \text{diámetro, } m$$

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

Número de Rayleigh

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

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

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

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

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

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

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

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

Para un cilindro

$$L_c = \text{Diámetro}$$

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

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

Datos del aire a 15°C

$$Gr = \frac{(0.57m)^3 * \left(\frac{1}{15 + 273.15}\right) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) * (66^\circ C - 15^\circ C)}{\left(1.470 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2}$$

$$Gr = 1.49 * 10^9$$

$$Ra_L = (1.49 * 10^9) * (0.7296) = 1.09 * 10^9$$

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

$$D = 0.57 \text{ cm}$$

$$\frac{35L}{Gr_L^{0.25}} = \frac{35 * (1 \text{ m})}{(1.49 * 10^9)^{0.25}} = 0.178 \text{ m}$$

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

$$Nu = 0.59(1.09 * 10^9)^{0.25} = 107.09$$

$$h = k * \frac{Nu}{D} = \frac{\left(0.02476 \frac{W}{m * K}\right) * 107.09}{0.57 \text{ m}} = 4.65 \frac{W}{m^2 * K}$$

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

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

$$\pi = \text{número pi, 3.1416}$$

$$D = \text{diámetro cilindro}$$

$$L = \text{largo del cilindro}$$

$$A_{cilindro} = \pi * D * L = \pi * (0.57m) * (1m) = 1.79 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{p\acute{e}rdidas} = \left(5.42 \frac{W}{m^2 * K}\right) * (1.79m^2) * (66^{\circ}C - 15^{\circ}C) = 424 W$$

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

$$m = masa, kg$$

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

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

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

Espesor de tanque de acero inoxidable de 1mm

$$m = \left(7.860 \frac{kg}{m^2}\right) * \left(\pi DL + \frac{\pi D^2}{4}\right) = \left(7860 \frac{kg}{m^2}\right) * \left(\pi(0.57m)(1m) + \frac{\pi(0.57m)^2}{4}\right) = 16.08 kg$$

$$\begin{aligned} Q_{requerido} &= (58.5 kg) \left(4.187 \frac{kJ}{kg} ^{\circ}C\right) (66^{\circ}C - 15^{\circ}C) + (9.75 kg) \left(1.674 \frac{kJ}{kg} ^{\circ}C\right) (66^{\circ}C - 15^{\circ}C) \\ &+ (16.08 kg) \left(\frac{0.456kJ}{kg} ^{\circ}C\right) (66^{\circ}C - 15^{\circ}C) = 13,698.27 kJ \end{aligned}$$

Calor en aproximadamente media hora

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{requerido} &= \frac{13,698.27 kJ}{0.5 h} \left(\frac{1h}{3600 s}\right) = 7.61 kW \\ \dot{Q}_{real} &= 7.61kW + 0.424kW = 8.03 kW \end{aligned}$$

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

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

$$Q_{real} = 13,698.27kJ + 424 W \left(\frac{1 J/s}{1 W}\right) * 1.5 h * \left(\frac{3600 s}{1 h}\right) * \left(\frac{1 kJ}{1000 J}\right) = 15,987.87 kJ$$

Calor en la cocción

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

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

$$\dot{Q}_{p\acute{e}rdidas} = 882 \text{ W}$$

$$Q_{p\acute{e}rdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

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

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

Mosto de 10 °Brix

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

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

$$Q_{requerido,sensible} = m * Cp * (\Delta T)(mosto) + mCp\Delta T(metal)$$

$$\begin{aligned} &= 51kg * \left(3.93 \frac{kJ}{kg * ^{\circ}C} \right) * (96^{\circ}C - 66^{\circ}C) + (16.08 \text{ kg}) \left(\frac{0.456 \text{ kJ}}{kg} ^{\circ}C \right) (96^{\circ}C - 66^{\circ}C) \\ &= 6,232.87 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Asumiendo media hora para cambio de temperatura sensible

$$Q_{requerido,sensible} = \frac{6,232.87 \text{ kJ}}{0.5 \text{ h}} \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 3.46 \text{ kW}$$

$$Q_{real,sensible} = 3.46 \text{ kW} + 0.882 \text{ kW} = 4.342 \text{ kW}$$

Para esta producción sería necesaria evaporar hasta 10 kg de agua.

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

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

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

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

$$Q_{requerido,latente} = m\lambda_{vap} = 10kg * \frac{2257kJ}{kg} = 22,570 kJ$$

Tiempo de cocción de 1 hora

$$\dot{Q}_{requerido,latente} = \frac{22,570 kJ}{1 h} \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) = 6.27 kW$$

$$\dot{Q}_{real,latente} = 6.27 kW + 0.882kW = 7.152 kW$$

Energía consumida en cocción

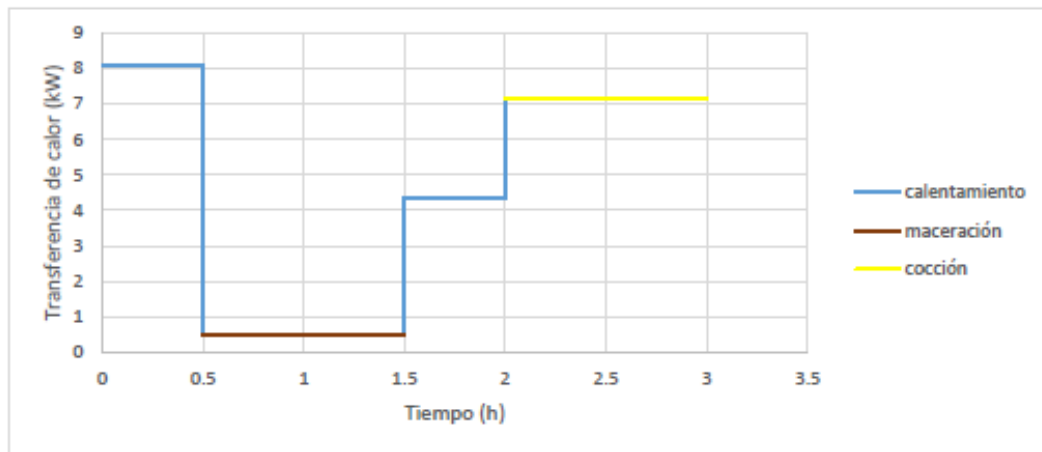
$$Q_{pérdidas} + Q_{requerido} = Q_{real}$$

$$Q_{real} = 0.882kW * (1.5 h) * \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) + 22,570kJ + 6,232.87kJ = 33,565.67 kJ$$

Energía consumida en maceración y cocción

$$Q_{real} = 16,371.27 kJ + 33,565.67 kJ = 49,936.94 kJ$$

Figura 54: Demanda térmica con respecto al tiempo durante proceso de maceración y cocción



Calentamiento por medio de vapor

$$\dot{Q}_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \lambda_{\text{vap}}$$

Entalpía de vapor proporcionado por vapor de la caldera del laboratorio a 652.6 kPa (80 psig)

$$\lambda_{\text{vap}} = 1884.78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

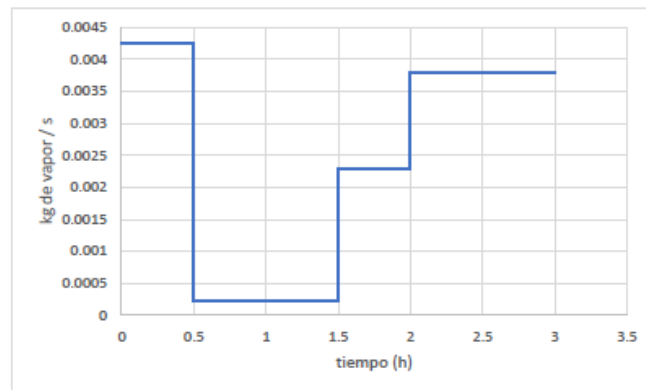
$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{vapor}}}{\lambda_{\text{vap}}}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \text{flujo másico de vapor}, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{\text{vapor}} = \text{calor cedido por el vapor}, W$$

$$\lambda_{\text{vap}} = \text{entalpía de vaporización}, \frac{J}{\text{kg}}$$

Figura 55: Demanda de vapor de caldera durante la maceración y cocción con uso de vapor del laboratorio de operaciones unitarias con entalpía de vaporización de 1884.78 kJ/kg



Para un cilindro

$$L_c = \text{Diámetro}$$

$$D_{\text{nominal}} = \frac{1''}{2}$$

$$D_{\text{externo}} = 0.840 \text{ pig} * \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ pig}} \right) * \left(\frac{1 \text{ m}}{3.281 \text{ ft}} \right) = 0.021 \text{ m}$$

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

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

Utilizando datos de agua

$$Gr = \frac{(0.021 \text{ m})^3 * \left(\frac{1}{15 + 273.15} \right) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * (162^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})}{\left(\frac{1.138 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}}{999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^2}$$

$$Gr = 3.75 * 10^7$$

$$Ra_L = (3.75 * 10^7) * (8.09) = 3.03 * 10^8$$

$$Nu = 0.59(3.03 \times 10^8)^{0.25} = 77.86$$

$$h = k \frac{Nu}{D} = \frac{\left(0.589 \frac{W}{m \cdot K}\right) * 77.86}{0.021 m} = 2,149.63 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Asumiendo largo de serpentín de 0.6m

$$A_{cilindro} = \pi * D * L = \pi * (0.021m) * (0.6m) = 0.04 m^2$$

$$\dot{Q}_{serpentín} = \left(2,149.63 \frac{W}{m^2 \cdot K}\right) * (0.04m^2) * (162.14^\circ C - 15^\circ C) = 12,720 W = 12.72kW$$

Lo cual suple la necesidad térmica para la producción actual con un sobre diseño del 50%.

En cocción

Ebullición en película

Según Cengel:

$$q_{película} = C_{película} \left[\frac{g k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0.4 c_{pv} (T_s - T_{sat})]}{\mu_v D (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} (T_s - T_{sat})$$

$C_{película} = 0.62$ para cilindros horizontales

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

$k_v =$ conductividad térmica del vapor, $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$\rho_v =$ densidad del vapor, kg/m^3

$\rho_l =$ densidad del líquido, kg/m^3

$h_{fg} =$ entalpía de vaporización, J/kg

$c_{pv} =$ calor específico del vapor, $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

$T_s =$ temperatura superficial del calentador, $^\circ C$

$T_{sat} =$ temperatura de saturación del fluido, $^\circ C$

$\mu_v =$ viscosidad del vapor, $\frac{kg}{m \cdot s}$

$D =$ diámetro, m

Datos usados a temperatura de película

$$T_{film} = \frac{T_{sat} + T_s}{2}$$

$$T_{film} = \frac{162 + 96}{2} = 129^\circ C$$

Utilizando datos del agua

$$q_{pelicula} = 0.62 *$$

$$\left[\frac{9.8 \frac{m}{s^2} \left(0.0288 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)^3 1.496 \frac{kg}{m^3} \left(961.5 \frac{kg}{m^3} - 1.496 \frac{kg}{m^3} \right) \left[2.174 * \frac{10^6 J}{kg} + 0.4 \left(2177 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right) (162^\circ C - 96^\circ C) \right]}{\left(1.33 * \frac{10^{-5} kg}{m \cdot s} \right) * 0.021 m * (162^\circ C - 96^\circ C)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$* (162^\circ C - 96^\circ C) = 18,312 \frac{W}{m^2} = 18.3 \frac{kW}{m^2}$$

$$q_{max} = 8.03 kW$$

$$A = \frac{8.03 kW}{18.3 \frac{kW}{m^2}} = 0.439 m^2$$

$$L = \frac{A}{\pi * D} = \frac{0.439 m^2}{3.1416 * 0.021 m} 6.5 m$$

Cálculo de serpentín

$$diámetro tubo = 0.021 m$$

$$vueltas: 5$$

$$diámetro de vueltas: 0.5 m$$

$$A = \pi * D * L = 3.1416 * (0.021 m) * (0.5 m * 3.1416 * 5) = 0.518 m^2$$

Cálculo 18: Cálculo de bomba

Punto A: nivel de agua en tanque agitado

Punto B: entrada de fermentador

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZa}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} + \eta Wp = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

$$\eta Wp = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f - \left(\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZa}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} \right)$$

$$P_A = \text{Presión en el punto A, } \frac{N}{m^2}$$

$$\rho_A = \text{densidad del fluido en el punto A, } \frac{kg}{m^3}$$

$$Za = \text{altura en el punto A, m}$$

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

$$g_c = \text{factor de corrección, 1 para el sistema internacional}$$

$$\alpha_A = \text{coeficiente de flujo, 1 para flujo turbulento}$$

$$V = \text{velocidad lineal del fluido, } \frac{m}{s}$$

$$\eta = \text{eficiencia de la bomba}$$

$$Wp = \text{trabajo de la bomba, } \frac{J}{kg}$$

$$h_f = \text{pérdidas por fricción, } \frac{J}{kg}$$

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZa}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} + \eta Wp = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZa}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} + \eta Wp = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

Tomando de referencia el punto A los valores del mismo se asumen de 0. La presión del punto A (tanque agitado) y punto B (fermentador) se asumen atmosféricas por lo que su resta se asume como 0.

$$\eta Wp = \cancel{\frac{P_B}{\rho_B}} + \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f - \left(\cancel{\frac{P_A}{\rho_A}} + \cancel{\frac{gZa}{g_c}} + \cancel{\frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c}} \right)$$

$$\eta Wp = \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

Pérdidas por fricción

La tubería de ¾ es utilizada en su mayoría por lo cual se asume diámetro de ¾ de pulgada (diámetro nominal) toda la tubería. Se asume velocidad lineal recomendada en tuberías.

$$v = 1 \frac{m}{s}$$

$$D = 0.824 \text{ plg} * \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ plg}} \right) * \left(\frac{1 \text{ m}}{3.281 \text{ ft}} \right) = 0.021 \text{ m}$$

$$s = \pi * \frac{D^2}{4} = \frac{3.1416 * (0.021 \text{ m})^2}{4} = 3.44 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = \rho * s * v$$

$$\dot{m} = \text{flujo másico}, \frac{kg}{s}$$

$$\rho = \text{densidad}, \frac{kg}{m^3}$$

$$s = \text{área transversal}, m^2$$

$$v = \text{velocidad lineal del fluido}, \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho * s * v = \left(1040 \frac{kg}{m^3} \right) * (3.44 * 10^{-4} m^2) * 1 \frac{m}{s} = 0.36$$

$$\text{Flujo} = s * v = 3.44 * 10^{-4} m^2 * \left(1 \frac{m}{s} \right) = 3.44 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} * \left(\frac{1000 \text{ l}}{1 m^3} \right) * \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 20.64 \frac{l}{min}$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

Re = número adimensional de Reynolds

D = diámetro interno de tubería, m

v = velocidad lineal del fluido, $\frac{m}{s}$

ρ = densidad del fluido, $\frac{kg}{m^3}$

μ = viscosidad cinemática del fluido, $\frac{kg}{m * s}$

Se asume densidad de mosto de 1040 kg/m^3

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{0.021 \text{ m} * \frac{1 \text{ m}}{\text{s}} * \frac{1040 \text{ kg}}{\text{m}^3}}{1 \text{ cP} * \left(\frac{1 \text{ kg}}{\frac{\text{m} * \text{s}}{1000 \text{ cP}}} \right)} = 21840$$

Factor de fricción de Fanning

$$k_{\text{acero}} = 0.00015 \text{ ft} * \left(\frac{1 \text{ m}}{3.281 \text{ ft}} \right) = 4.57 * 10^{-5} \text{ m}$$

$$\frac{k}{D} = \frac{4.57 * 10^{-5} \text{ m}}{0.021 \text{ m}} = 2.2 * 10^{-3}$$

Gráfica de factor de fricción de fanning, leyendo Re vs. $\frac{k}{D}$
 $f = 0.007$

Pérdidas por fricción en el largo de la tubería

$$hfs = \frac{4 * f * L}{D} * \frac{v^2}{2gc}$$

$$hfs = \frac{4 * 0.007 * 4 \text{ m}}{0.021 \text{ m}} * \frac{\left(\frac{1 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2(1)} = 2.66 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Pérdidas por cambio de forma

$$hfc = 0.4 * \left(1 - \frac{Sb}{Sa} \right)$$

$$\text{como } Sb \ll Sa, \frac{Sb}{Sa} = 0$$

$$hfc = 0.4 * (1 - 0) = 0.4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Pérdidas por accesorios

Accesorios:

1. 2 llaves de $\frac{3}{4}$ de pulgada completamente abiertas ($k=0.17$)
2. Retorno de flujo ($k=1.5$)
3. T de $\frac{3}{4}$ de pulgada ($k=0.4$)
4. Codo de 90° (0.75)

Cuadro 134: Coeficientes de pérdida por fricción en accesorios de tubería con cuerda estándar,

TABLA 5.1

Coeficientes de pérdida por fricción en accesorios de tubería con cuerda estándar^{2b}

Accesorio	K_f
Codo estándar	
45°	0.35
90°	0.75
T	
En líneas rectas	0.4
Usados como codo	1.0
Retorno, 180°	1.5
Válvula de compuerta	
Semabierta	4.5
Completamente abierta	0.17
Válvula de ángulo, completamente abierta	2.0
Válvula de globo, completamente abierta	6.0

$$k = 1.5 + 0.4 + 2 * 0.17 + 0.75 = 2.99$$

$$h_{ff} = k f * \frac{v^2}{2g_c} = 2.99 * \left(\frac{\left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2(1)} \right) = 1.495 \frac{m^2}{s^2}$$

Total de pérdidas

$$\sum h_f = \frac{(2.66 + 0.4 + 1.495)m^2}{s^2} = 4.57 \frac{m^2}{s^2}$$

Cálculo de bomba

$$\eta W_p = \frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

según McCabe

$$\text{Trabajo de bomba} = W_p = \frac{1}{\eta} * \left(\frac{gZb}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f \right)$$

$$W_p = \frac{1}{0.55} * \left(\frac{(1.2 m) * 9.8 \frac{m}{s^2}}{1} + \frac{1 * \left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2(1)} + 4.57 \frac{m^2}{s^2} \right) = 30.60 \frac{m^2}{s^2} = 30.60 \frac{J}{kg}$$

$$\text{Potencia requerida} = P_b = \dot{m} * W_p = \left(0.36 \frac{kg}{s} \right) * 30.60 \frac{J}{kg} = 10.95 W = 0.011 kW = 0.015 hp$$

Caida de presión

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZ_A}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZ_B}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

$$P_A - P_B = + \frac{\rho g Z_B}{g_c} + \frac{\rho \alpha_B V_B^2}{2g_c} + \rho h_f$$

$$\Delta P = \frac{\left(1040 \frac{kg}{m^3}\right) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) * (1.20 m)}{(1)} + \frac{\left(1040 \frac{kg}{m^3}\right) * (1) * \left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * (1)} + \left(1040 \frac{kg}{m^3}\right) * \left(4.57 \frac{m^2}{s^2}\right)$$

$$= 17.5 kPa$$

Cálculo 19: Curva de secado

Se calculó la masa de malta conociendo la humedad medida durante el secado

lote 1:

$$m = 3.64 kg$$

$$humedad = 4.99\%$$

$$m_{seca} = 3.64 kg * (100\% - 4.99\%) = 3.46 kg$$

Siguiendo esta tendencia se calculó por prorratio la masa dependiendo de la humedad

$$Velocidad de secado = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

$$Velocidad de secado = \frac{4.18 kg - 4.15 kg}{1h - 0h} * \left(\frac{1h}{3600s}\right) = 9.58 * 10^{-6} kg/s$$

Se calculó de esta forma la velocidad de secado para la construcción de la curva de secado

a. Cantidad de levadura para el mosto

Cálculo 20: Conversión de gravedad específica a grados Plato

$$^{\circ}\text{Plato} = (1 * 626.868) + (1111.14 * SG) - (630.272 * SG^2) + (135.997 * SG^3)$$

$$^{\circ}\text{Plato} = (-1 * 626.868) + (1111.14 * 1.050) - (630.272 * 1.050^2) + (135.997 * 1.050^3)$$

$$^{\circ}\text{Plato} = 12.403$$

*El cálculo anterior se realizó con base en una ecuación encontrada en la literatura para la obtención de grados Plato. Este mismo se realizó para determinar posteriormente la cantidad de levadura a utilizar en las pruebas de funcionamiento del fermentador.

Cálculo 21: Tasa de inoculación base

$$\text{Tasa de inoculación base} = (\# \text{ de células}) * (\text{volumen de mosto}) * (^{\circ}\text{Plato mosto})$$

$$\text{Tasa de inoculación base} = (0.75 \times 10^6) * (15000 \text{ ml}) * (12.403) = 1.395 \times 10^{11} \text{ células}$$

*En el cálculo anterior, el número de células es un aproximado para la densidad inicial del mosto previamente calculada. Este mismo se realizó para determinar posteriormente la cantidad de levadura a utilizar en las pruebas de funcionamiento del fermentador.

Cálculo 22: Cantidad de levadura a utilizar

$$\text{masa de levadura} = \frac{\text{tasa de inoculación base}}{(20 \text{ billones} * \text{viabilidad})}$$

$$\text{masa de levadura} = \frac{139.5 \text{ billones de células}}{(20 \text{ billones} * 90\%)} = 7.75 \text{ g de levadura}$$

*Este mismo cálculo se realizó para determinar la cantidad de levadura a utilizar en cada corrida de fermentación, así como en las pruebas de funcionamiento.

2. Análisis de alcoholes, azúcares y microorganismos

Cálculo 23: Conversión de concentración en porcentaje %m/v a concentración en g/L

$$\left(\frac{3.7085 \text{ g maltosa}}{100 \text{ ml}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \right) = 37.085 \text{ g maltosa/L}$$

*Este mismo cálculo se realizó para determinar la concentración del resto de azúcares presentes en las muestras.

Cálculo 24: Conversión de concentración en porcentaje %m/v a concentración en g/L

$$\left(\frac{2.1652 \text{ g etanol}}{100 \text{ ml}}\right) * \left(\frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}\right) * \left(\frac{2.000 \text{ ml solución}}{1.5 \text{ ml muestra}}\right) = 2.887 \text{ g etanol/L}$$

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

Cálculo 25: Concentración de microorganismos experimental utilizando el peso seco

$$C_N = \frac{\text{Peso seco}}{\# \text{ células viables iniciales}} * \# \text{ células viables}$$

$$C_N = \frac{0.991 \text{ g/ml}}{1.950 \times 10^5 \text{ células/ml}} * 4.091 \times 10^4 \text{ células/ml} * \left(\frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}\right) = 20.815 \text{ g/L}$$

*Este mismo cálculo se realizó para determinar la concentración en g/L de cada una de las muestras en valores de tiempo determinados.

3. Modelo cinético de predicción de sustrato, microorganismos y productos

a. Fase de crecimiento celular

Cálculo 26: Diferencial de concentración de sustrato sobre el diferencial de tiempo

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{C_s - C_{so}}{T - T_o}$$

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{(45.169 \text{ g/L} - 51.743 \text{ g/L})}{(0.5 \text{ h} - 0 \text{ h})} = -13.146 \text{ g/L} * \text{h}$$

*Este mismo cálculo se realizó para determinar el diferencial de concentración de microorganismos y producto en el tiempo.

Cálculo 27: Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de crecimiento celular

$$y = 0.1167x^2 - 4.5x + 50.995$$

Con la ecuación, se obtuvo la derivada para valuar el tiempo promedio y obtener un valor corregido del diferencial de concentración de sustrato en el tiempo.

$$y = 2(0.1167)x - 4.5$$

$$y = 0.2334(0.25) - 4.5 = -4.442 \text{ g/L} \cdot \text{h}$$

*Este mismo cálculo se realizó para los ajustes polinomiales de las curvas de productos y microorganismos en fase de crecimiento celular.

Cálculo 28: Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de decrecimiento celular

$$y = 22.114x^{-0.216}$$

Con la ecuación, se obtuvo la derivada para valuar el tiempo promedio y obtener un valor corregido del diferencial de concentración de sustrato en el tiempo.

$$y = -0.216(22.114)x^{-0.216}$$

$$y = -4.776(28.000\text{h})^{-0.216} = 0.0831$$

Cálculo 29: Rendimiento de microorganismos con respecto al sustrato

$$Y_{X/S} = \frac{dC_N/dt}{dC_S/dt}$$

$$Y_{X/S} = \frac{(16.966\text{g/L} \cdot \text{h})}{(-4.442 \text{ g/L} \cdot \text{h})} = -3.820$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados y para el rendimiento de producto con respecto al sustrato.

Cálculo 30: Parámetros cinéticos utilizando ecuación de Lineweaver-Burk

$$\frac{dt}{dC_S} \frac{C_N}{Y_{X/S}} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \frac{1}{C_S} + \frac{1}{\mu_{\max}}$$

Se graficó $1/C_S$ y $dt/dC_S \cdot C_N$ para linealizar y obtener la pendiente e intercepto. Con estos valores se procede a obtener los parámetros cinéticos de reacción como la constante de afinidad al sustrato y la velocidad máxima de crecimiento celular.

Cálculo 31: Primer paso para obtener diferencial de tiempo sobre diferencial de sustrato

$$X = \frac{\mu_{\max} C_s}{K_s + C_s} \left(\frac{1}{Y_{X/S}} \right) = \frac{-0.26(44.974 \text{g/L})}{-74 + 44.974 \text{g/L}} \left(\frac{1}{-3.820} \right) = -0.105$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 32: Segundo paso para obtener diferencial de tiempo sobre diferencial de sustrato

$$Y = \frac{K_s + C_s}{\mu_{\max} C_s} (Y_{X/S}) = -9.482$$

Este cálculo es el inverso del cálculo anterior, por lo que se obtuvo directamente en Excel. Este mismo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 33: Diferencial de tiempo sobre el diferencial de sustrato

$$\frac{dt}{dC_s} = \frac{K_s + C_s}{\mu_{\max} C_s} \left(\frac{Y_{X/S}}{C_N} \right) = -0.468$$

Este cálculo es el cociente del resultado del cálculo anterior y la concentración de microorganismos. Este mismo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 34: Diferencial de sustrato en el tiempo corregido

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{1}{-0.468} = -2.138$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 35: Diferencial de concentración de sustrato

$$dC_s = \frac{dC_s}{dt} * dt$$

$$d = -2.538(0.5\text{h} - 0\text{h}) = -1.069$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 36: Modelo final de concentración de sustrato

$$C_{s_{\text{modelo}}} = dC_s + C_{s_0}$$

$$C_{s_{\text{modelo}}} = -1.069 + 48.456 = 44.974$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados y para el modelo de concentración de microorganismos y producto.

Cálculo 37: Diferencial de concentración de microorganismos

$$dC_N = dC_s * Y_{X/S}$$

$$dC_N = -1.069 - 3.0820 = 4.083$$

*Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados y para el diferencial de concentración de producto.

b. Fase de decrecimiento celular

Cálculo 38: Diferencial de concentración de microorganismos sobre diferencial de tiempo

$$\frac{dC_N}{dt} = \frac{\mu_{\text{máx}} C_s C_N}{K_s + C_s} \frac{K_p}{K_p + C_p}$$

$$\frac{dC_N}{dt} = \frac{-0.5(9.266\text{g/L})(378.601\text{g/L})}{9.266\text{g/L} - 25} \frac{-0.7}{-0.7 + 22.873\text{g/L}}$$

$$\frac{dC_N}{dt} = -3.519 \text{ g/L} * \text{h}$$

Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados.

Cálculo 39: Diferencial de concentración de sustrato

$$dC_N = \frac{dC_N}{dt} (\Delta T)$$

$$dC_N = -\frac{3.519\text{g}}{\text{L}} * \text{h}(51\text{h} - 32\text{h}) = -66.868 \text{ g/L}$$

Este mismo cálculo se realizó para cada muestra tomada en valores de tiempo determinados. El modelo se calcula de igual forma que en la Ecuación 16.

4.Propuesta de sistema de agitación

Cálculo 40: Diámetro del agitador

$$D_a = \frac{1}{3} D_t$$

$$D_a = \frac{1}{3} (0.480\text{m}) = 0.160\text{m}$$

*Este cálculo se realizó con el diámetro interno del tanque y con semejanzas geométricas de un diseño estándar de agitador mecánico.

Cálculo 41: Distancia de la parte superior del agitador al fondo del tanque

$$E = \frac{1}{3} D_t$$

$$E = \frac{1}{3} (0.480\text{m}) = 0.160\text{m}$$

*Este cálculo se realizó con semejanzas geométricas de un diseño estándar de agitador mecánico.

Cálculo 42: Altura de la pala del agitador

$$W = \frac{1}{5} D_a$$

$$W = \frac{1}{5} (0.16\text{m}) = 0.032\text{m}$$

*Este cálculo se realizó con el diámetro del agitador obtenido anteriormente y semejanzas geométricas de un diseño estándar de agitador mecánico.

Cálculo 43: Ancho de la pala del agitador

$$L = \frac{1}{4} D_a$$

$$L = \frac{1}{4} (0.160\text{m}) = 0.040\text{m}$$

*Este cálculo se realizó con el diámetro del agitador obtenido anteriormente y con semejanzas geométricas de un diseño estándar de agitador mecánico.

Cálculo 44: Altura del estanque con respecto al fermentador

$$H = (1)D_t$$

$$H = 0.480 \text{ m}$$

*Este cálculo se realizó con el diámetro del tanque y con semejanzas geométricas de un diseño estándar de agitador mecánico.

Cálculo 45: Número de Reynolds

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

$$N_{Re} = \frac{(0.167 \text{ rps})(0.160\text{m})^2(1001.2 \text{ kg/m}^3)}{(0.0012\text{kg/m} \cdot \text{s})} = 3,559.82$$

*Este cálculo se realizó con la viscosidad y densidad del mosto, el diámetro de agitación calculado anteriormente y una velocidad de agitación que se fijó para este tipo de proceso fermentativo.

Cálculo 46: Potencia del motor

$$P = N_p(n^3 D_a^5 \rho)$$

$$P = 5.9((0.167\text{rps})^3(0.160\text{m})^5(1001.2\text{kg/m}^3)) = 0.003 \text{ W } (3.8 \times 10^{-6} \text{ hp})$$

*Este cálculo se realizó con el número de potencia obtenido de la Figura 24 partir del número de Reynolds calculado anteriormente.

Cálculo 47: Corrección de potencia

$$P_{\text{real}} = \frac{P(\text{pérdidas})}{n}$$

Consideraciones:

- Pérdidas por fricción: 35%
- Eficiencia del motor: 80%

$$P_{\text{real}} = \frac{3.8 \times 10^{-6} \text{ hp}(1.35)}{0.80} = 6.5 \times 10^{-6} \text{ hp} * \left(\frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \right) = 0.005 \text{ W}$$

*En este cálculo se tomaron las consideraciones anteriores con base en cálculos realizados en la literatura consultada.

e. Sistema de enfriamiento del fermentador

Cálculo 48: Balance de energía del sistema de enfriamiento del fermentador

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

*El trabajo es despreciable debido a la baja velocidad de agitación que habrá en función del tipo de reacción que se estará realizando en el fermentador. 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.

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

Cálculo 49: Cálculo del coeficiente de expansión térmica

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

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

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

Cálculo 50: Número de Grashof

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

*Para este cálculo, se interpolaron los valores las propiedades del aire a 1 atm en una tabla con valores a diferentes temperaturas. La variable L representa la altura de la superficie vertical.

$$\text{Gr} = \frac{(0.360\text{m})^3 * (1.140 \text{ kg/m}^3)^2 * (0.004^\circ\text{C}^{-1}) * (39.000^\circ\text{C} - 25.000^\circ\text{C})}{(1.699 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2} = 1.076 \times 10^7$$

Cálculo 51: Número de Nusselt

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

*Para éste cálculo, de igual forma se interpoló el valor del número de Prandtl para el aire con la tabla del cálculo anterior. Además, los coeficientes b y n se obtienen de la tabla de la

Figura 120 que el producto de Gr y Pr se encuentra en el rango especificado ahí mismo.

$$Nu = 0.59((1.076 \times 10^7) * (0.726))^{0.25} = 31.193$$

Cálculo 52: Coeficiente convectivo de transferencia de calor

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

Para este cálculo, se despejó la ecuación para obtener el valor de h, el coeficiente convectivo. La conductividad térmica, de igual forma se interpoló de los valores correspondientes al aire.

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

$$h = \frac{(0.027 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) * (31.193)}{(0.360\text{m})} = 2.097 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo 53: Área de transferencia de calor

$$A = C * h$$

Para este cálculo se tomó el fermentador como una lámina, cuya base es la circunferencia del fermentador.

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

Cálculo 54: Transferencia de calor del ambiente

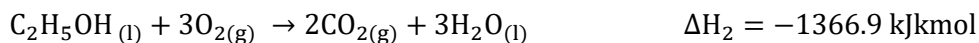
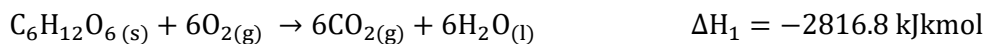
$$Q_{\text{ambiente}} = h A \Delta T$$

$$Q_{\text{ambiente}} = (2.097 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) * (0.718\text{m}^2) * (39^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 27.407 \text{ W}$$

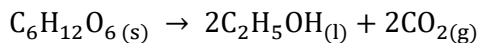
Para este cálculo se tomó el coeficiente convectivo de transferencia de calor obtenido anteriormente, el área de transferencia de calor y el diferencial de temperatura correspondiente.

Cálculo 55: Entalpía de reacción utilizando Ley de Hess

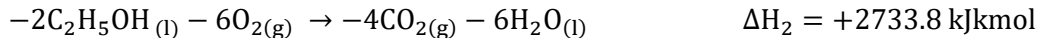
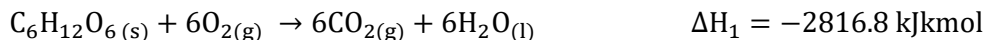
Partiendo de las reacciones de combustión de glucosa y etanol, con sus respectivos valores de entalpía:



La reacción de fermentación es la siguiente:



Para obtener los productos se cambia el signo de la segunda ecuación y se multiplica por un factor de 2 para dejar balanceada la reacción, entonces,



Para obtener la entalpía de reacción resultante se suman los valores de entalpía ya calculados anteriormente,

$$\Delta H_3 = -2816.8 \text{ kJ/kmol} + 2733.8 \text{ kJ/kmol} = -83.0 \text{ kJ/kmol}$$

Dado que el sustrato principal en la reacción de fermentación de cerveza es maltosa, un disacárido, se toma este valor y se multiplica por dos.

La entalpía de reacción de maltosa es:

$$\Delta H_3 = -166.0 \text{ kJ/kmol}$$

Cálculo 56: Velocidad de reacción de fermentación

$$-r_A = \frac{-dC_s}{dt} = \frac{\mu_{\text{máx}} C_s}{C_s + K_s} \frac{C_N}{Y_{X/S}}$$

Se utilizaron los resultados obtenidos para el cálculo del modelo cinético de reacción:

$$-r_A = \frac{(-0.26 \text{ mol/s})(30.002 \text{ g/L})}{30.002 \text{ g/L} - 74} * \frac{96.86 \text{ g/L}}{-4.028} * \left(\frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}}\right) = 0.004 \text{ kmol/L} * s$$

Cálculo 57: Volumen de maltosa en el punto de velocidad máxima de reacción

$$V = \frac{dC_s}{dt} * V_m$$

$$V = \frac{8.916 \text{ g}}{\text{L}} * (0.150 \text{ L}) = 1.337 \text{ g} * \left(\frac{1 \text{ ml}}{1.64 \text{ g maltosa}}\right) * \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}}\right) = 0.001 \text{ L}$$

Cálculo 58: Calor de reacción

$$Q_{\text{rxn}} = (\Delta H)(-r_A)(V)$$

$$Q_{\text{rxn}} = (-164.4 \text{ kJ/kmol}) * (0.004 \text{ kmol/L} * s) * (0.001 \text{ L}) * \left(\frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}}\right) = 0.580 \text{ W}$$

Cálculo 59: Requerimiento de agua fría para el fermentador durante la fermentación

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

$$\dot{m} = \frac{0.580 \text{ W} + 27.407 \text{ W}}{(4186.000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C})(17^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})} = 3.342 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Cálculo 60: Balance de energía del sistema de enfriamiento del fermentador y requerimiento de agua fría 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. El balance queda de la siguiente forma:

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

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

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

$$\dot{m} = \frac{27.407 \text{ J/s} + (103.338 \text{ kg/h})(3935.90 \text{ J/kg } ^\circ\text{C})(23^\circ\text{C})}{4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} (2^\circ\text{C})} * \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 6.168 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

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

f. Sistema de calentamiento del fermentador

Cálculo 61: Cálculo de calor específico de mosto de cerveza

$$C_p = 1 - 0.006(^{\circ}\text{Brix})$$

Dado que no se encontró un valor teórico, se calculó con la concentración de sólidos disueltos inicial promedio de las tres corridas de fermentación:

$$C_p = 1 - 0.006(9.957\%) = 0.940 \text{ kcal/kg K} * \left(\frac{4.186 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}}\right) = 3.936 \text{ kJ/kg K}$$

*Para este cálculo, se tomó una ecuación encontrada en literatura consultada para obtener el calor específico estimado a partir de la concentración de sólidos disueltos en $^{\circ}\text{Brix}$.

Cálculo 62: Flujo másico de vapor para esterilización

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_f C_p \Delta T}{H_v}$$

Se tomó el valor de la entalpía de vapor saturado a 85°C y para el flujo másico se obtuvo la masa del mosto en el tanque de fermentación y se dividió en el tiempo estimado para la esterilización,

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{(132.864 \text{ kg/h}) * (3.936 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}) * (85.000^\circ\text{C} - 25.000^\circ\text{C})}{2652.000 \text{ kJ/kg}} \\ &= 11.831 \text{ kg/h} * \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 3.286 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Cálculo 63: Flujo másico de vapor de la caldera

$$m_v = m_{TA} + m_E + m_P + m_M$$

$$m_v = (18.511 \text{ kg}) + (1.854 \text{ kg}) + (0.893 \text{ kg}) + (1.236 \text{ kg}) = 22.495 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_v = \frac{m_v}{t}$$

$$\dot{m}_v = \frac{22.495 \text{ kg}}{258 \text{ s}} = 0.087 \text{ kg/s}$$

*Los datos de éste cálculo fueron obtenidos de forma experimental. Para el resultado final, se calculó el flujo másico promedio de vapor de la caldera.

Cálculo 64: Dimensionamiento de bomba centrífuga a utilizarse

La determinación de la potencia requerida para la bomba a utilizar se basó en la ecuación de Bernoulli. Se toma de referencia el punto A como la altura mínima de del tanque a donde está conectada la bomba y el punto B la descarga del filtro. Al estar los dos puntos mencionados a presión atmosférica las presiones de la ecuación de Bernoulli se vuelven cero.

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{gZ_A}{g_c} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g_c} + nW_p = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{gZ_B}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f$$

Por lo que la ecuación se reduce a la siguiente donde h_f será comprendida por 1 válvula de $\frac{3}{4}$ '' completamente abierta ($k = 6.0$), 1 codo de 90° ($k = 0.75$), 3 accesorios en T de $\frac{3}{4}$ '' ($k = 0.4$) y el filtro de cartuchos. Los valores de k son obtenidos de la tabla 2 en marco teórico.

$$W_p = \frac{\frac{gZ_B}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f}{n}$$

Ya que la tubería de 0.01905 m ($\frac{3}{4}$ in) es la que predomina en la mayoría del sistema se asume de este diámetro en todo el trayecto, igual que una velocidad de 1 m/s. Se calcula el diámetro de la tubería, seguido por su área transversal y su velocidad másica para poder determinar el flujo y el número de Reynolds.

$$D = 0.824 \text{ in} * \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) * \left(\frac{1 \text{ m}}{3.281 \text{ ft}} \right) = 0.021 \text{ m}$$

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} = \frac{3.14159 * (0.021 \text{ m})^2}{4} = 3.44 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = \rho * s * v = \left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * (5.07 * 10^{-4} \text{ m}^2) * \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0.505$$

$$\text{Flujo} = A * v = (3.44 * 10^{-4} \text{ m}^2) * \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) * \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 20.64 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{0.021m * 1 \frac{m}{s} * 997 \frac{kg}{m^3}}{0.13cp * \left(\frac{1 \frac{kg}{m * s}}{1000 cp} \right)} = 161,053$$

$$k_{acero} = 0.00015ft * \left(\frac{1m}{3.281ft} \right) = 4.57 * 10^{-5}m$$

$$\frac{k}{D} = \frac{4.57 * 10^{-5}m}{0.021m} = 2.2 * 10^{-3}$$

Con el Reynolds calculado se procede a encontrar el factor de fracción de fanning utilizando el cálculo de k/D que sirve para leer el valor del factor de fanning encontrado en la Figura 8 en marco teórico. Con los datos previamente calculados se encuentra que el factor de fricción de fanning es de 0.0061. Con este valor se encuentran las pérdidas por fricción (hfs), por cambio de forma (hfc), por accesorios (hff) y el total (hf).

$$hfs = \frac{4 * f * L}{D} * \frac{v^2}{2gc}$$

$$hfs = \frac{4 * 0.0061 * 2.9m}{0.021m} * \frac{\left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2(1)} = 1.69 \frac{m^2}{s^2}$$

$$hfc = 0.4 * \left(1 - \frac{S_b}{S_a}\right)$$

$$como S_b \ll S_a, \frac{S_b}{S_a} = 0$$

$$hfc = 0.4 * (1 - 0) = 0.4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$k = 6.0 + 0.75 + (3 * 0.4) = 7.95$$

$$hff = kf * \frac{v^2}{2gc} = 7.95 * \left(\frac{\left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2(1)} \right) = 3.975 \frac{m^2}{s^2}$$

$$\sum hf = (1.69 + 0.4 + 3.975) \frac{m^2}{s^2} = 6.065 \frac{m^2}{s^2}$$

Ya con el cálculo de las pérdidas de la bomba se procede a calcular el trabajo de la misma y su potencia requerida. Se asume una eficiencia de la bomba del 55% para asegurar que puede trabajar al peor caso posible.

$$W_p = \frac{\frac{gZ_B}{g_c} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g_c} + h_f}{n}$$

$$W_p = \frac{\left(\frac{1.9m * 9.81 \frac{m}{s^2}}{1} + \frac{1 * (1 \frac{m}{s})^2}{2(1)} + 6.065 \frac{m^2}{s^2} \right)}{0.55} = 45.82 \frac{m^2}{s^2} = 45.82 \frac{J}{kg}$$

$$P_b = \dot{m} * W_p = 0.505 \frac{kg}{s} * 45.82 \frac{J}{kg} = 23.14W$$

$$23.14W = 0.0231kW = 0.031hp$$

Cálculo 65: Viscosidad cinemática de la cerveza

La determinación de la viscosidad se realizó empleando un viscosímetro de copa. El cálculo de la viscosidad requiere el tiempo, en segundos, que tarda el fluido en vaciar la copa por un agujero que tiene esta en la parte inferior. Se debe tener la muestra de líquido a temperatura ambiente para poder emplear la siguiente ecuación:

$$\text{Viscosidad cinemática (cSt)} = 23.56T - \frac{766}{T}$$

Donde a T hace referencia al tiempo transcurrido descrito previamente, de manera que el cálculo de la primera corrida en la tabla 16 es:

$$v = 23.56(33.4s) - \frac{766}{33.4s} = 763.97 \frac{cSt}{s}$$

El mismo cálculo se realizó para todas las pruebas de viscosidad ya fuera para pruebas de sedimentación o para pruebas de filtración.

Cálculo 66: Velocidad de sedimentación de la cerveza

El cálculo de la velocidad de sedimentación de la cerveza se realizó empleando la viscosidad y la densidad de la cerveza, la fuerza gravitacional y el diámetro de una partícula de levadura, ya que esta se considera es el sedimento principal. La densidad específica de la partícula se toma como 0 ya que no se pudo medir dicha densidad y se encontró antecedentes de realizar esta suposición.

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{d_p^2}{\nu} * (\delta - 1)$$

$$V_s = \frac{\frac{-9.81m}{s^2}}{18} * \frac{(0.00005m)^2}{7.6463 \text{ St}} * \left(\frac{0 \frac{kg}{m^3}}{997 \frac{kg}{m^3}} - 1 \right) = 1.782 * 10^{-12} \frac{m}{s}$$

El mismo cálculo se realizó para las 4 corridas de las pruebas de velocidad de sedimentación al finalizar el fermentado, a 7 días de sedimentado y a 14 días sedimentado.

Cálculo 67: Velocidad de sedimentación teórico

El cálculo de la velocidad de sedimentación teórica parte de la velocidad de sedimentación de la partícula de levadura que es de 0.5 cm/h, de un factor de corrección dependiendo del volumen sedimentado presente y de su forma que es tiene un coeficiente de 2.

$$v = \frac{0.5cm}{h} \left(\frac{1 m}{100 m} \right) * \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) * (1 - 0.95)^2 = 3.47 \times 10^{-9}$$

El mismo cálculo se realizó para los otros tiempos de sedimentado cambiando el factor de corrección de 0.95 a 0.79 y 0.61 según los valores proporcionados por la teoría.

Cálculo 68: Porcentaje másico de sedimentado en las pruebas de sedimentación

El porcentaje másico de sedimentado es el cociente del peso de sedimento sobre el peso total de la muestra, siendo esta la suma del mismo sedimentado y del sobrenadante resultante. Para el caso del sobrenadante, el único cambio recae en que es el cociente del peso del líquido, igual sobre el peso total.

$$\frac{0.6959 g}{0.6959 g + 7.4162 g} * 100\% = 8.58\%$$

El mismo cálculo se realizó para el cálculo de retenido y sobrenadante en las pruebas de filtración.

Cálculo 69: Corrección de UFC/mL por factor de dilución en muestras de análisis microbiológico

$$\text{UFC/mL real} = 2 \text{ UFC/mL} * 10$$

$$\text{UFC/mL real} = 20 \text{ UFC/mL}$$

Se observa un ejemplo del cálculo corregido de UFC/mL de la dilución 1:10 de la muestra evaluada del lote 3. El cálculo se realizó de la misma manera para la dilución 1:100 de la misma muestra del lote 3 evaluada.

Cálculo 70: Recuento de levaduras viables y totales por método de cámara de Neubauer

$$\text{Recuento levaduras totales/mL} = \frac{25 * 20 * 1000 * 1/10}{0.1}$$

$$\text{Recuento levaduras totales/mL} = 5.0 * 10^5 \text{ células/mL}$$

Se observa un ejemplo del recuento de levaduras totales/mL de la muestra del lote 3 al inicio de la fermentación. El cálculo se realizó de la misma manera en todo el informe. Para el recuento de levaduras viables se realizó el mismo procedimiento, pero colocando el recuento de levaduras viables y no totales como n.

Cálculo 71: Porcentaje de viabilidad por método de cámara de Neubauer

$$\% \text{ Levaduras viables} = \frac{20 * 100\%}{25}$$

$$\% \text{ Levaduras viables} = 80.00\%$$

Se observa un ejemplo del porcentaje de levaduras viables de la muestra del lote 3 al inicio de la fermentación. El cálculo se realizó de la misma manera para la muestra del lote 3 al final de la fermentación.

G. ANÁLISIS DE ERROR Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Cálculo 72: Incertidumbre para sumas y restas

$$\Delta y = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2 \dots \dots \dots}$$

Ecuación 10

En donde:

Δy : Incertidumbre a calcular

$\Delta x, \Delta z$: Incertidumbre de los datos a sumar o restar.

$$\Delta y = \sqrt{\left(0.02 \frac{L}{s}\right)^2 + \left(0.02 \frac{L}{s}\right)^2 + \left(0.02 \frac{L}{s}\right)^2} = \pm 0.04 \frac{L}{s}$$

Nota: se realizó el mismo cálculo para determinar todas las incertidumbres que involucrasen operaciones de suma o resta.

Cálculo 73: Incertidumbre para multiplicación y división

$$\Delta y = (y) * \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 \dots \dots \dots}$$

Ecuación 11:

En donde:

y: Operación a realizar

Δy : Incertidumbre a calcular

$\Delta x, \Delta z$: Incertidumbre de los datos a dividir o multiplicar.

x, z: Datos a dividir o multiplicar

$$\Delta y = \left(\frac{1.00 L}{2.98 s}\right) * \sqrt{\left(\frac{0.05 L}{1.00 L}\right)^2 + \left(\frac{0.01 s}{2.98 s}\right)^2} = \pm 0.02 \frac{L}{s}$$

Nota: se realizó el mismo cálculo para determinar todas las incertidumbres que involucrasen operaciones de multiplicación o división.

Cálculo 74: Porcentaje de error en comparación con valor teórico

$$\%E = \frac{|V_T - V_E|}{V_T} * 100$$

En donde:

V_T = valor teórico

V_E = valor experimental

$\%E$ = porcentaje de error

$$PE\% = \frac{|29.44 - 31.37|}{29.44} * 100 = 6.55\%$$

Cálculo 75: Promedio de las corridas de caudal.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

Ecuación 12:

En donde:

$\bar{X}$: Promedio

x_i : Dato

N : Número de datos

$$\bar{X} = \frac{0.33 \frac{L}{s} + 0.33 \frac{L}{s} + 0.33 \frac{L}{s}}{3} = 0.33 \frac{L}{s}$$

Nota: se realizó el mismo cálculo para determinar el promedio de los valores que tuviesen distintas corridas.

Cálculo 76: Desviación estándar para el promedio de las corridas del cálculo de caudal.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 13:

En donde:

S_x : Desviación estándar

X_i : Dato

$\bar{X}$: Promedio

N: Número de datos

$$S_x = \sqrt{\frac{\left(0.33 \frac{L}{s} - 0.33 \frac{L}{s}\right)^2 + \left(0.33 \frac{L}{s} - 0.33 \frac{L}{s}\right)^2 + \left(0.33 \frac{L}{s} - 0.33 \frac{L}{s}\right)^2}{2 - 1}} = 0.00 \frac{L}{s}$$

Nota: se realizó el mismo cálculo para determinar todas las desviaciones estándar de los datos.

Cálculo 77: Incertidumbre de la turbidez medida con el turbidímetro portátil marca Hanna modelo HI 98703

El cálculo de incertidumbre de este parámetro es diferente a la propagación de error de los demás ya que esta fue medida directamente con el equipo mencionado y este contaba con una ecuación para la determinación de la incertidumbre de sus mediciones.

$$\text{Incertidumbre} = \text{NTU} * 2\% + 0.02$$

$$927 \text{ NTU} * 2\% + 0.02 = \pm 18.56 \text{ NTU}$$

El mismo cálculo se realizó para todas las mediciones de turbidez, ya fuera para pruebas de sedimentación, centrifugación o filtración.

Cálculo 78: Incertidumbre de la densidad de la cerveza fermentada

Para determinar la propagación de error de la densidad de la cerveza posterior al proceso de fermentación, donde se emplea la operación de división, se emplea la siguiente ecuación.

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

Donde S_y es la incertidumbre de la densidad, y es el valor de la densidad, a es un valor usado para calcular y , S_a es la incertidumbre de a , b es un valor usado para calcular y , y S_b es la incertidumbre de b . De esta manera, para la primera corrida para determinar la densidad de la cerveza, en la tabla 15, se tiene que:

$$0.996 \frac{\text{g}}{\text{mL}} * \sqrt{\left(\frac{0.0001 \text{ g}}{34.8605 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.5 \text{ mL}}{35 \text{ mL}}\right)^2} = \pm 0.014 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

El mismo cálculo se realizó para todas las otras pruebas de densidad de la cerveza, previo y posterior a los diferentes procesos de remoción de sólidos suspendidos.

Cálculo 79: Incertidumbre de la viscosidad de la cerveza

La viscosidad de la cerveza, cálculo No. 2, se determina empleando una operación de multiplicación y división por lo que el cálculo es igual al No. 6. Para la primera corrida de determinación de viscosidad en la cerveza previo al proceso de sedimentación, tabla 25, se tiene que:

$$764.63 \text{ cSt} * \sqrt{\left(\frac{0.1 \text{ s}}{33.4 \text{ s}}\right)^2 + \left(\frac{0.1 \text{ s}}{33.4 \text{ s}}\right)^2} = \pm 3.24 \text{ cSt}$$

El mismo cálculo se realizó para todas las otras pruebas de viscosidad de la cerveza, previo y posterior a los diferentes procesos de remoción de sólidos suspendidos.

Cálculo 80: Incertidumbre de la velocidad de sedimentación de la cerveza

La velocidad de sedimentación de la cerveza, cálculo No. 3, se determina empleando una operación de multiplicación y división por lo que el cálculo es igual al No. 6. Para la primera corrida de determinación de velocidad de sedimentación en la cerveza previo al proceso de sedimentación, tabla 26, se tiene que:

$$1.728 * 10^{-12} \text{ m/s} * \sqrt{\left(\frac{3.24 \text{ cSt}}{764.63 \text{ cSt}}\right)^2 + \left(\frac{0.014 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}{0.996 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}\right)^2} = \pm 2.655 * 10^{-14} \text{ m/s}$$

El mismo cálculo se realizó para todas las otras pruebas de viscosidad de la cerveza, previo y posterior a los diferentes procesos de remoción de sólidos suspendidos.

Cálculo 81: Desviación estándar de la turbidez de la cerveza

Para determinar la desviación estándar de la turbidez de la cerveza se empleó con la siguiente ecuación.

$$DE = \frac{\sum_i^n |\bar{x} - x_i|}{n}$$

Por ejemplo, para la prueba de sedimentación, en la tabla 14, se tiene que:

$$\frac{|930.5 - 927\text{NTU}| + |930.5 - 920\text{NTU}| + |930.5 - 940\text{NTU}| + |930.5 - 935\text{NTU}|}{3} = 8.81 \text{ NTU}$$

El mismo cálculo se realizó para determinar la desviación estándar de las otras mediciones de turbidez en cada experimento, de densidad, de viscosidad y de velocidad de sedimentación.

Cálculo 82: Desviación estándar de medición de pH

$$\sigma = \sqrt{\frac{(5.043 - 5.040)^2 + (5.034 - 5.040)^2 + (5.043 - 5.040)^2}{3}}$$

$$\sigma = 0.0052$$

Se observa un ejemplo de la desviación estándar obtenida de la réplica 1 del lote 1 para medición de pH. El cálculo se realizó de la misma manera para cada una de las réplicas medidas en los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, turbidez y oxígeno disuelto.

H. DATOS CALCULADOS

1. Acondicionamiento, germinado y malteado de cebada

Cuadro 135. Promedio de parámetros físicos y organolépticos del agua para el proceso de fabricación de cerveza.

Parámetro	Resultados								
	Lote 1 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar	Lote 2 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar	Lote 3 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar
Temperatura (°C)	24.57	± 0.09	0.25	24.40	± 0.09	0.36	24.47	± 0.09	0.40
Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.00	± 0.20	0.00	7.00	± 0.20	0.00	7.00	± 0.20	0.00
Conductividad eléctrica (us/cm)	676.33	± 0.20	22.85	678.33	± 0.20	19.73	667.67	± 0.20	22.50
Olor	NR ¹	NA	NA ²	NR	NA	NA	NR	NA	NA
Color Real (Pt/Co)	2.23	± 0.20	0.42	1.97	± 0.20	0.16	2.10	± 0.20	0.30
Sólidos disueltos totales (mg/L)	7.27	± 0.20	0.29	8.17	± 0.20	0.05	8.27	± 0.20	0.47
Turbiedad (UNT ³)	3.00	± 0.50	0.00	3.00	± 0.50	0.00	3.00	± 0.50	0.00

1. NR: No Rechazable
2. NA: No Aplica
3. UNT: Unidad Nefelométrica de Turbidez

Cuadro 136. Comparación de parámetros físicos y organolépticos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Parámetro	COGUANOR NGO 29001		Organización Mundial de la Salud (OMS)	Resultados		
				Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua
	LMA ²	LMP ³	Límite establecido			
Temperatura (°C)	NA ⁵		NA	24.57 ± 0.25	24.40 ± 0.36	24.47 ± 0.40
Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.0-7.5	6.5-8.5	7.0-7.5	7.00 ± 0.20	7.00 ± 0.20	7.00 ± 0.20
Conductividad eléctrica (µs/cm)	750.0	1500.0	750.0	676.33 ± 22.85	678.33 ± 19.73	667.67 ± 22.50
Olor	NR ⁴	NR	NR	NR	NR	NR
Color Real (Pt/Co)	5.0	35.0	15.0	2.23 ± 0.42	1.97 ± 0.20	2.10 ± 0.30
Sólidos disueltos totales (mg/L)	500.0	1000.0	600.0	7.27 ± 0.29	8.17 ± 0.20	8.27 ± 0.47
Turbiedad (UNT⁶)	5.0	15.0	5.0	3.00 ± 0.50	3.00 ± 0.50	3.00 ± 0.50

1. Se utilizó la desviación estándar como parámetro de precisión para los datos de temperatura, conductividad eléctrica, color real y sólidos disueltos totales. Para los datos de pH y turbiedad se utilizó la incertidumbre calculada como parámetro de precisión. Para el lote 3 de agua se realizó una excepción, ya que se tomó la incertidumbre como valor de precisión para los datos de color real y sólidos disueltos totales.

2. LMA: Límite Máximo Aceptable
3. LMP: Límite Máximo Permisible
4. NR: No Rechazable
5. NA: No Aplica
6. UNT: Unidad Nefelométrica de Turbidez

Cuadro 137. Promedio de parámetros químicos del agua para el proceso de fabricación de cerveza.

Parámetro	Resultados								
	Lote 1 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar	Lote 2 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar	Lote 3 de agua	Incertidumbre	Desviación estándar
Calcio (mg/L)	0.03	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	6.00×10^{-3}	0.03	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	0.02	0.02	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	0.01
Magnesio (mg/L)	3.83	± 0.07	0.33	4.10	± 0.07	0.85	4.74	± 0.09	0.04
Dureza total (mg/L)	3.89	± 0.07	0.32	4.13	± 0.07	0.86	4.75	± 0.09	0.03
Cloruro (mg/L)	13.93	± 0.20	0.91	12.30	± 0.20	0.35	12.43	± 0.17	0.58
Cloro residual (mg/L)	0.04	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	0.01	0.04	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	0.012	0.02	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	0.01
Nitratos (mg/L)	8.03	± 0.14	0.12	8.13	± 0.14	0.06	8.38	± 0.15	0.03
Nitritos (mg/L)	0.42	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	6.00×10^{-3}	0.43	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	6.00×10^{-3}	0.47	$\pm 1.71 \times 10^{-2}$	6.00×10^{-3}
Sulfatos (mg/L)	3.00	± 0.62	0.00	3.00	± 0.62	0.00	3.00	± 0.62	0.00

Cuadro 138. Comparación de parámetros químicos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Parámetro	COGUANOR NGO 29001		Organización Mundial de la Salud (OMS)	Resultados		
	LMA ²	LMP ³		Límite establecido	Lote 1 de agua	Lote 2 de agua
Calcio (mg/L)	75.0	150.0	60.0	0.03 ± 1.71x 10 ⁻²	0.03 ± 1.71x 10 ⁻²	0.02 ± 1.71x 10 ⁻²
Magnesio (mg/L)	50.0	100.0	50.0	3.83 ± 0.33	4.10 ± 0.85	4.74 ± 0.04
Dureza total (mg/L)	100.0	500.0	200.0	3.89 ± 0.32	4.13 ± 0.86	4.75 ± 0.03
Cloruro (mg/L)	100.0	250.0	250.0	13.93 ± 0.91	12.30 ± 0.35	12.43 ± 0.58
Cloro residual (mg/L)	0.5	1.0	0.7	0.04 ± 1.71x10 ⁻²	0.04 ± 1.71x10 ⁻²	0.02 ± 1.71x10 ⁻²
Nitratos (mg/L)	---	50.0	50.0	8.03 ± 0.14	8.13 ± 0.14	8.38 ± 0.15
Nitritos (mg/L)	---	3.0	3.0	0.42 ± 1.71x10 ⁻²	0.43 ± 1.71x10 ⁻²	0.47 ± 1.71x10 ⁻²
Sulfatos (mg/L)	100.0	250.0	250.0	3.00 ± 0.62	3.00 ± 0.62	3.00 ± 0.62

1. Se utilizó la desviación estándar como parámetro de precisión para los datos de magnesio, dureza total y cloruro. Para los datos de calcio, cloro residual, nitratos, nitritos y sulfatos se utilizó la incertidumbre calculada como parámetro de precisión. Para el lote 3 de agua se realizó una excepción ya que se tomó la incertidumbre como parámetro de precisión para los datos de magnesio y dureza total.

2. LMA: Límite Máximo Aceptable

3. LMP: Límite Máximo Permisible

Cuadro 139. Promedio de parámetros microbiológicos del agua para proceso de fabricación de cerveza

Parámetro	Resultados		
	Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua
Coliformes fecales (UFC¹/100mL)	ND ² /100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL
Coliformes totales (UFC/100mL)	ND/100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL
E. Coli (UFC/100mL)	ND/100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL

1. UFC: Unidad formadora de colonias

2. ND: No Detectable

Cuadro 140. Comparación de parámetros microbiológicos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001 y la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

Parámetro	COGUANOR NGO 29001	Organización Mundial de la Salud (OMS)	Lote 1 de agua	Lote 2 de agua	Lote 3 de agua
	LMP ¹	Límite establecido			
Coliformes fecales (UFC ² /100mL)	Un microorganismo en una muestra de 100 mL	No detectable en ninguna muestra de 100 mL	ND ³ /100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL
Coliformes totales (UFC/100mL)	Un microorganismo en una muestra de 100 mL	No detectable en ninguna muestra de 100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL

Parámetro	COGUANOR NGO 29001	Organización Mundial de la Salud (OMS)	Lote 1 de agua Lote 2 de agua Lote 3 de agua		
	LMP ¹	Límite establecido			
E. Coli (UFC/100mL)	No detectable en ninguna muestra de 100 mL	No detectable en ninguna muestra de 100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL	ND/100 mL

1. LMP: Límite Máximo Permisible

2. UFC: Unidad formadora de colonias

3. ND: No Detectable

Cuadro 141. Caudal medido en la tubería de la salida del pozo

Corrida	Caudal (L/s)	Incertidumbre (L/s)
1	0.33	± 0.02
2	0.33	± 0.02
3	0.33	± 0.02

Cuadro 142. Especificaciones determinadas para la bomba dosificadora de cloro.

	Flujo de diseño	Dosis	Volumen de solución de NaClO			Valor objetivo
			$35 \frac{\text{L}}{\text{día}}$	$70 \frac{\text{L}}{\text{día}}$	$140 \frac{\text{L}}{\text{día}}$	Cloro residual
Sistema Internacional	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$2.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$	$1.8 \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{día}}$	$3.5 \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{día}}$	$7.0 \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{día}}$	$< 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$
Sistema Ingles	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$	-----	-----	-----	-----	-----

Nota: Se incluyeron algunas especificaciones en el Sistema Inglés debido a que la mayoría de los proveedores presenta las especificaciones en ambos sistemas.

Cuadro 143. Especificaciones determinas para el filtro de sedimentos.

	Diámetro	Área tanque	Flujo de diseño	Flujo de retrolavado
Sistema Internacional	0.249 m	0.049 m^2	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$5.01 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Sistema Ingles	9.84 in	0.53 ft^2	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$	$7.95 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$

Nota: Se incluyeron algunas especificaciones en el Sistema Inglés debido a que la mayoría de los proveedores presenta las especificaciones en ambos sistemas.

Cuadro 144. Especificaciones determinadas para el filtro de columna de carbón activado

	Diámetro	Área tanque	Flujo de diseño	Flujo de retrolavado
Sistema Internacional	0.249 m	0.049 m ²	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Sistema Ingles	9.84 in	0.53 ft ²	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$	$5.30 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$

Nota: Se incluyeron algunas especificaciones en el Sistema Inglés debido a que la mayoría de los proveedores presenta las especificaciones en ambos sistemas.

Cuadro 145. Especificaciones determinadas para la lámpara de luz UV.

	Flujo de diseño	Dosis	Porcentaje de reducción de microorganismos
Sistema internacional	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$21.6 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}$	99.99%
Sistema Ingles	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$	-----	-----

Nota: Se incluyeron algunas especificaciones en el Sistema Inglés debido a que la mayoría de los proveedores presenta las especificaciones en ambos sistemas.

Cuadro 146. Especificaciones determinadas para el filtro pulidor

	Dimensiones del filtro	Dimensiones del cartucho de 1 micra	Flujo de diseño
Sistema Internacional	Diámetro: 0.114 m	Diámetro: 0.060 m	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	Largo: 0.254 m	Largo: 0.251 m	
Sistema Ingles	Diámetro: 4.5 in	Diámetro: 2.38 in	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$
	Largo: 10.0 in	Largo: 9.88 in	

Nota: Se incluyeron algunas especificaciones en el Sistema Inglés debido a que la mayoría de los proveedores presenta las especificaciones en ambos sistemas.

Cuadro 147. Especificaciones determinadas para el tanque de almacenamiento de agua acondicionada

	Dimensiones del tanque	Volumen	Tiempo de llenado
Sistema Internacional	Diámetro: 0.50 m	200.0 L (0.20 m ³)	10.0 min
	Largo: 1.00 m		
Sistema Ingles	Diámetro: 19.7 in	53.0 gal (7.10 ft ³)	
	Largo: 39.4 in		

Nota: El tiempo de llenado se determinó tomando en cuenta el caudal de diseño del sistema de acondicionamiento, el cual es de $3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ (5.20 gal/min).

Cuadro 148. Especificaciones determinadas para la bomba centrífuga del sistema de acondicionamiento

	Flujo de diseño
Sistema Internacional	$3.30 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Sistema Ingles	$5.20 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$

Nota: El uso de la bomba será únicamente para recircular el agua del tanque de almacenaje hacia la lámpara de luz UV y descargar el agua acondicionada al tanque de macerado.

Cuadro 149. Cantidad de impurezas removidas según la etapa del proceso de limpieza.

	Primera separación	Incertidumbre (kg)	Segunda separación	Incertidumbre (kg)	Tercera separación	Incertidumbre (kg)	Masa total de impurezas removidas (kg)	Incertidumbre (kg)
	Masa removida (kg)		Masa removida (kg)		Masa removida (kg)			
1	0.11	$\pm 1.41 \times 10^{-2}$	0.01	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	0.52	$\pm 1.97 \times 10^{-2}$	0.64	± 0.03
2	0.12	$\pm 1.41 \times 10^{-2}$	0.03	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	0.21	$\pm 1.97 \times 10^{-2}$	0.36	± 0.03
3	0.18	$\pm 1.41 \times 10^{-2}$	0.01	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	0.27	$\pm 1.97 \times 10^{-2}$	0.46	± 0.03
4	0.16	$\pm 1.41 \times 10^{-2}$	0.06	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	0.31	$\pm 1.97 \times 10^{-2}$	0.53	± 0.03
5	0.15	$\pm 1.41 \times 10^{-2}$	0.03	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	0.20	$\pm 1.97 \times 10^{-2}$	0.38	± 0.03
$\bar{X}$	0.14	± 0.03	0.03	$\pm 3.85 \times 10^{-2}$	0.30	± 0.04	0.47	± 0.07

Cuadro 150. Promedio del porcentaje de impurezas removidas según la etapa de limpieza

Primera separación (%)	Incertidumbre (%)	Segunda separación (%)	Incertidumbre (%)	Tercera separación (%)	Incertidumbre (%)
30.80	± 0.80	5.91	± 0.90	63.29	± 0.95

Cuadro 151. Promedio del porcentaje de humedad de la cebada según el tiempo de germinado.

Lote de cebada	Tiempo (h)	Porcentaje de humedad (%)	Incertidumbre	Desviación estándar (%)
1	0	15.30	± 0.02	0.43
	24	24.40	± 0.02	0.31
	48	38.29	± 0.02	0.15
	72	45.76	± 0.02	0.82
2	0	14.66	± 0.02	0.51
	24	24.31	± 0.02	0.40
	48	38.77	± 0.02	0.80
	72	45.65	± 0.02	0.50
3	0	15.29	± 0.02	0.44
	24	24.67	± 0.02	0.13
	48	38.82	± 0.02	0.58
	72	47.37	± 0.02	1.19
	0	14.69	± 0.02	0.42
	24	24.39	± 0.02	0.26

4	48	38.56	± 0.02	0.89
	72	46.34	± 0.02	0.48
Lote de cebada	Tiempo (h)	Porcentaje de humedad (%)	Incertidumbre	Desviación estándar (%)
5	0	15.12	± 0.02	0.76
	24	23.99	± 0.02	0.02
	48	39.80	± 0.02	0.90
	72	46.89	± 0.02	0.67
$\bar{X}$	0	15.01	± 0.04	0.63
	24	24.35	± 0.04	0.37
	48	38.89	± 0.04	0.78
	72	46.40	± 0.04	1.41

Cuadro 152. Promedio del largo del acrospire del grano de cebada según el tiempo de germinado

Lote de cebada	Tiempo (h)	Largo del acrospire (mm)	Incertidumbre (mm)	Desviación estándar (mm)	Porcentaje de humedad (%)
1	0	0.0	1.7×10^{-1}	0.0	45.76
	24	0.6	1.7×10^{-1}	0.2	43.78
	48	2.7	1.7×10^{-1}	0.2	40.89
	72	3.5	1.7×10^{-1}	0.6	40.15
	96	6.2	1.7×10^{-1}	0.5	15.02
2	0	0.0	1.7×10^{-1}	0.0	45.65
	24	0.9	1.7×10^{-1}	0.5	44.88
	48	2.6	1.7×10^{-1}	0.2	42.15
	72	4.2	1.7×10^{-1}	0.4	41.56
	96	6.6	1.7×10^{-1}	0.4	15.89
3	0	0.0	1.7×10^{-1}	0.0	47.37
	24	0.6	1.7×10^{-1}	0.2	35.74
	48	1.2	1.7×10^{-1}	0.3	18.63
	72	2.8	1.7×10^{-1}	0.9	11.78
	96	4.7	1.7×10^{-1}	1.2	9.88
4	0	0.0	1.7×10^{-1}	0.0	46.34
	24	1.0	1.7×10^{-1}	0.2	45.63
	48	2.3	1.7×10^{-1}	0.3	44.21
	72	3.7	1.7×10^{-1}	0.5	40.12
	96	6.6	1.7×10^{-1}	0.6	15.11
5	0	0.0	1.7×10^{-1}	0.0	46.89
	24	1.1	1.7×10^{-1}	0.2	45.77
	48	2.3	1.7×10^{-1}	0.1	43.17
	72	4.4	1.7×10^{-1}	0.3	40.23
	96	6.0	1.7×10^{-1}	0.1	15.74
	0	0.0	3.4×10^{-1}	0.0	45.88
	24	0.9	3.4×10^{-1}	0.2	44.96
	48	2.5	3.4×10^{-1}	0.3	42.99

$\bar{X}$	72	3.9	3.4×10^{-1}	0.1	41.44
	96	6.3	3.4×10^{-1}	0.2	15.09

Nota: El promedio se realizó en base a los lotes 1,2,4 y 5. El lote 3 fue descartado debido a lo mencionado en la sección de Análisis de Resultados.

Cuadro 153. Porcentaje de rendimiento del proceso de germinado.

Lote de cebada	Porcentaje de conversión (%)	Incertidumbre (%)
1	79.71	± 0.18
2	62.01	± 0.13
3	17.35	± 0.16
4	78.63	± 0.20
5	92.99	± 0.14

Cuadro 154. Humedad en porcentaje másico con respecto al tiempo en secado de malta base utilizando el deshidratador de gabinetes

Tiempo (h)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Humedad (m/m)	Lote 1	15.21	14.30	12.42	10.27	8.49	7.57	6.57	5.83	5.24	4.99
	Lote 2	15.79	14.40	12.51	10.25	8.33	7.46	6.44	5.71	5.07	4.66
	Lote 3	16.02	14.66	12.68	10.55	8.66	7.67	6.51	5.80	5.18	4.70
Promedio		15.67	14.45	12.54	10.54	8.436	7.49	6.57	5.71	5.08	4.66
Desviación estándar		0.42	0.19	0.13	0.13	0.17	0.17	0.11	0.07	0.06	0.09

Humedad medida en balanza de humedad OHAUS en programa de secado de 75°C y finalización de 1 mg/ 90 s.

Cuadro 155. Humedad en porcentaje másico con respecto al tiempo en secado de malta caramel utilizando el deshidratador de gabinetes

Tiempo (h)		0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Humedad (m/m)	Lote 1	15.80	14.14	11.95	9.81	7.56	5.72	4.57	3.48	2.52	1.92	1.54
	Lote 2	14.93	13.88	11.72	9.66	7.14	5.19	4.21	3.16	2.28	1.34	0.90

	Lote 3	15.41	14.01	11.88	9.71	7.15	5.31	4.41	3.27	2.39	1.73	1.38
Promedio		15.38	14.01	11.85	9.73	7.28	5.41	4.40	3.30	2.40	1.66	1.27
Desviación estándar		0.44	0.13	0.12	0.08	0.24	0.28	0.18	0.16	0.12	0.03	0.33

Humedad medida en balanza de humedad OHAUS en programa de secado de 75°C y finalización de 1 mg/ 90 s.

Cuadro 156. Velocidad de secado y humedad para malta base

Lote 1	Humedad (%)	15.21	14.30	12.42	10.27	8.49	7.57	6.57	5.83	5.24	4.99
	Velocidad de secado (kg/s)	9.2 E-06	1.9 E-05	2.2 E-05	1.8 E-05	9.3 E-06	1.0 E-05	7.5 E-06	6.0 E-06	2.5 E-06	-
Lote 2	Humedad (%)	15.79	14.40	12.51	10.25	8.33	7.46	6.44	5.71	5.07	4.66
	Velocidad de secado (kg/s)	1.6 E-05	2.1 E-05	2.5 E-05	2.1 E-05	9.7 E-06	1.1 E-05	8.2 E-06	7.1 E-06	4.6 E-06	-
Lote 3	Humedad (%)	16.02	14.66	12.68	10.55	8.66	7.67	6.51	5.80	5.18	4.70
	Velocidad de secado (kg/s)	1.4 E-05	2.0 E-05	2.2 E-05	1.9 E-05	1.0 E-05	1.2 E-05	7.3 E-06	6.3 E-06	4.9 E-06	-
Promedio	Humedad (%)	15.67	14.45	12.54	12.54	10.36	8.49	7.57	6.51	5.78	5.16
	Velocidad de secado (kg/s)	1.3 E-05	2.0 E-05	2.3 E-05	2.0 E-05	9.7 E-06	1.1 E-05	7.6 E-06	6.5 E-06	4.0 E-06	-
Desv. estándar	Humedad (%)	0.42	0.19	0.13	0.13	0.17	0.17	0.11	0.07	0.06	0.09
	Velocidad de secado (kg/s)	3.3 E-06	1.1 E-06	2.0 E-06	1.7 E-06	4.1 E-07	9.0 E-07	4.7 E-07	6.0 E-07	1.3 E-06	3.3 E-06

Cuadro 157. Velocidad de secado y humedad para malta caramel

Lote 1	Humedad (%)	15.80	14.14	11.95	9.81	7.56	5.72	4.57	3.48	2.52	1.92	1.54
	Velocidad de secado (kg/s)	5.9E-06	7.8E-06	7.6E-06	8.0E-06	6.5E-06	4.1E-06	3.9E-06	3.4E-06	2.1E-06	1.4E-06	-
Lote 2	Humedad (%)	14.93	13.88	11.72	9.66	7.14	5.19	4.21	3.16	2.28	1.34	0.90
	Velocidad de secado (kg/s)	4.4E-06	9.0E-06	8.6E-06	1.1E-05	8.1E-06	4.1E-06	4.4E-06	3.7E-06	3.9E-06	1.8E-06	-
Lote 3	Humedad (%)	15.41	14.01	11.88	9.71	7.15	5.31	4.41	3.27	2.39	1.73	1.38
	Velocidad de secado (kg/s)	4.9E-06	7.5E-06	7.6E-06	9.0E-06	6.4E-06	3.2E-06	4.0E-06	3.1E-06	2.3E-06	1.2E-06	-
Promedio	Humedad (%)	15.38	14.01	11.85	9.73	7.28	5.41	4.40	3.30	2.40	1.66	1.27
	Velocidad de secado (kg/s)	5.1E-06	8.1E-06	7.9E-06	9.2E-06	7.0E-06	3.8E-06	4.1E-06	3.4E-06	2.8E-06	1.5E-06	-
Desv. Estándar	Humedad (%)	0.44	0.13	0.12	0.08	0.24	0.28	0.18	0.16	0.12	0.3	0.33
	Velocidad de secado (kg/s)	7.8E-07	8.1E-07	5.7E-07	1.3E-06	9.4E-07	5.4E-07	2.6E-07	2.9E-07	9.8E-07	3.2E-07	-

Cuadro 158. Tamaño de partícula de malta de cebada sin moler

Tamaño promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
3.83	0.21

Cuadro 159. Análisis granulométrico de malta base molida en tamiz rotap

Tamiz	Corrida #1		Corrida #2		Corrida #3		Corrida #4	
	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje	Masa (g)	Porcentaje
Malla No. 20	451.4	81.30%	445.3	81.92%	447.9	81.17%	449.4	81.87%
Malla No. 30	35.3	6.36%	34.9	6.42%	35.0	6.34%	34.7	6.32%
Malla No. 45	18.8	3.39%	17.9	3.29%	18.6	3.37%	18.5	3.37%
Malla No. 60	23.0	4.14%	19.9	3.66%	23.8	4.31%	20.5	3.73%
Malla No. 80	7.3	1.31%	6.9	1.27%	7.2	1.30%	7.0	1.28%
Malla No. 100	5.8	1.04%	5.6	1.03%	5.9	1.07%	5.8	1.06%
Harinas finas	13.6	2.45%	13.1	2.41%	13.4	2.43%	13.0	2.37%
Total	555.2	100.00%	543.6	100.00%	551.8	100.00%	548.9	100.00%

Cuadro 160. Análisis granulométrico de malta caramel molida en tamiz rotap

Tamiz	Corrida #1		Corrida #2		Corrida #3		Corrida #4	
	Masa (g)	%	Masa (g)	%	Masa (g)	%	Masa (g)	%
Malla No. 20	327.3	82.74%	317.4	83.44%	325.8	82.11%	326.3	84.56%
Malla No. 30	26.8	6.77%	24.8	6.52%	26.0	6.55%	25.7	6.66%
Malla No. 45	13.4	3.39%	12.2	3.21%	13.6	3.43%	12.1	3.14%

Tam iz	Corrida #1		Corrida #2		Corrida #3		Corrida #4	
	Masa (g)	%	Masa (g)	%	Masa (g)	%	Masa (g)	%
Malla No. 60	12.7	3.21 %	12.2	3.21 %	15.9	4.01 %	7.1	1.84 %
Malla No. 80	4.1	1.04 %	3.8	1.00 %	3.9	0.98 %	3.7	0.96 %
Malla No. 100	3.5	0.88 %	2.9	0.76 %	3.5	0.88 %	3.4	0.88 %
Hari nas finas	7.8	1.97 %	7.1	1.87 %	8.1	2.04 %	7.6	1.97 %
Tota l	395.6	100.00 %	380.4	100.0 0%	396.8	100.0 0%	385.9	100.0 0%

Cuadro 161. Amargor calculado en adiciones de lúpulo con método Rager

Lote	Lúpulos	Porcent aje De alfa ácidos	Cantidad a añadir (g)	Tiempos de adición (min)	Volumen final (m ³) *10 ³	Amargor (IBU)
1	Cascade	6	38.7945	60	15.12	46.18
	Cascade	6	19.8621	30		18.91
	Fuggles	3	19.9314	5		2.37
2	Cascade	6	40.0197	60	16.28	44.25
	Cascade	6	20.1022	30		17.78
	Fuggles	3	19.9452	5		2.21
3	Cascade	6	39.7814	60	16.34	43.82
	Cascade	6	19.1478	30		16.87
	Fuggles	3	20.0549	5		2.21

Calculado con método Rager

Cuadro 162. Concentración de azúcares en mosto antes de fermentar

	Concentración de azúcares (g/L)				Concentración total de azúcares (g/L)
	Malt osa	Gluc osa	Sacaros a	Fru cto sa	
Lote 1	45.4 822	37.2 823	24.2012	3.4 332	106.9657
Lote 2	55.9 815	36.5 58	26.5478	5.2 345	119.0873
Lote 3	50.3 299	35.0 332	28.9564	4.3 348	114.3195

Promedio	50.5979	36.2912	26.5685	4.3341	113.4575
Desviación Estándar	5.2547	1.1480	2.3776	0.9007	6.1066

Medido en cromatógrafo líquido de alta resolución marca Agilent

Cuadro 163. Datos calculados para demanda térmica de la planta piloto para la producción de 35 litros de mosto cocido utilizando un serpentín con vapor como medio de calentamiento

Proceso	Duración (h)	Energía (kJ)	Transferencia de calor (kW)	Flujo de vapor (kg/s)	Cálculo de serpentín
Calentamiento	0.5	14,589	8.03	$4.26 \cdot 10^{-3}$	Diámetro de tubo externo de 0.021m, 5 vueltas de 0.5m cada una de diámetro
Maceración	1	1,782	0.424	$0.22 \cdot 10^{-3}$	
Calentamiento	0.5	7,816	4.342	$2.3 \cdot 10^{-3}$	
Cocción	1	25,747	7.152	$3.80 \cdot 10^{-3}$	

Datos calculados con datos de temperatura y entalpía de vaporización a 652.7 kPa para vapor saturado.

Cuadro 164. Cálculo de bomba necesaria para movilización de mosto desde el tanque de cocción al fermentador

Flujo (l/min)	Pérdidas por fricción (J/kg)	Potencia requerida (kW)	Trabajo de la bomba (J/kg)	Caída de presión (Pa)	Eficiencia
20.64	4.57	0.011	30.60	17500	55%

Ver cálculo de muestra para ver cálculo detallado.

2. Corridas de fermentación de cerveza

Cuadro 165. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la primera corrida de fermentación

Parámetro	Inicial	Desviación estándar	Final	Desviación estándar
pH	5.949	0.006	4.389	0.041
°Brix	8.937	0.006	5.177	0.035

*En el cuadro anterior, se muestran los valores promedio iniciales y finales de pH y concentración de sólidos disueltos en la primera corrida de fermentación.

Cuadro 166. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la segunda corrida de fermentación

Parámetro	Inicial	Desviación estándar	Final	Desviación estándar
pH	5.949	0.005	4.453	0.020
°Brix	11.523	0.327	7.630	0.026

*En el cuadro anterior, se muestran los valores promedio iniciales y finales de pH y concentración de sólidos disueltos en la segunda corrida de fermentación.

Cuadro 167. Valores de pH y °Brix promedio y desviación estándar de la tercera corrida de fermentación

Parámetro	Inicial	Desviación estándar	Final	Desviación estándar
pH	5.634	0.093	4.493	0.025
°Brix	9.413	0.006	5.800	0.026

*En el cuadro anterior, se muestran los valores promedio iniciales y finales y concentración de sólidos disueltos en la tercera corrida de fermentación.

Cuadro 168. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la primera corrida de fermentación

Etanol (±0.0001g/L)	Metanol (±0.0001g/L)	Maltosa (±0.0001g/L)	Sacarosa (±0.0001g/L)	Glucosa (±0.0001g/L)	Fructosa (±0.0001g/L)
0.0293	0.0000	45.4822	24.2012	37.2823	3.4332

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la fermentación de la primera corrida.

Cuadro 169. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la segunda corrida de fermentación

Etanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Metanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Glucosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Fructosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
19.8443	0.0000	55.9815	26.5478	36.5580	5.2345

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la fermentación de la segunda corrida.

Cuadro 170. Azúcares fermentables y alcoholes presentes iniciales en el mosto para la tercera corrida de fermentación

Etanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Metanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Glucosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Fructosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
0.4551	0.0000	50.3299	28.9564	35.0332	4.3348

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza previo a la fermentación de la tercera corrida.

Cuadro 171. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la primera corrida de fermentación

Etanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Metanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Glucosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Fructosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
28.8697	0.0389	0.0000	0.0000	3.1479	0.0000

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la primera corrida.

Cuadro 172. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la segunda corrida de fermentación

Etanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Metanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Glucosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Fructosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
65.0805	0.0454	0.0000	3.6277	6.6099	0.0000

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la segunda corrida.

Cuadro 173. Azúcares fermentables y alcoholes presentes finales en el mosto para la tercera corrida de fermentación

Etanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Metanol ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Maltosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Sacarosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Glucosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)	Fructosa ($\pm 0.0001\text{g/L}$)
47.8203	0.0788	0.0000	17.2853	41.9212	17.7814

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de alcohol y azúcares fermentables presentes en el mosto de cerveza después de fermentar en la tercera corrida.

3. Cinética de reacción de fermentación

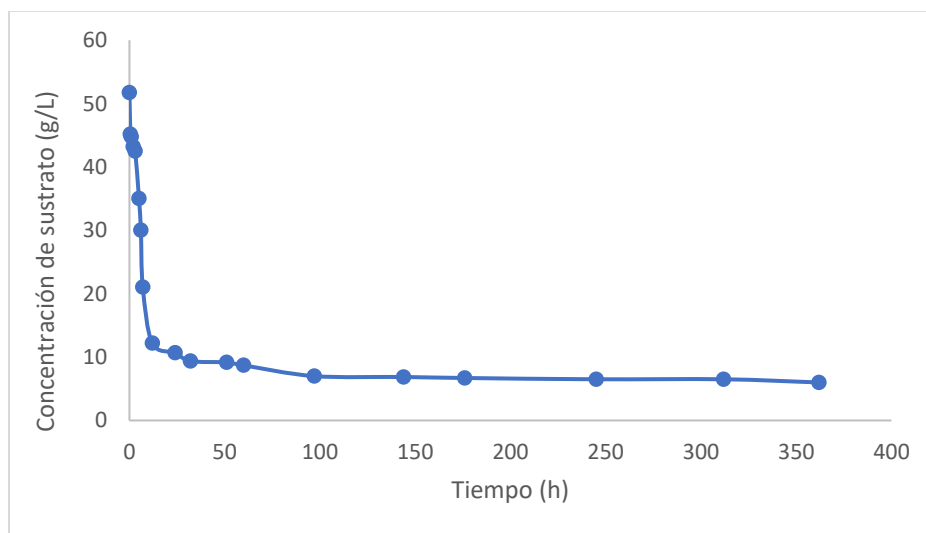
Cuadro 174. Densidad del mosto a través del tiempo

Tiempo (h)	Densidad ($\pm 0.002\text{g/mL}$)
0	0.977
0.5	1.001
1	0.972
2	1.001
3	1.000
5	1.001
6	0.999
7	0.999
12	0.991
24	0.981
32	0.986

Tiempo (h)	Densidad ($\pm 0.002\text{g/mL}$)
51	0.978
60	0.969
97	0.972
144	0.972
176	0.976
245	0.974
312	0.976
362	0.977

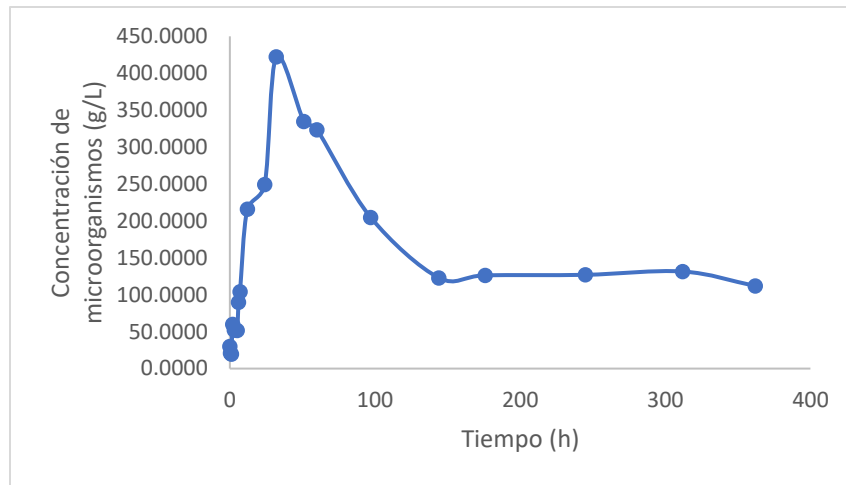
*En el cuadro anterior, se muestra la densidad del mosto en función del tiempo con las muestras del estudio cinético de reacción.

Gráfica 27. Comportamiento de concentración de sustrato en el proceso de fermentación



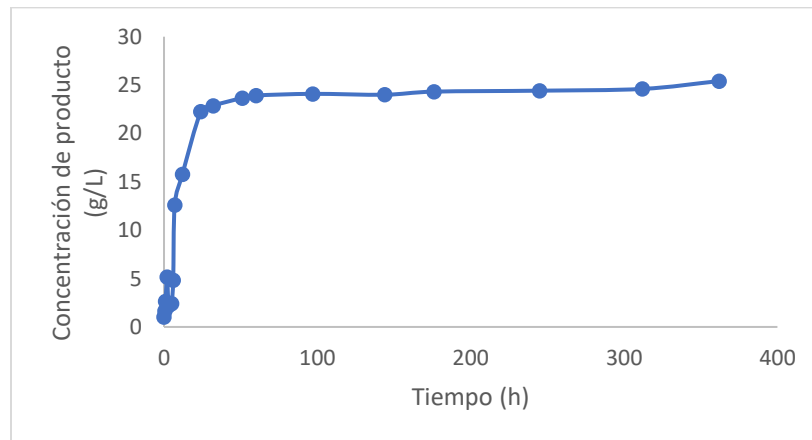
*En la gráfica anterior, se observa el comportamiento de concentración de sustrato en función del tiempo con las muestras del estudio de cinético de reacción. En el tiempo de 32 horas, se observa el inicio del agotamiento del sustrato.

Gráfica 28. Comportamiento de microorganismos en el proceso de fermentación



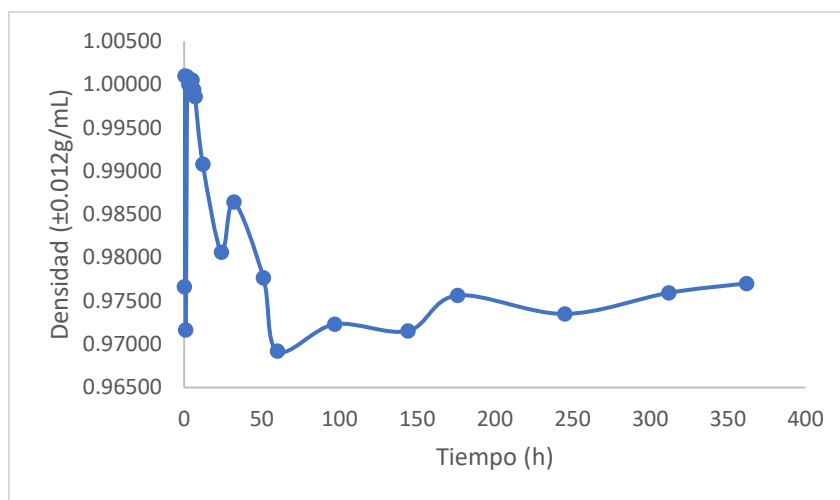
*En la gráfica anterior, se observa el comportamiento de concentración de microorganismos (levaduras) en función del tiempo con las muestras del estudio de cinético de reacción. En el tiempo de 32 horas, se observa el inicio de la fase de decrecimiento celular. La levadura utilizada fue *Saccharomyces Cerevisiae*.

Gráfica 29. Comportamiento del producto en el proceso de fermentación



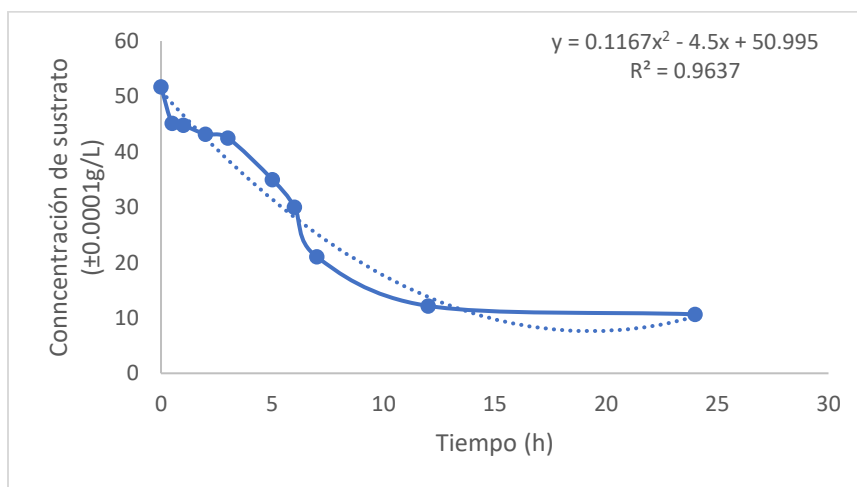
*En la gráfica anterior, se observa el comportamiento de concentración de producto en función del tiempo con las muestras del estudio de cinético de reacción. En el tiempo de 32 horas, se observar la disminución en la formación de etanol como producto de la fermentación.

Gráfica 30. Comportamiento de la densidad del mosto con respecto al tiempo durante la fermentación



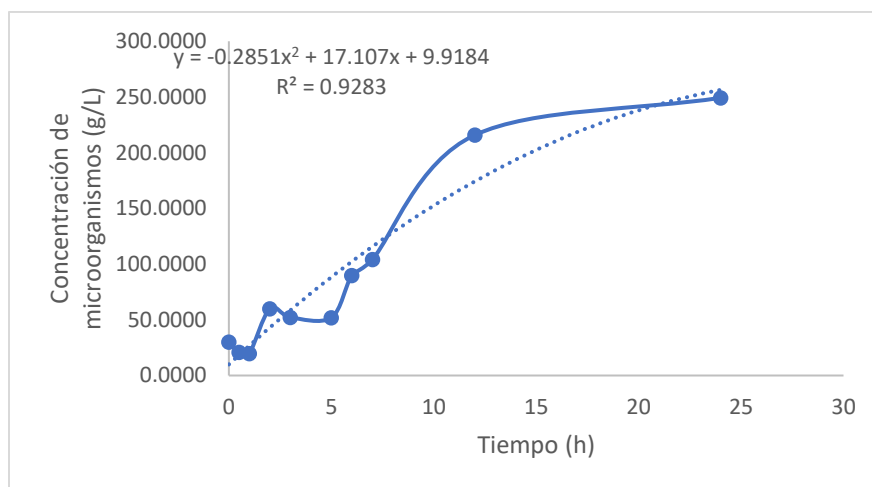
*En la gráfica anterior, se muestra el comportamiento de la densidad en función del tiempo con las muestras del estudio cinético de reacción.

Gráfica 31. Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de crecimiento celular



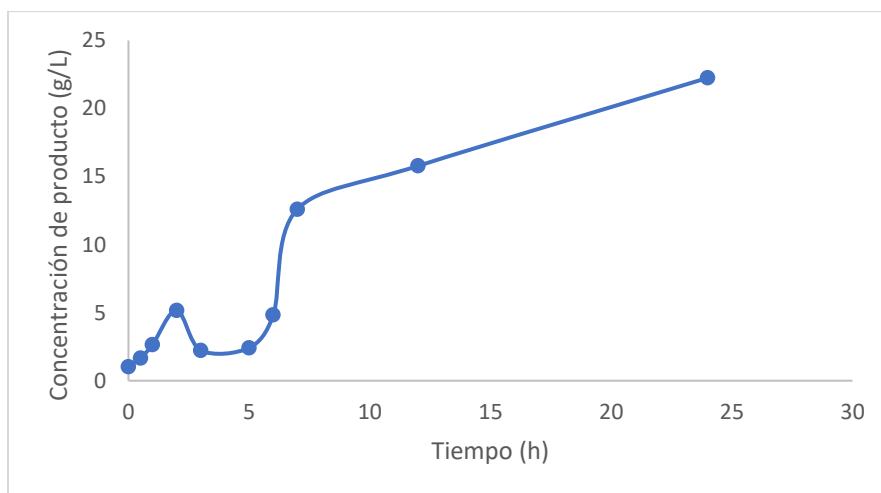
*En la gráfica anterior, se muestra el ajuste polinomial realizado para suavizar la curva de concentración de sustrato en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 32. Ajuste polinomial para suavizar curva de concentración de microorganismos en fase de crecimiento celular



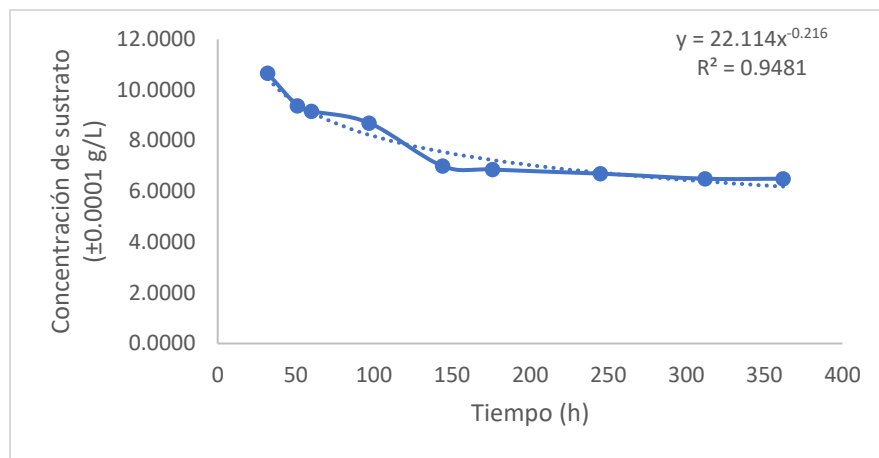
*En la gráfica anterior, se muestra el ajuste polinomial realizado para suavizar la curva de concentración de sustrato en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 33. Curva de concentración de producto sin ajuste en fase de crecimiento celular



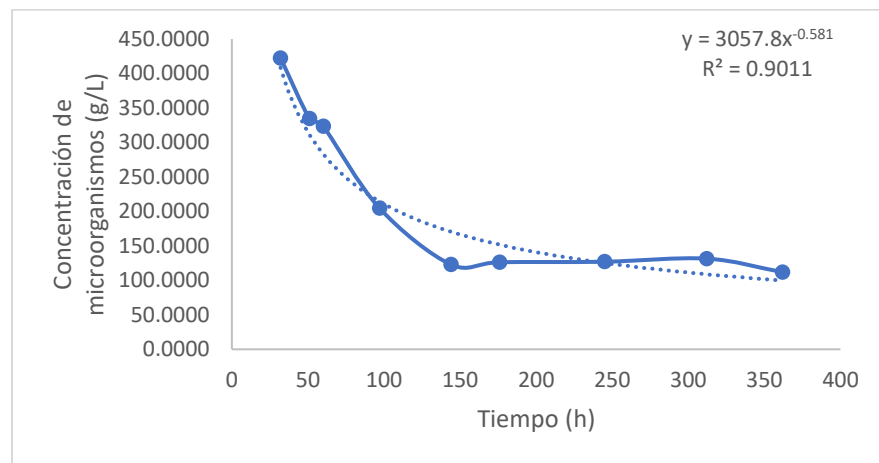
*En la gráfica anterior, se muestra la curva de concentración de producto sin ajuste en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 34. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de sustrato en fase de decrecimiento celular



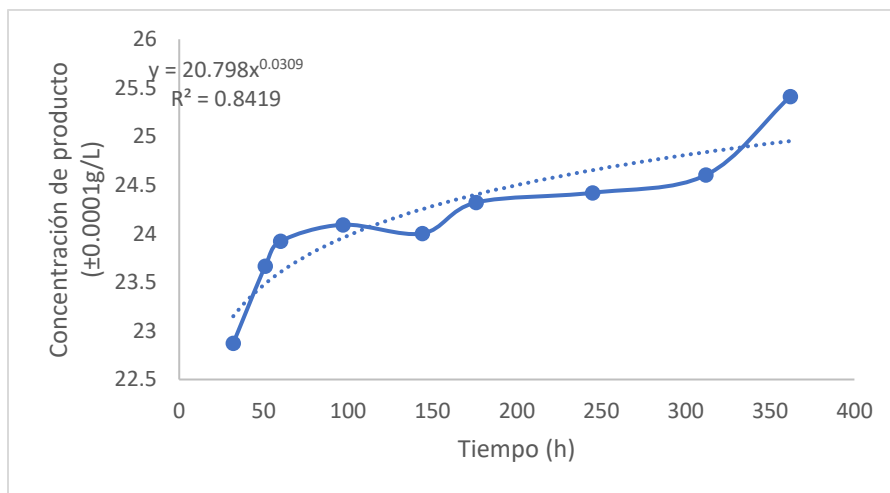
*En la gráfica anterior, se muestra el ajuste potencial para suavizar la curva de concentración de sustrato en la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 35. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de microorganismos en fase de decrecimiento celular



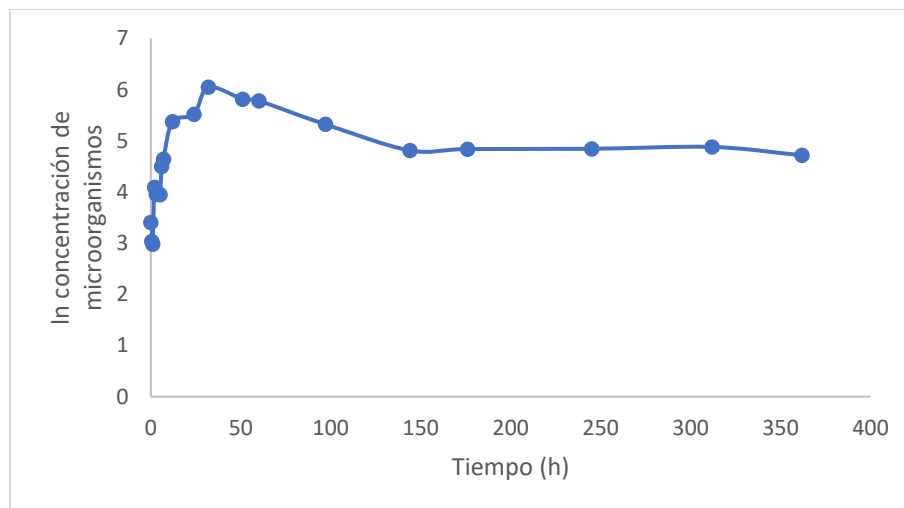
*En la gráfica anterior, se muestra el ajuste potencial para suavizar la curva de concentración de microorganismos en la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 36. Ajuste potencial para suavizar curva de concentración de producto en fase de decrecimiento celular



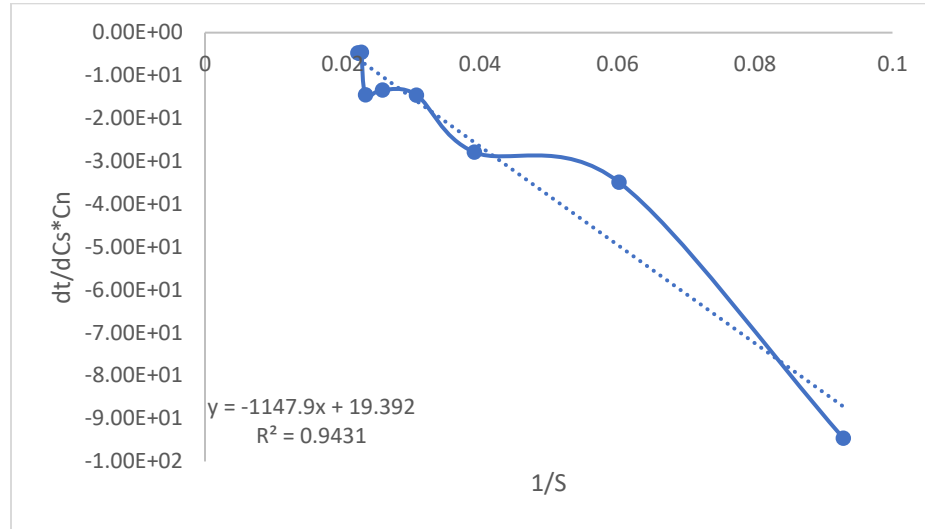
*En la gráfica anterior, se muestra el ajuste potencial para suavizar la curva de concentración de producto en fase de decrecimiento celular.

Gráfica 37. Logaritmo natural de concentración de microorganismos



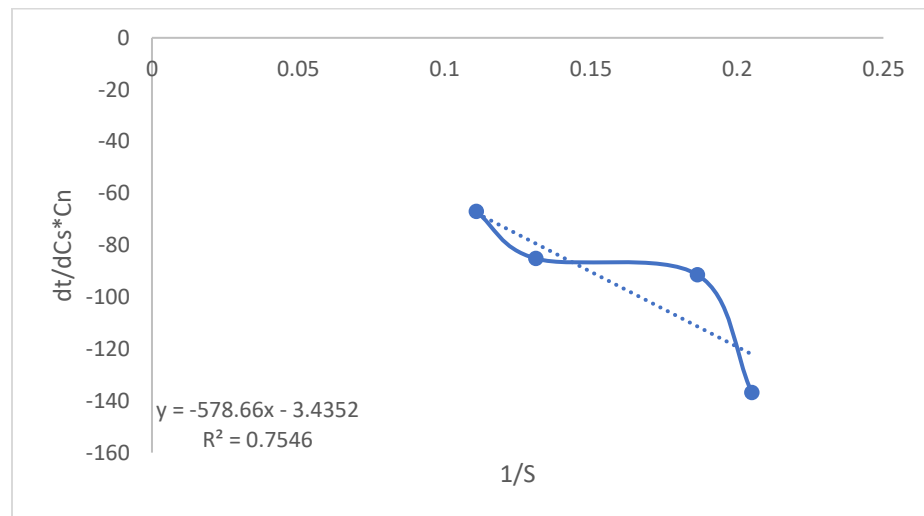
*En la gráfica anterior, se muestra el comportamiento de logaritmo natural de la concentración de microorganismos en función del tiempo.

Gráfica 38. Linealización de Lineweaver-Burk para fase de crecimiento celular



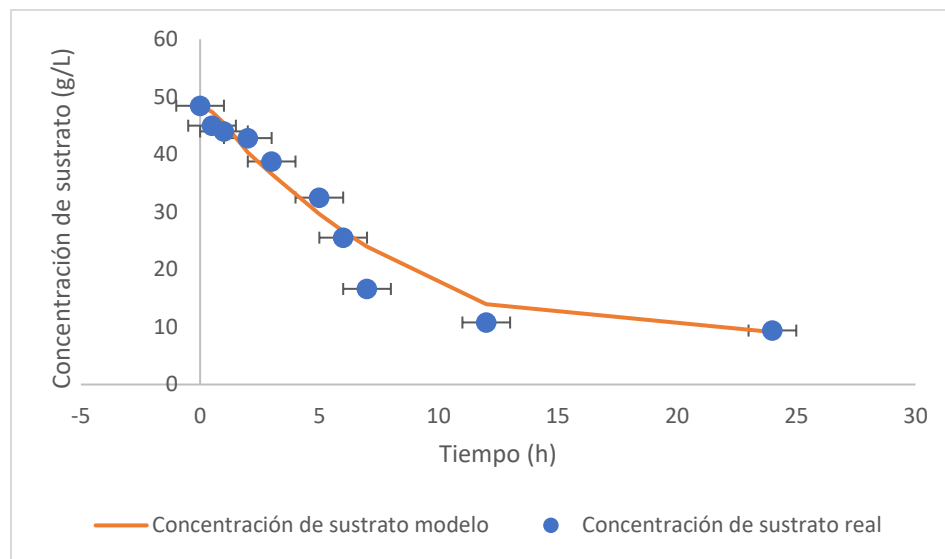
*En la gráfica anterior, se muestra la linealización de Lineweaver-Burk para la obtención de los parámetros cinéticos de reacción en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 39. Linealización de Lineweaver-Burk para decrecimiento celular



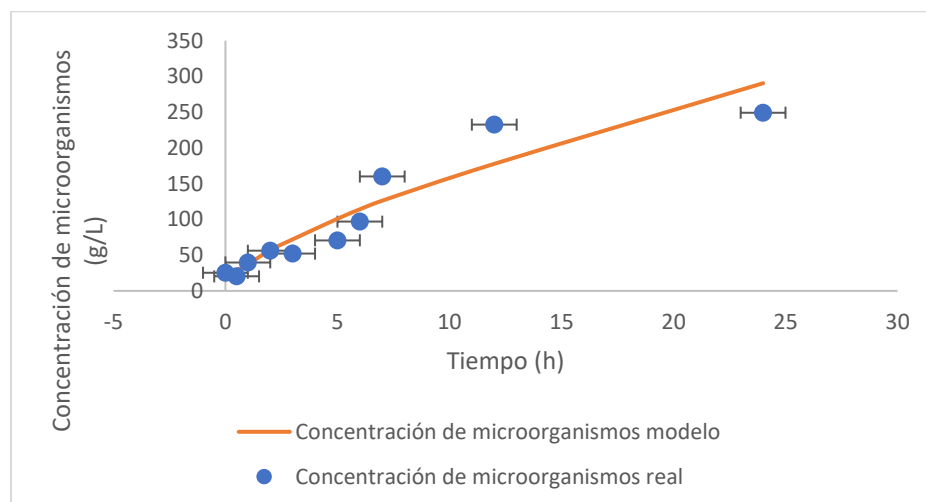
*En la gráfica anterior, se muestra la linealización de Lineweaver-Burk para la obtención de los parámetros cinéticos de reacción en la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 40. Modelo cinético para predecir concentración de sustrato en la fase de crecimiento celular



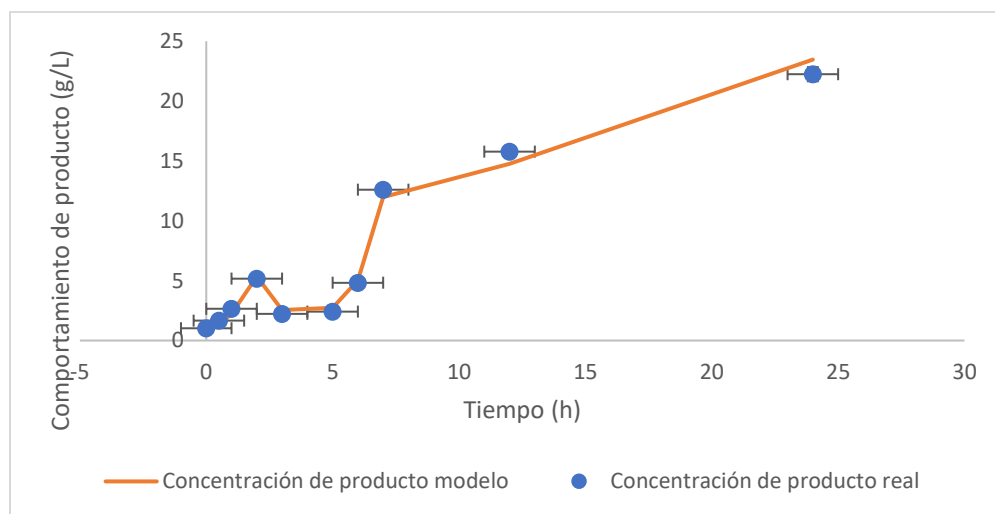
*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de sustrato y los datos experimentales de concentración de sustrato real en función del tiempo en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 41. Modelo cinético para predecir la concentración de microorganismos en la fase de crecimiento celular



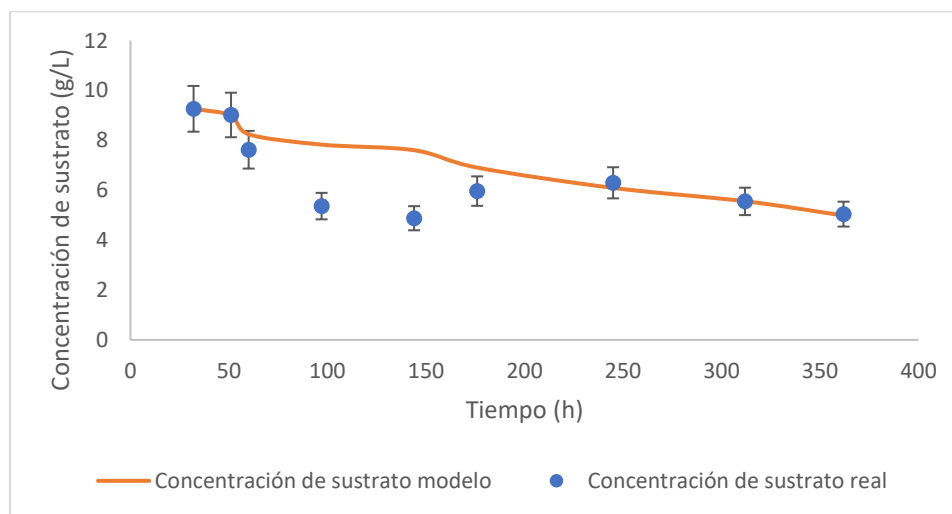
*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de microorganismos y los datos experimentales de concentración de microorganismos real en función del tiempo en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 42. Modelo cinético para predecir la concentración de producto en la fase de crecimiento celular



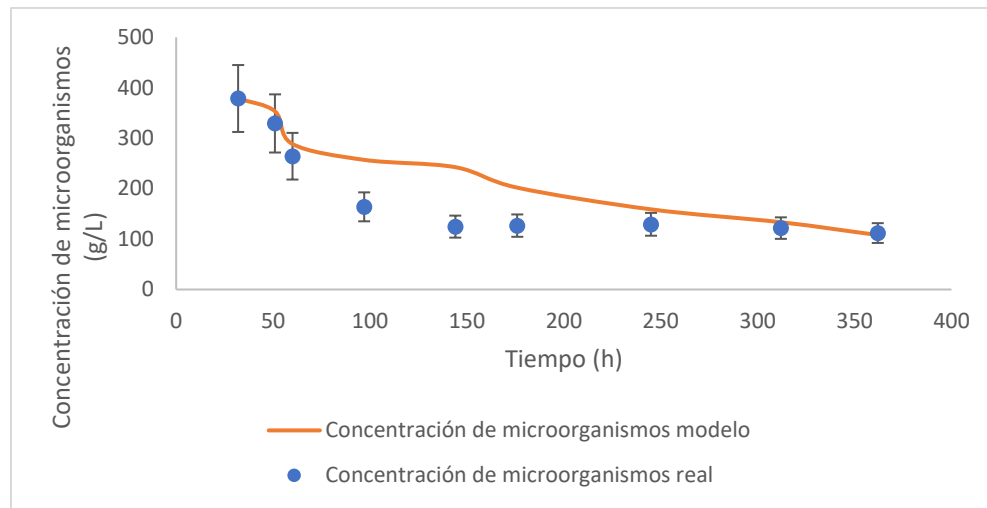
*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de producto y los datos experimentales de concentración de producto real en función del tiempo en la fase de crecimiento celular.

Gráfica 43. Modelo cinético para predecir la concentración de sustrato en la fase de decrecimiento celular



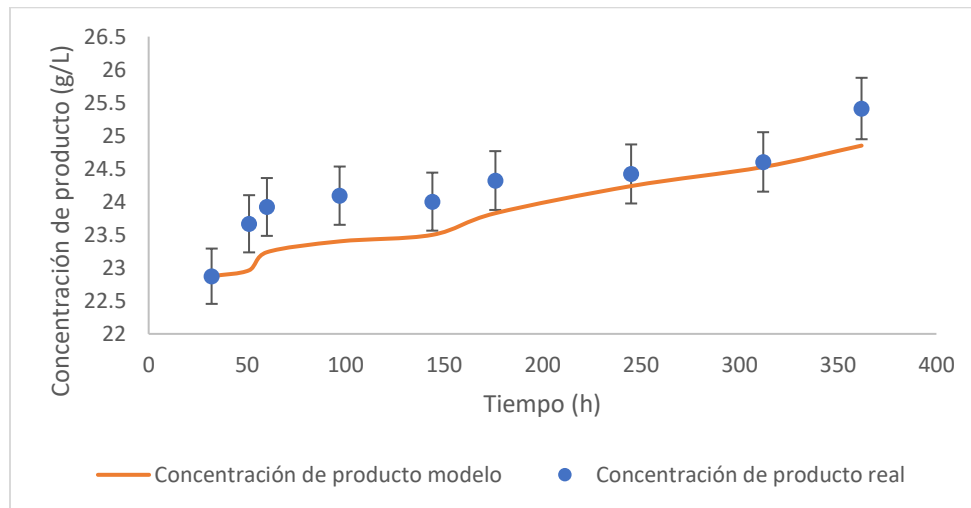
*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de sustrato y los datos experimentales de concentración de sustrato real en función del tiempo en la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 44. Modelo cinético para predecir la concentración de microorganismos en la fase de decrecimiento celular



*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de microorganismos y los datos experimentales de concentración de microorganismos real en función del tiempo en la fase de decrecimiento celular.

Gráfica 45. Modelo cinético para predecir la concentración de producto en la fase de decrecimiento celular



*En la gráfica anterior, se muestran los datos del modelo de concentración de producto y los datos experimentales de concentración de producto real en función del tiempo en la fase de decrecimiento celular.

Cuadro 175. Conteo de microorganismos promedio: células viables y células totales

Muestra	Células totales ($\pm 10\%$ cel/mL)	Células viables ($\pm 10\%$ cel/mL)
0	1.95E+05	1.95E+05
1	4.28E+04	4.09E+04
2	3.94E+04	3.87E+04
3	1.85E+05	1.85E+05
4	1.03E+05	1.03E+05
5	1.02E+05	1.02E+05
6	1.76E+05	1.76E+05
7	2.01E+05	2.04E+05
8	4.25E+05	4.24E+05
9	4.97E+05	4.89E+05
10	8.41E+05	8.29E+05
11	6.59E+05	6.57E+05
12	6.45E+05	6.35E+05
13	5.53E+05	5.40E+05
14	4.02E+05	4.02E+05
15	2.41E+05	2.41E+05
16	2.52E+05	2.48E+05
17	2.51E+05	2.49E+05
18	2.60E+05	2.58E+05
19	1.11E+05	2.20E+05

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados de células totales y células viables obtenidos por conteo celular en las muestras del estudio cinético de reacción.

Cuadro 176. Datos de concentración de microorganismos y propagación de error

Muestra	Concentración de microorganismos (g/L)	$\pm$
1	30.001	0.022
2	20.815	0.047
3	19.724	0.033

Muestra	Concentración de microorganismos (g/L)	±
4	60.009	0.015
5	52.291	0.059
6	51.918	0.052
7	89.642	0.039
8	104.073	0.063
9	215.785	0.051
10	249.231	0.098
11	422.403	0.087
12	334.798	0.165
13	323.593	0.133
14	204.801	0.161
15	122.980	0.132
16	126.313	0.078
17	126.993	0.080
18	131.492	0.079
19	111.925	0.089

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de microorganismos con su respectiva incertidumbre de las muestras del estudio cinético de reacción.

Cuadro 177. Datos de modelo cinético de predicción de sustrato

Tiempo [h]	Cs modelo (g/L)	±	Cs real (±0.0001 g/L)
0	48.456	0.212	48.456
0.5	47.388	0.351	44.974

Tiempo [h]	Cs modelo (g/L)	±	Cs real (±0.0001 g/L)
1	45.420	0.583	43.978
2	40.298	0.128	42.842
3	36.582	0.610	38.753
5	29.662	0.815	32.501
6	26.618	0.182	25.520
7	23.950	0.526	16.604
12	13.953	0.113	10.772
24	9.121	0.244	9.373
32	9.266	0.247	9.266
51	8.999	0.263	9.019
60	8.246	0.290	7.625
97	7.830	0.308	5.365
144	7.605	0.316	4.878
176	6.909	0.352	5.966
245	6.094	0.401	6.299
312	5.560	0.442	5.553
362	4.988	0.509	5.043

*En el cuadro anterior se muestran los resultados de concentración de sustrato del modelo y los datos experimentales de concentración de sustrato real con sus respectivas incertidumbres.

Cuadro 178. Datos de modelo cinético de predicción de microorganismos

Tiempo [h]	Cn modelo (g/L)	±	Cn real (±0.0001 g/L)
0	25.408	0.184	25.408
0.5	29.491	0.305	20.269
1	37.082	0.507	39.862
2	57.154	0.112	56.146
3	72.048	0.530	52.104
5	100.874	0.709	70.780
6	114.130	0.158	96.857
7	126.159	0.458	159.929
12	177.654	0.980	232.508
24	290.425	0.212	249.231

Tiempo [h]	Cn modelo (g/L)	±	Cn real (±0.0001 g/L)
32	378.601	0.215	378.601
51	353.120	0.229	329.196
60	288.465	0.252	264.197
97	256.976	0.268	163.890
144	242.454	0.274	124.647
176	201.866	0.306	126.653
245	158.827	0.348	129.242
312	133.383	0.385	121.708
362	107.939	0.443	111.925

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados de concentración de microorganismos del modelo y los datos experimentales de la concentración de microorganismos real con sus respectivas incertidumbres.

Cuadro 179. Datos de modelo cinético de predicción de producto

Tiempo [h]	Cp modelo (g/L)	±	Cp real (±0.0001 g/L)
0	1.027	0.290	1.027
0.5	1.332	0.480	1.662
1	2.230	0.799	2.648
2	5.346	0.176	5.173
3	2.554	0.835	2.230
5	2.735	0.947	2.417
6	5.020	0.249	4.831
7	11.971	0.721	12.602
12	14.756	0.155	15.782
24	23.469	0.334	22.247
32	22.873	0.338	22.873
51	22.963	0.360	23.667
60	23.236	0.397	23.922
97	23.401	0.422	24.092
144	23.499	0.432	24.002
176	23.827	0.482	24.321
245	24.238	0.549	24.421

Tiempo [h]	Cn modelo (g/L)	$\pm$	Cn real (± 0.0001 g/L)
312	24.526	0.606	24.603
362	24.850	0.698	25.412

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados de concentración de producto del modelo y los datos experimentales de concentración de producto real con sus respectivas incertidumbres.

4. Para los equipos auxiliares

Cuadro 180. Masa de condensados en el tanque de ahogamiento

No.	Volumen (± 0.001 m ³)	Masa (kg)	$\pm$
1	0.018	18.5113	1.0667
2	0.008	8.2272	1.0232
3	0.023	22.6249	1.0927
4	0.023	23.1391	1.0962
5	0.018	17.9971	1.0638

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados obtenidos de volumen y masa de condensados obtenidos en el tanque de ahogamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 181. Masa de condensados en el manifold

No.	Volumen (± 0.0001 m ³)	Masa (kg)	$\pm$
1	0.1257	123.6212	2.2138
2	0.2513	247.2424	4.4263
3	0.3770	370.8637	6.6391
4	0.5027	494.4849	8.8519
5	0.6283	618.1061	11.0648

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados obtenidos de volumen y masa de condensados obtenidos en el manifold del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 182. Masa de condensados en el evaporador

No.	Volumen ($\pm 0.0001 \text{ m}^3$)	Masa (kg)	$\pm$
1	0.0019	1.8543	0.0702
2	0.0050	4.9448	0.1080
3	0.0019	1.8543	0.0702
4	0.0019	1.8543	0.0702
5	0.0025	2.4724	0.0760

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados obtenidos de volumen y masa de condensados obtenidos en el evaporador del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 183. Masa de condensados en la planta de biodiesel

No.	Volumen ($\pm 0.0001 \text{ m}^3$)	Masa (kg)	$\pm$
1	0.0907	89.3163	1.6010
2	0.1816	178.6327	3.2010
3	0.2724	267.9490	4.8012
4	0.3632	357.2653	6.4015
5	0.4539	446.5817	8.0018

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados obtenidos de volumen y masa de condensados obtenidos en la planta de biodiesel del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 184. Flujos másicos de vapor de la caldera

No.	Flujo másico de vapor (kg/s)	$\pm$
1	0.0872	0.0042
2	0.0733	0.0049
3	0.0905	0.0036
4	0.0898	0.0036
5	0.0789	0.0035

*En el cuadro anterior, se muestran los resultados obtenidos de flujo másico de vapor obtenido a partir de las corridas realizadas en la experimentación.

Cuadro 185. Masa de mosto, agua y levadura inicial para el balance de masa

# de lote	Volumen (L)	Volumen (m³)	Masa mosto (kg)	Masa agua (kg)	Masa levadura (kg)
1	15.12	0.015	15.10	14.14	0.007
2	16.28	0.016	16.25		
3	16.34	0.016	16.31		
Promedio	15.91	0.016	15.89		

*En el cuadro anterior, se muestran los datos de volumen obtenidos para el primer lote antes de fermentar. Estos datos se utilizaron para realizar el balance de masa.

Cuadro 186. Masa de azúcares totales fermentables y no fermentables para el balance de masa

Azúcares	Maltosa	Sacarosa	Glucosa	Fructosa	Azúcares totales (kg)	Azúcares no fermentables (kg)
Concentración (g/L)	50.59	18.60	36.29	4.33	1.75	0.24
Masa (g)	805.18	296.05	577.51	68.97		
Masa (kg)	0.81	0.30	0.58	0.07		

*En el cuadro anterior, se muestran los datos de concentración promedio de azúcares fermentables presentes iniciales en el mosto de cerveza cuyos valores se utilizaron para determinar la masa de entrada al proceso de fermentación. La masa de azúcares no fermentables se determinó con un dato teórico de concentración de 15 g/L. Estos datos se utilizaron para realizar el balance de masa.

Cuadro 187. Masa de fermentado y agua para el balance de masa

# de lote	Volumen (L)	Volumen (m³)	Masa de mosto fermentado (kg)	Masa agua (kg)
1	15.12	0.015	14.61	14.14
2	16.28	0.0163	15.73	
3	16.34	0.0163	15.78	
Promedio	15.91	0.0159	15.37	

*En el cuadro anterior, se muestran los datos de volumen finales y la masa del mosto fermentado obtenido con la densidad final y la masa de agua. Estos datos se utilizaron para realizar el balance de masa.

Cuadro 188. Concentración y masa de azúcares fermentables y alcoholes presentes al final de la fermentación para el balance de masa

Compuesto	Maltosa	Sacarosa	Glucosa	Fructosa	Alcohol	Metanol	Azúcares totales (kg)	Alcoholes totales (kg)
Concentración (g/L)	0	6.97	17.23	5.92	47.26	0.041	0.48	0.75
Masa (g)	0	110.93	274.13	94.32	752.01	0.651		
Masa (kg)	0	0.11	0.27	0.09	0.75	0.001		

*En el cuadro anterior, se muestran los datos de concentración y masa final de azúcares y alcoholes presentes después del proceso de fermentación. Estos datos se utilizaron para el balance de masa.

Cuadro 189. Masa de levadura residual del proceso de fermentación de mosto de cerveza para el balance de masa

# de lote	Volumen (L)	Volumen (m3)	Masa levadura (kg)
1	0.28	0.00028	0.37
2	0.34	0.00034	0.45
3	0.29	0.00029	0.38
Promedio	0.30	0.00030	0.40

*En el cuadro anterior, se muestran los datos de volumen final y masa de levadura residual del proceso de fermentación de mosto de cerveza. Estos datos se utilizaron para el balance de masa.

Cuadro 190. Velocidad en m²/s para pruebas de sedimentación

	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
1	764.63 ± 3.24	677.12 ± 3.21	652.69 ± 3.21
2	774.32 ± 3.24	679.56 ± 3.21	660.03 ± 3.21
3	781.58 ± 3.24	677.12 ± 3.21	650.25 ± 3.20
4	776.54 ± 3.24	684.44 ± 3.22	657.58 ± 3.21
DE	7.128	3.449	4.464

Cuadro 191. Velocidad de sedimentación calculada para pruebas de sedimentación

	Inicial	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
1	$1.782 \times 10^{-12} \pm 2.655 \times 10^{-14}$	$2.012 \times 10^{-12} \pm 3.029 \times 10^{-14}$	$2.087 \times 10^{-12} \pm 2.087 \times 10^{-14}$
2	$1.760 \times 10^{-12} \pm 3.595 \times 10^{-14}$	$2.005 \times 10^{-12} \pm 4.121 \times 10^{-14}$	$2.064 \times 10^{-12} \pm 4.249 \times 10^{-14}$
3	$1.743 \times 10^{-12} \pm 2.994 \times 10^{-14}$	$2.012 \times 10^{-12} \pm 3.487 \times 10^{-14}$	$2.095 \times 10^{-12} \pm 3.642 \times 10^{-14}$
4	$1.754 \times 10^{-12} \pm 2.611 \times 10^{-14}$	$1.991 \times 10^{-12} \pm 2.994 \times 10^{-14}$	$2.072 \times 10^{-12} \pm 3.128 \times 10^{-14}$
DE	1.627×10^{-14}	1.014×10^{-14}	1.417×10^{-14}

Cuadro 192. Porcentaje másico de sedimentado y sobrenadante para pruebas de sedimentación.

	7 días de sedimentado	14 días de sedimentado
Sedimentado	$8.58 \pm 0.0012 \%$	$9.02 \pm 0.0010 \%$
Sobrenadante	$91.42 \pm 0.0017 \%$	$90.90 \pm 0.0014 \%$

Cuadro 193. Velocidad en m²/s calculada para pruebas de filtración

	Inicial	Filtrado
1	769.47 ± 3.24	645.35 ± 3.20
2	767.05 ± 3.24	635.56 ± 3.20
3	774.32 ± 3.24	630.66 ± 3.20
4	779.16 ± 3.24	642.91 ± 3.20
DE	5.369	6.746

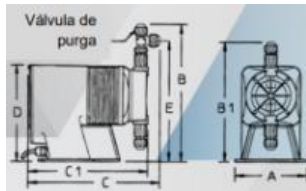
Cuadro 194. Porcentaje másico de retenido y sobrenadante para pruebas de sedimentación

Retenido	Sobrenadante
$8.73 \pm 0.0010 \%$	$91.27 \pm 0.0014 \%$

I. FIGURAS

1. Fichas técnicas

Figura 56: Ficha técnica de la bomba dosificadora de cloro.

Marca	PULSAtron®						
Serie	E						
Modelo	LPK2						
Capacidad nominal máxima	3.00 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$						
Presión máxima	300 PSIG						
Conexiones	Tubing			Tubería			
	1/4" DI x 3/8" DE			1/4" FNPT			
	3/8" DI x 1/2" DE						
Material disponible para la cabeza de la bomba	GFPPL – PVC – PVDF – SS 316						
Diafragma	Frente de PTFE, CSPE en la parte posterior						
Materiales disponibles para las válvulas de retención	Asientos/Anillos			Bolas			
	PTFE – CSPE – Viton			Cerámica – PTFE - SS 316 - Aleación C			
Materiales disponibles para los accesorios	GFPPL – PVC – PVDF						
Válvula de purga	Asientos/Anillos			Bolas			
	PTFE – CSPE Viton			Cerámica – PTFE – Aleación C			
Ensamble de válvula de inyección y válvula de pie	Asientos/Anillos			Bolas			
	PTFE – CSPE Viton			Cerámica – PTFE Aleación C			
Tubería	PVC transparente – PE blanco						
Dimensiones	A	B	B1	C	C1	D	E
Foto	5.4"	10.3"	-	10.8	-	7.5"	8.9"
	Diagrama						
Reproducibilidad	± 3% a máxima capacidad						

Máxima viscosidad	3000 CPS
SPM Máxima de frecuencia de recorrido	125
Tasa de reducción de la frecuencia de recorrido	10:1
Tasa de reducción de longitud de recorrido	10:1
Alimentación	115 VCA/50-60 HZ/1 ph 230 VCA/50-60 HZ/1 ph
Consumo de energía promedio	@ 115 VCA, 1.0 Amps @ 230 VCA, 0.5 Amps
Corriente entrada pico	300 watts
Corriente de entrada promedio @ máx. SPM	130 watts

Figura 57: Ficha técnica del filtro de sedimentos

Marca	STRUCTURAL Pentair Water
Modelo	Polyglass Pentair® Structuras
Código	660010
Dimensiones del tanque	10" x 54"
Boca del tanque	2 1/2 " Rosca superior
Tipo de base	Estándar
Capacidad de material filtrante	1.5 ft ²
Color	Azul
Material de construcción	Carcasa interior de polietileno de alta densidad
Presión operativa máxima	150 psi
Temperatura operativa máxima	120°F
Factor de seguridad	4:1

Explosión mínima	600 psi
Foto	
Válvula	VERTEX®
Modelo	2750
Código	651260
Tanque	10" x 54"
Material	1.5 ft ²
Conexiones	1 "
Flujo de servicio	5.40 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$
Foto	

Figura 58: Ficha técnica del filtro de columna de carbón activado

Marca	STRUCTURAL Pentair Water
Modelo	Polyglass Pentair® Structuras
Código	660010
Dimensiones del tanque	10" x 54"
Boca del tanque	2 1/2 " Rosca superior
Tipo de base	Estándar
Capacidad de material filtrante	1.5 ft ²
Color	Azul
Material de construcción	Carcasa interior de polietileno de alta densidad
Presión operativa máxima	150 psi
Temperatura operativa máxima	120°F
Factor de seguridad	4:1
Explosión mínima	600 psi
Foto	
Válvula	VERTEX®
Modelo	2750

Código	651260
Tanque	10" x 54"
Material	1.5 ft ²
Conexiones	1 "
Flujo de servicio	5.40 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$
Foto	

Figura 59: Ficha técnica del material filtrante del filtro de columna de carbón activado

Marca	Watts® Water Technologies
Código	601132
Descripción	Carbón activado mineral
Tipo	Bituminoso
Volumen	2 $\frac{\text{ft}^3}{\text{bulto}}$
Malla	8 x 30
Peso/bulto	25 kg (55 lb)
Especificaciones	Índice de yodo: 900 mínimo (mg/g) Número de dureza: mínimo Humedad (al empacar): 5% máximo Densidad aparente: 0.50 típico (g/cc) Contenido total de ceniza: 2% máximo

Foto	

Figura 60: Ficha técnica del material filtrante del filtro de sedimentos

Marca	Watts® Water Technologies
Código	601140
Descripción	Antracita 1 (0.6 – 0.8 mm)
Aplicación	Sedimentos turbidez
Volumen	$1 \frac{\text{ft}^3}{\text{bulto}}$
Peso/bulto	22.7 kg (50 lb)
Foto	

Figura 61: Ficha técnica de la lámpara de luz UV

Marca	VIQUA® Simply Safe Water
Código	S5Q-PA
Flujo de diseño	6 $\frac{\text{gal}}{\text{min}}$
Dosis	30 $\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}$
Parámetros de operación	
Presión máxima	125 psi
Temperatura del agua de alimentación	2 °C – 40 °C
Orientación	Vertical u Horizontal
Especificaciones eléctricas	
Voltaje	100 -240V/50-60Hz
Consumo	30W
Dimensiones	
Cámara	22 in x 2 $\frac{1}{2}$ in
Conexiones	$\frac{3}{4}$ in MNPT
Características del sistema	
Material de cámara	Acero Inoxidable SS 304
Sensor UV	NO
Encendido/ Apagado visual	SI
Alarma visual de la vida del foco	SI
Alarma por fallo de la lámpara	SI

Alarma de recordatorio para reemplazo de la lámpara	SI
Opciones	
Regulador de flujo	SI
Válvula para control de temperatura	NO
Válvula solenoide	NO
Foto	

Figura 62: Ficha técnica del filtro pulidor

Marca	VERTEX®
Modelo	BB
Código	607703
Dimensiones del tanque	4.5" x 10"
Entrada/Salida	1.0"
Purgador	Si
Tapa	Negra
Cantidad por Caja	4
Rango máximo de presión	100 psi (6.9 bar)

Rango de temperatura	4-52°C (40-125°F)
Material de construcción	Polipropileno reforzado
Accesorios	Brackets Llaves
Foto	
Cartucho	PENTEK®
Modelo	Spun P
Código	607341
Medidas	2.38" x 9.88"
Micras	1
Material	Fibra de polipropileno
Temperatura mínima	4.4°C
Temperatura máxima	62.8°C
Foto	

Figura 63: Ficha técnica de la bomba seleccionada

Marca	Aquastrong
Modelo	Ejm61C
Flujo máximo	45.0 L/min
Flujo mínimo	5.0 L/min
Cabeza máxima	38.0 m
Succión máxima	9.0 m
Diámetro de carga	0.0254 (1 in)
Diámetro de descarga	0.0254 (1 in)
Grado de protección	F
Grado de aislamiento	IPX4
Material	Acero inoxidable
Temperatura ambiente máxima	+40.0°C
Temperatura líquida máxima	+40.0°C
Potencia	0.45kW
Frecuencia	0.60 Hz
Voltaje	110
Capacitancia	25 micro faradios
Inductancia	250 volteos
Fotos	

Figura 64: Ficha técnica del primer separador

Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	Foto
	0.47 m	0.29 m	0.28 m	
Dimensiones de la malla de separación	Largo	Alto	Ancho	
	0.45 m	0.02 m	0.26 m	
Dimensiones de la tolva de descarga de impurezas	Largo	Alto	Ancho	
	0.47	0.06 m	0.28	
Tipo de impureza que remueve	Materias gruesas			
Mesh de la malla de separación	2.00 mm			
Angulo de la tolva de impurezas	15°			
Malla removible	SI			
Materiales	Malla	Estructura general	Tolva de descarga	
	Acero	Acero	Acero	
Sistema de vibración	Sistema resorte			
Cantidad máxima de cebada que permite limpiar	0.23 kg			
Tiempo de eliminación de impurezas	10 minutos			

Figura 65: Ficha técnica del segundo separador

Dimensiones	Caja separadora		Ventilador		Foto
	Largo	0.20 m	Largo	0.40 m	
	Alto	0.20 m	Alto	-----	
	Ancho	0.10 m	Ancho	-----	
Velocidad de la corriente de aire				10 km/h	
Tipo de impureza que remueve				Partículas ligeras	
Diámetro de la salida de impurezas de la caja separadora				0.18 m	
Diámetro de la entrada de aire a la caja separadora				0.18 m	
Material de la caja				Cartón	
Material de la estructura del ventilador				Plástico	
Material de las aspas				Acero inoxidable	
Ventilador	Consumo	Conexión	Diámetro del sistema de aspas		
	0.08 kWh	110 V	0.20 m		

Figura 66: Ficha técnica del tercer separador

Dimensiones	Alto	Diámetro	Foto
	1.50 m	1.00 m	
Capacidad	18.00 kg		
Mesh la malla de separación	2.50 mm		
Material de la malla de separación	Acero		
Entrada y salida de cebada	Entrada	Salida	
	Parte superior	Parte superior	
Salida de impurezas	A través de la malla		
Tipo de impureza que remueve	Granos descartados		



Figura 67: Ficha técnica del tanque de remojo

Dimensiones	Alto	Diámetro	Foto
	0.46 m	0.33 m	
Volumen máximo general (Agua + Cebada)	3.50x10 ⁻² m ³		
Volumen máximo de cebada	2.700x10 ⁻² m ³		



Altura de la cama de agua	0.10 m sobre el nivel de la cebada	
Material del tanque		
Sistema de aireación	Manual * Se debe sacar el agua	Tiempo de aireación
		30 minutos cada 6 horas
Tiempo de cambio de agua	Cada 6 horas	

Figura 68: Ficha técnica de la plancha de germinado

Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	Foto
	0.85 m	0.20	0.45 m	
Dimensiones de la malla de germinado	Largo	Alto	Ancho	
	0.83 m	0.02 m	0.43 m	
Mesh de la malla de germinado	2.50 mm			
Material de la malla	Acero			
Material de la estructura	Acero			
Malla removible	SI			
Sistema de iluminación	NO			
Sistema de control de agentes externos	NO			
Capacidad máxima de cebada	9.00 kg			
Tamaño de la capa de cebada	0.01 m			

Figura 69: Ficha técnica de la caja de germinado

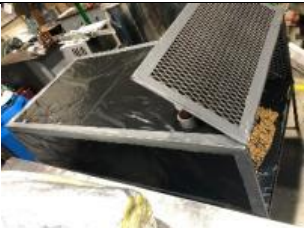
Dimensiones generales	Largo	Alto	Ancho	Foto – exterior 
	2.00 m	1.00 m	1.00 m	
Dimensiones de la caja de germinado	Largo	Alto	Ancho	
	2.00 m	0.50 m	1.00 m	
Mesh de la malla de germinado	2.50 mm			
Material de la malla de germinado	Acero			
Material de la estructura general	Acero			Foto – interior 
Sistema de iluminación	Tipo	Consumo	Conexión	
	2 fotos LED	0.4 kWh	Roscada	
Sistema de control de agentes externos	Primer control		Segundo control	
	Pared de polipropileno de alta densidad		Malla de acero	
Sistema de riego de cebada	Manual – con atomizador			
Capacidad máxima de cebada	18.00 kg			
Tamaño de la capa de cebada	0.01 m			

Figura 70. Ficha técnica de filtro de elemento

Marca	PENTAIR
Modelo	PENTEK Big Blue
Código	150235
Tipo de base	Suspendido con estructura metálica
Porosidad	5 micras
Largo de filtro	0.45 m
Diámetro de filtro	0.07 m
Largo de carcasa	0.54 m
Diámetro de carcasa	0.15 m
Color de filtro	Blanco
Color de carcasa	Celeste
Presión operativa máximo	90 psi
Presión operativa mínima	40 psi
Caída de presión	15 psi
Temperatura operativa máxima	37.78 °C
Temperatura operativa mínima	4 °C
Diámetro de entrada	0.0381 m (1.5 in)
Diámetro de salida	0.0381 m (1.5 in)

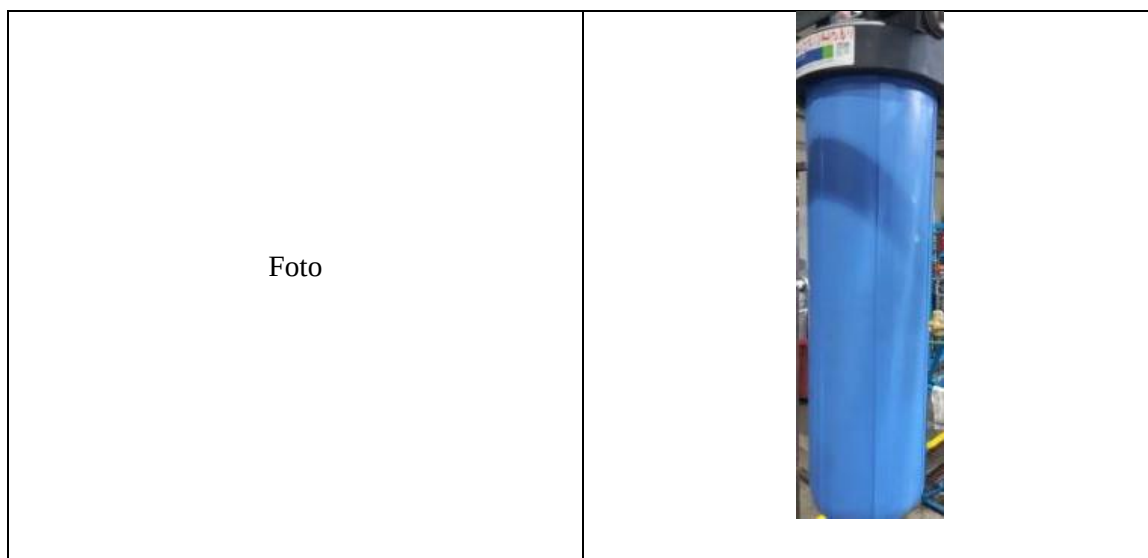


Figura 71: Deshidratador de gabinetes del laboratorio de operaciones unitarias



Figura 72: panel de control de deshidratador de gabinetes



Cuadro 195. Datos técnicos del deshidratador de gabinetes del laboratorio de operaciones unitarias

Dato	Descripción
Voltaje	220 V
Tamaño	1.93m de alto X 1.73m de ancho X 2.28 m de profundidad
Temperatura máxima	115°C
Marca	Corbett Industries Inc.
Potencia del motor del ventilador	1 hp
Modelo	EC-404-6
Bandejas de equipo	0.47 m X 0.80 m

Figura 73: secador de rodillos



Cuadro 196. 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 74: Tamizadora vibratoria



Cuadro 197. Datos técnicos de tamiz vibratorio

Dato	Descripción
Marca	W. S. Tyler
Modelo	RX-29
Tipo	Rotap
Número de serie	19183
Tamices	No. 20, 30, 45, 60, 80, 100 y plato de finos
Capacidad	450 g
Motor	Marca Baldor
Corriente	5 A
Voltaje	120 V

Figura 75: Bomba centrífuga Aquastrong EJm61C



Cuadro 198. 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 μ 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 76: Tanque de acero inoxidable del laboratorio de operaciones unitarias



Cuadro 199. Datos técnicos de tanque de acero inoxidable del laboratorio de operaciones unitarias

Dato	Descripción
Material	Acero inoxidable
Volumen	0.255 m ³
Alto	1 m
Diámetro interno	0.57 m
Llave de salida	0.016 m (1/2 in)
Aislamiento	Fibra de vidrio
Espesor de aislamiento	2 mm

Figura 77. Agitador con motor WEG



Cuadro 200. Datos técnicos de agitador

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 78: Fermentador de la planta piloto



Cuadro 201. Datos técnicos de fermentador

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 (0 a 200 kPa)

Figura 79: Molino de rodillos propuesto



(CPM, 2019)

Cuadro 202. Datos técnicos de molino de rodillos propuesto

Dato	Descripción
Marca	Roskamp Champion
Modelo	FX 1600
Rodillos	De 0.40m de diámetro (16 inch)
Producto principal	Hojuelas

Figura 80: Bomba propuesta en planta piloto



(Netzsch, 2019)

Cuadro 203. Datos técnicos de bomba propuesta para procesos en sala de cocimiento

Dato	Descripción
Marca	Netzsch
Modelo	NM201
Tipo	Rodete centrífugo helicoidal
Temperaturas	-40°C a 300°C
Potencia	1.1 kW
Caudal	600 – 32300 l/h

Bombas empleadas en industria cervecera para movilización de mosto

Figura 81. Especificaciones de balanza analítica BOECO Germany

Especificaciones	BAS 31
Capacidad máxima	220 g
Carga mínima	0,01g
Legibilidad	0,0001 g
Rango de tara	- 220 g
Linealidad	± 0,0002 g
Tamaño de bandeja	ø 85 mm
Tiempo de estabilización	3,5 sec.
Calibración	Internal (automatic)
Interfaz	2xRS232, 2xUSB(A+B)
Pantalla	large LCD with backlight
Temperatura de trabajo	+ 10°C - +40°C
Fuente de poder	110-230 V AC, 50/60 Hz
Peso neto / bruto	5,6 kgs / 7,7 Kg
Tamaño / Empaque	333x206x355 / 495x400x515 mm

Figura 82. Especificaciones del refractómetro digital ATAGO Rx-5000i

Modelo	RX-5000i	Número de Catálogo	3276
Rango de Medición	Índice de Refracción (nD) : 1.32420 a 1.58000 Brix : 0.00 a 100.00% (5 a 75°C ATC)	Indicación Mínima	Índice de Refracción (nD) : 0.00001 Brix : 0.01% Temperatura: 0.01°C
Exactitud de la Medición	Índice de Refracción (nD) : ±0.00004 Brix : ±0.03%	Gama de la temperatura	5.00 a 75.00°C (No mas bajo de 10°C temperatura ambiental y no mas arriba de 55°C temperatura ambiental)
Repetición	Índice de Refracción : ±0.00002 Brix : ±0.01%	Fuente de Poder	AC100V a 240V, 50/60Hz
Consumo de Poder	90VA	Dimensiones y Peso	37×26×14cm, 6.6kg (Unidad principal solamente)
Modo	Modo-1: Presenta el valor de la medida cuando la muestra llega al objetivo de la temperatura. Modo-2: Mide índice de refracción y la temperatura en diferentes intervalos fijos y presenta el valor estimado de la medida en la temperatura deseada. Modo-3: Dispone una opción para apagar el termo-módulo. Sin control de temperatura, el valor de medición se muestra en 4 segundos después de presionar la tecla de inicio. Modo-S: Presenta la medición del valor una vez un cierto nivel de estabilidad de la muestra es alcanzado.		
Terminales de Salida	• Impresora (Para ATAGO Impresora Digital) • Computadora - USB		
Opcional	• Software Refractosoft : Cat.No.3176 • Impresora Digital DP-63 : Número de Catálogo 3118 • Impresora Digital DP-AD : Número de Catálogo 3123 • MAGIC™(metal) : RE-56180 • MAGIC™(resin) : RE-56185 • Accesorio para célula de flujo : RE-56172 • 10% Sucrosa (± 0.01%) : RE-111001 • 20% Sucrosa (± 0.01%) : RE-112001 • 30% Sucrosa (± 0.01%) : RE-113001 • 40% Sucrosa (± 0.02%) : RE-114002 • 50% Sucrosa (± 0.02%) : RE-115002 * Calibration Certificate : Contact an ATAGO representative for details.		
Piezas	• Papel de impresora (normal) para DP-63 : RE-8412 • Papel de impresora (larga vida de almacenaje) para DP-63 : RE-8414 • Papel de impresora (normal) para DP-AD : RE-89403 • Cassette de cinta para DP-AD : RE-89402 • Repuesto de filtro de ventilador : RE-58001		

Figura 83. Especificaciones del potenciómetro utilizado para análisis de pH

Resolution (Temperature)	0.1 °C
Accuracy (mV)	±0.2 mV (±199.9 mV), ±2 mV beyond ±200 mV
Range (pH)	0 to 14
Outputs	Recorder (±2000 mV)
Temperature Probe Calibration	Offset in 0.1 °C increments; Offset range: ±5 °C
Memory	100 data sets
Temperature Range (Metric)	0.0 to 100.0 °C
Calibration Points	1 to 5 points with automatic buffer recognition (ABR)
Inputs	BNC, 2.5 mm phono plug, reference pin tip, ground
Resolution (mV)	0.1 mV (±199.9 mV); 1 mV beyond ±200 mV
Electrical Requirements	AC/DC 9 V adapter (110/220 VAC, 50-60 Hz)
Range (mV)	±1999 mV

Figura 84. Especificaciones del autoclave o esterilizador de cristalería

Overall dimensions	48W x 79D x 74Hcm (18 ³ / ₄ x 31 x 29")
Chamber dimensions	66L x 41dia. cm (26 x 16")
Operating pressure	1 atm, 100 kPa (15 psi)
Net weight	63 kg (140 lbs.)

Figura 85. Especificaciones del baño térmico Thermo Scientific

Certificaciones/conformidad	CE/ROHS/WEEE	Capacidad de refrigeración	240w
Dimensiones (longitud x anchura x altura)	16.3 x 8.7 x 24.9 in. (41.4 x 22 x 63.2 cm)	Capacidad (métrico)	6 L
Altura (métrico)	63.2 cm	Longitud (métrico) interior	12.4 cm
Peso (métrico)	27.5 kg	Anchura (métrico)	22 cm
Anchura (métrico) interior	13.7 cm		

Figura 86. Especificaciones de la incubadora New Brunswick

Temperature Range:	Approximately 5°C above ambient to 60°C
Recovery Time:	Approximately 45 sec. (at 37°C) for chamber to recover to 37°C after lid is opened for 10 sec. with ambient air at 25°C
Stroke: *	Rotary motion - 1" circle reciprocating motion - variable from 0 to 3 1/2"
Speed Range: *	Rotary - 40 to 400 RPM reciprocating - 30 to 285 strokes/min.
Dimension - External (with lid closed):	
	Length: 22"
	Width: 45 1/2"
	Height: 30 1/2"
Dimensions Chamber:	
	Length: 22"
	Width: 34 1/2"
	Height: 12 1/2" (optional king size 19 1/2")

Figura 87. Especificaciones del cromatógrafo de gases (GC)

Opciones del Sistema	
Soporte simultáneamente	2 inyectores, 3 detectores (uno de ellos tiene que ser TCD o ECD, 4 señales de detector)
Sistema EPC	En inyectores y detectores
Módulos EPC disponibles	Hasta 6 módulos, con posibilidad de 16 señales
Control de presión	Hasta 0,001 psi
Condiciones atmosféricas	La presión y temperatura ambiental no afectan a los resultados
Opción LTM	Opción de columnas LTM
Mantenimiento	Botón de acceso directo
Test de fugas	Programables
Introducción de muestra líquida automática	Integrada en el control del equipo
Eventos	550
Pantalla	Con información del estado de automuestreadores y del GC
Opciones del Horno	
Dimensiones	28 x 31 x 16cm
Temperatura de operación	4°C a 450°C
Opción Nitrógeno criogénico	(-80)°C a 450°C
Opción Dióxido de Carbono criogénico	(-45)°C a 450°C
Resolución de temperatura	0,1°C
Rampa máxima temperatura	120°C/min
Máximo tiempo de análisis	999,99 min
Tiempo enfriamiento	Si la temperatura ambiental es de 22°C tarda 4 min en pasar de 450°C a 50°C

Figura 88. Especificaciones del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC)

Table 2 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, $\pm 10\%$	Wide-ranging capability
Line frequency	50 or 60 Hz, $\pm 5\%$	
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 89. Especificaciones de la columna DB-624

Megabore	
ID (mm)	0.45 – 0.53 mm
Length (m)	15 – 75 m
Film (µm)	2.55 – 3.00 µm
Temperature Limits (°C)	-20 – 260 °C

Figura 90. Especificaciones de la columna Aminex HPX-87K del HPLC

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

Figura 91. Especificaciones del citómetro de flujo Muse

Muse® System

Physical Characteristics

instrument weight:	13.1 lb (5.94 kg)
instrument size	
height:	8.69 in (22.07 cm)
width:	8.12 in (20.62 cm)
depth:	11.11 in (28.22 cm)
connectors:	power – Kycon KPJX-PM back panel for motherboard – Intel D525MW five USB connectors—one on front and four on back of instrument

Operating Environment

temperature:	16–35°C (60–95°F)
external power supply (input voltage range):	100–240 VAC, 50/60 Hz 80 W
main unit (input voltage):	15VDC, 5A
fuse rating:	auto-resettable

Optics

laser:	532-nm green laser
forward scatter detector:	photodiode
fluorescence detectors:	photodiodes (YLW 576/28, RED 680/30)

Signal Processing

parameter dynamic range:	4.0 decade
pulse processing:	digital signal processing
time:	every particle time stamped

Figura 92. Especificaciones del sistema de enfriamiento

Base Specifications	
Model Number	TCA018AKC
Max. Cooling Capacity (Btuh)	17800
SEER Label	10
Sound Rating Decibels	70 / 68
Fan HP / Type / Speeds	1/8-PSC-2
Fan RPM / Max. CFM	1075 / 1400
Coil Face Area (Sq Ft)	10.7
Coil Rows / Fins Per Inch	1 / 24
Line Connection Suction I.D. Size (In.)	3/4
Line Connection Liquid I.D. Size (In.)	3/8
Supplied Optional Evaporator Orifice Size	.051
Factory Charge - R22 (Oz)	64
Compressor	Scroll
Weight Lbs. (Ship)	130
Electrical Specifications - 208 - 230	
Minimum Circuit Ampacity	12.8
Wire Size/Max. Length (AWG Cu) Ft.	14 / 58
Time Delay Fuse (Amps)	15
Max. Fuse or HACR Breaker Size (Amps)	20
Compressor Full Run / Lock Rotor Amps	9.6 / 47
Fan Full Load / Lock Rotor Amps.	.66 / 1.55

Figura 93. Especificaciones de la caldera

Capacidad nominal	50 a 800 hp
Presión de trabajo	Vapor a 103-1724 kPa (15-250 psig) o un valor mayor si se especifica Agua caliente a 207-1724 kPa (30-250 psig) o un valor mayor si se especifica
Combustible	Fueloil o gas, o combinación
Encendido	Automático
Alimentación	Modulación completa a través de los rangos de trabajo
Quemador (fueloil)	Pulverización por aire comprimido (baja presión)
Quemador (gas)	Sin premezcla, del tipo con orificios
Amortiguador de aire	De tipo giratorio (modulación electrónica)
Guarnición de vapor	Código ASME
Guarnición de agua	Código ASME

Figura 94. Especificaciones de equipos auxiliares propuestos

Equipo auxiliar	Nombre del equipo	Especificaciones		Proveedor
Sensor de temperatura	TERMOSTATO DIGITAL CON VAINA ACERO DE INOXIDABLE	Marca	COEL	AMAZON
		Modelo	TLE 20	
		Longitud de vaina	1.0 m	
		Rango de medición	-50°C - 100°C	
		Dimensiones	33 x 75 x 65 mm	
		Precisión	0.50%	
		Consumo energético	5 W	
Sensor de pH	SENSOR DE pH DE PROCESO EN LÍNEA DE ACERO INOXIDABLE	Marca	Hach	HACH
		Modelo	LXV 427	
		Diámetro	0.00354 m (35.4 mm)	
		Longitud	0.2713 m (271.3 mm)	
		Rango de medición	0 – 14 pH	
		Precisión	± 0.02 pH	
		Material de carcasa	Acero inoxidable	
Controlador digital	CONTROLADOR DIGITAL ENTRADA 1 DONDA DIGITAL, 2x mA OUT	Marca	Hach	HACH
		Modelo	SC 200	
		Condiciones de almacenamiento	-20°C – 70°C	
		Dimensiones	144 x 144 x 181mm	
		Peso	1.70 kg	
		Voltaje	100-240V	
Propuesta de sistema de agitación	AGITADOR MECÁNICO PARA FERMENTADOR	Diámetro de impulsor	0.160m	TALLERES HERNÁNDEZ
		Tipo de impulsor	Turbina de discos	

		Material del eje e impulsor	Acero inoxidable	
		Número de palas	6	
		Largo de palas	0.040m	
		Ancho de palas	0.032m	
		Diámetro del eje	0.009m	
		Velocidad de agitación	1500 rpm	
		Número de Reynolds	3,559.82	
		Potencia del motor	186.5 W	
		Conexión	Trifásica	
Reductor de velocidad de agitación	REDUCTOR DE ENGRANAJES	Marca	Genérico	EBAY
		Modelo	040-63B5	
		Voltaje de funcionamiento	6V	
		Relación de tipo	150:1	
		Velocidad de entrada	1500 rpm	
Válvula de seguridad	VÁLVULA DE ALIVIO DE ACERO INOXIDABLE SOLDABLE	Material	SS316L	MAINCO
		Temperatura máxima de operación	121 °C	
		Presión máxima de trabajo	2 x 10 ⁵ Pa (2 bar)	
		Medida	0.0254 m (1'')	
		Conexiones estándar	DIN 11851	
Válvula de salida de gases	VÁLVULA DE RETENCIÓN SOLDABLE TAINOX	Material	SS316L	MAINCO
		Máxima presión de trabajo	1 x 10 ⁶ (10 bar)	
		Medida	0.0254m (1'')	
Válvula de descarga	VÁLVULA DE COMPUERTA PN - 16	Material	SS316	MAINCO
		Presión máxima de trabajo	1.59 x 10 ⁶ Pa	
		Medida	3.81 m (1.5'')	
		Conexiones estándar	DIN 2999	

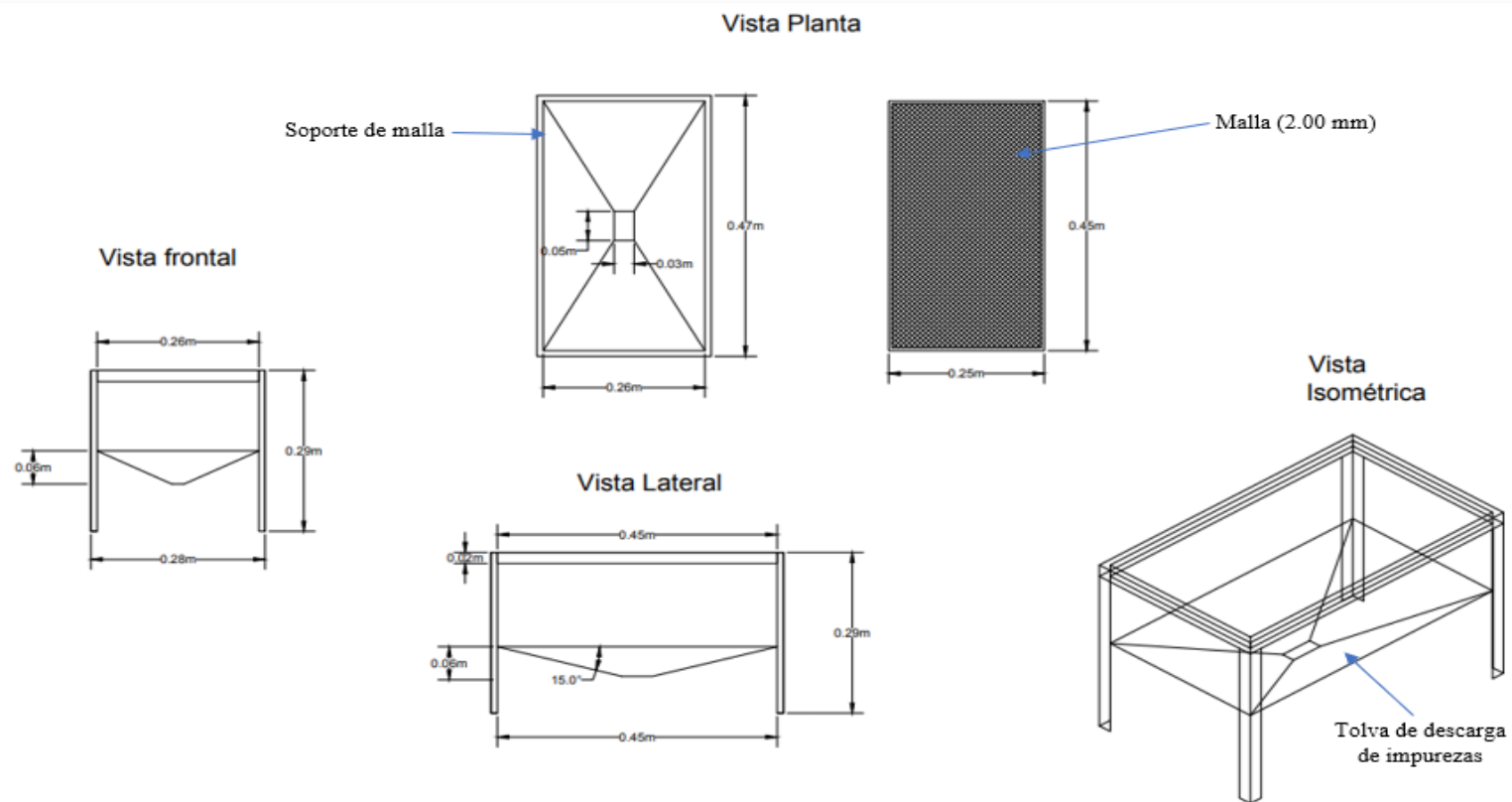
Empaques	EMPAQUE DE NEOPRENO	Material	Neopreno	PRAISA, S.A.
		Rango de temperatura	-20°C - 105°C	

Figura 95. Especificaciones de equipos disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias

Equipo auxiliar	Nombre del equipo	Especificaciones	
Sistema de enfriamiento	ENFRIADOR TEMPSTAR	Marca	Tempstar
		Modelo	SmartComfort 2000
		Capacidad	5216.67 W (17800 Btu/h)
		Rango de temperaturas	1°C - 25°C
Bomba del sistema de enfriamiento	BOMBA CENTRÍFUGA	Marca	National Filter Corp (NFC)
		Modelo	SSM - 36
		Tipo de bomba	Centrífuga
		Potencia de la bomba	746 W (1 hp)
		Flujo	125 L/min (2.08kg/s)
		Diámetro de succión	0.0127m (1/2'')
		Diámetro de descarga	0.00635m (1/4'')
Sistema de calentamiento	CALDERA	Marca	Cleaver-Brooks
		Modelo	CB
		Tipo de caldera	Pirotubular
		Temperatura de vapor	162.65 °C
		Presión de vapor	6.894 x 10 ⁵ Pa (80 psig)
		Potencia de la caldera	40 BHP
		Capacidad de la caldera	0.084 ± 0.008 kg/s

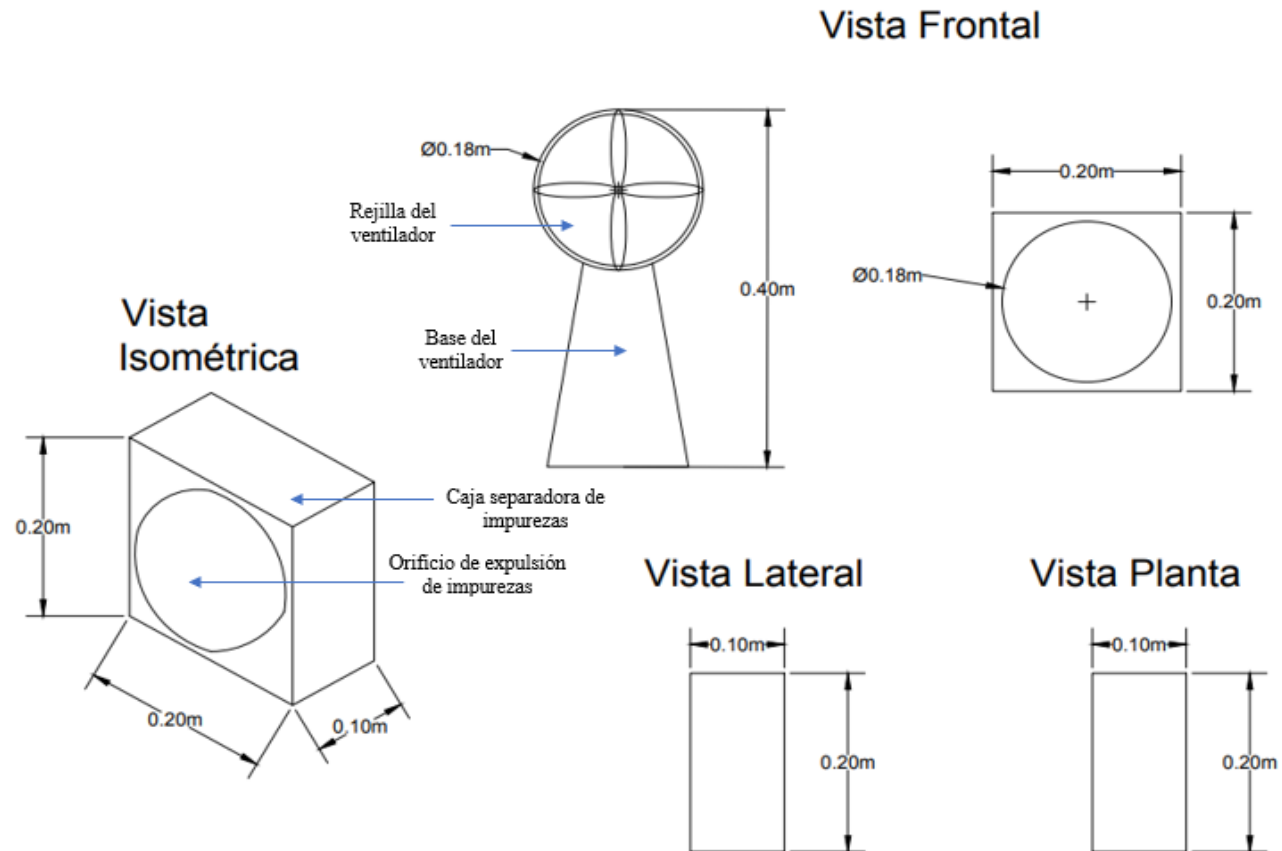
2. Diagramas de equipo

Figura 96: Diagrama del primer separador.



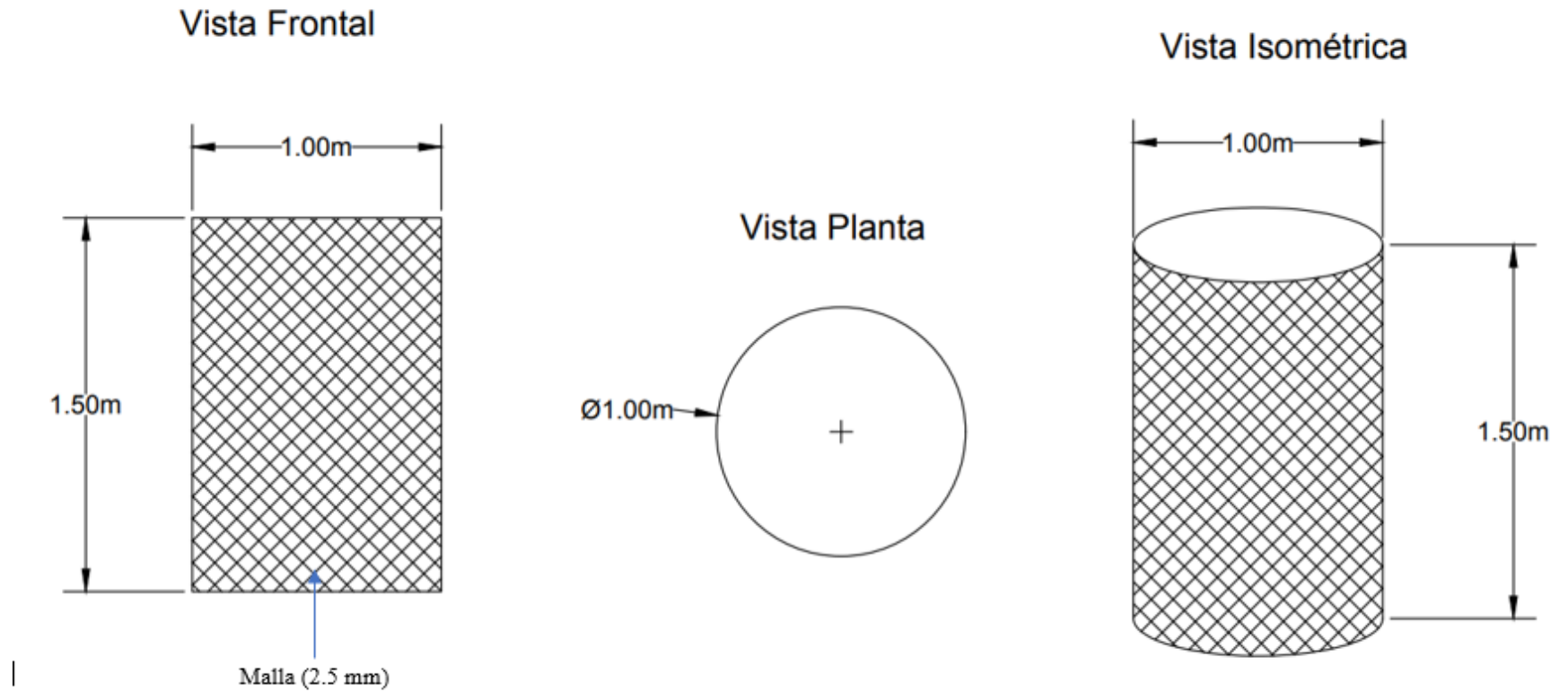
Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento

Figura 97: Diagrama del segundo separador



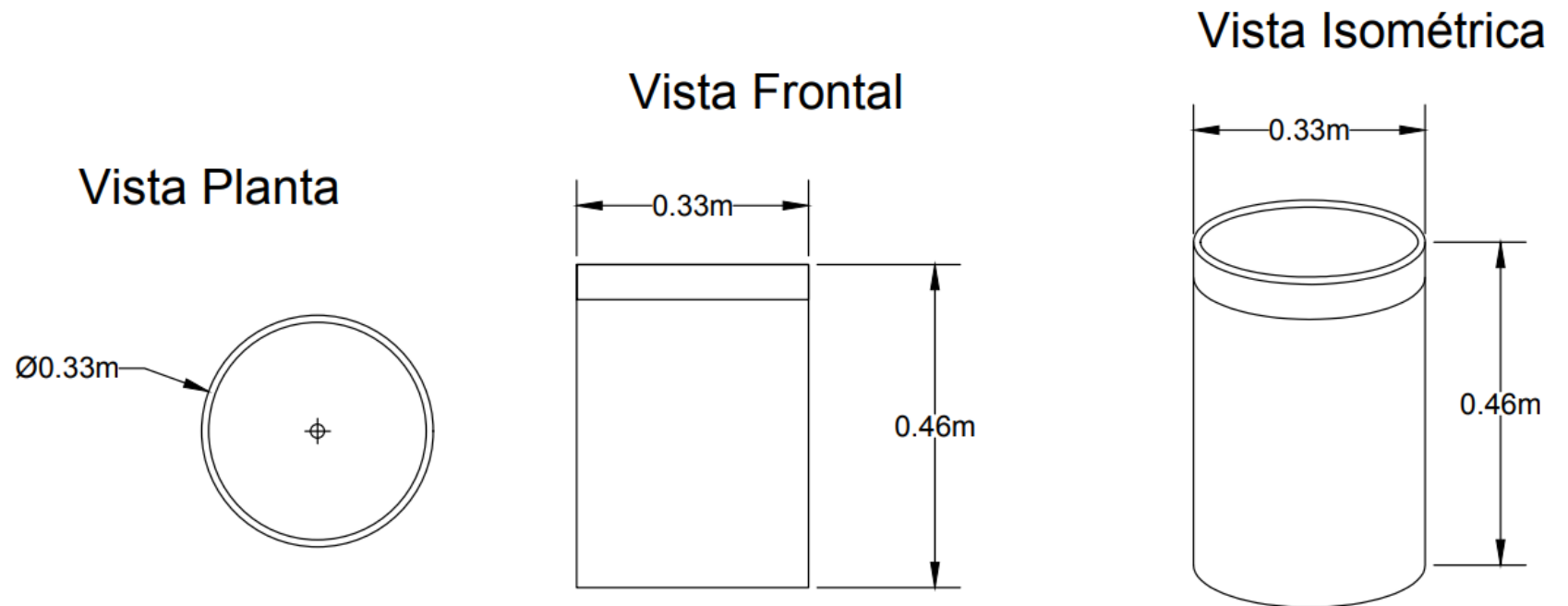
Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento.

Figura 98: Diagrama del tercer separador



Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento.

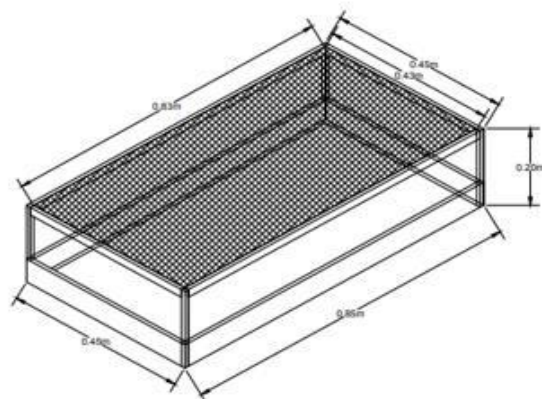
Figura 99: Diagrama del tanque de remojo



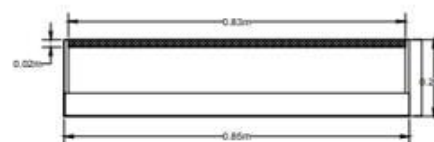
Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento.

Figura 100: Diagrama de la plancha de germinado

Vista Isométrica



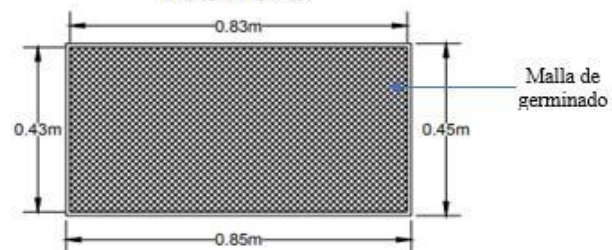
Vista Lateral



Vista frontal

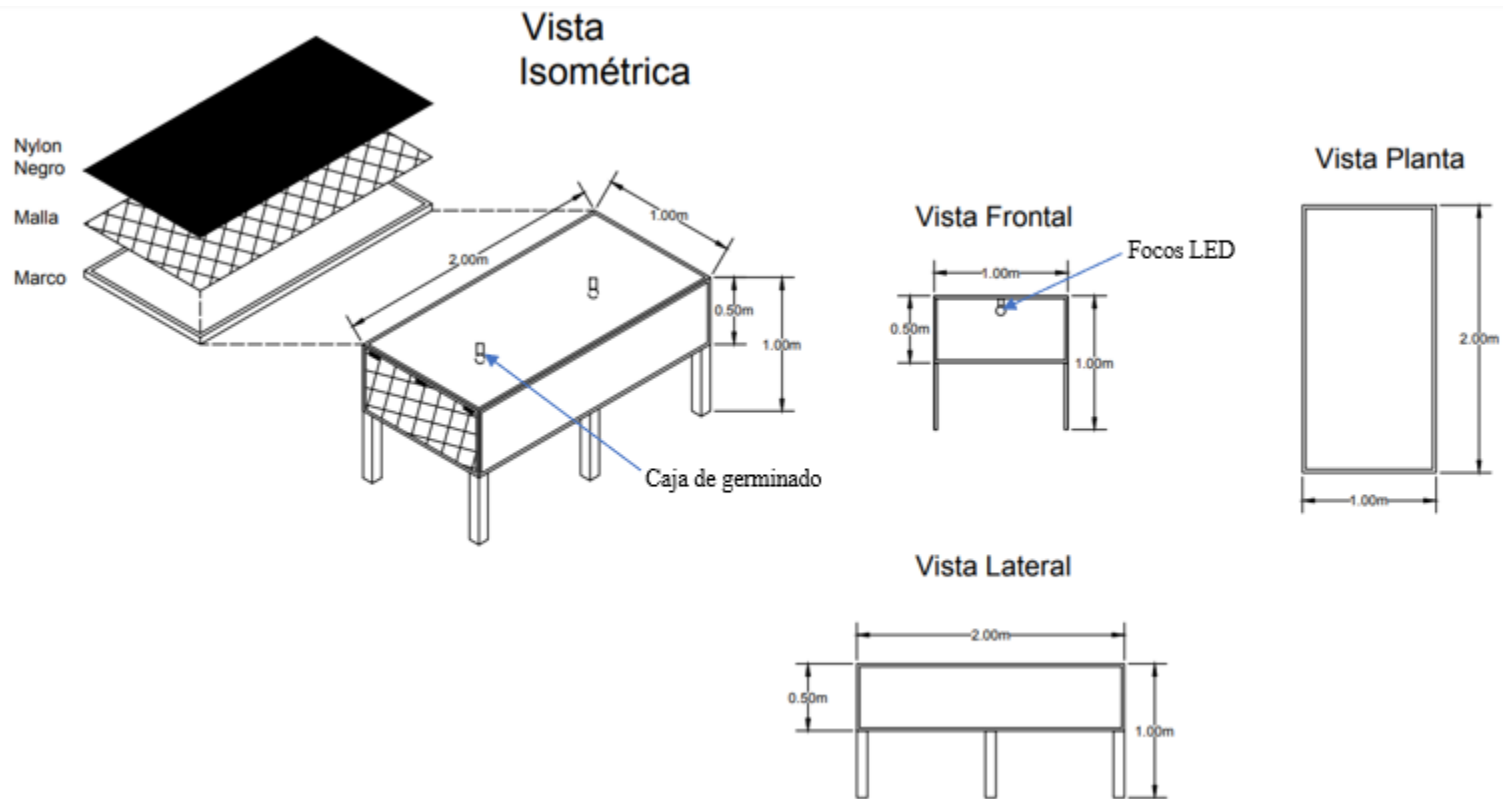


Vista Planta



Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento

Figura 101: Diagrama de la caja de germinado



Nota: El CAD se encuentra adjunto al final del documento.

Figura 102: Diagrama 3D de la planta de producción de cerveza (Vista Isométrica)

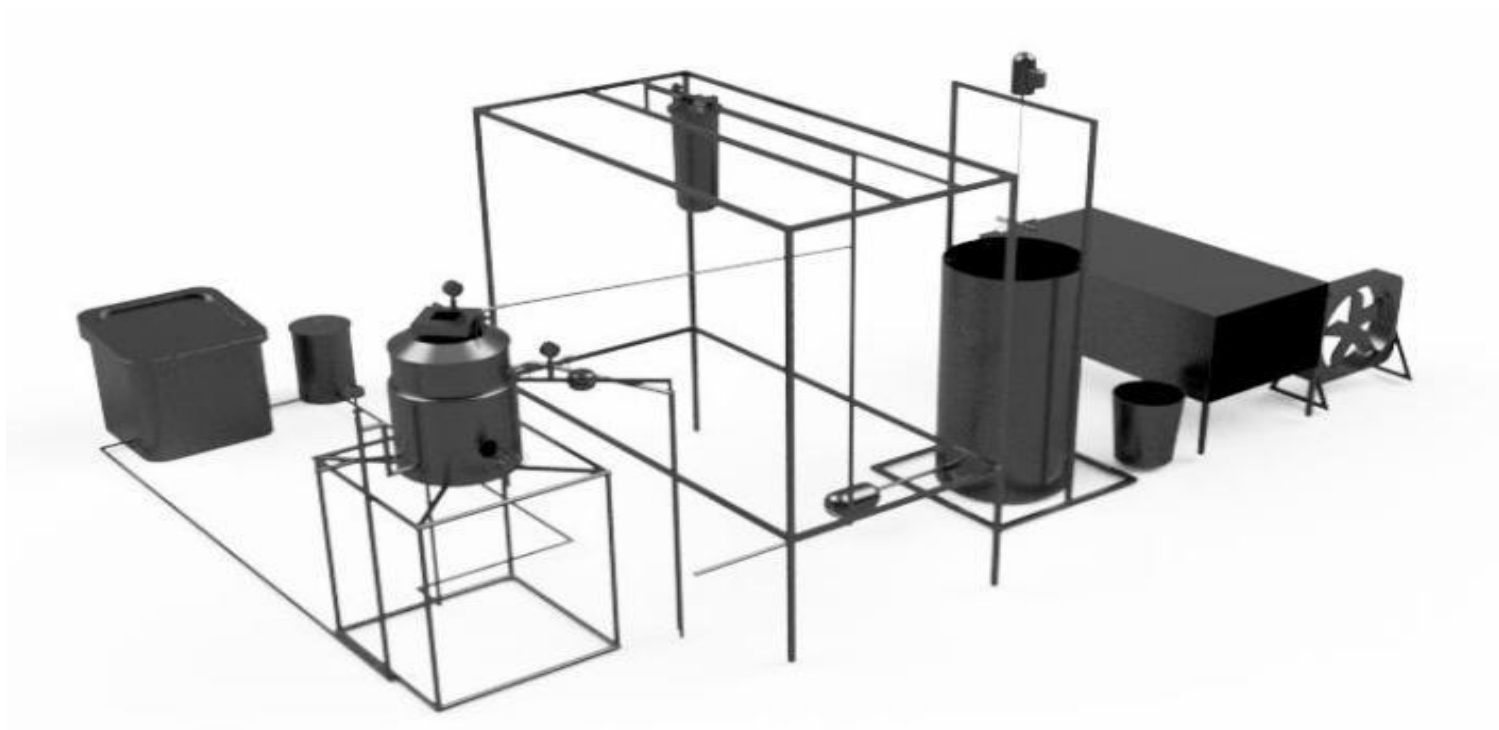


Figura 103: Diagrama 3D de la planta de producción de cerveza (Vista de planta).

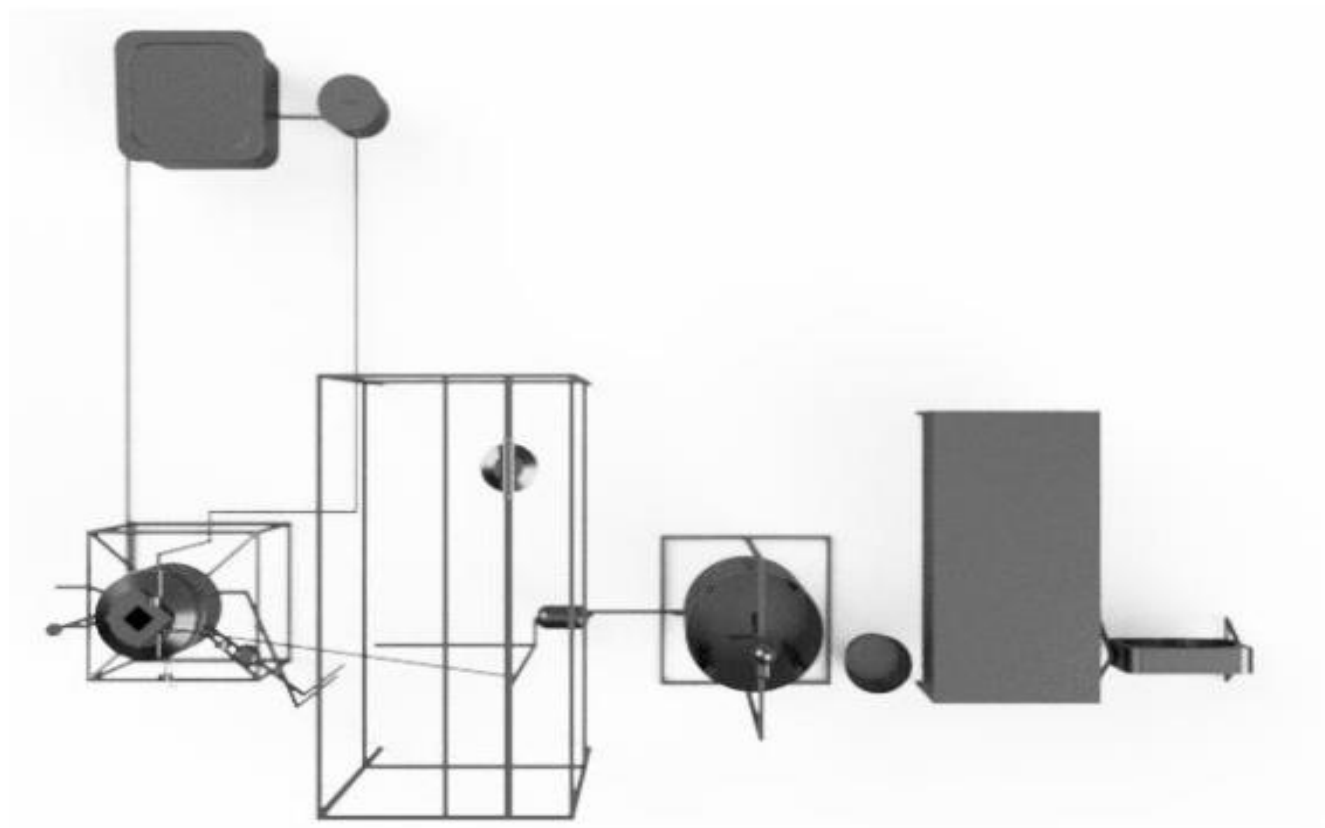
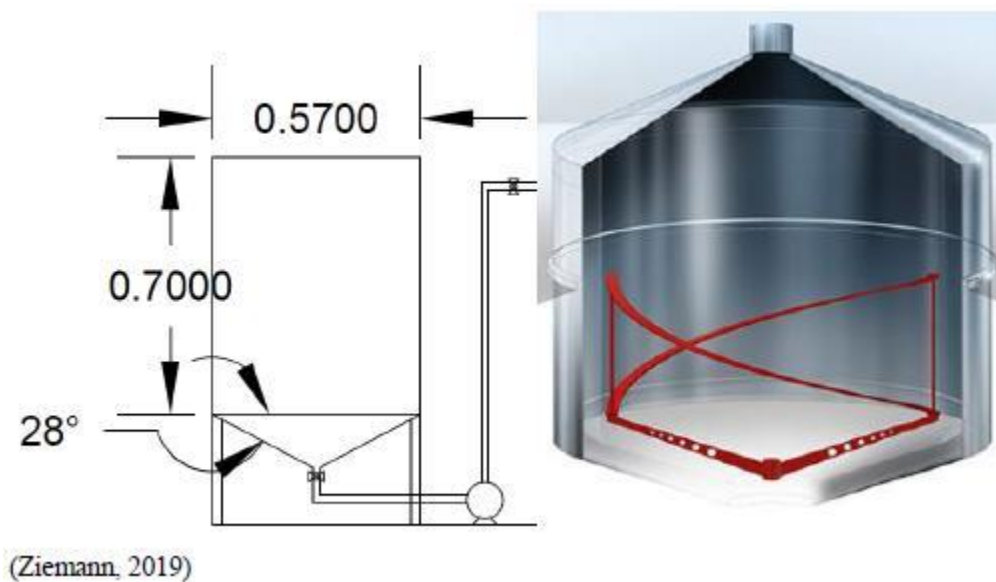


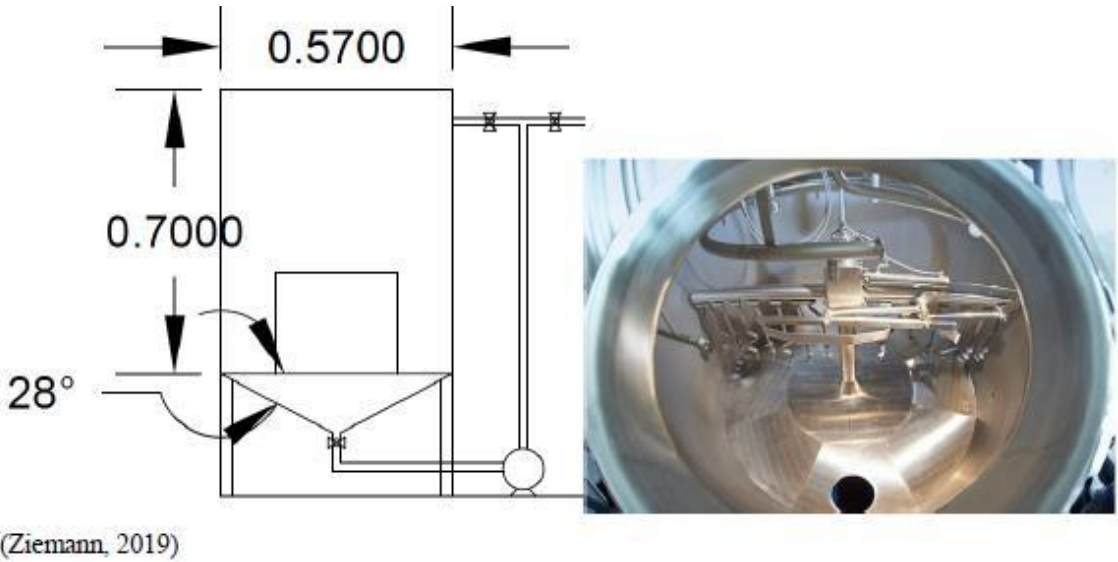
Figura 104: Tanque de maceración propuesto



Cuadro 204. Datos técnicos de tanque de maceración propuesto en casa de cocimiento

Dato	Descripción
Marca	Ziemann
Agitador	Colibri®
Volumen	0.191 m ³

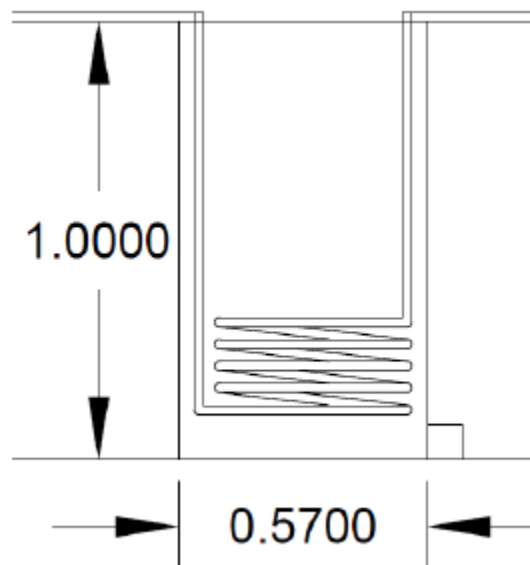
Figura 105: Filtro Lauter propuesto en planta piloto



Cuadro 205. Datos técnicos de filtro Lauter propuesto en casa de cocimientos

Dato	Descripción
Marca	Ziemann
Modelo	Lotus
Agitación	De cuchillas
Fondo	Fondo falso
Compuerta	A nivel de fondo falso, para limpieza de afrecho
Volumen	0.191m ³

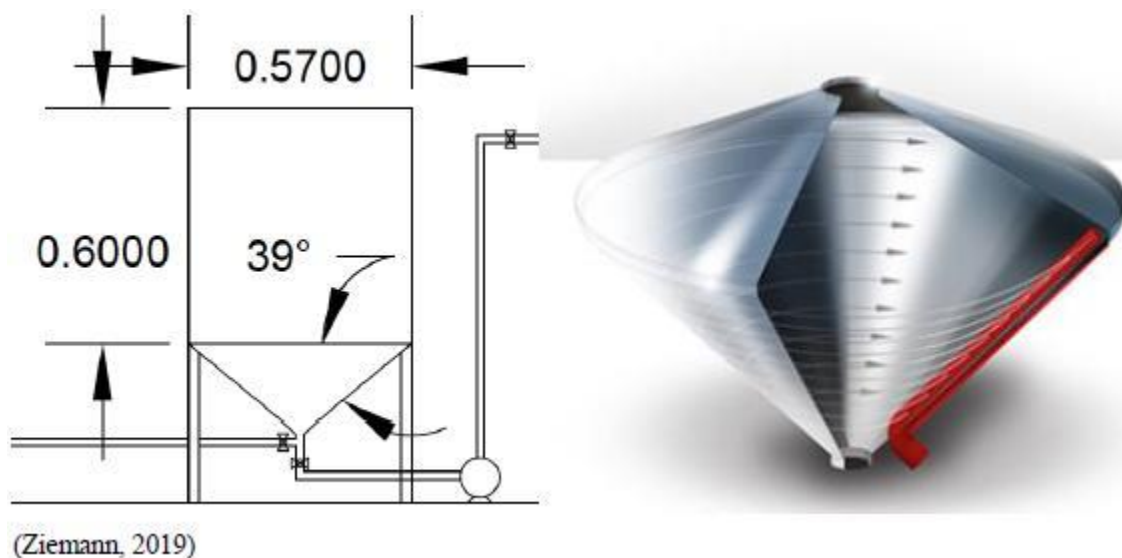
Figura 106: Serpentín propuesto en tanque de cocción



Cuadro 206. Datos técnicos de serpentín de calentamiento propuesto en tanque de cocción

Dato	Descripción
Diámetro de tubo	0.021 m (1/2 inch)
Largo de tubo	6.5 m
Número de vueltas	5
Diámetro de vueltas	0.50m
Flujo de vapor	$0.22 \cdot 10^{-3}$ a $4.26 \cdot 10^{-3}$ kg/s
Temperatura de vapor	162°C
Entalpía de vapor	1884.78 kJ/kg
Material	Acero inoxidable

Figura 107: Tanque sedimentador Whirlpool propuesto



Cuadro 207. Datos técnicos de tanque sedimentador Whirlpool propuesto en casa de cocimientos

Dato	Descripción
Marca	Ziemann
Modelo	Diamond
Volumen	0.175 m ³

1. Cuadros de referencia.

Figura 108. Análisis organoléptico y fisicoquímico del agua de pozo que ingresa al Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	22.50
Potencial de hidrógeno (Unidades de pH)	7.20
Color real (Pt/Co)	3.78
Olor	NR
Conductividad eléctrica (µs/cm)	681.40

Turbidez (UNT)	5.61
Sólidos disueltos totales (mg/L)	20.80
Calcio (mg/L)	94.21
Magnesio (mg/L)	16.72
Dureza total (mg/L)	110.93
Cloruro (mg/L)	58.11
Cloro residual (mg/L)	0.13
Nitratos (mg/L)	32.91
Nitritos (mg/L)	0.78
Sulfatos (mg/L)	3.95

Figura 109: Análisis microbiológico del agua de pozo que ingresa al Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.

Parámetro	Valor
Coliformes fecales (UFC²/100mL)	ND/100 mL
Coliformes totales (UFC/100mL)	ND/100 mL
E. Coli (UFC/100mL)	1 UFC/ 100 mL

Figura 110: Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano, según norma COGUANOR NGO 29901.

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μ S/cm	1500 μ S/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c) (d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L
(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). (c) En unidades de pH (d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.		

Figura 111: Características químicas que debe tener el agua para consumo humano, según norma COGUANOR NGO 29901

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	-----
a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia. b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.		

Figura 112: Relación de sustancias inorgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud, según norma COGUANOR NGO 29901

Substancia	LMP (mg/L)
Arsénico (As)	0,010
Bario (Ba)	0,70
Boro (B)	0,30
Cadmio (Cd)	0,003
Cianuro (CN ⁻)	0,070
Cromo total (Cr)	0,050
Fluoruro (F ⁻)	1,50
Mercurio total (Hg)	0,001
Plomo (Pb)	0,010
Selenio (Se)	0,010
Nitrato (NO ₃ ⁻)	50,0
Nitrito (NO ₂ ⁻)	3,0

Figura 113: Valores guía para verificación de la calidad microbiológica del agua, según norma COGUANOR NGO 29901

Microorganismos	Límite Máximo Permisible
Agua para consumo directo Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada que entra al sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada en el sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua

Figura 114: Perfiles de agua para cerveza, según la norma BJCP 2008.

	Calcio [Ca]	Magnesio [Mg]	Sodio [Na]	Sulfato [SO ₄]	Cloruro [Cl]	Bicarbonato [HCO ₃]
Light Lager	1A Light American Lager	50	0-10	0-50	50-100	0-50
	1B Standard American Lager	50-75	0-10	0-50	50-100	0-50
	1C Premium American Lager	50-75	0-10	0-50	50-100	0-50
	1D English Lager	50-75	0-10	0-50	50-100	0-50
	1E Dortmund Export	75-100	0-10	0-50	50-100	50-100
Pilsner	2A German Pilsner	50-75	0-10	0-10	50-100	0-50
	2B Bohemian Pilsner	50-50	0-5	0-10	50-100	0-50
	2C Classic American Pilsner	50-75	0-10	0-10	50-100	0-50
European Amber Lager	3A Vienna Lager	50-75	0-10	0-10	50-100	50-100
	3B Oktoberfest Lager	50-75	0-10	0-10	50-100	50-100
Dark Lager	4A American Dark Lager	50-75	0-10	0	50-100	100-150
	4B Munich Dunkel	50-75	0-10	0	50-100	100-150
	4C Schwarzbier	50-75	0-10	0	50-100	100-150
Bock	5A Maibock / Festbier	50-75	0-20	0-100	50-100	50-100
	5B Traditional Bock	50-100	0-20	0-100	50-100	50-100
	5C Export Bock	50-100	0-20	0-100	50-100	50-100
	5D Tilsner	50-100	0-20	0-100	50-100	100-150
	5A Cream Ale	50-100	0-10	0-20	0-100	0-100
Light Hybrid Beer	6A Blonde Ale	50-100	0-10	0-20	100-200	50-100
	6B Blonde Ale	50-100	0-10	0-20	100-200	50-100
	6C Kolsch	50-100	0-10	0-20	0-50	0-100
	6D American Wheat or Rye	50-100	0-10	0-20	0-50	0-100
Amber Hybrid Beer	7A Northern German Altbier	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
	7B California Common	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
	7C Dunkelshof Altbier	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
English Pale Ale	8A Standard / Ordinary Bitter	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
	8B Special / Best Premium Bitter	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
	8C English Pale Ale	50-100	0-10	0-30	100-200	50-100
Scottish and Irish Ale	9A Scottish Light 60	50-100	0-20	0-50	100-200	50-100
	9B Scottish Heavy 70	50-100	0-20	0-50	100-200	50-100
	9C Scottish Export 80	50-100	0-20	0-50	100-200	50-100
	9D Irish Red	50-100	0-10	0-20	100-200	50-100
	9E West Heavy (Strong Scotch Ale)	50-100	0-30	0-100	50-100	50-100
American Ale	10A American Pale Ale	50-100	0-10	0-20	100-200	0-100
	10B American Amber Ale	50-100	0-20	0-30	100-200	50-100
	10C American Brown Ale	50-100	0-30	0-50	100-200	100-200
English Brown Ale	11A Mild	50-100	0-20	0-30	100-200	50-100
	11B Southern English Brown	50-100	0-30	0-50	100-200	100-200
	11C Northern English Brown	50-100	0-30	0-50	100-200	100-200
Porter	12A Brown Porter	50-75	10-30	0-50	100-200	100-200
	12B Robust Porter	50-75	10-30	0-50	100-200	100-200
	12C Baltic Porter	50-100	0-20	0-80	100-200	100-200
Stout	13A Dry Irish Stout	50-75	0-10	0-100	50-100	100-200
	13B Sweet Stout	50-75	10-30	20-100	50-100	100-200
	13C Chimney Stout	50-75	10-30	20-100	50-100	100-200
	13D Foreign Export Stout	50-75	10-30	20-100	50-100	100-200
	13E American Stout	50-75	10-30	20-100	50-100	100-200
IPA	14A English IPA	50-150	0-10	0-50	100-300	50-150
	14B American IPA	50-150	0-10	0-50	100-400	0-100
	14C Imperial IPA	50-150	0-10	0-50	100-300	50-150
German Wheat or Rye	15A Weizen	50-100	0-20	0-30	0-50	50-100
	15B Dunkel Weizen	50-75	0-30	0-100	50-150	100-200
	15C Weizen Back	50-75	10-30	0-150	50-150	100-250
	15D Roggenbier	50-75	0-30	0-30	50-150	50-200
	15A Witbier	50-100	0-20	0-30	0-50	50-100
Belgian and French Ale	16A Belgian Pale Ale	50-150	0-20	0-20	100-300	0-100
	16B Saison	50-150	0-20	0-20	100-300	0-100
	16C Gueuze	50-150	0-20	0-20	100-300	0-100
	16D Belgian Specialty Ale [2]	50-150	0-20	0-20	100-300	0-100
	16E Belgian Specialty Ale [2]	50-150	0-20	0-20	100-300	0-100
Sour Ale [1]	17A Berliner Weisse	50-100	0-5	0	0-50	0
	17B Flanders Red	50-100	0-10	0	0-100	0-100
	17C Oud Bruin	50-100	0-10	0-50	50-100	50-200
	17D Lambic	50-150	0-10	0-20	0-100	0
	17E Gueuze	50-150	0-10	0-20	0-100	0
Belgian Strong Ale	17F Froid Lambic	50-150	0-10	0-20	0-100	0
	18A Belgian Strong Ale	50-100	0-10	0-30	50-100	50-100
	18B Belgian Dubbel	50-100	5-20	0-50	50-100	50-100
	18C Belgian Tripel	50-100	0-10	0-30	50-100	50-100
	18D Belgian Golden Strong Ale	50-100	0-10	0-30	50-100	50-100
Strong Ale	19A Old Ale	50-75	10-30	0-150	50-150	50-250
	19B barley Wine	50-100	10-30	0-100	50-100	50-150
	19C American Barley Wine	50-100	10-30	0-100	50-100	50-150
Fruit Beer	20 Fruit Beer [4]	-	-	-	-	-
	21 Fruit Beer [4]	-	-	-	-	-
Spice/Herb/Vegetable Beer	21A Spice, Herb or Vegetable Beer [4]	-	-	-	-	-
	21B Christmas/Winter Spiced [4]	-	-	-	-	-
Smoked or Wood Aged Beer	22A Rauchbier	50-75	0-10	0-30	0-100	50-150
	22B Other Smoked Beer [4]	-	-	-	-	-
	22C Wood Aged Beer [4]	-	-	-	-	-
Specialty Beer	23 Specialty Beer [2]	-	-	-	-	-
	24 Specialty Beer [2]	-	-	-	-	-

Figura 115: Datos generales filtros multicama o multimedia.

Tanque	ft² Área Tanque	ft³ Vol. Tanque	ft³ Mat. Filtrante	Excelente		Normal		Pico		Retrolavado	
				GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM
8" x 44"	0.35	1.16	0.75	3.49	13.21	4.36	16.50	5.24	19.80	5.24	7.27
9" x 48"	0.44	1.58	1.00	4.42	16.72	5.52	20.90	6.63	25.10	6.63	9.20
10" x 54"	0.54	2.19	1.50	5.40	20.44	6.75	25.50	8.10	30.70	8.10	11.24
12" x 52"	0.78	3.00	2.00	7.80	29.52	9.75	36.90	11.70	44.30	11.70	16.24
13" x 54"	0.92	3.68	2.50	9.20	34.82	11.50	43.50	13.80	52.20	13.80	19.15
14" x 65"	1.07	5.10	3.00	10.69	40.46	13.36	50.60	16.03	60.70	16.03	22.25
16" x 65"	1.39	6.60	4.00	13.90	52.61	17.38	65.80	20.85	78.90	20.85	28.94
18" x 65"	1.77	8.30	5.00	17.67	66.88	22.09	83.60	26.51	100.30	26.51	36.79
21" x 62"	2.41	11.00	7.00	24.05	91.04	30.07	113.80	36.08	136.60	36.08	50.07
24 "x 72"	3.14	13.40	10.00	31.42	118.91	39.27	148.60	47.12	178.40	47.12	65.40
30" x 72"	4.91	25.00	15.00	49.09	185.79	61.36	232.20	73.63	278.70	73.63	102.18
36" x 72"	7.07	35.30	20.00	70.70	267.60	88.38	334.50	106.05	401.40	106.05	147.18
42 "x 72"	9.62	46.10	30.00	96.20	364.12	120.25	455.10	144.30	546.20	144.30	200.26
48" x 72"	12.57	61.90	40.00	125.70	475.77	157.13	594.70	188.55	713.70	188.55	261.68
63" x 67"	21.65	80.20	55.00	216.47	819.34	270.59	1,024.20	324.71	1,229.00	324.71	450.64
66" x 60"	23.76	118.80	80.00	118.80	449.66	166.32	629.50	237.60	899.30	285.12	1,079.18
72" x 60"	28.27	141.35	95.00	141.35	535.01	197.89	749.00	282.70	1,070.00	339.24	1,284.02
78" x 60"	33.18	165.90	110.00	165.90	627.93	232.26	879.10	331.80	1,255.90	398.16	1,507.04
84" x 60"	38.48	192.40	130.00	192.40	728.23	269.36	1,019.50	384.80	1,456.50	461.76	1,747.76
90" x 60"	44.18	220.90	150.00	220.90	836.11	309.26	1,170.50	441.80	1,672.20	530.16	2,006.66
96" x 60"	50.27	251.35	170.00	251.35	951.36	351.89	1,331.90	502.70	1,902.70	603.24	2,283.26
102" x 60"	56.75	283.75	190.00	283.75	1,073.99	397.25	1,503.60	567.50	2,148.00	681.00	2,577.59
108" x 60"	63.62	318.10	215.00	318.10	1,204.01	445.34	1,685.60	636.20	2,408.00	763.44	2,889.62
114" x 60"	70.88	354.40	240.00	354.40	1,341.40	496.16	1,878.00	708.80	2,682.80	850.56	3,219.37
120" x 60"	78.54	392.70	260.00	392.70	1,486.37	549.78	2,080.90	785.40	2,972.70	942.48	3,567.29
126" x 60"	86.59	432.95	300.00	432.95	1,638.72	606.13	2,294.20	865.90	3,277.40	1,039.08	3,932.92
132" x 60"	95.03	475.15	315.00	475.15	1,798.44	665.21	2,517.80	950.30	3,596.90	1,140.36	4,316.26
138 "x 60"	103.87	519.35	350.00	519.35	1,965.74	727.09	2,752.00	1,038.70	3,931.50	1,246.44	4,717.78
144" x 60"	113.10	565.50	380.00	565.50	2,140.42	791.70	2,996.60	1,131.00	4,280.80	1,357.20	5,137.00

Figura 116: Datos generales filtros de carbón activado

Tanque	ft² Área Tanque	ft³ Vol. Tanque	ft³ Mat. Filtrante	Olores y Sabores		Decolorar		Ósmosis Inversa		Retrolavado	
				GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM
8" x 44"	0.35	1.16	0.75	2.09	7.93	3.49	13.20	1.75	6.60	3.49	13.20
9" x 48"	0.44	1.58	1.00	2.65	10.03	4.42	16.70	2.21	8.40	4.42	16.70
10" x 54"	0.54	2.19	1.50	3.24	12.26	5.40	20.40	2.70	10.20	5.40	20.40
12" x 52"	0.78	3.00	2.00	4.68	17.71	7.80	29.50	3.90	14.80	7.80	29.50
13" x 54"	0.92	3.68	2.50	5.52	20.89	9.20	34.80	4.60	17.40	9.20	34.80
14" x 65"	1.07	5.10	3.00	6.41	24.28	10.69	40.50	5.34	20.20	10.69	40.50
16" x 65"	1.39	6.60	4.00	8.34	31.57	13.90	52.60	6.95	26.30	13.90	52.60
18" x 65"	1.77	8.30	5.00	10.60	40.13	17.67	66.90	8.84	33.40	17.67	66.90
21" x 62"	2.41	11.00	7.00	14.43	54.62	24.05	91.00	12.03	45.50	24.05	91.00
24" x 72"	3.14	13.40	10.00	18.85	71.34	31.42	118.90	15.71	59.50	31.42	118.90
30" x 72"	4.91	25.00	15.00	29.45	111.47	49.09	185.80	24.54	92.90	49.09	185.80
36" x 72"	7.07	35.30	20.00	42.42	160.56	70.70	267.60	35.35	133.80	70.70	267.60
42" x 72"	9.62	46.10	30.00	57.72	218.47	96.20	364.10	48.10	182.10	96.20	364.10
48" x 72"	12.57	61.90	40.00	75.42	285.46	125.70	475.80	62.85	237.90	125.70	475.80
63" x 67"	21.65	80.20	55.00	129.88	491.60	216.47	819.30	108.24	409.70	216.47	819.30
66" x 60"	23.76	118.80	80.00	142.56	539.90	237.60	899.30	118.80	449.70	237.60	899.30
72" x 60"	28.27	141.35	95.00	169.62	642.01	282.70	1,070.00	141.35	535.00	282.70	1,070.00
78" x 60"	33.18	165.90	110.00	199.08	753.52	331.80	1,255.90	165.90	627.90	331.80	1,255.90
84" x 60"	38.48	192.40	130.00	230.88	873.88	384.80	1,456.50	192.40	728.20	384.80	1,456.50
90" x 60"	44.18	220.90	150.00	265.08	1,003.33	441.80	1,672.20	220.90	836.10	441.80	1,672.20
96" x 60"	50.27	251.35	170.00	301.62	1,141.63	502.70	1,902.70	251.35	951.40	502.70	1,902.70
102" x 60"	56.75	283.75	190.00	340.50	1,288.79	567.50	2,148.00	283.75	1,074.00	567.50	2,148.00
108" x 60"	63.62	318.10	215.00	381.72	1,444.81	636.20	2,408.00	318.10	1,204.00	636.20	2,408.00
114" x 60"	70.88	354.40	240.00	425.28	1,609.68	708.80	2,682.80	354.40	1,341.40	708.80	2,682.80
120" x 60"	78.54	392.70	260.00	471.24	1,783.64	785.40	2,972.70	392.70	1,486.40	785.40	2,972.70
126" x 60"	86.59	432.95	300.00	519.54	1,966.46	865.90	3,277.40	432.95	1,638.70	865.90	3,277.40
132" x 60"	95.03	475.15	315.00	570.18	2,153.13	950.30	3,596.90	475.15	1,798.40	950.30	3,596.90
138" x 60"	103.87	519.35	350.00	623.22	2,358.89	1,038.70	3,931.50	519.35	1,965.70	1,038.70	3,931.50
144" x 60"	113.10	565.50	380.00	678.60	2,568.50	1,131.00	4,280.80	565.50	2,140.40	1,131.00	4,280.80

Figura 117: Requerimiento de dosis de radiación UV según microorganismos.

Species	Dose (mJ/cm ²)
Bacillus subtilis (spore)	12.0
Clostridium tetani	4.9
Legionella Pneumophilla	2.04
Pseudonomas aeruginosa	5.5
Streptococcus feacalis	4.5
Hepatitis A virus	11.0
Hepatitis Poliovirus	12.0
Saccharomyces cervisiae	6.0
Infectious pancreatic necrosis	60.0

Figura 118: Porcentaje de reducción de microorganismos según dosis de radiación UV.

Dose mJ/cm ²	Reduction in number of live microorganisms
5.4	90.0%
10.8	99.0%
16.2	99.9%
21.6	99.99%
27.0	99.999%

Figura 119. Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. T, °F	Densidad ρ , lb _m /ft ³	Calor específico C _p , Btu/lb _m ·R	Conductividad térmica k, Btu/h·ft·R	Difusividad térmica α , ft ² /s	Viscosidad dinámica μ , lb _m /ft·s	Viscosidad cinemática ν , ft ² /s	Número de Prandtl Pr
-300	0,24844	0,5072	0,00508	$1,119 \times 10^{-5}$	$4,039 \times 10^{-6}$	$1,625 \times 10^{-5}$	1,4501
-200	0,15276	0,2247	0,00778	$6,294 \times 10^{-5}$	$6,772 \times 10^{-6}$	$4,433 \times 10^{-5}$	0,7042
-100	0,11029	0,2360	0,01037	$1,106 \times 10^{-4}$	$9,042 \times 10^{-6}$	$8,197 \times 10^{-5}$	0,7404
-50	0,09683	0,2389	0,01164	$1,397 \times 10^{-4}$	$1,006 \times 10^{-5}$	$1,039 \times 10^{-4}$	0,7439
0	0,08630	0,2401	0,01288	$1,726 \times 10^{-4}$	$1,102 \times 10^{-5}$	$1,278 \times 10^{-4}$	0,7403
10	0,08446	0,2402	0,01312	$1,797 \times 10^{-4}$	$1,121 \times 10^{-5}$	$1,328 \times 10^{-4}$	0,7391
20	0,08270	0,2403	0,01336	$1,868 \times 10^{-4}$	$1,140 \times 10^{-5}$	$1,379 \times 10^{-4}$	0,7378
30	0,08101	0,2403	0,01361	$1,942 \times 10^{-4}$	$1,158 \times 10^{-5}$	$1,430 \times 10^{-4}$	0,7365
40	0,07939	0,2404	0,01385	$2,016 \times 10^{-4}$	$1,176 \times 10^{-5}$	$1,482 \times 10^{-4}$	0,7350
50	0,07783	0,2404	0,01409	$2,092 \times 10^{-4}$	$1,194 \times 10^{-5}$	$1,535 \times 10^{-4}$	0,7336
60	0,07633	0,2404	0,01433	$2,169 \times 10^{-4}$	$1,212 \times 10^{-5}$	$1,588 \times 10^{-4}$	0,7321
70	0,07489	0,2404	0,01457	$2,248 \times 10^{-4}$	$1,230 \times 10^{-5}$	$1,643 \times 10^{-4}$	0,7306
80	0,07350	0,2404	0,01481	$2,328 \times 10^{-4}$	$1,247 \times 10^{-5}$	$1,697 \times 10^{-4}$	0,7290
90	0,07217	0,2404	0,01505	$2,409 \times 10^{-4}$	$1,265 \times 10^{-5}$	$1,753 \times 10^{-4}$	0,7275
100	0,07088	0,2405	0,01529	$2,491 \times 10^{-4}$	$1,281 \times 10^{-5}$	$1,709 \times 10^{-4}$	0,7260
110	0,06963	0,2405	0,01552	$2,575 \times 10^{-4}$	$1,299 \times 10^{-5}$	$1,866 \times 10^{-4}$	0,7245
120	0,06843	0,2405	0,01576	$2,660 \times 10^{-4}$	$1,316 \times 10^{-5}$	$1,923 \times 10^{-4}$	0,7230
130	0,06727	0,2405	0,01599	$2,746 \times 10^{-4}$	$1,332 \times 10^{-5}$	$1,981 \times 10^{-4}$	0,7216
140	0,06615	0,2406	0,01623	$2,833 \times 10^{-4}$	$1,349 \times 10^{-5}$	$2,040 \times 10^{-4}$	0,7202
150	0,06507	0,2406	0,01646	$2,921 \times 10^{-4}$	$1,365 \times 10^{-5}$	$2,099 \times 10^{-4}$	0,7188
160	0,06402	0,2406	0,01669	$3,010 \times 10^{-4}$	$1,382 \times 10^{-5}$	$2,159 \times 10^{-4}$	0,7174
170	0,06300	0,2407	0,01692	$3,100 \times 10^{-4}$	$1,398 \times 10^{-5}$	$2,220 \times 10^{-4}$	0,7161
180	0,06201	0,2408	0,01715	$3,191 \times 10^{-4}$	$1,414 \times 10^{-5}$	$2,281 \times 10^{-4}$	0,7148
190	0,06106	0,2408	0,01738	$3,284 \times 10^{-4}$	$1,430 \times 10^{-5}$	$2,343 \times 10^{-4}$	0,7136
200	0,06013	0,2409	0,01761	$3,377 \times 10^{-4}$	$1,446 \times 10^{-5}$	$2,406 \times 10^{-4}$	0,7124
250	0,05590	0,2415	0,01874	$3,857 \times 10^{-4}$	$1,524 \times 10^{-5}$	$2,727 \times 10^{-4}$	0,7071
300	0,05222	0,2423	0,01985	$4,358 \times 10^{-4}$	$1,599 \times 10^{-5}$	$3,063 \times 10^{-4}$	0,7028
350	0,04899	0,2433	0,02094	$4,879 \times 10^{-4}$	$1,672 \times 10^{-5}$	$3,413 \times 10^{-4}$	0,6995
400	0,04614	0,2445	0,02200	$5,419 \times 10^{-4}$	$1,743 \times 10^{-5}$	$3,777 \times 10^{-4}$	0,6971
450	0,04361	0,2458	0,02305	$5,974 \times 10^{-4}$	$1,812 \times 10^{-5}$	$4,154 \times 10^{-4}$	0,6953
500	0,04134	0,2472	0,02408	$6,546 \times 10^{-4}$	$1,878 \times 10^{-5}$	$4,544 \times 10^{-4}$	0,6942
600	0,03743	0,2503	0,02608	$7,732 \times 10^{-4}$	$2,007 \times 10^{-5}$	$5,361 \times 10^{-4}$	0,6934
700	0,03421	0,2535	0,02800	$8,970 \times 10^{-4}$	$2,129 \times 10^{-5}$	$6,225 \times 10^{-4}$	0,6940
800	0,03149	0,2568	0,02986	$1,025 \times 10^{-3}$	$2,247 \times 10^{-5}$	$7,134 \times 10^{-4}$	0,6956
900	0,02917	0,2599	0,03164	$1,158 \times 10^{-3}$	$2,359 \times 10^{-5}$	$8,087 \times 10^{-4}$	0,6978
1000	0,02718	0,2630	0,03336	$1,296 \times 10^{-3}$	$2,467 \times 10^{-5}$	$9,080 \times 10^{-4}$	0,7004
1500	0,02024	0,2761	0,04106	$2,041 \times 10^{-3}$	$2,957 \times 10^{-5}$	$1,460 \times 10^{-3}$	0,7158
2000	0,01613	0,2855	0,04752	$2,867 \times 10^{-3}$	$3,379 \times 10^{-5}$	$2,095 \times 10^{-3}$	0,7308
2500	0,01340	0,2922	0,05309	$3,765 \times 10^{-3}$	$3,750 \times 10^{-5}$	$2,798 \times 10^{-3}$	0,7432
3000	0,01147	0,2972	0,05811	$4,737 \times 10^{-3}$	$4,082 \times 10^{-5}$	$3,560 \times 10^{-3}$	0,7516
3500	0,01002	0,3010	0,06293	$5,797 \times 10^{-3}$	$4,381 \times 10^{-5}$	$4,373 \times 10^{-3}$	0,7543
4000	0,00889	0,3040	0,06789	$6,975 \times 10^{-3}$	$4,651 \times 10^{-5}$	$5,229 \times 10^{-3}$	0,7497

Figura 120. Valores de las constantes de la ecuación para obtener el número de Nusselt

TABLA 12.4

Valores de las constantes en la ecuación (12.74)

Sistema	Intervalo de Gr Pr	b	n
Láminas verticales, cilindros verticales	10^4 - 10^9	0.59	0.25
	10^9 - 10^{12}	0.13	0.333
Láminas horizontales:			
Superficie de calentamiento dirigida hacia arriba	10^5 - 2×10^7	0.54	0.25
o de enfriamiento dirigida hacia abajo	2×10^7 - 3×10^{10}	0.14	0.333
Superficie de enfriamiento dirigida hacia arriba, o de calentamiento dirigida hacia abajo	3×10^5 - 3×10^{10}	0.27	0.25

Fuente: Tomado con autorización del autor y editores W. H. McAdams, *Heat Transmission*, 3a. ed., pp. 172, 180. Derechos de autor, 1954, McGraw-Hill Book Company.

Figura 121. Propiedades termodinámicas de vapor saturado en sistema internacional

Tablas F.1: Vapor saturado, unidades SI (Continúa)

t °C	T K	P kPa	VOLUMEN ESPECÍFICO V			ENERGÍA INTERNA U			ENTALPÍA H			ENTROPÍA S		
			liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.
75	348.15	38.55	1.026	4133.1	4134.1	313.9	2162.1	2476.0	313.9	2321.5	2635.4	1.0154	6.6681	7.6835
76	349.15	40.19	1.027	3974.6	3975.7	318.1	2159.2	2477.3	318.1	2318.9	2637.1	1.0275	6.6418	7.6693
77	350.15	41.89	1.027	3823.3	3824.3	322.3	2156.3	2478.5	322.3	2316.4	2638.7	1.0395	6.6156	7.6551
78	351.15	43.65	1.028	3678.6	3679.6	326.5	2153.3	2479.8	326.5	2313.9	2640.4	1.0514	6.5896	7.6410
79	352.15	45.47	1.029	3540.3	3541.3	330.7	2150.4	2481.1	330.7	2311.4	2642.1	1.0634	6.5637	7.6271
80	353.15	47.36	1.029	3408.1	3409.1	334.9	2147.4	2482.3	334.9	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6132
81	354.15	49.31	1.030	3281.6	3282.6	339.1	2144.5	2483.5	339.1	2306.3	2645.4	1.0871	6.5123	7.5995
82	355.15	51.33	1.031	3160.6	3161.6	343.3	2141.5	2484.8	343.3	2303.8	2647.1	1.0990	6.4868	7.5858
83	356.15	53.42	1.031	3044.8	3045.8	347.5	2138.6	2486.0	347.5	2301.2	2648.7	1.1108	6.4615	7.5722
84	357.15	55.57	1.032	2933.9	2935.0	351.7	2135.6	2487.3	351.7	2298.6	2650.4	1.1225	6.4362	7.5587
85	358.15	57.80	1.033	2827.8	2828.8	355.9	2132.6	2488.5	355.9	2296.1	2652.0	1.1343	6.4111	7.5454
86	359.15	60.11	1.033	2726.1	2727.2	360.1	2129.7	2489.7	360.1	2293.5	2653.6	1.1460	6.3861	7.5321
87	360.15	62.49	1.034	2628.8	2629.8	364.3	2126.7	2490.9	364.3	2290.9	2655.3	1.1577	6.3612	7.5189
88	361.15	64.95	1.035	2535.4	2536.5	368.5	2123.7	2492.2	368.5	2288.4	2656.9	1.1693	6.3365	7.5058
89	362.15	67.49	1.035	2446.0	2447.0	372.7	2120.7	2493.4	372.7	2285.8	2658.5	1.1809	6.3119	7.4928
90	363.15	70.11	1.036	2360.3	2361.3	376.9	2117.7	2494.6	376.9	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799
91	364.15	72.81	1.037	2278.0	2279.1	381.1	2114.7	2495.8	381.1	2280.6	2661.7	1.2041	6.2629	7.4670
92	365.15	75.61	1.038	2199.2	2200.2	385.3	2111.7	2497.0	385.4	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543
93	366.15	78.49	1.038	2123.5	2124.5	389.5	2108.7	2498.2	389.6	2275.4	2665.0	1.2271	6.2145	7.4416
94	367.15	81.46	1.039	2050.9	2051.9	393.7	2105.7	2499.4	393.8	2272.8	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291
95	368.15	84.53	1.040	1981.2	1982.2	397.9	2102.7	2500.6	398.0	2270.2	2668.1	1.2501	6.1665	7.4166
96	369.15	87.69	1.041	1914.3	1915.3	402.1	2099.7	2501.8	402.2	2267.5	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042
97	370.15	90.94	1.041	1850.0	1851.0	406.3	2096.6	2503.0	406.4	2264.9	2671.3	1.2729	6.1190	7.3919
98	371.15	94.30	1.042	1788.3	1789.3	410.5	2093.6	2504.1	410.6	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796
99	372.15	97.76	1.043	1729.0	1730.0	414.7	2090.6	2505.3	414.8	2259.6	2674.4	1.2956	6.0719	7.3675
100	373.15	101.33	1.044	1672.0	1673.0	419.0	2087.5	2506.5	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554
102	375.15	108.78	1.045	1564.5	1565.5	427.4	2081.4	2508.8	427.5	2251.6	2679.1	1.3294	6.0021	7.3315
104	377.15	116.68	1.047	1465.1	1466.2	435.8	2075.3	2511.1	435.9	2246.3	2682.2	1.3515	5.9560	7.3078
106	379.15	125.04	1.049	1373.1	1374.2	444.3	2069.2	2513.4	444.4	2240.9	2685.3	1.3742	5.9104	7.2845
108	381.15	133.90	1.050	1287.9	1288.9	452.7	2063.0	2515.7	452.9	2235.4	2688.3	1.3964	5.8651	7.2615
110	383.15	143.27	1.052	1208.9	1209.9	461.2	2056.8	2518.0	461.3	2230.0	2691.3	1.4185	5.8203	7.2388
112	385.15	153.16	1.054	1136.6	1136.6	469.6	2050.6	2520.2	469.8	2224.5	2694.3	1.4405	5.7758	7.2164
114	387.15	163.62	1.055	1067.5	1068.5	478.1	2044.3	2522.4	478.3	2219.0	2697.2	1.4624	5.7318	7.1942
116	389.15	174.65	1.057	1004.2	1005.2	486.6	2038.1	2524.6	486.7	2213.4	2700.2	1.4842	5.6881	7.1723
118	391.15	186.28	1.059	945.3	946.3	495.0	2031.8	2526.8	495.2	2207.9	2703.1	1.5060	5.6447	7.1507
120	393.15	198.54	1.061	890.5	891.5	503.5	2025.4	2529.0	503.7	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293
122	395.15	211.45	1.062	839.4	840.5	512.0	2019.1	2531.1	512.2	2196.6	2708.8	1.5491	5.5590	7.1082
124	397.15	225.04	1.064	791.8	792.8	520.5	2012.7	2533.2	520.7	2190.9	2711.6	1.5706	5.5167	7.0873
126	399.15	239.33	1.066	747.3	748.4	529.0	2006.3	2535.3	529.2	2185.2	2714.4	1.5919	5.4747	7.0666
128	401.15	254.35	1.068	705.8	706.9	537.5	1999.9	2537.4	537.8	2179.4	2717.2	1.6132	5.4330	7.0462

Figura 122. Propiedades termodinámicas de vapor saturado en sistema inglés

Tablas F.3: Vapor saturado, unidades inglesas (Continúa)

t (°F)	P (psia)	VOLUMEN ESPECÍFICO V			ENERGÍA INTERNA U			ENTALPÍA H			ENTROPÍA S		
		líq. sat.	evap.	vap. sat.	líq. sat.	evap.	vap. sat.	líq. sat.	evap.	vap. sat.	líq. sat.	evap.	vap. sat.
162	4.972	0.01641	73.90	73.92	129.95	933.0	1063.0	129.96	1001.0	1131.0	0.2345	1.6103	1.8448
164	5.212	0.01642	70.70	70.72	131.95	931.6	1063.6	131.96	999.8	1131.8	0.2377	1.6032	1.8409
166	5.462	0.01643	67.67	67.68	133.95	930.2	1064.2	133.97	998.6	1132.6	0.2409	1.5961	1.8371
168	5.722	0.01644	64.78	64.80	135.95	928.8	1064.8	135.97	997.4	1133.4	0.2441	1.5892	1.8333
170	5.993	0.01645	62.04	62.06	137.96	927.4	1065.4	137.97	996.2	1134.2	0.2473	1.5822	1.8295
172	6.274	0.01646	59.43	59.45	139.96	926.0	1066.0	139.98	995.0	1135.0	0.2505	1.5753	1.8258
174	6.566	0.01647	56.95	56.97	141.96	924.6	1066.6	141.98	993.8	1135.8	0.2537	1.5684	1.8221
176	6.869	0.01649	54.59	54.61	143.97	923.2	1067.2	143.99	992.6	1136.6	0.2568	1.5616	1.8184
178	7.184	0.01650	52.35	52.36	145.97	921.8	1067.8	145.99	991.4	1137.4	0.2600	1.5548	1.8147
180	7.511	0.01651	50.21	50.22	147.98	920.4	1068.4	148.00	990.2	1138.2	0.2631	1.5480	1.8111
182	7.850	0.01652	48.17	48.19	149.98	919.0	1069.0	150.01	989.0	1139.0	0.2662	1.5413	1.8075
184	8.203	0.01653	46.23	46.25	151.99	917.6	1069.6	152.01	987.8	1139.8	0.2694	1.5346	1.8040
186	8.568	0.01655	44.38	44.40	153.99	916.2	1070.2	154.02	986.5	1140.5	0.2725	1.5279	1.8004
188	8.947	0.01656	42.62	42.64	156.00	914.7	1070.7	156.03	985.3	1141.3	0.2756	1.5213	1.7969
190	9.340	0.01657	40.94	40.96	158.01	913.3	1071.3	158.04	984.1	1142.1	0.2787	1.5148	1.7934
192	9.747	0.01658	39.34	39.35	160.02	911.9	1071.9	160.05	982.8	1142.9	0.2818	1.5082	1.7900
194	10.168	0.01660	37.81	37.82	162.02	910.5	1072.5	162.05	981.6	1143.7	0.2848	1.5017	1.7865
196	10.605	0.01661	36.35	36.36	164.03	909.0	1073.1	164.06	980.4	1144.4	0.2879	1.4952	1.7831
198	11.058	0.01662	34.95	34.97	166.04	907.6	1073.6	166.08	979.1	1145.2	0.2910	1.4888	1.7798
200	11.526	0.01664	33.62	33.64	168.05	906.2	1074.2	168.09	977.9	1146.0	0.2940	1.4824	1.7764
202	12.011	0.01665	32.35	32.37	170.06	904.7	1074.8	170.10	976.6	1146.7	0.2971	1.4760	1.7731
204	12.512	0.01666	31.13	31.15	172.07	903.3	1075.3	172.11	975.4	1147.5	0.3001	1.4697	1.7698
206	13.031	0.01668	29.97	29.99	174.08	901.8	1075.9	174.12	974.1	1148.2	0.3031	1.4634	1.7665
208	13.568	0.01669	28.86	28.88	176.09	900.4	1076.5	176.14	972.8	1149.0	0.3061	1.4571	1.7632
210	14.123	0.01670	27.80	27.82	178.11	898.9	1077.0	178.15	971.6	1149.7	0.3091	1.4509	1.7600
212	14.696	0.01672	26.78	26.80	180.12	897.5	1077.6	180.17	970.3	1150.5	0.3121	1.4447	1.7568
214	15.282	0.01674	25.84	25.86	182.14	896.0	1078.2	182.20	969.0	1151.3	0.3151	1.4385	1.7536
216	15.881	0.01676	24.95	24.97	184.16	894.6	1078.8	184.23	967.7	1152.1	0.3181	1.4323	1.7504
218	16.492	0.01678	24.11	24.13	186.18	893.1	1079.4	186.26	966.4	1152.9	0.3211	1.4261	1.7472
220	17.115	0.01680	23.31	23.33	188.20	891.7	1080.0	188.29	965.1	1153.7	0.3241	1.4200	1.7440
222	17.750	0.01682	22.55	22.57	190.22	890.2	1080.6	190.32	963.8	1154.5	0.3271	1.4138	1.7408
224	18.397	0.01684	21.83	21.85	192.24	888.8	1081.2	192.35	962.5	1155.3	0.3301	1.4076	1.7376
226	19.056	0.01686	21.15	21.17	194.26	887.3	1081.8	194.38	961.2	1156.1	0.3331	1.4014	1.7344
228	19.727	0.01688	20.51	20.53	196.28	885.9	1082.4	196.40	959.9	1156.9	0.3361	1.3952	1.7312
230	20.409	0.01690	19.90	19.92	198.30	884.4	1083.0	198.43	958.6	1157.7	0.3391	1.3890	1.7280
232	21.102	0.01692	19.32	19.34	200.32	883.0	1083.6	200.45	957.3	1158.5	0.3421	1.3828	1.7248
234	21.807	0.01694	18.77	18.79	202.34	881.5	1084.2	202.48	956.0	1159.3	0.3451	1.3766	1.7216
236	22.524	0.01696	18.25	18.27	204.36	880.1	1084.8	204.50	954.7	1160.1	0.3481	1.3704	1.7184
238	23.252	0.01698	17.75	17.77	206.38	878.6	1085.4	206.53	953.4	1160.9	0.3511	1.3642	1.7152
240	24.000	0.01700	17.27	17.29	208.40	877.2	1086.0	208.55	952.1	1161.7	0.3541	1.3580	1.7120
242	24.768	0.01702	16.81	16.83	210.42	875.7	1086.6	210.58	950.8	1162.5	0.3571	1.3518	1.7088
244	25.546	0.01704	16.37	16.39	212.44	874.3	1087.2	212.60	949.5	1163.3	0.3601	1.3456	1.7056
246	26.334	0.01706	15.94	15.96	214.46	872.8	1087.8	214.63	948.2	1164.1	0.3631	1.3394	1.7024
248	27.132	0.01708	15.52	15.54	216.48	871.4	1088.4	216.65	946.9	1164.9	0.3661	1.3332	1.6992
250	27.940	0.01710	15.11	15.13	218.50	869.9	1089.0	218.68	945.6	1165.7	0.3691	1.3270	1.6960
252	28.758	0.01712	14.71	14.73	220.52	868.5	1089.6	220.70	944.3	1166.5	0.3721	1.3208	1.6928
254	29.586	0.01714	14.32	14.34	222.54	867.1	1090.2	222.73	943.0	1167.3	0.3751	1.3146	1.6896
256	30.424	0.01716	13.94	13.96	224.56	865.7	1090.8	224.76	941.7	1168.1	0.3781	1.3084	1.6864
258	31.272	0.01718	13.57	13.59	226.58	864.3	1091.4	226.79	940.4	1168.9	0.3811	1.3022	1.6832
260	32.130	0.01720	13.21	13.23	228.60	862.9	1092.0	228.82	939.1	1169.7	0.3841	1.2960	1.6800
262	33.000	0.01722	12.86	12.88	230.62	861.5	1092.6	230.85	937.8	1170.5	0.3871	1.2898	1.6768
264	33.880	0.01724	12.52	12.54	232.64	860.1	1093.2	232.88	936.5	1171.3	0.3901	1.2836	1.6736
266	34.770	0.01726	12.19	12.21	234.66	858.7	1093.8	234.91	935.2	1172.1	0.3931	1.2774	1.6704
268	35.670	0.01728	11.87	11.89	236.68	857.3	1094.4	236.94	933.9	1172.9	0.3961	1.2712	1.6672
270	36.580	0.01730	11.56	11.58	238.70	855.9	1095.0	238.97	932.6	1173.7	0.3991	1.2650	1.6640
272	37.500	0.01732	11.26	11.28	240.72	854.5	1095.6	240.99	931.3	1174.5	0.4021	1.2588	1.6608
274	38.430	0.01734	10.97	10.99	242.74	853.1	1096.2	243.02	930.0	1175.3	0.4051	1.2526	1.6576
276	39.370	0.01736	10.69	10.71	244.76	851.7	1096.8	245.05	928.7	1176.1	0.4081	1.2464	1.6544
278	40.320	0.01738	10.42	10.44	246.78	850.3	1097.4	247.08	927.4	1176.9	0.4111	1.2402	1.6512
280	41.280	0.01740	10.16	10.18	248.80	848.9	1098.0	249.11	926.1	1177.7	0.4141	1.2340	1.6480
282	42.250	0.01742	9.91	9.93	250.82	847.5	1098.6	251.14	924.8	1178.5	0.4171	1.2278	1.6448
284	43.230	0.01744	9.67	9.69	252.84	846.1	1099.2	253.17	923.5	1179.3	0.4201	1.2216	1.6416
286	44.220	0.01746	9.44	9.46	254.86	844.7	1099.8	255.20	922.2	1180.1	0.4231	1.2154	1.6384
288	45.220	0.01748	9.22	9.24	256.88	843.3	1100.4	257.23	920.9	1180.9	0.4261	1.2092	1.6352
290	46.230	0.01750	9.01	9.03	258.90	841.9	1101.0	259.26	919.6	1181.7	0.4291	1.2030	1.6320
292	47.250	0.01752	8.81	8.83	260.92	840.5	1101.6	261.29	918.3	1182.5	0.4321	1.1968	1.6288
294	48.280	0.01754	8.62	8.64	262.94	839.1	1102.2	263.32	917.0	1183.3	0.4351	1.1906	1.6256
296	49.320	0.01756	8.44	8.46	264.96	837.7	1102.8	265.35	915.7	1184.1	0.4381	1.1844	1.6224
298	50.370	0.01758	8.27	8.29	266.98	836.3	1103.4	267.38	914.4	1184.9	0.4411	1.1782	1.6192
300	51.430	0.01760	8.11	8.13	269.00	834.9	1104.0	269.41	913.1	1185.7	0.4441	1.1720	1.6160
302	52.500	0.01762	7.96	7.98	271.02	833.5	1104.6	271.44	911.8	1186.5	0.4471	1.1658	1.6128
304	53.580	0.01764	7.81	7.83	273.04	832.1	1105.2	273.47	910.5	1187.3	0.4501	1.1596	1.6096
306	54.670	0.01766	7.67	7.69	275.06	830.7	1105.8	275.50	909.2	1188.1	0.4531	1.1534	1.6064
308	55.770	0.01768	7.54	7.56	277.08	829.3	1106.4	277.53	907.9	1188.9	0.4561	1.1472	1.6032
310	56.880	0.01770	7.42	7.44	279.10	827.9	1107.0	279.56	906.6	1189.7	0.4591	1.1410	1.6000
312	57.990	0.01772	7.31	7.33	281.12	826.5	1107.6	281.59	905.3	1190.5	0.4621	1.1348	1.5968
314	59.110	0.01774	7.21	7.23	283.14	825.1	1108.2	283.62	904.0	1191.3	0.4651	1.1286	1.5936
316	60.240	0.01776	7.11	7.13	285.16	823.7	1108.8	285.65	902.7	1192.1	0.4681	1.1224	1.5904
318	61.380	0.01778											

Figura 123. Tabla control para determinar número más probable (NMP) con límites de confianza de 95% con 10 tubos de 10mL

No. Tubos positivos	NMP/100 mL	Límite de confianza de 95% (aproximado) Inferior	Límite de confianza de 95% (aproximado) Superior
0	<1.1	0.0	3.0
1	1.1	0.03	5.9
2	2.2	0.26	8.1
3	3.6	0.69	10.6
4	5.1	1.3	13.4
5	6.9	2.1	16.8
6	9.2	3.1	21.1
7	12.0	4.3	27.1
8	16.1	5.9	36.8
9	23.0	8.1	59.5
10	>23.0	13.5	Infinito

(COGUANOR, 1985)

Figura 124. Tabla control para determinar número más probable (NMP) con límites de confianza de 95% con 5 tubos de 20 mL

No. Tubos positivos	NMP/100 MI	Límite de confianza (aproximado) Inferior	Límite de confianza (aproximado) Superior
0	<1.1	0.0	3.0
1	1.1	0.05	6.3
2	2.2	0.3	9.6
3	3.6	0.8	14.7
4	5.1	1.7	26.4
5	6.9	4.0	Infinito

(Palintest, 2019)

Figura 125. Conversión de valores de UFC/mL a NMP/mL

UFC/mL	NMP/mL
0	0 . 9
< 10	1 – 9
> 10	> 10

(Kehr et al 2004)

Figura 126. Hoja técnica de *Saccharomyces cerevisiae* SafAle S-04


Fermentis
 LESAFFRE FOR BEVERAGES


Safale™ S-04
 ACTIVE DRY YEAST

Cepa ale inglesa seleccionada por su rápida capacidad fermentativa y por formar un sedimento compacto al final de la fermentación, ayudando a mejorar la claridad de la cerveza. Recomendada para la producción de un amplio rango de ales y especialmente adaptadas para acondicionamiento en barriles y fermentación en tanques cilíndrico - cónicos.

INGREDIENTES: Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), agente emulsionante E491

ESTERES TOTALES

37
ppm a 18°F y 20°C en tubos EBC

ALCOHOLES SUPERIORES TOTALES

363
ppm a 18°F y 20°C en tubos EBC

AZUCARES RESIDUALES

18 g/l*
* correspondiendo a un atenuación aparente de 75%

FLOCULACION

alta

TEMPERATURA DE FERMENTACION: 12-25°C (53.6-77°F) ideal 15-20°C (59-68°F)

DOSIS: 50 a 80 g/hl

INSTRUCCIONES DE SIEMBRA:
 Previamente a la inoculación, se debe rehidratar la levadura seca en un recipiente con agitación hasta formar una crema. El procedimiento consiste en esparcir la levadura seca en un volumen de agua estéril o mosto 10 veces superior a su propio peso, a una temperatura de 27 °C ± 3 °C (80 °F ± 6 °F). Una vez que el peso total de la levadura se encuentre reconstituido en forma de crema (esta etapa lleva de 15 a 30 minutos) se mantiene la agitación suave por otros 30 minutos. Posteriormente se siembra la crema obtenida en los fermentadores. Alternativamente, se puede sembrar directamente levadura seca en el fermentador, asegurando que la temperatura del mosto supere los 20 °C (68 °F). Este procedimiento consiste en esparcir la levadura seca en forma progresiva sobre la superficie del mosto, asegurando que la misma cubra toda el área disponible, evitando la formación de grumos. Se deja en reposo por 30 minutos y luego se mezcla el mosto, por ejemplo, utilizando aireación.

ANÁLISIS TÍPICOS:
 % peso seco: 94.0 – 96.5
 Células viables al envasado: > 6 x 10⁸ /g
 Bacterias totales*: < 5 / ml
 Bacterias ácido acéticas*: < 1 / ml
 Lactobacilos*: < 1 / ml
 Pediococcus*: < 1 / ml
 Levaduras salvajes no *Saccharomyces**: < 1 / ml
 Microorganismos patógenos: en acuerdo a la regulación vigente

ALMACENAMIENTO
 Durante el transporte: el producto puede ser transportado y almacenado a temperatura ambiente durante 3 meses, sin que sea afectada su performance.
 A destino: Conservar en lugar fresco (< 10 °C / 50 °F) y ambiente seco.

VALIDEZ
 El producto almacenado bajo condiciones recomendadas posee una validez de 24 meses contando desde la fecha de elaboración. Los sachets abiertos deben ser sellados y almacenados a 4 °C (39 °F) y utilizados dentro de los 7 días siguientes a la apertura. No deben ser utilizados los sachets blancos o que presenten algún tipo de daño.

*Cuando la levadura seca es inoculada a una tasa de 100 g/hl o > 6 x 10⁸ células viables / ml

Se informa que cualquier cambio en el proceso fermentativo puede alterar la calidad final del producto. Por lo tanto, se sugiere realizar ensayos de fermentación antes de utilizar comercialmente nuestra levadura.

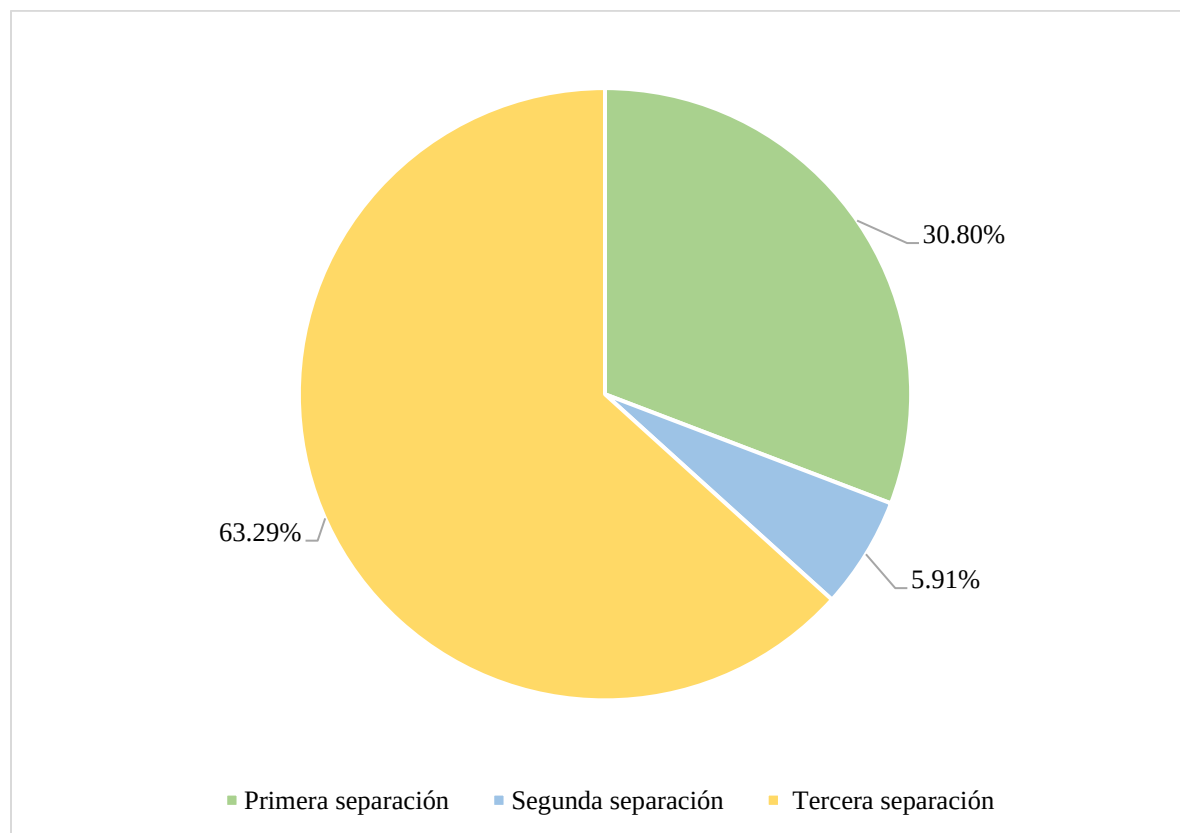
TECHNICAL DATA SHEET • Safale™ S-04 - Rev. OCT2015

The obvious choice for beverage fermentation

Fermentis Division of S.I. Lesaffre - BP 3029 - 137 Rue Gabriel Péri - 59703 Marcq-en-Baroeul Cedex - FRANCE - Tel. +33 (0)3 20 81 62 75 - Fax. +33 (0)3 20 81 62 70 - www.fermentis.com

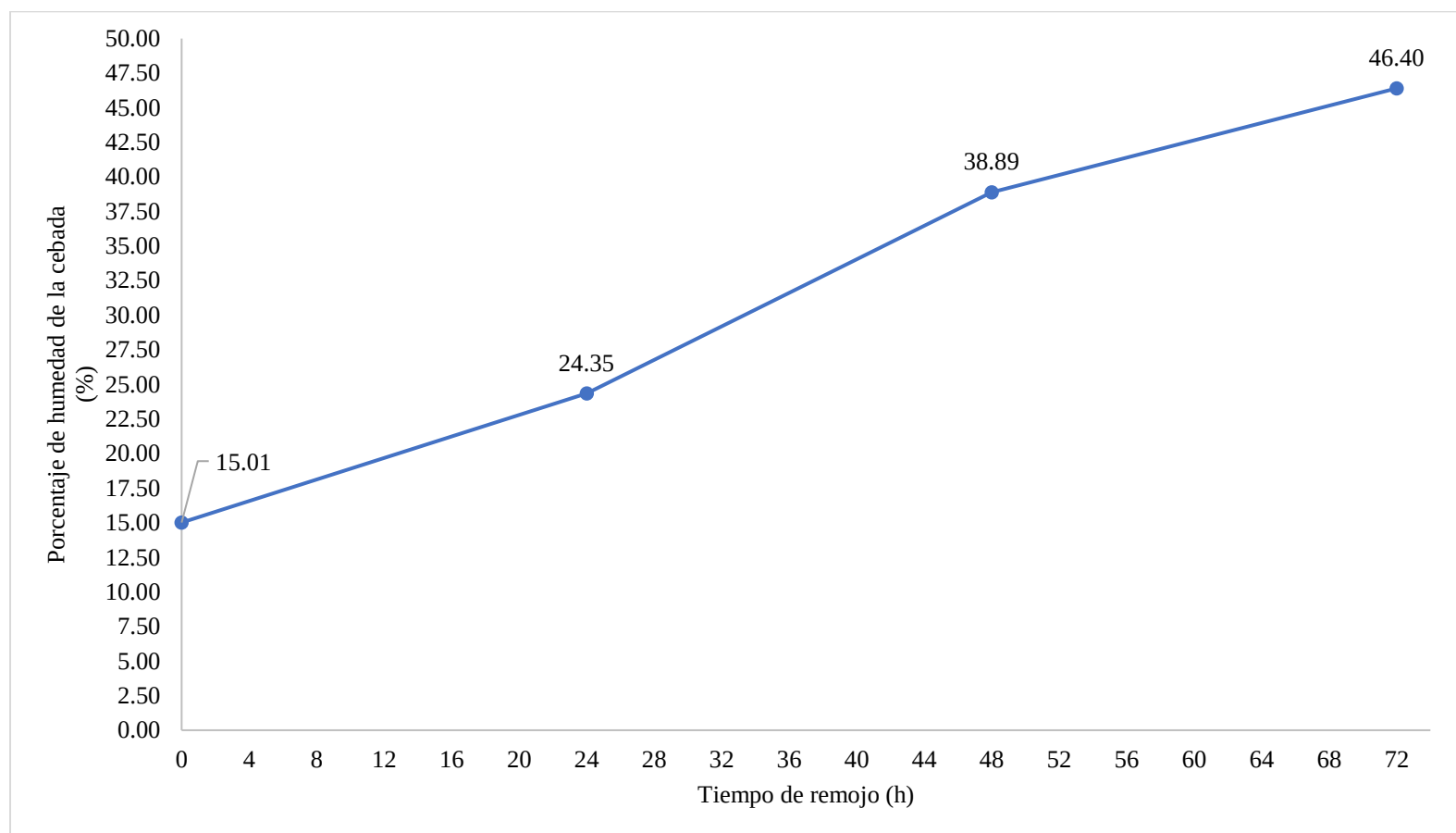
3. Gráficas

Gráfica 46. Porcentaje de impurezas removidas según la etapa de limpieza.



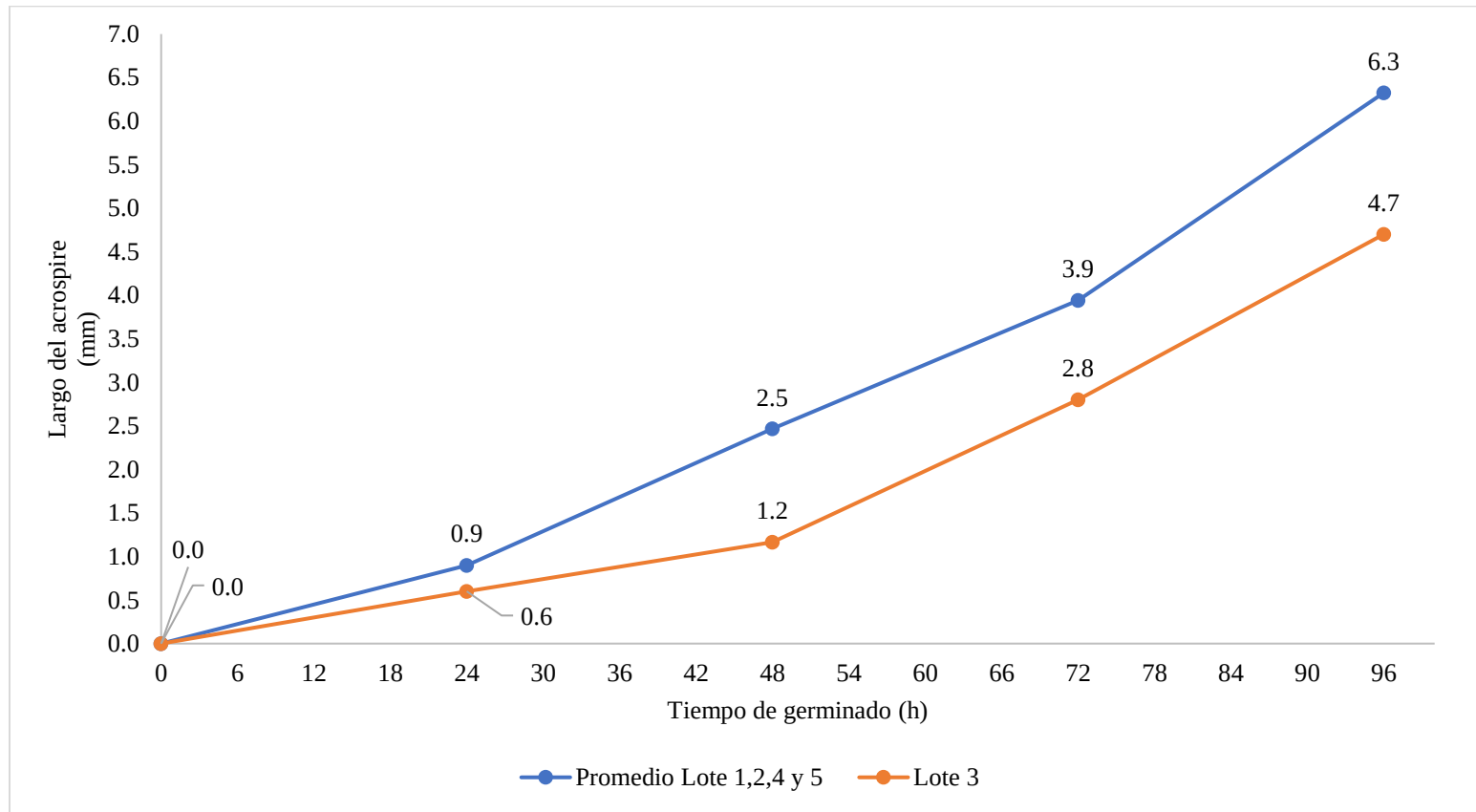
Nota: Los datos mostrados en la figura son el promedio de porcentaje de impurezas removidas de los cinco lotes de cebada.

Gráfica 47. Porcentaje promedio de humedad de los lotes de cebada según el tiempo de remojo



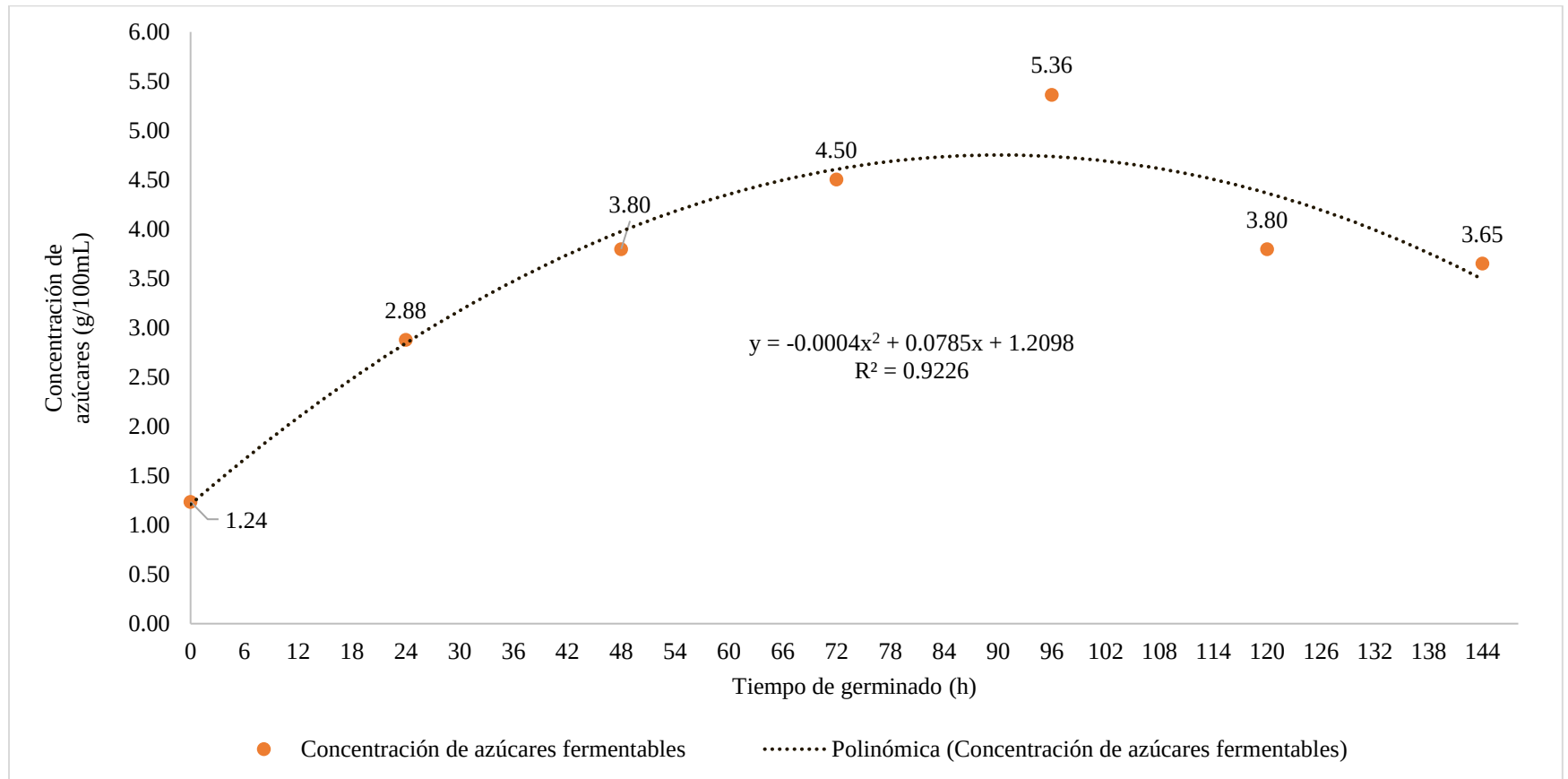
Nota: Los datos mostrados en la figura son el promedio del porcentaje de humedad de los cinco lotes de cebada.

Gráfica 48. Porcentaje promedio del largo del acrospire de la cebada según el día de germinado

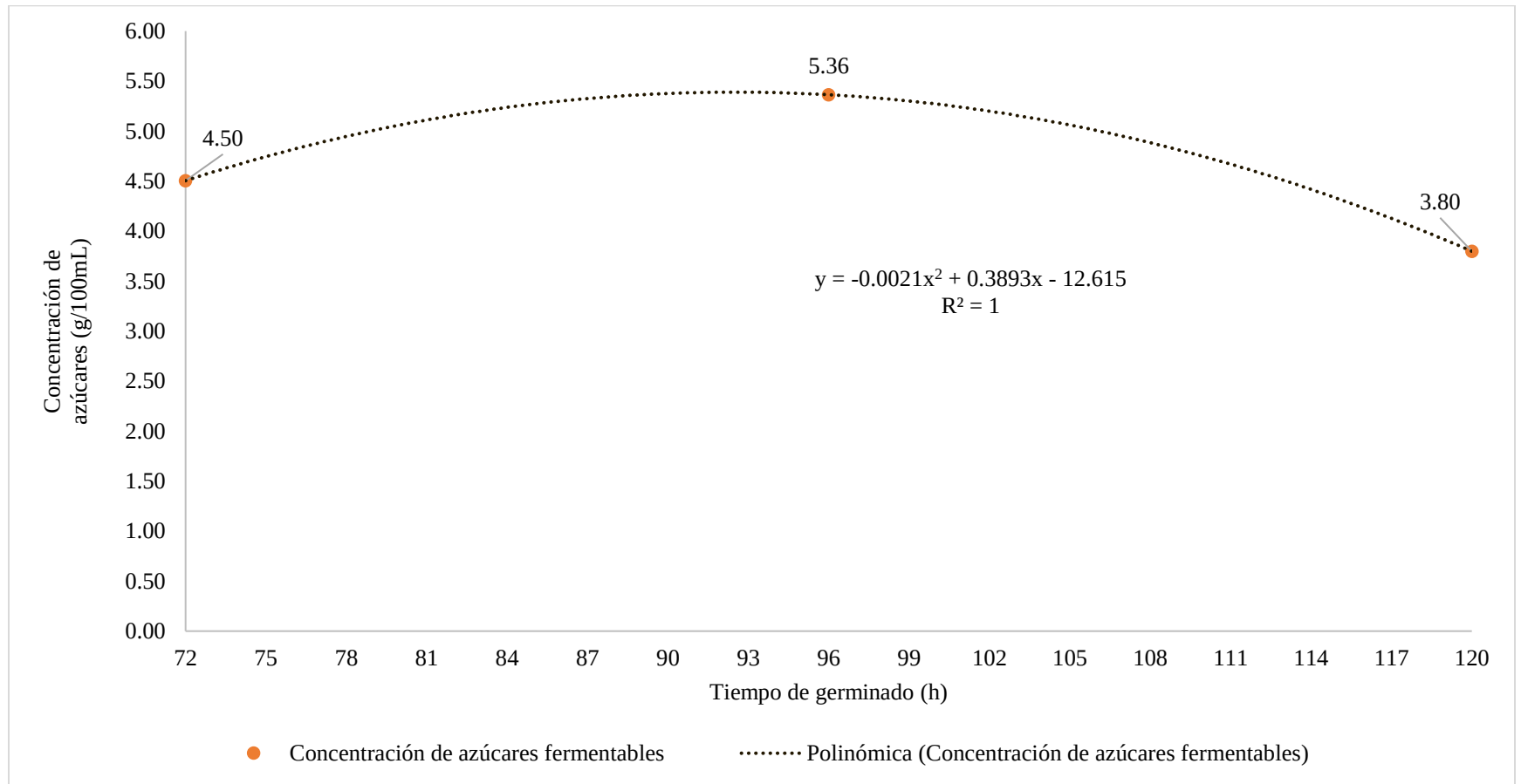


Nota: Los datos mostrados en la figura son el promedio del largo del acrospire de los lotes 1,2,4 y 5 respectivamente. El lote 3 se graficó por separad, debido a que fue descartado por su bajo porcentaje de rendimiento.

Gráfica 49. Concentración de azúcares fermentables según el día de germinado de cebada

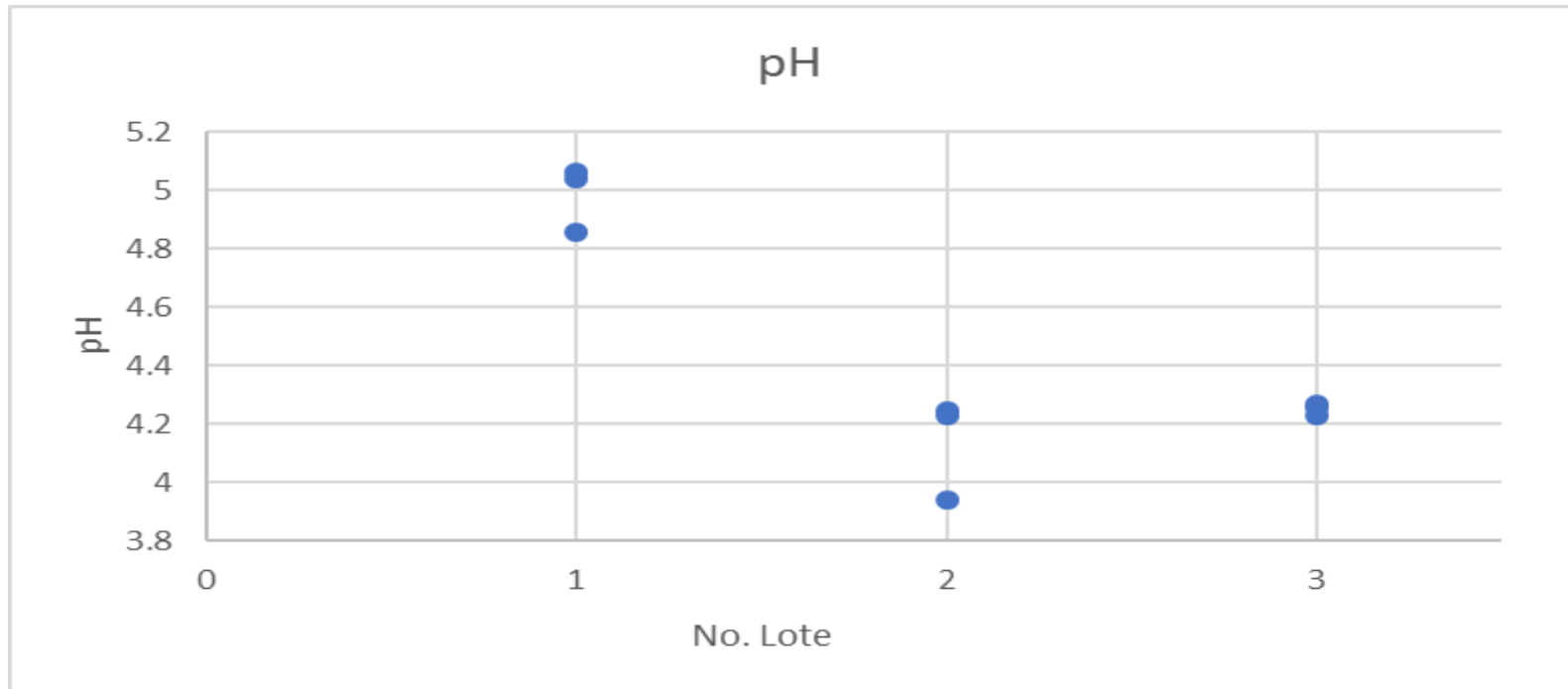


Gráfica 50. Concentración de azúcares fermentables según el día de germinado de cebada



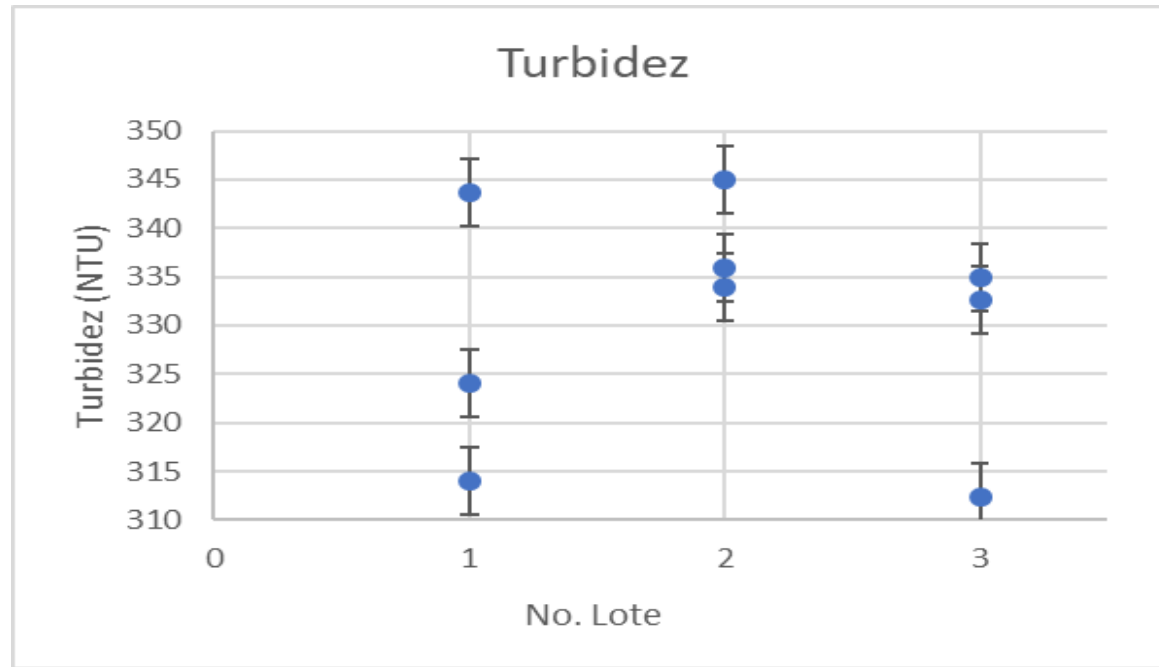
Nota: Los valores en la figura pertenecen a las 72,96 y 120 horas de germinado.

Gráfica 51. pH medido de los 3 lotes analizados



En el gráfico se observan los resultados obtenidos de las 3 réplicas realizadas para cada lote, con una incertidumbre de ± 0.03464 . En el lote 1 se obtuvieron los siguientes resultados: 5.04, 5.06 y 4.86, en el lote 2 se obtuvieron los siguientes resultados: 4.86, 3.94 y 4.24 y en el lote 3 se obtuvieron los siguientes resultados: 4.27, 4.26 y 4.23.

Gráfica 52. Gráfico de turbidez de los 3 lotes analizados



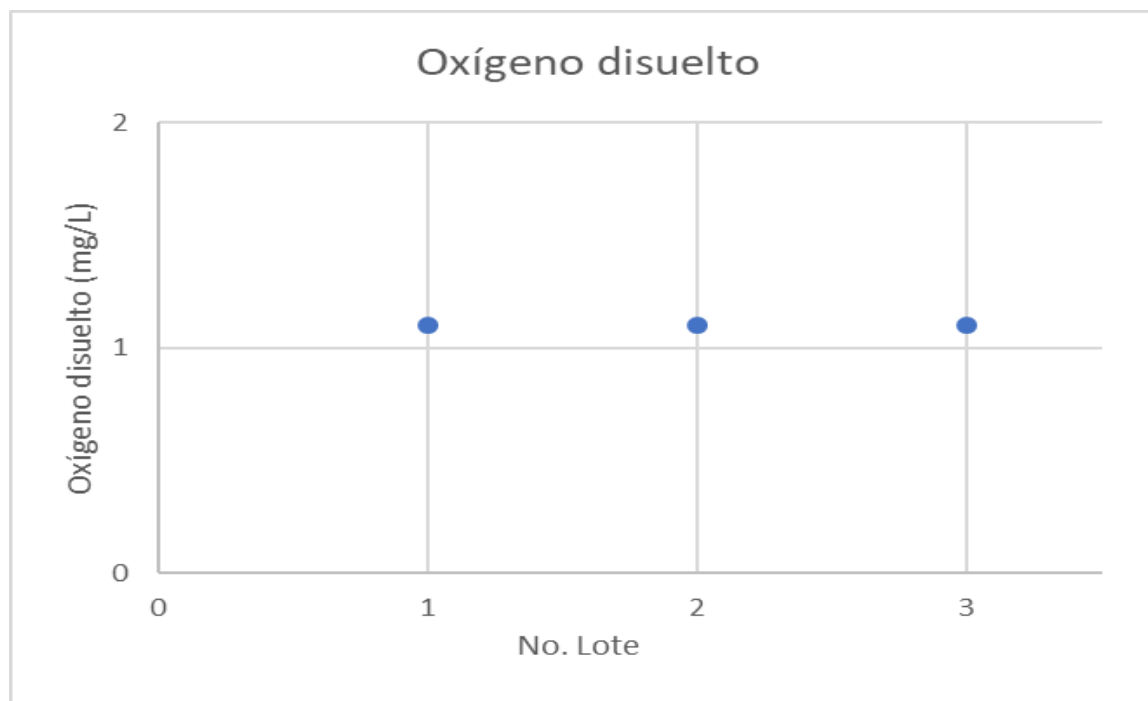
En el gráfico se observan los resultados obtenidos de las 3 réplicas realizadas para cada lote, con una incertidumbre de ± 3.464 (barras de error). En el lote 1 se obtuvieron los siguientes resultados: 314.00, 324.00 y 343.67, en el lote 2 se obtuvieron los siguientes resultados: 336.00, 345.00 y 334.00 y en el lote 3 se obtuvieron los siguientes resultados: 332.67, 335.00 y 312.33.

Gráfica 53. Gráfico de conductividad de los 3 lotes analizados



En el gráfico se observan los resultados obtenidos de las 3 réplicas realizadas para cada lote, con una incertidumbre de $\pm 1\%$ (barras de error). En el lote 1 se obtuvieron los siguientes resultados: 122.53, 125.80 y 126.83, en el lote 2 se obtuvieron los siguientes resultados: 173.20, 173.43 y 175.53 y en el lote 3 se obtuvieron los siguientes resultados: 163.77, 157.77 y 161.60.

Gráfica 54. Gráfico de oxígeno disuelto de los 3 lotes analizados



En el gráfico se observan los resultados obtenidos de las 3 réplicas realizadas para cada lote, con una incertidumbre de ± 0.03464 (barras de error). En todos los lotes se obtuvo un resultado de 1.1mg/L.

4. Procesos

Figura 127: Remojo de cebada.



Figura 128: Germinado de cebada.



Figura 129: Proceso de molienda.



Figura 130: Macerado.

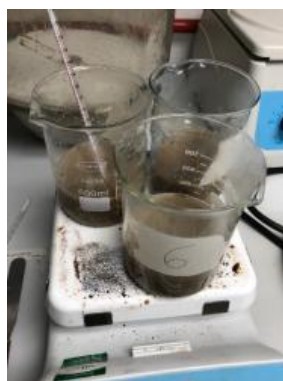


Figura 131: Lavado de granos.



Figura 132: Filtración de mosto.



Figura 133: Mosto a distintas concentraciones de azúcar.



Figura 134: Preparación de viales para el equipo HPLC.



Figura 135: Recepción de malta verde germinando



Figura 136: Bandeja de malta verde lista para ser secada en el deshidratador de gabinete.



Figura 137: Medición del tamaño de granos de malta



Figura 138: Ajuste de secador de rodillos con estándar referencia



Figura 139: Comparativa de estándar de distancia entre rodillos y grano de malta típico



Figura 140: Molienda de malta en secador de rodillos



Figura 141: Maceración de cerveza a pequeña escala con control de temperatura.



Figura 142: Cocción de mosto



Figura 143: Lúpulo Fuggless



Figura 144: Lúpulo Cascade



5. Equipo y materiales.

Figura 145: Hach DR890.



Figura 146: Multiparámetros PCSTestrTM marca OAKTON, modelo 35.



Figura 147: Petrifilm® 3M.



Figura 148: Incubadora Quincy Lab Inc, modelo 12-140E.



Figura 149: Regla.



Figura 150: Probeta de un 1L.



Figura 151: Cronómetro marca CASIO.



Figura 152: Balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120.



Figura 153: Balanza OHAUS, modelo 3000Series.



Figura 154: Cromatógrafo HPLC marca Agilent, 1,100 Series.



Figura 155: Light Meter EXTECH.



Figura 156: Densímetro Better Brew ®



Figura 157: Amperimetro de gancho



Figura 158: Taquímetro



Figura 159: Vernier



Figura 160: olla de peltre



Figura 161: termocupla

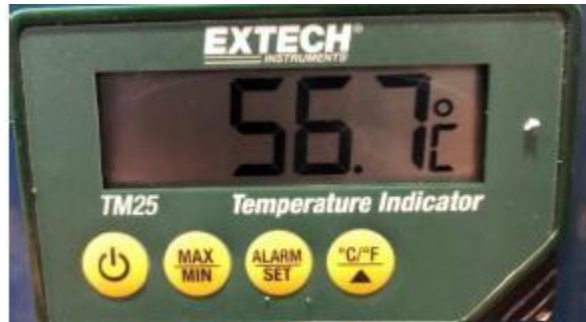


Figura 162: estufa eléctrica de inducción



Figura 163. Prueba de fermentación a microescala



*En el cuadro anterior se muestra una primera prueba de fermentación a microescala realizada para analizar el comportamiento de la reacción de fermentación antes de iniciar con las pruebas en el garrafón.

Figura 164. Mosto en proceso de fermentación



Figura 165. Autoclave o esterilizador de cristalería



Figura 166. Balanza analítica BOECO Germany



Figura 167. Refractómetro utilizado para medir °Brix e índice de refracción

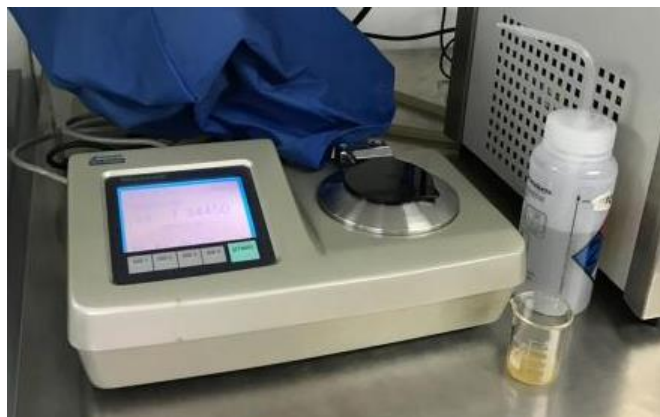


Figura 168. Baño térmico utilizado para mantener controlada la temperatura del inóculo



Figura 169. Potenciómetro utilizado para medir pH

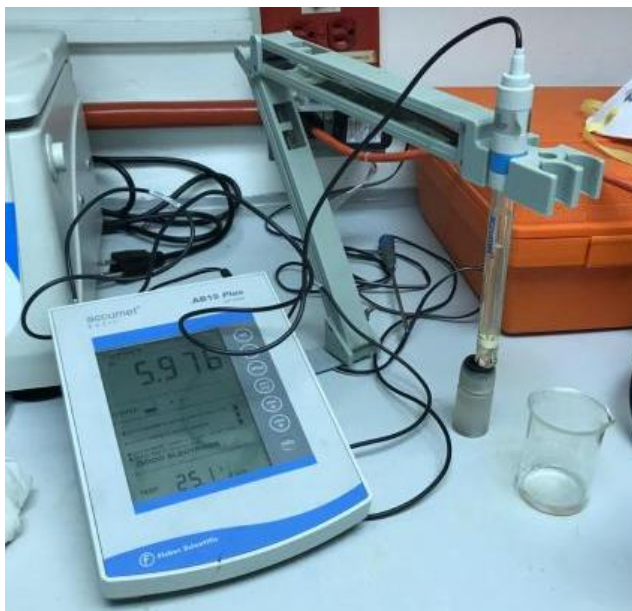


Figura 170. Determinación de peso seco con centrífuga



Figura 171. Determinación de densidad con un picnómetro

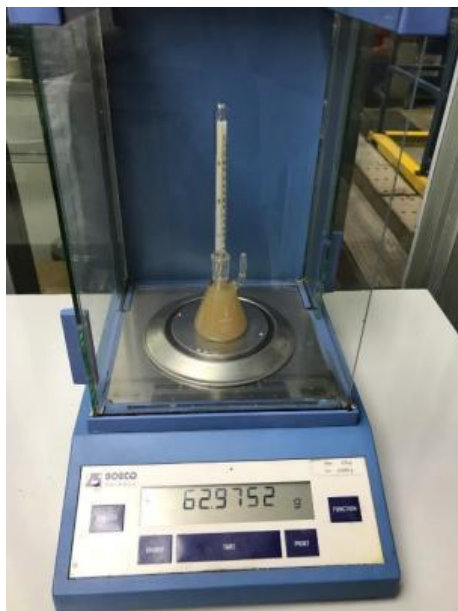


Figura 172. Muestras para mediciones empleadas en cinética de reacción



*En la figura anterior se observan las muestras que contienen el mosto de cerveza utilizadas para realizar el estudio cinético de la reacción de fermentación del mosto de cerveza.

Figura 173. Sistema de fermentación de cerveza



*En la figura anterior se observa el sistema montado de fermentación de cerveza en un garrafón sumergido en una cubeta con agua fría y la trampa de dióxido de carbono que consta de una manguera que conduce a una cubeta con agua.

Figura 174. Cromatógrafo de gases (GC-FID)



*En la figura anterior, se observa el equipo utilizado para la cuantificación de alcoholes presentes utilizando el detector de ionización de llama.

Figura 175. Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC)



*En la figura anterior, se observa el cromatógrafo líquido de alta resolución utilizado para la cuantificación de azúcares fermentables en el mosto de cerveza.

Figura 176. Columna Aminex HPX-87K utilizada en el HPLC



*En la figura anterior se observa la columna utilizado en el cromatógrafo líquido. Se utilizó esta ya que es especial para la cuantificación de maltosa.

Figura 177. Citómetro de flujo utilizado para conteo celular y viabilidad



Figura 178. Fermentador disponible modificado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias



6. Cromatogramas

Figura 179: Cromatograma muestra 0, obtenido por el equipo HPLC.

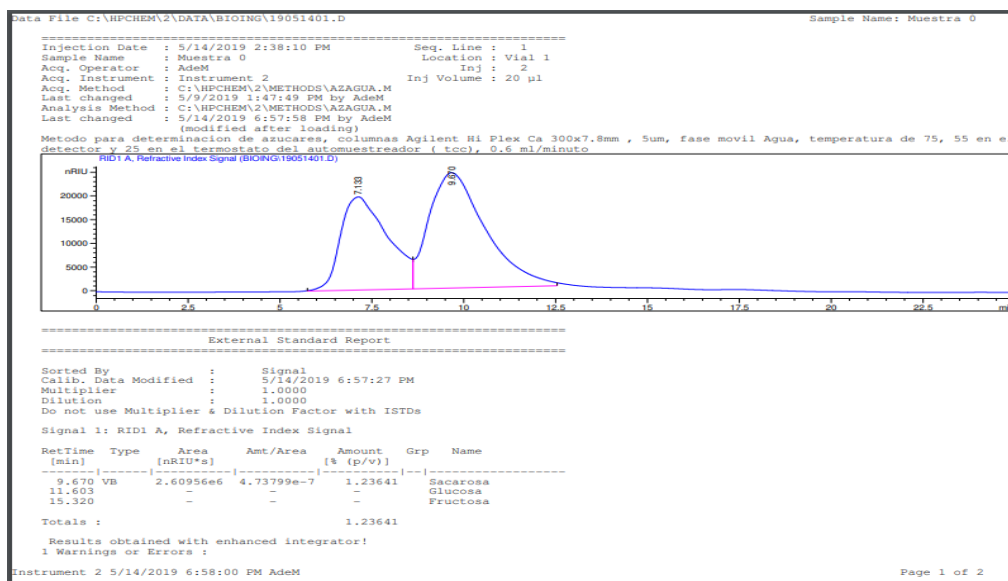


Figura 180: Cromatograma muestra 1, obtenido por el equipo HPLC.

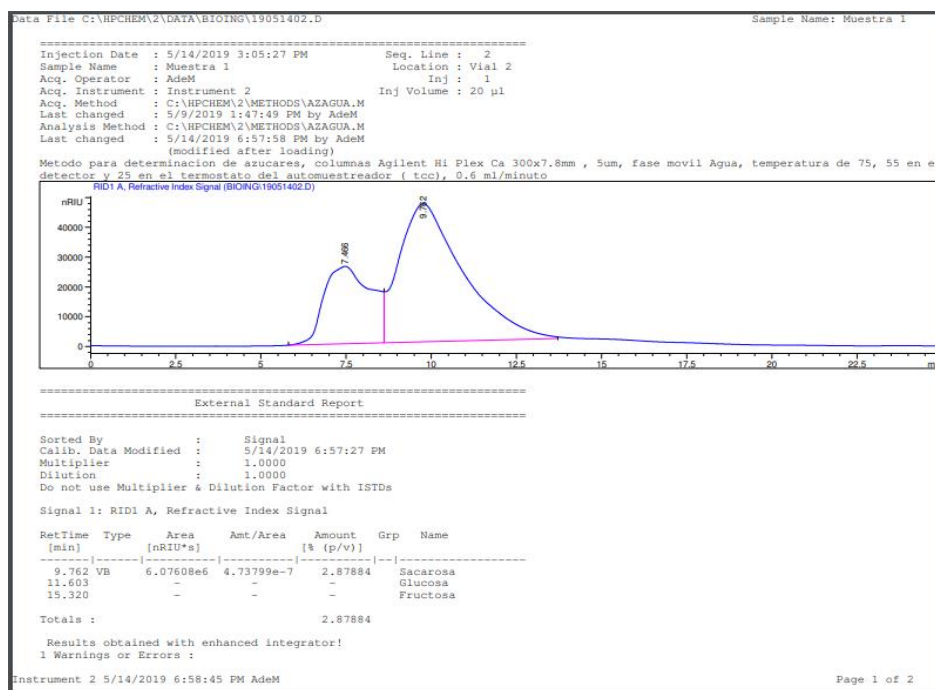


Figura 181: Cromatograma muestra 2, obtenido por el equipo HPLC.

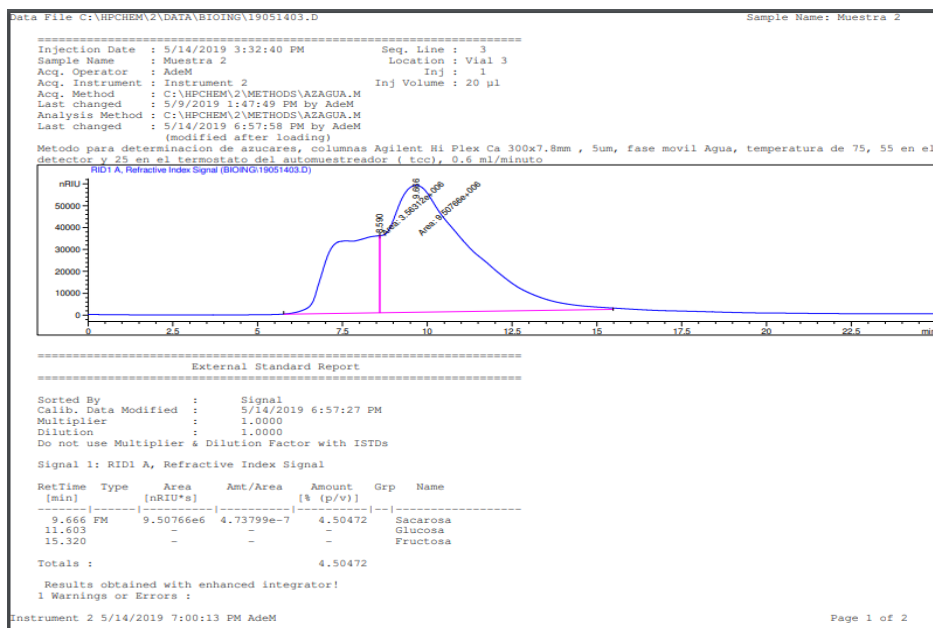


Figura 182. Cromatograma muestra 3, obtenido por el equipo HPLC

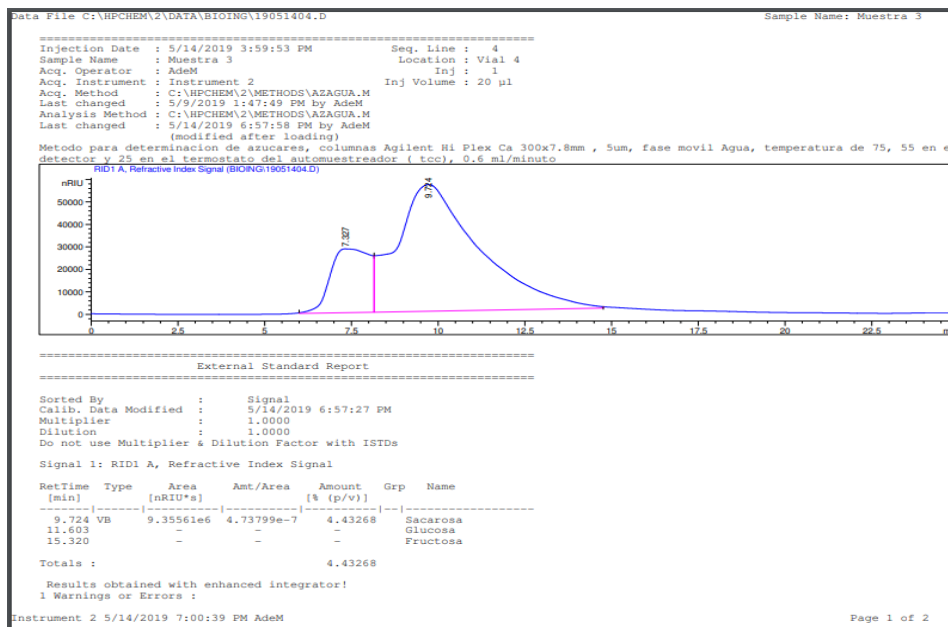


Figura 183: Cromatograma muestra 4, obtenido por el equipo HPLC.

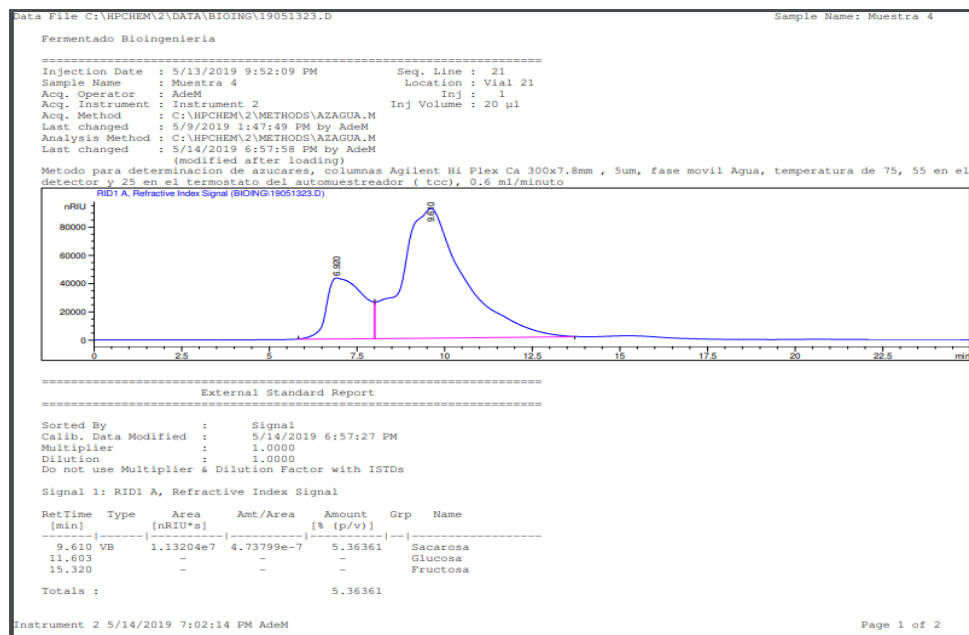


Figura 184: Cromatograma muestra 5, obtenido por el equipo HPLC

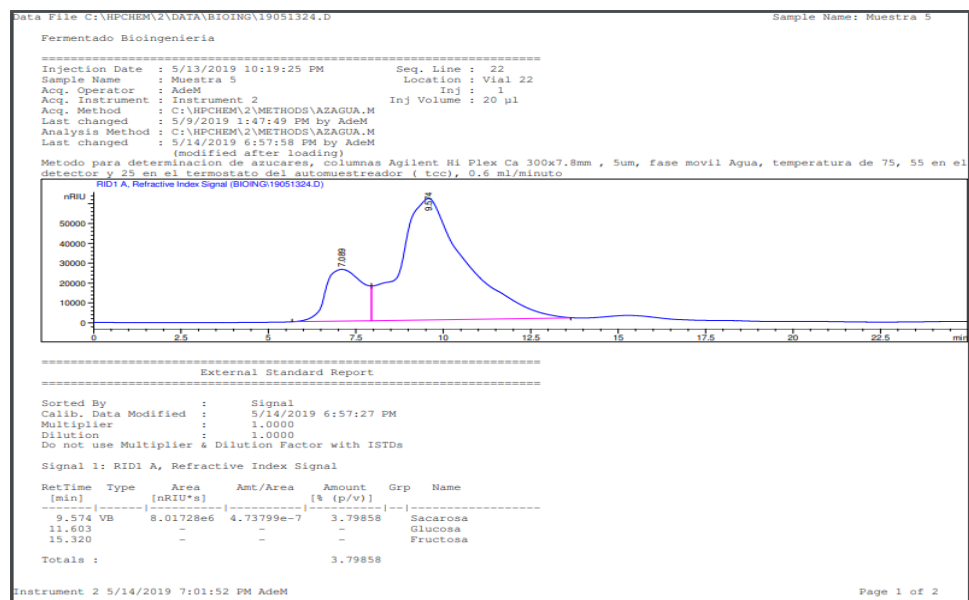


Figura 185: Cromatograma muestra 6, obtenido por el equipo HPLC

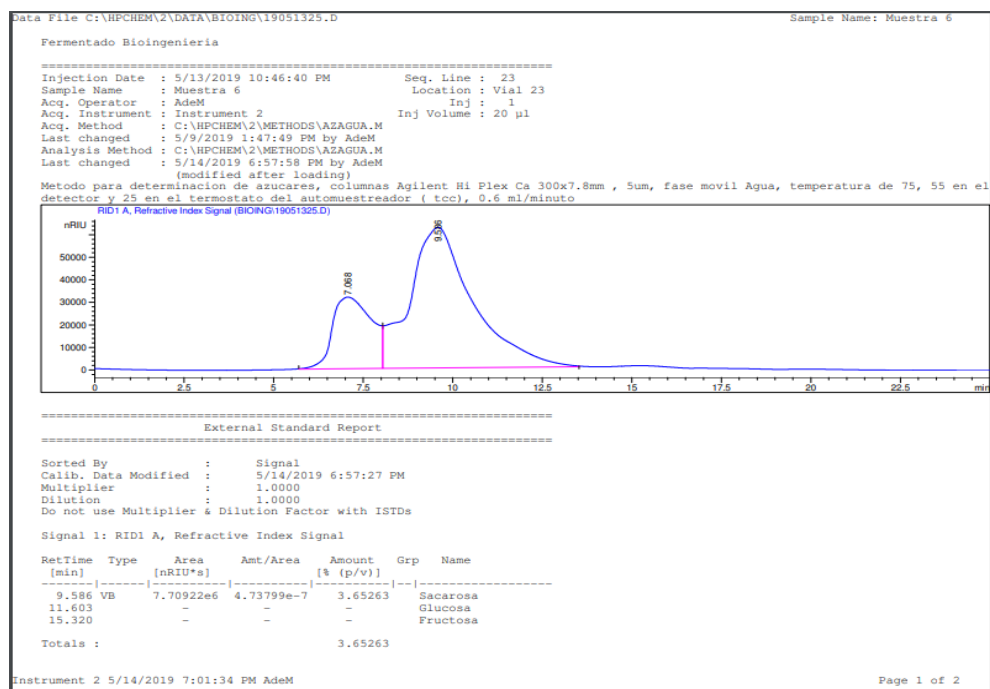


Figura 186. Análisis de alcoholes de muestra inicial de corrida de primera fermentación

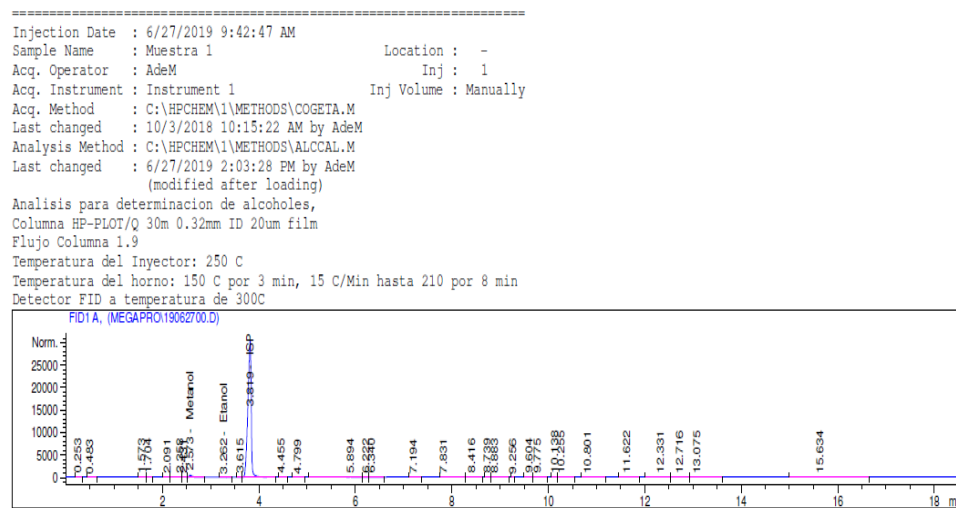


Figura 187. Análisis de alcoholes de muestra final de corrida de primera fermentación

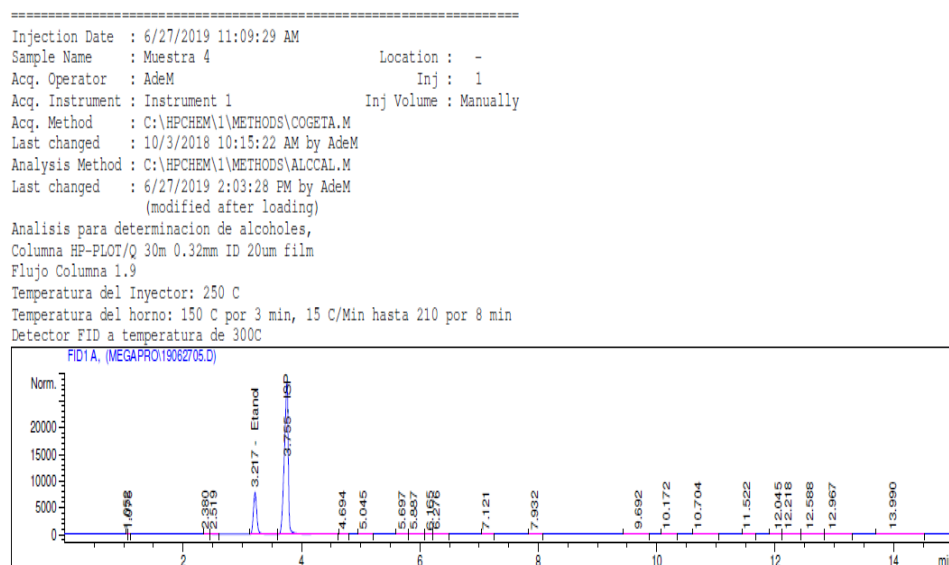


Figura 188. Análisis de azúcares de muestra inicial de primera fermentación

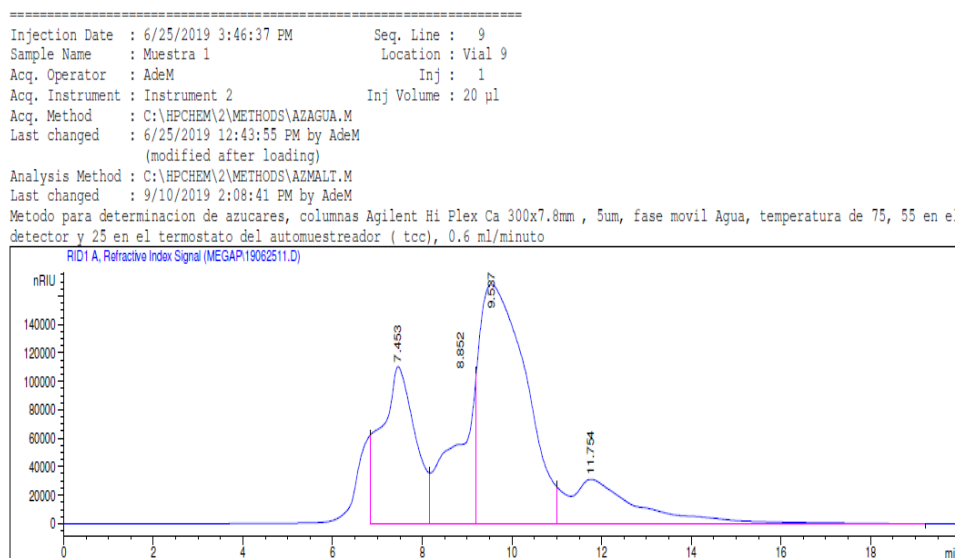


Figura 189. Análisis de azúcares de muestra final de primera fermentación

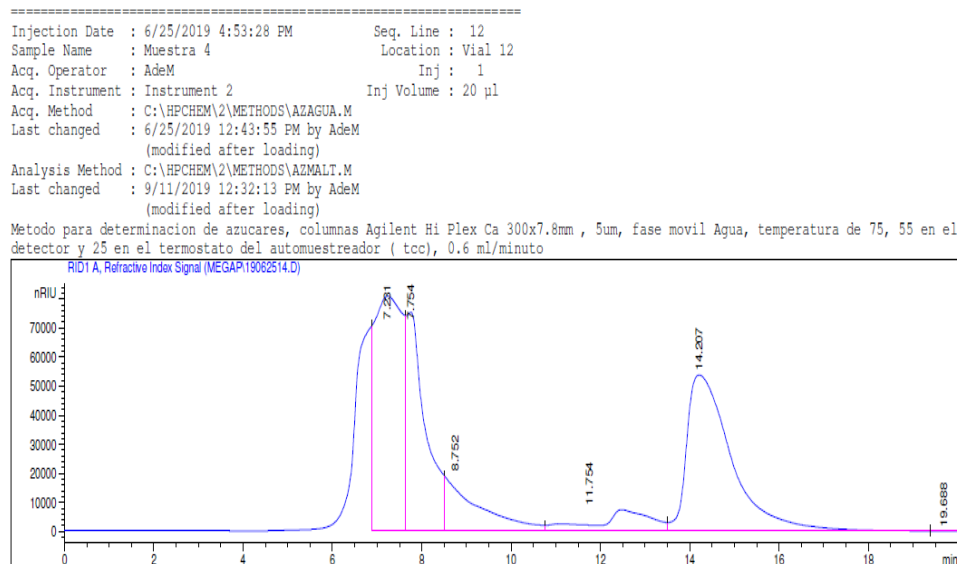


Figura 190. Análisis de alcoholes de muestra inicial de segunda fermentación

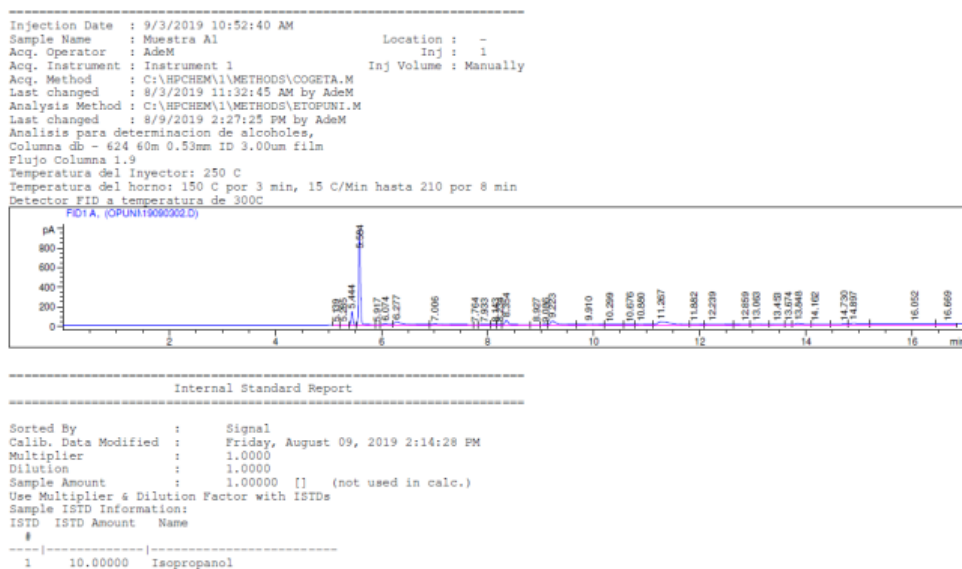


Figura 191. Análisis de alcoholes de muestra final de segunda fermentación

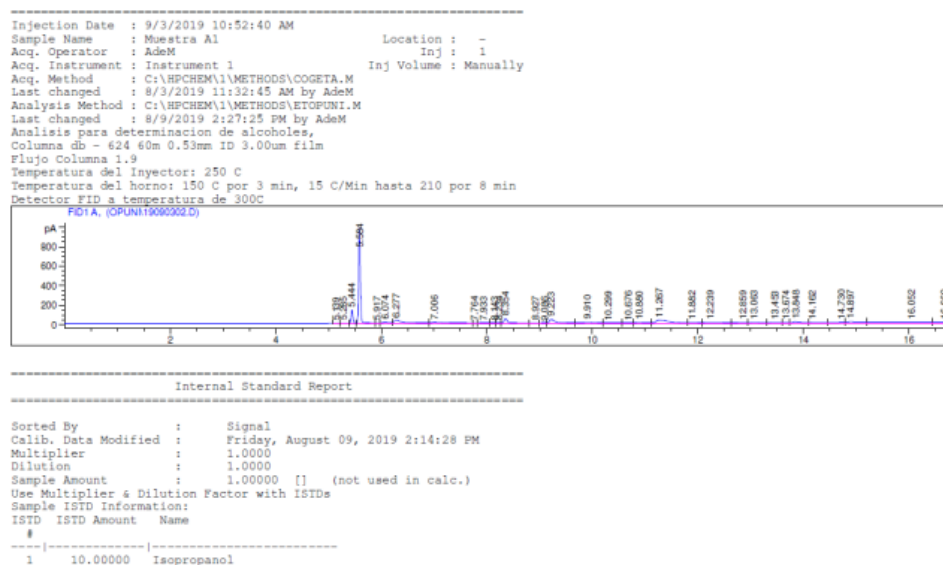


Figura 192. Análisis de azúcares de muestra inicial de segunda fermentación

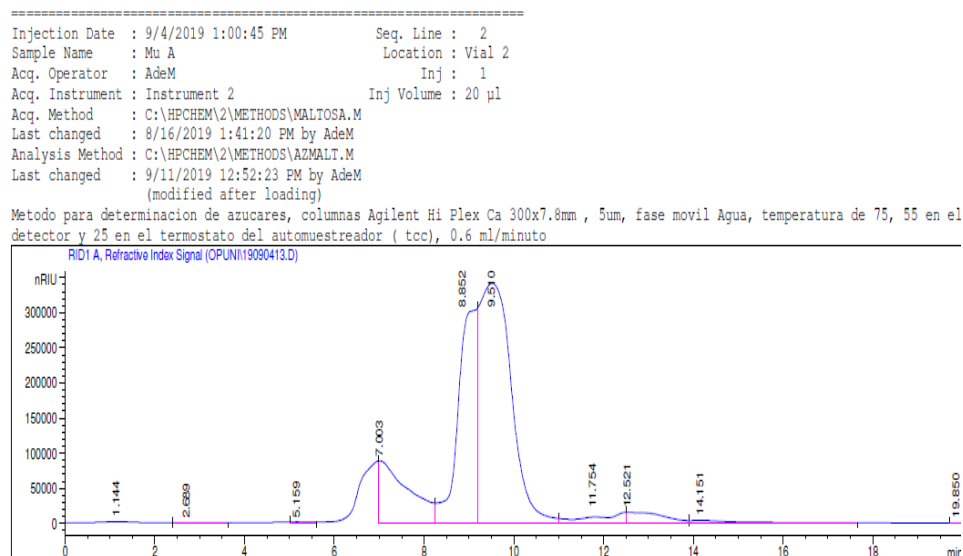


Figura 193. Análisis de azúcares de muestra final de segunda fermentación

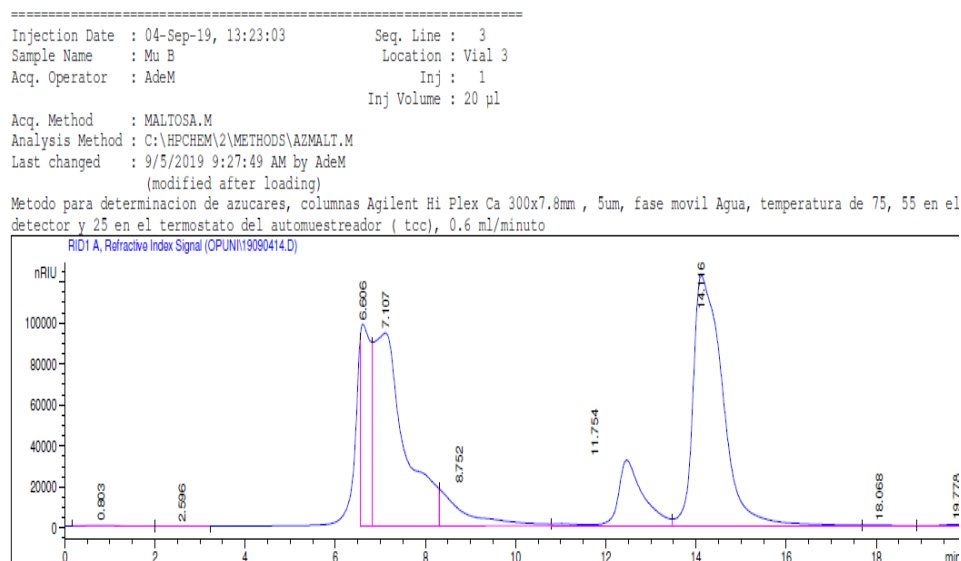
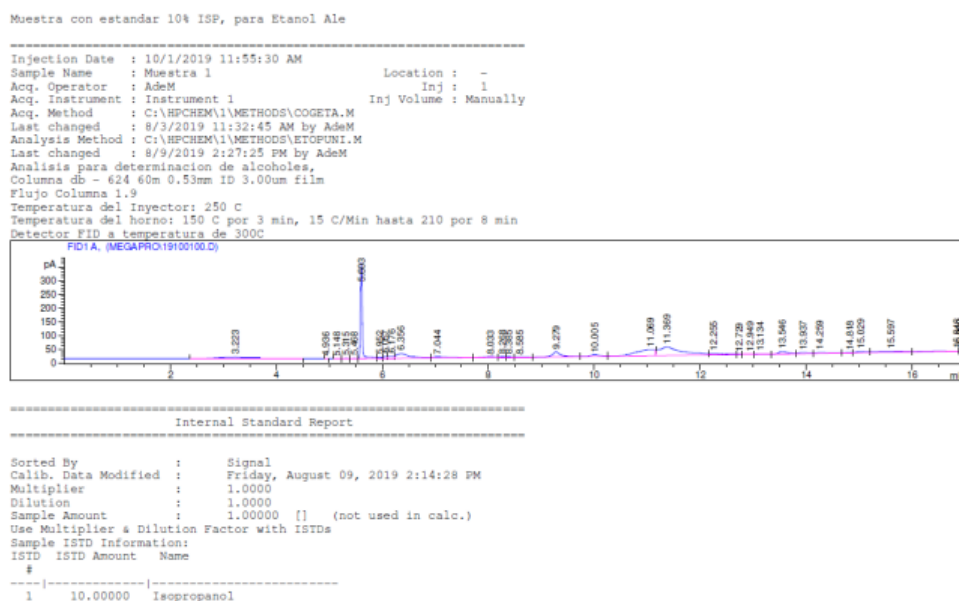


Figura 194. Análisis de alcoholes de muestra inicial de tercera fermentación



uestra con estandar 10% ISP, para Etanol Ale

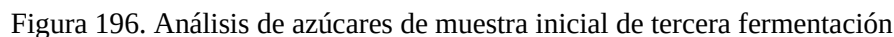


Figura 197. Análisis de azúcares de muestra final de tercera fermentación

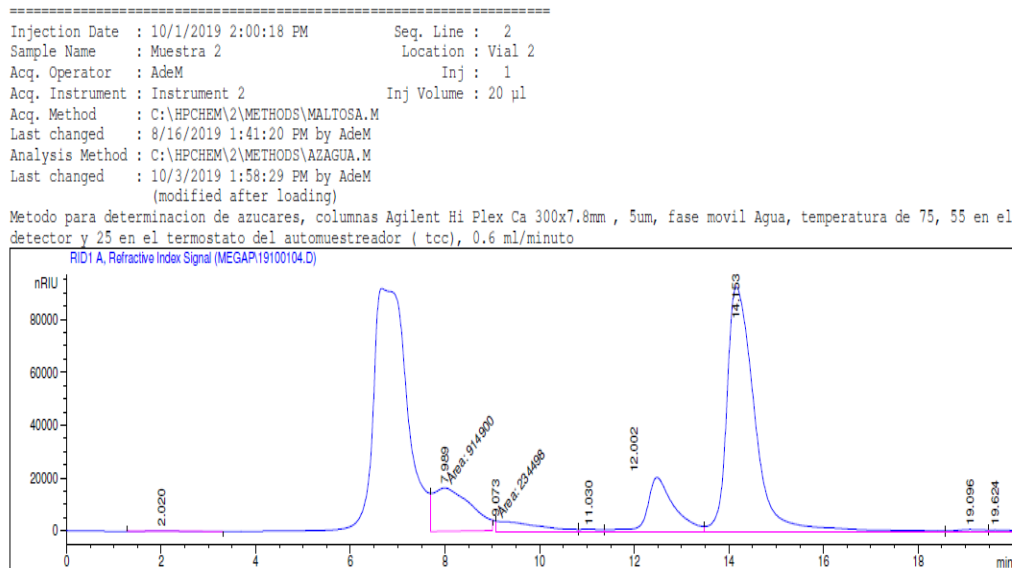


Figura 198. Curva de calibración para análisis de azúcares

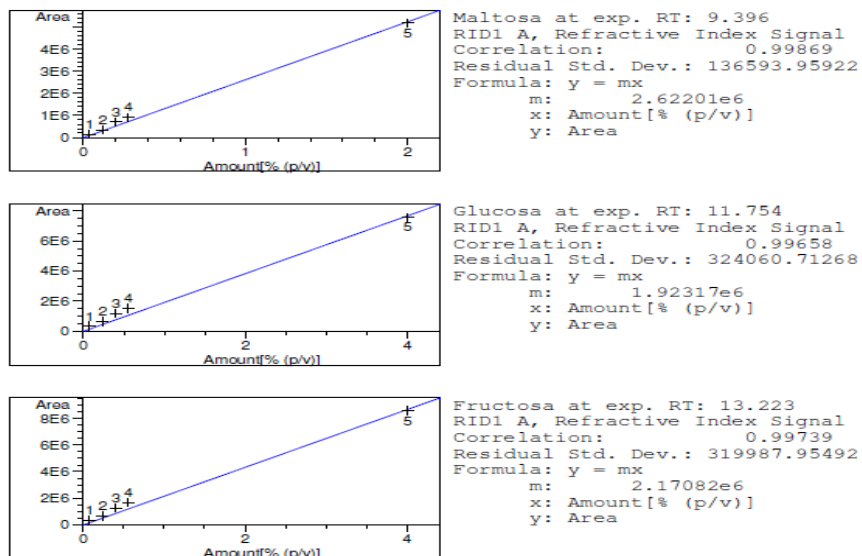


Figura 199. Muestra 0 para análisis de alcoholes presentes

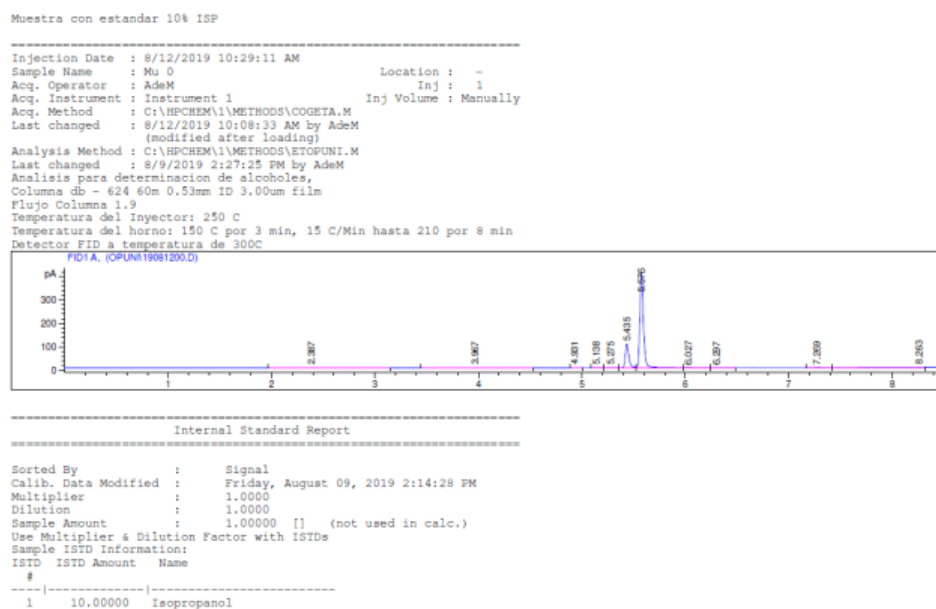


Figura 200. Muestra 1 para análisis de alcoholes presentes

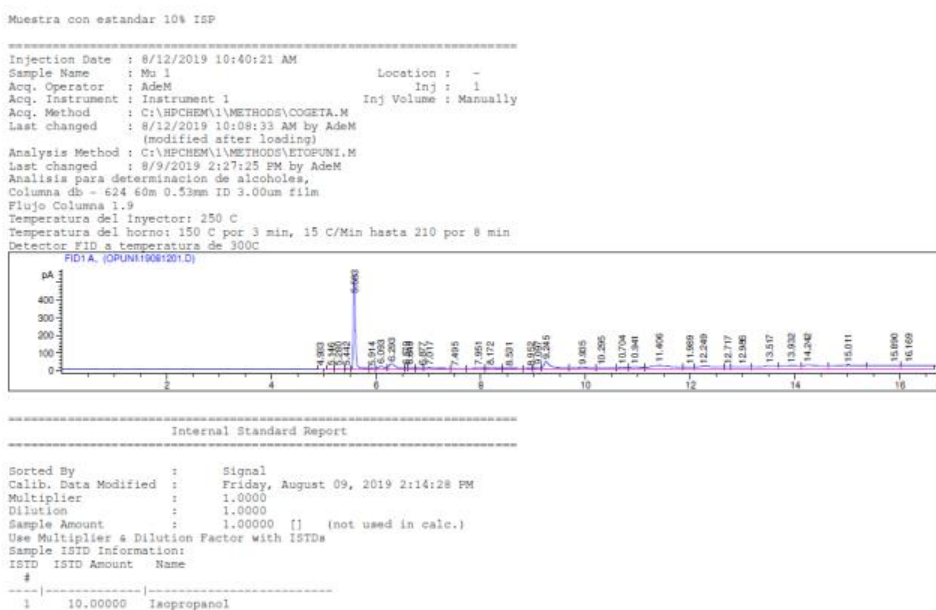


Figura 201. Muestra 2 para análisis de alcoholes presentes

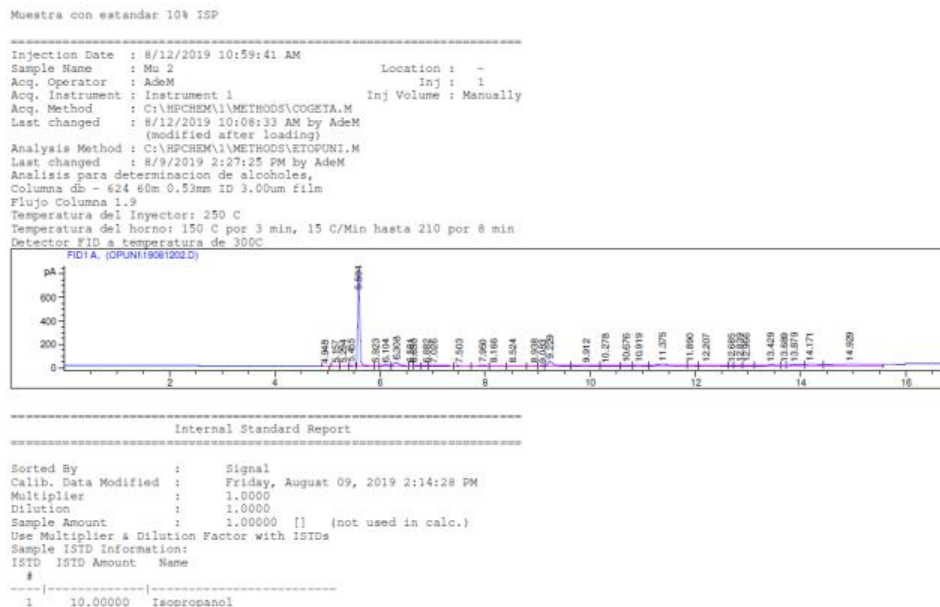


Figura 202. Muestra 3 para análisis de alcoholes presentes

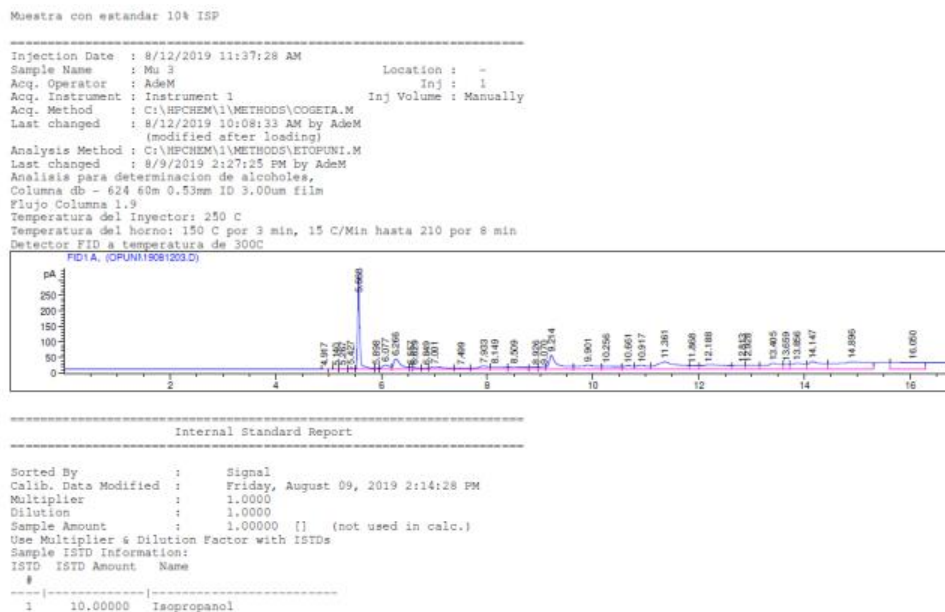


Figura 203. Muestra 4 para análisis de alcoholes presentes

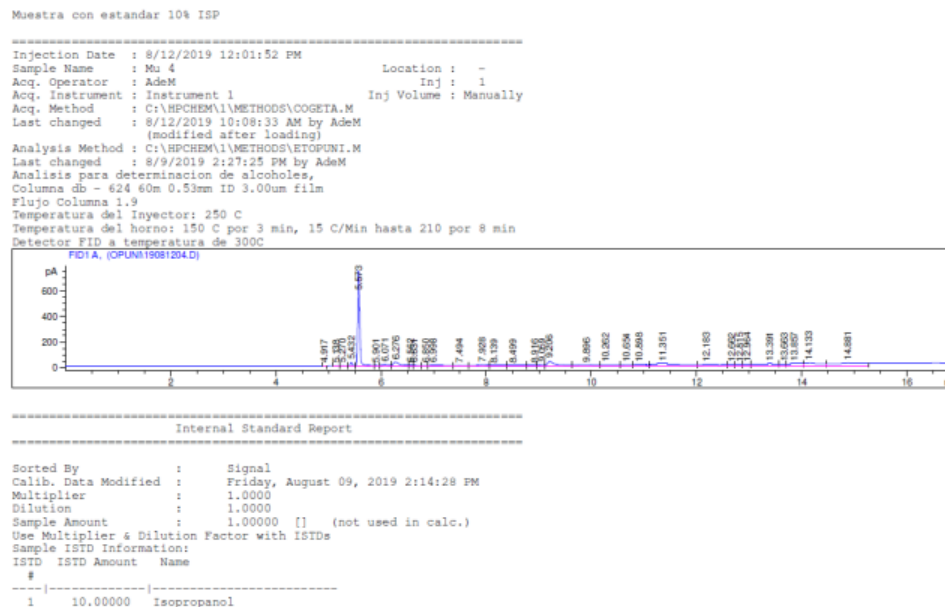


Figura 204. Muestra 5 para análisis de alcoholes presentes

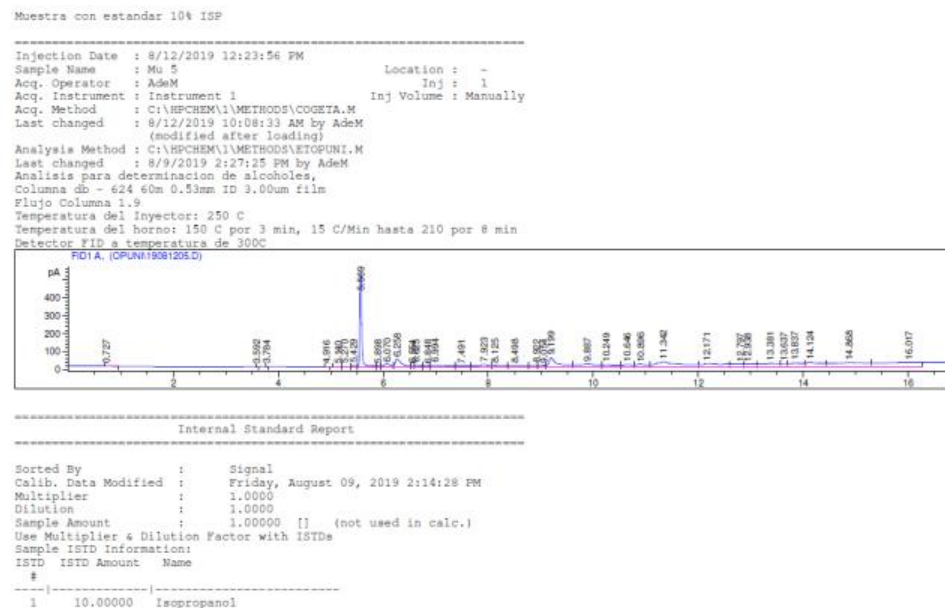


Figura 205. Muestra 6 para análisis de alcoholes presentes

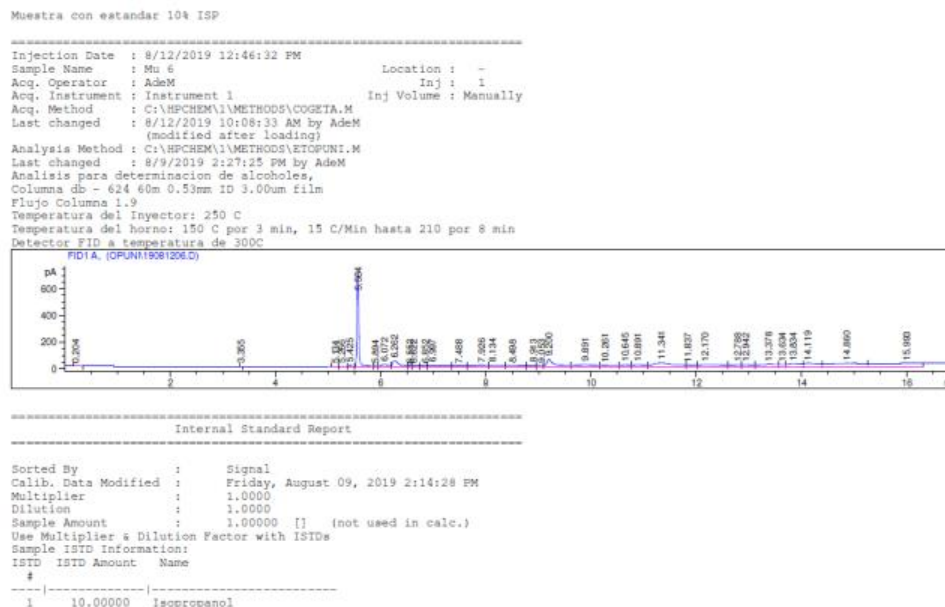


Figura 206. Muestra 7 para análisis de alcoholes presentes

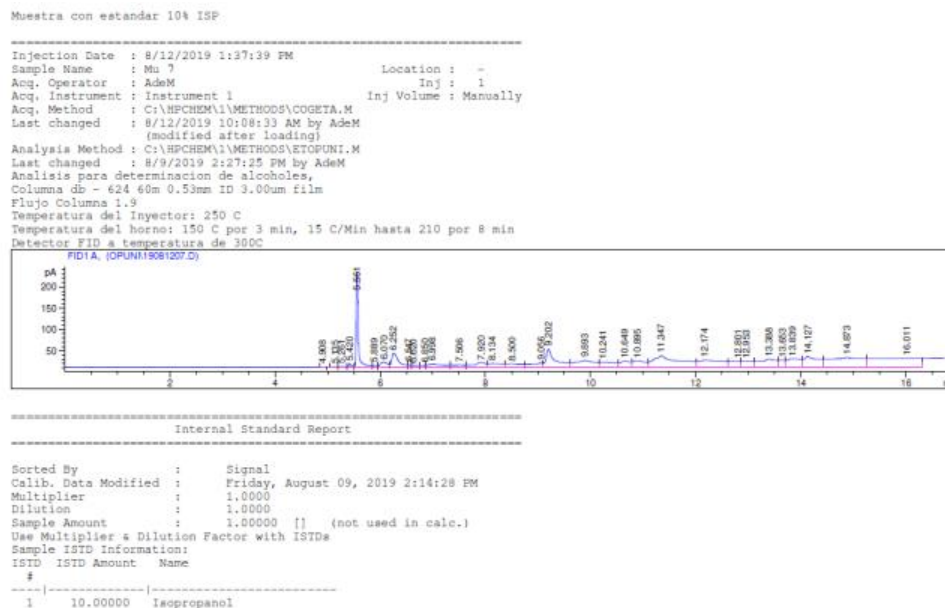


Figura 207. Muestra 8 para análisis de alcoholes presentes

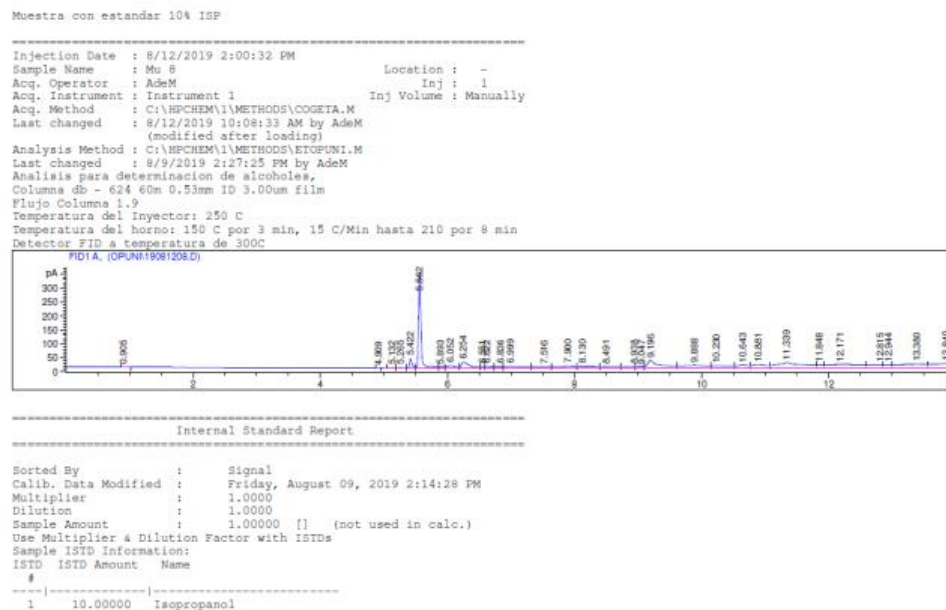


Figura 208. Muestra 9 para análisis de alcoholes presentes

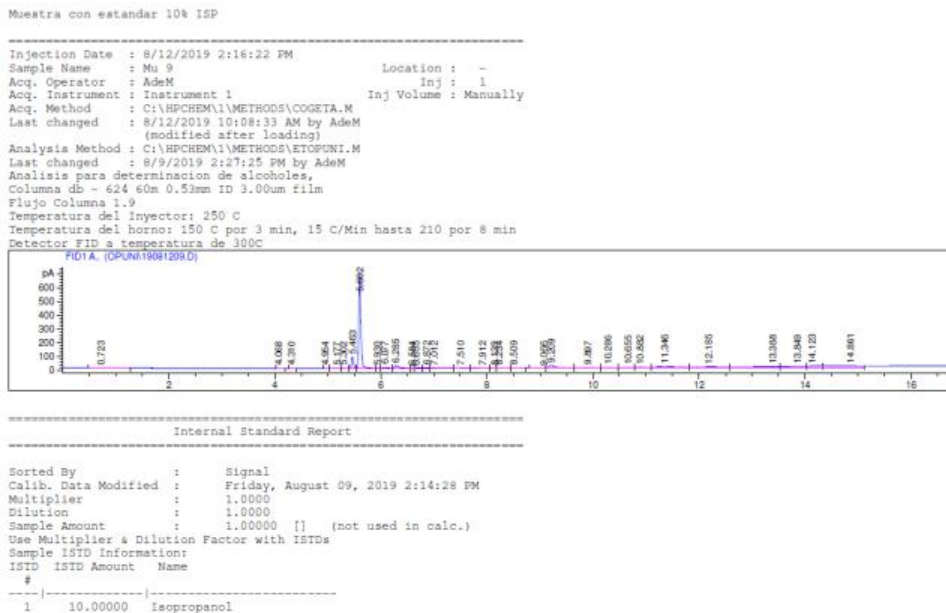


Figura 209. Muestra 10 para análisis de alcoholes

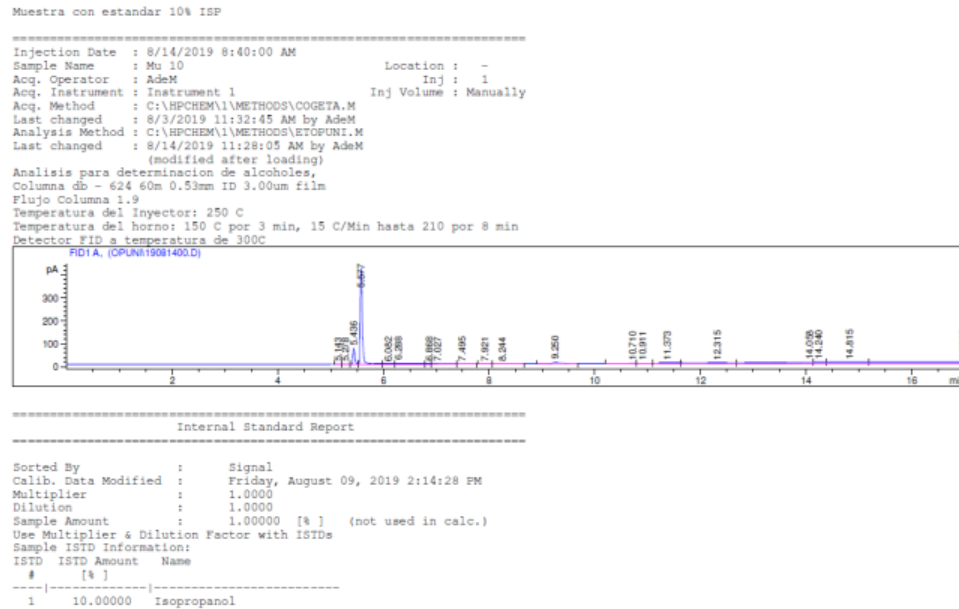


Figura 210. Muestra 11 para análisis de alcoholes

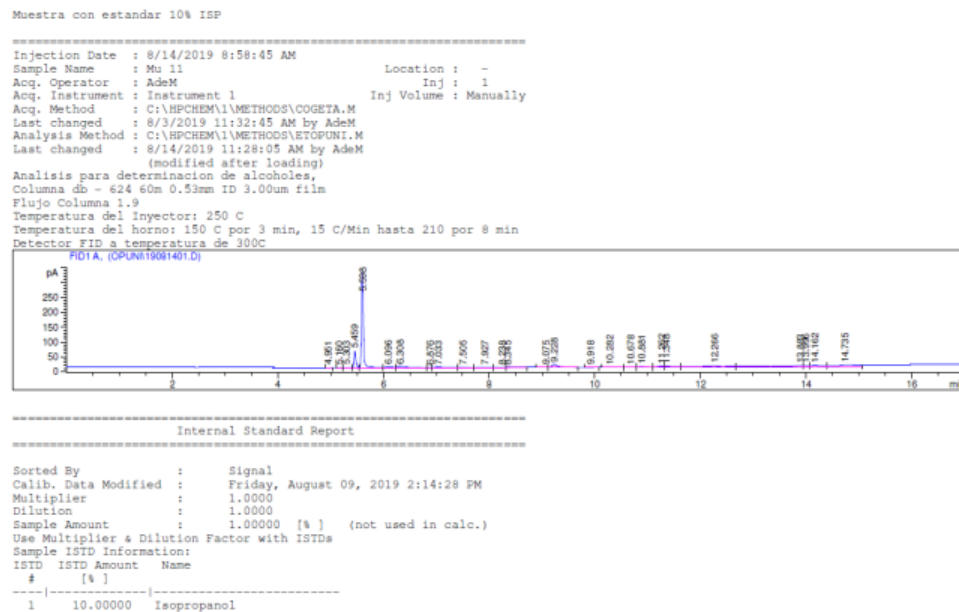


Figura 211. Muestra 12 para análisis de alcoholes

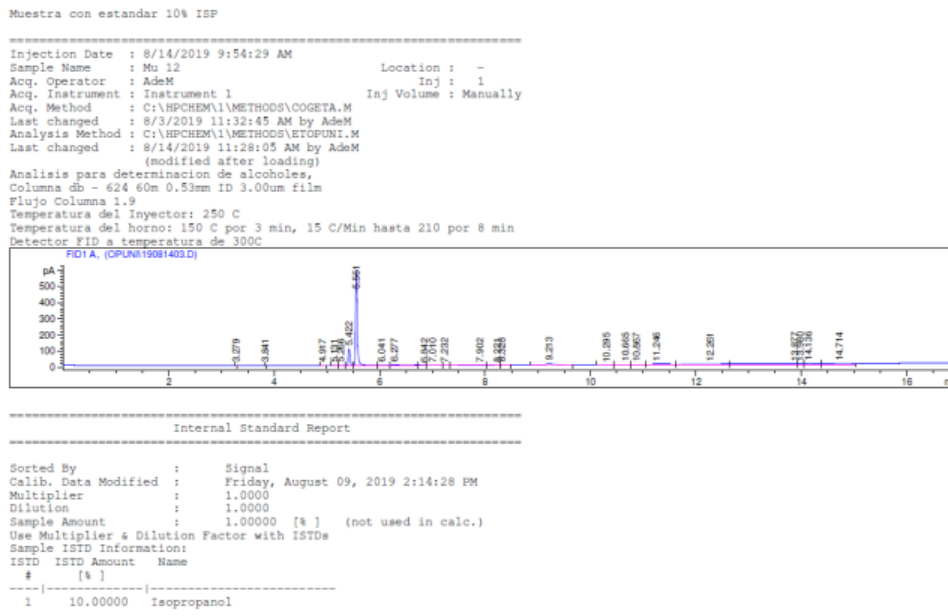


Figura 212. Muestra 13 para análisis de alcoholes

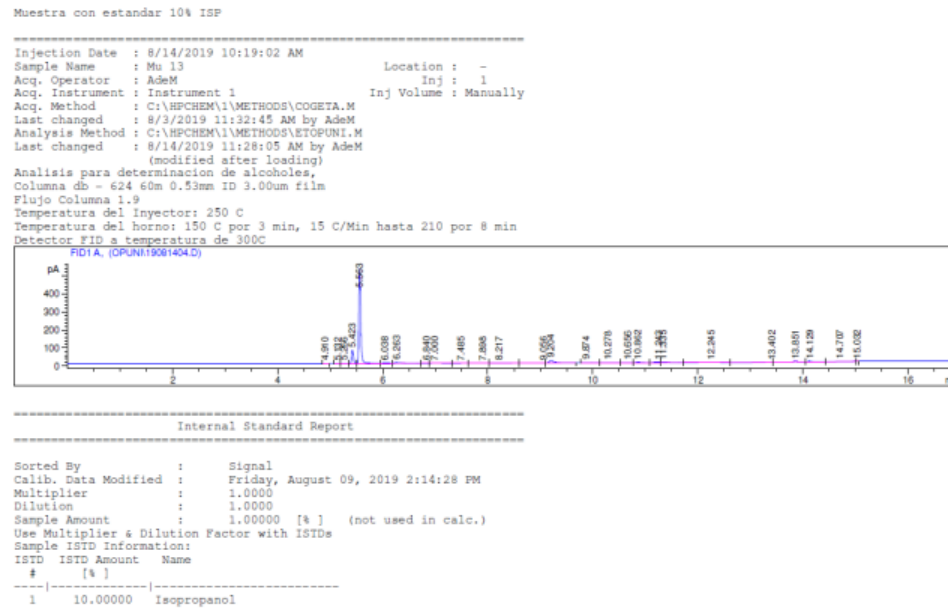


Figura 213. Muestra 14 para análisis de alcoholes

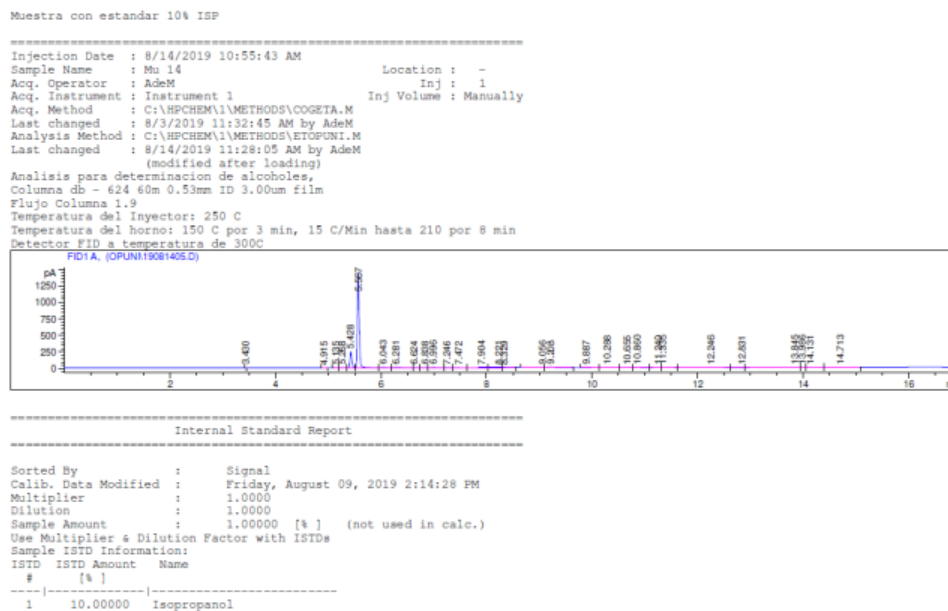


Figura 214. Muestra 15 para análisis de alcoholes

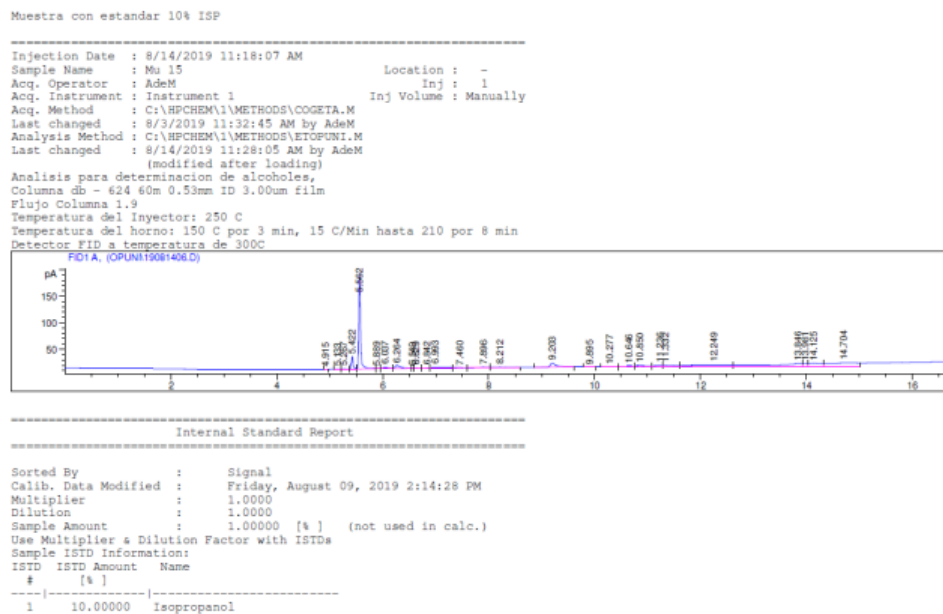


Figura 215. Muestra 16 para análisis de alcoholes

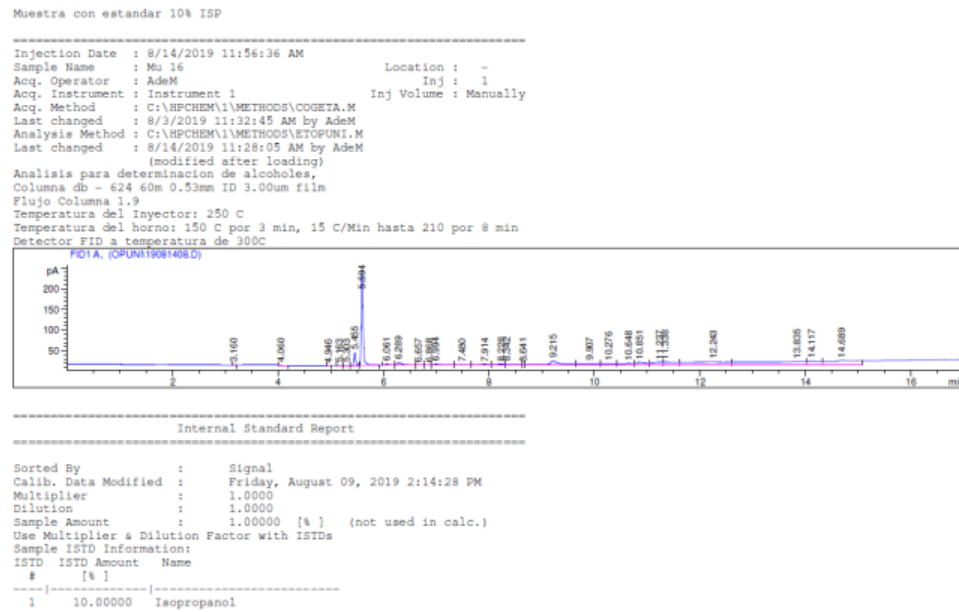


Figura 216. Muestra 17 para análisis de alcoholes

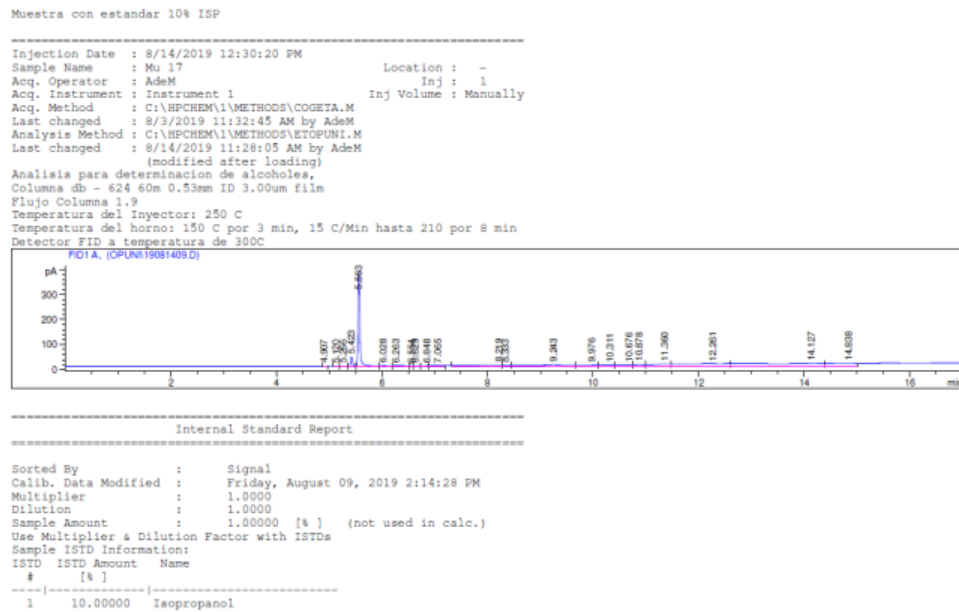


Figura 217. Muestra 18 para análisis de alcoholes

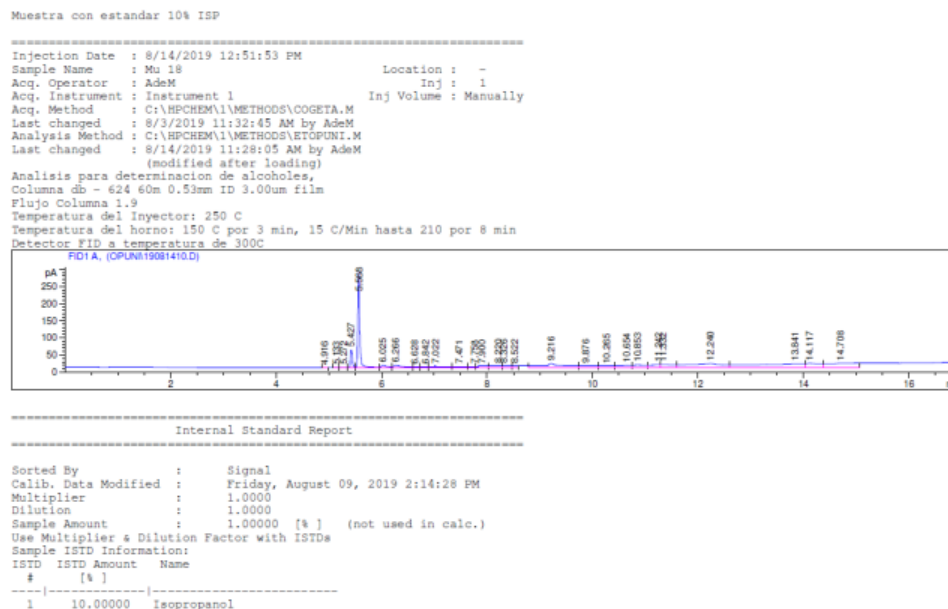


Figura 218. Muestra 19 para análisis de alcoholes

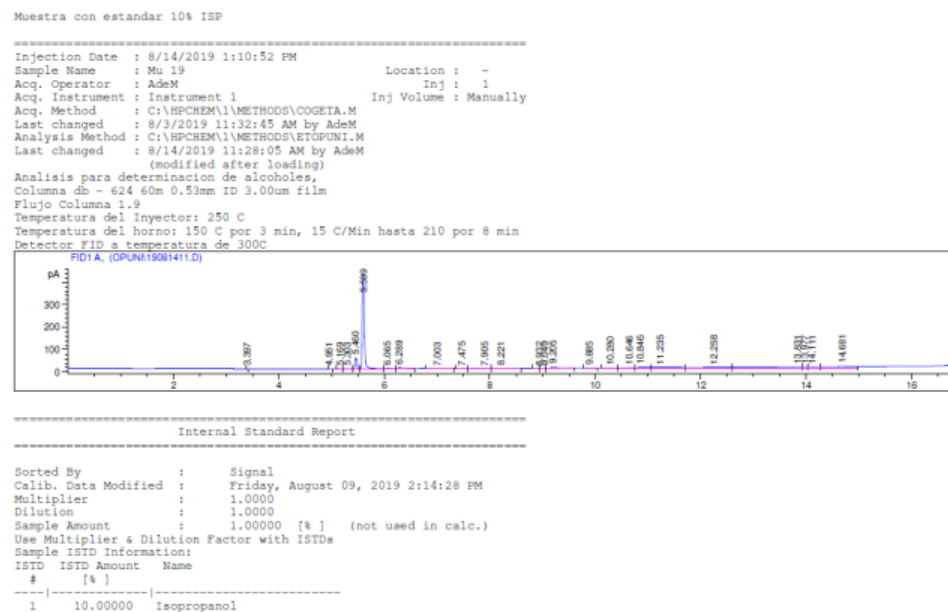


Figura 219. Muestra 20 para análisis de alcoholes

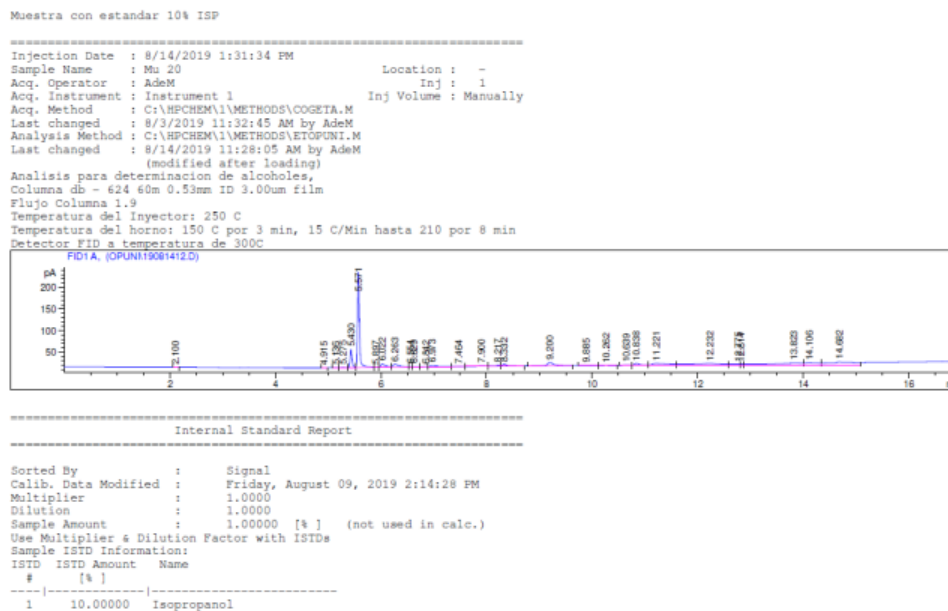


Figura 221. Muestra 2 para análisis de azúcares

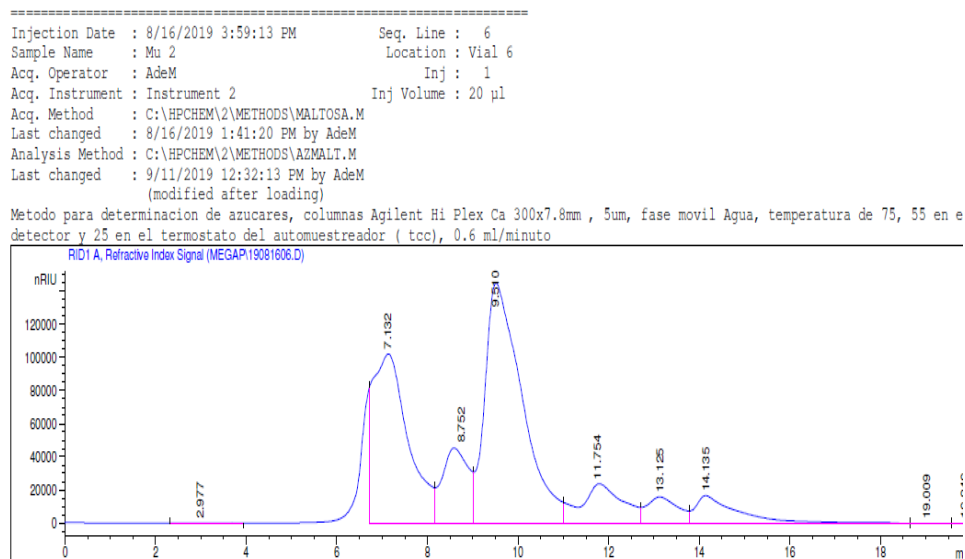


Figura 222. Muestra 3 para análisis de azúcares

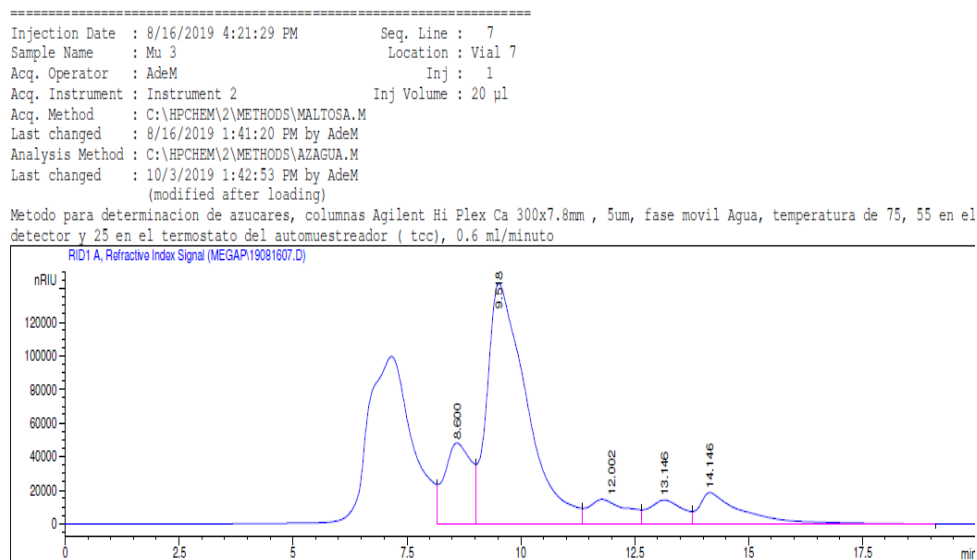


Figura 223. Muestra 4 para análisis de azúcares

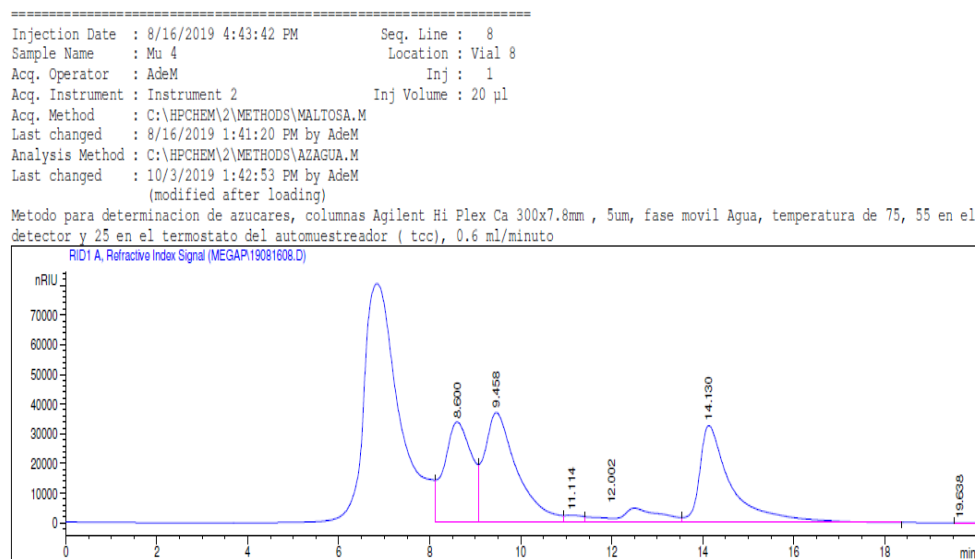


Figura 224. Muestra 5 para análisis de azúcares

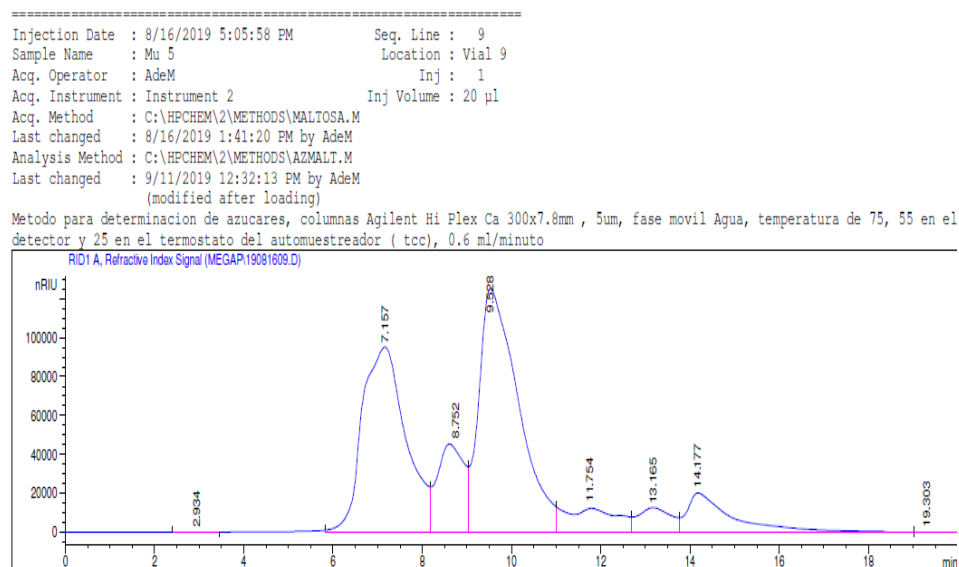


Figura 225. Muestra 6 para análisis de azúcares

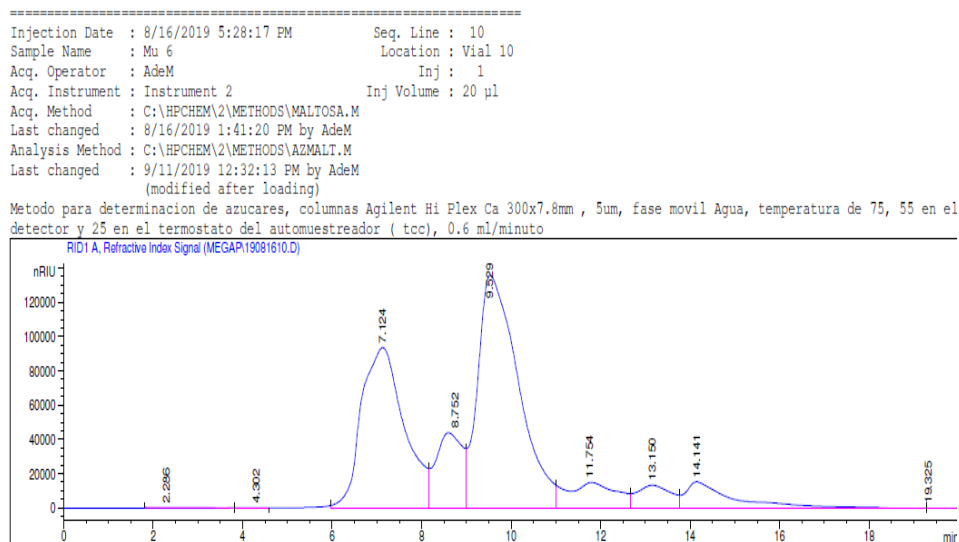


Figura 226. Muestra 7 para análisis de azúcares

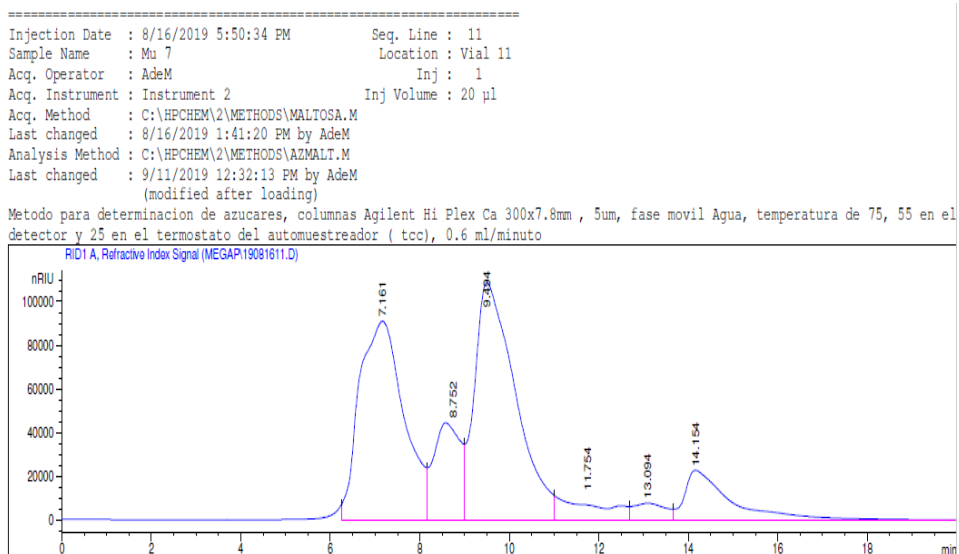


Figura 227. Muestra 8 para análisis de azúcares

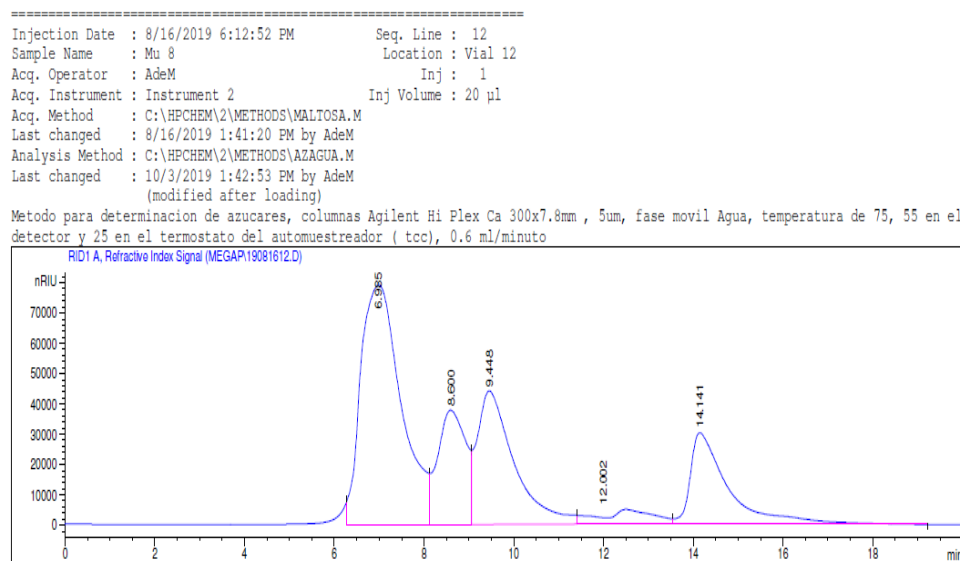


Figura 228. Muestra 9 para análisis de azúcares

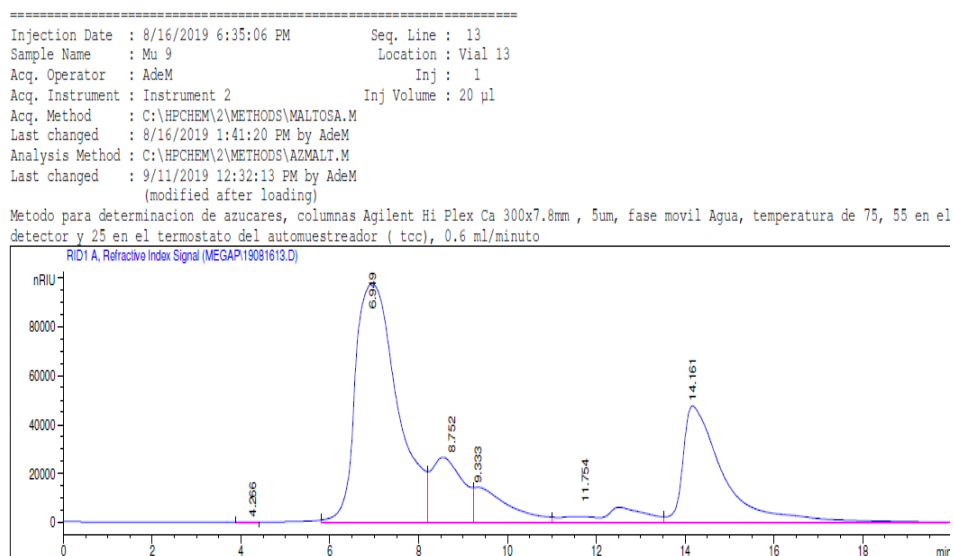


Figura 229. Muestra 10 para análisis de azúcares

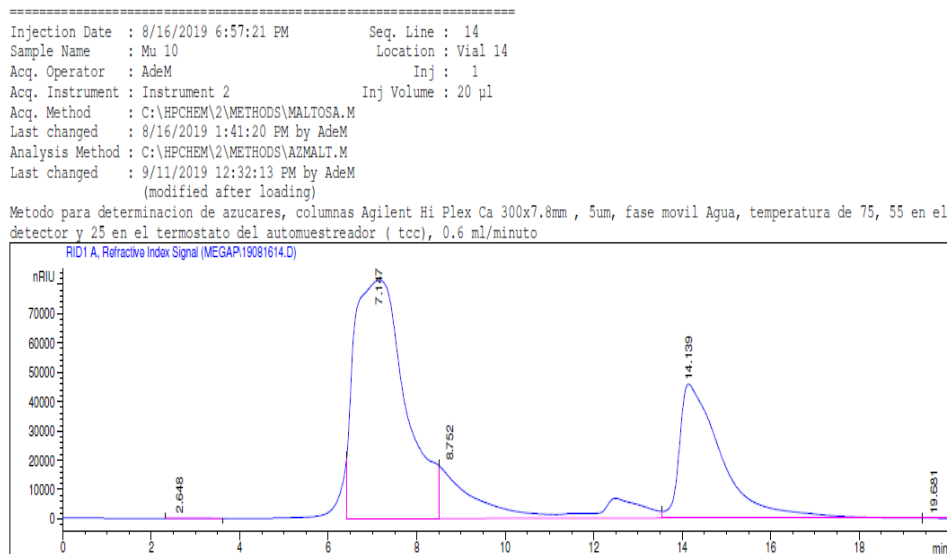


Figura 230. Muestra 11 para análisis de azúcares

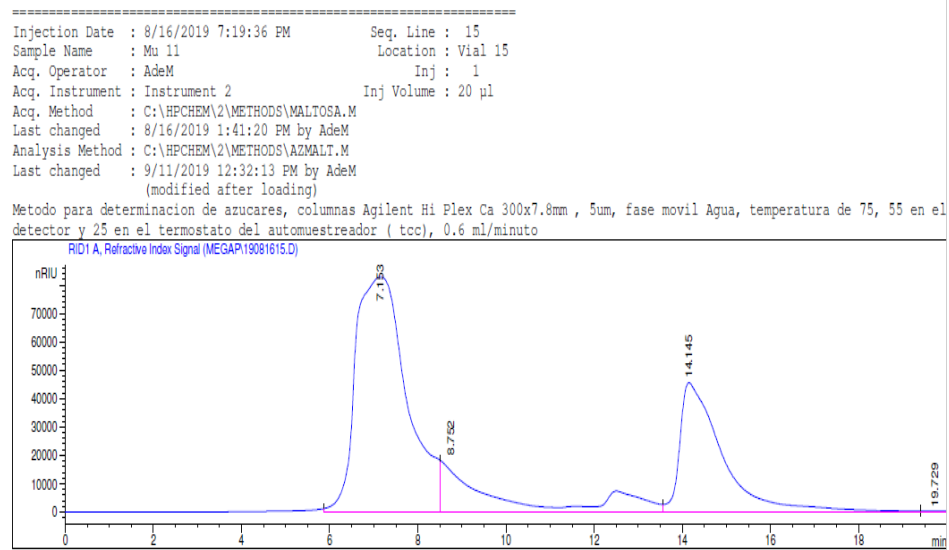


Figura 231. Muestra 12 para análisis de azúcares

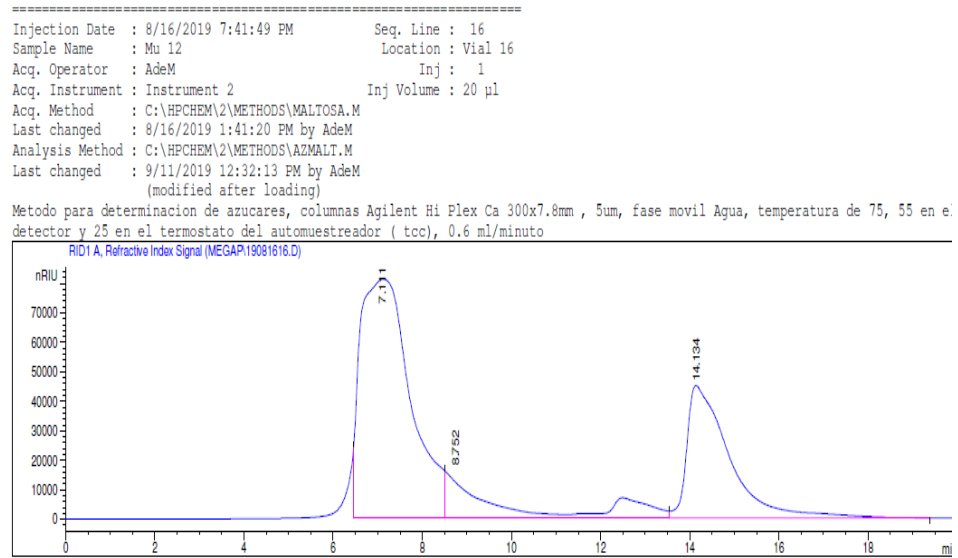


Figura 232. Muestra 13 para análisis de azúcares

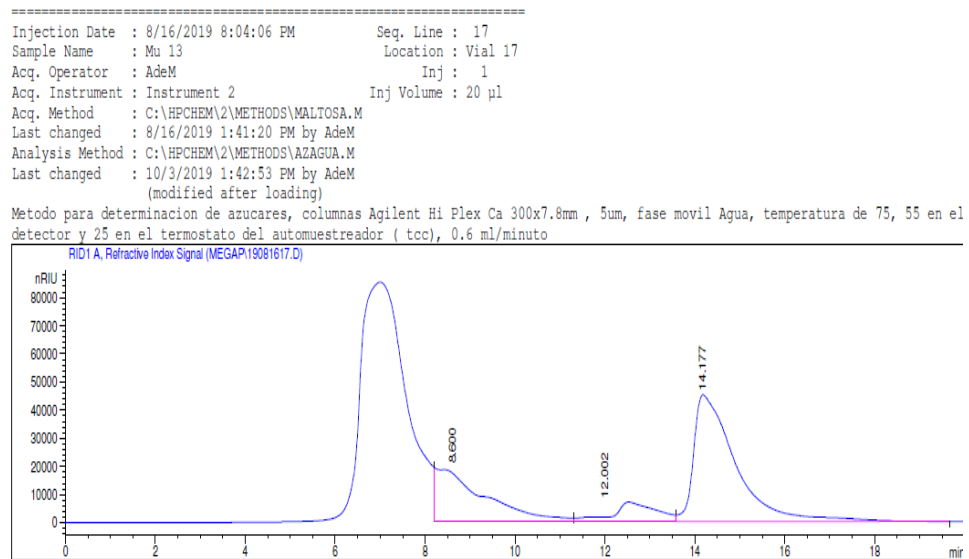


Figura 233. Muestra 14 para análisis de azúcares

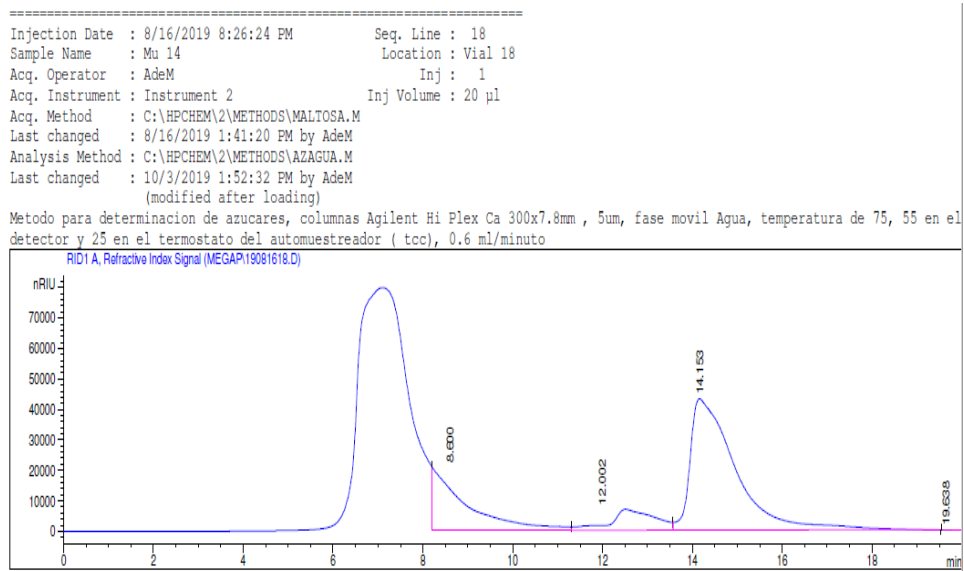


Figura 234. Muestra 15 para análisis de azúcares

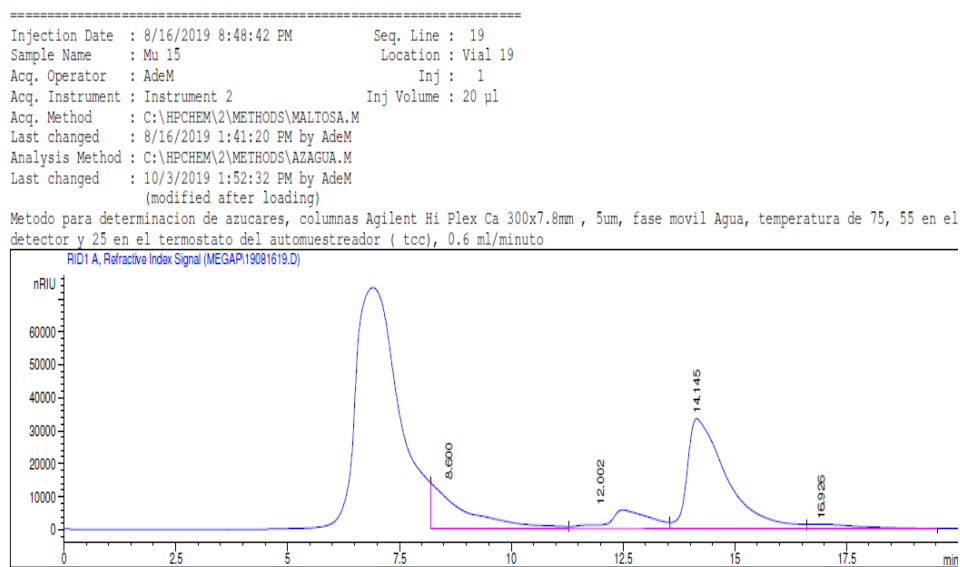


Figura 235. Muestra 16 para análisis de azúcares

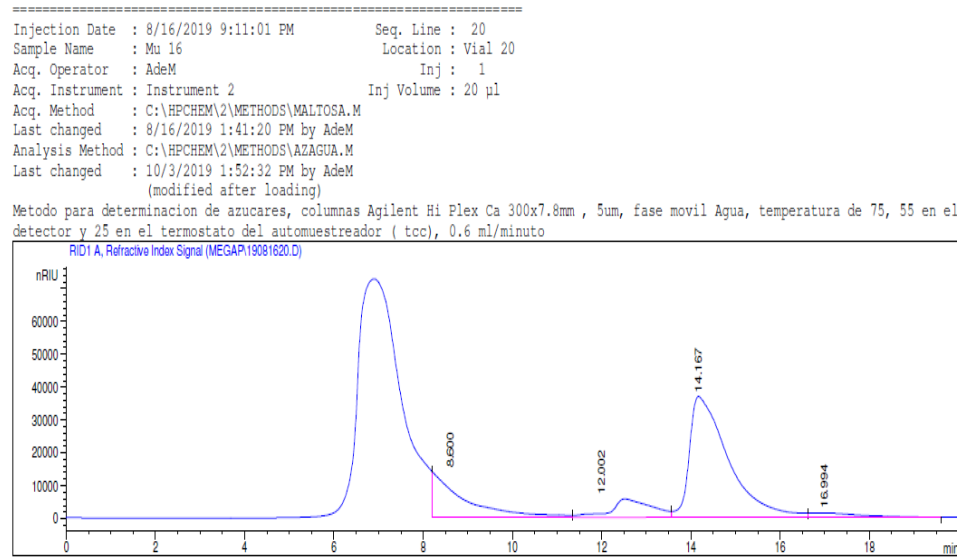


Figura 236. Muestra 17 para análisis de azúcares

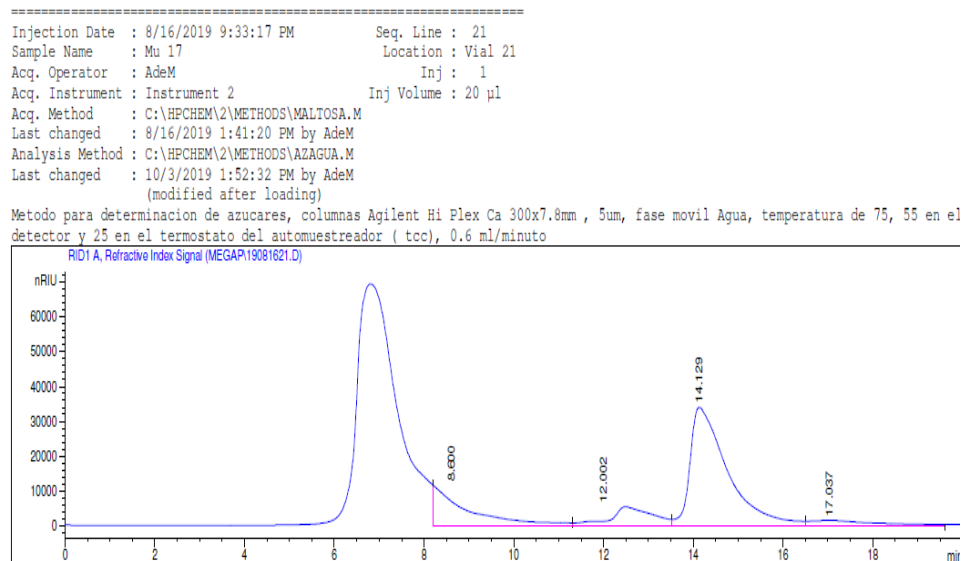


Figura 237. Muestra 18 para análisis de azúcares

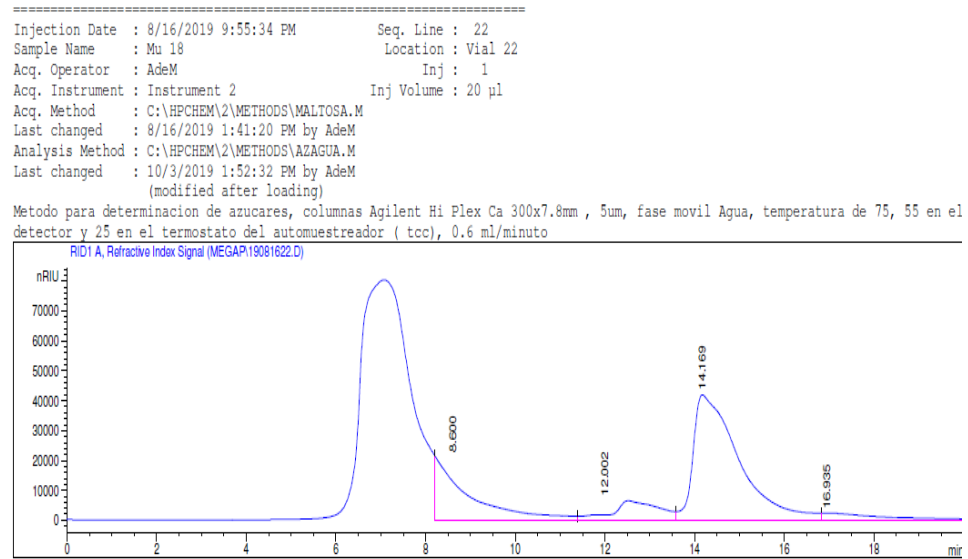


Figura 238. Muestra 19 para análisis de azúcares

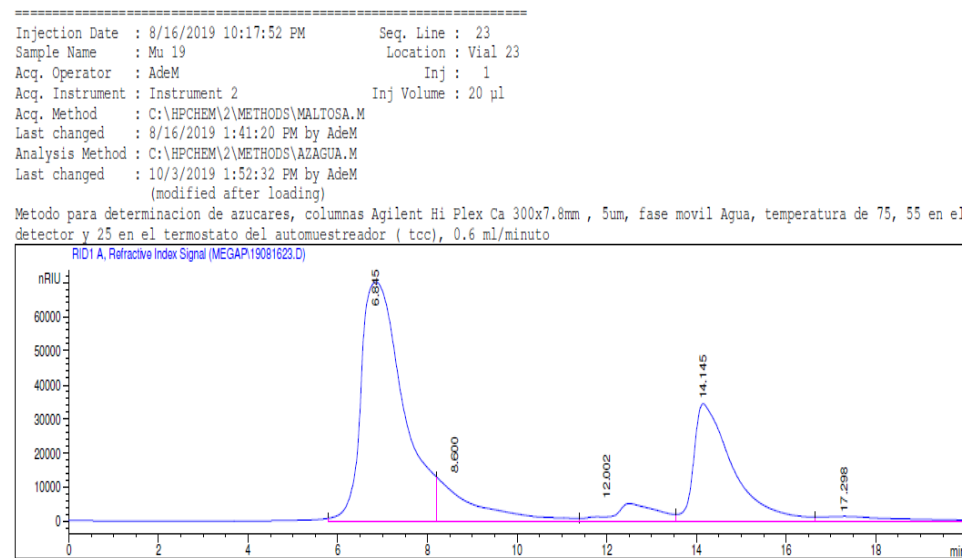


Figura 239. Muestra 20 para análisis de azúcares

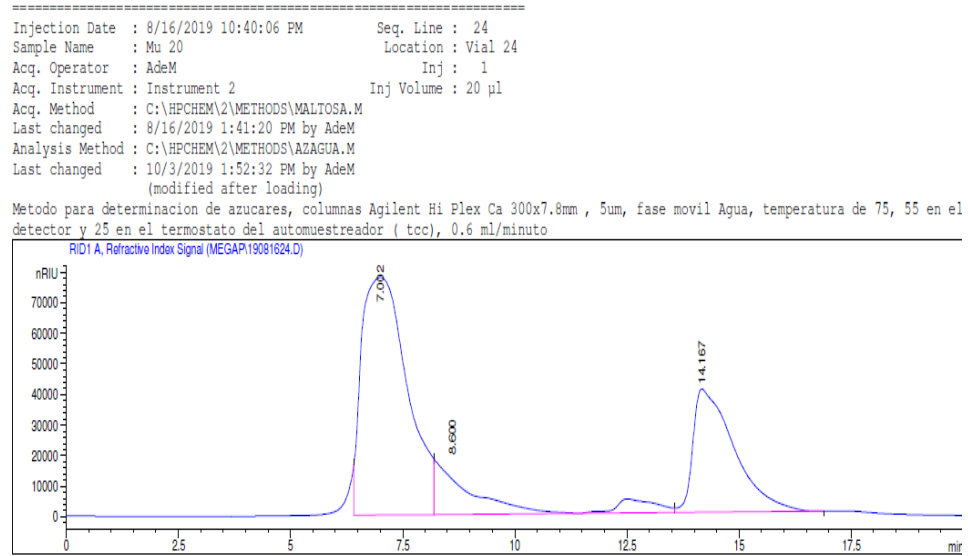


Figura 240. Prueba de identificación de presencia de almidón en cromatograma

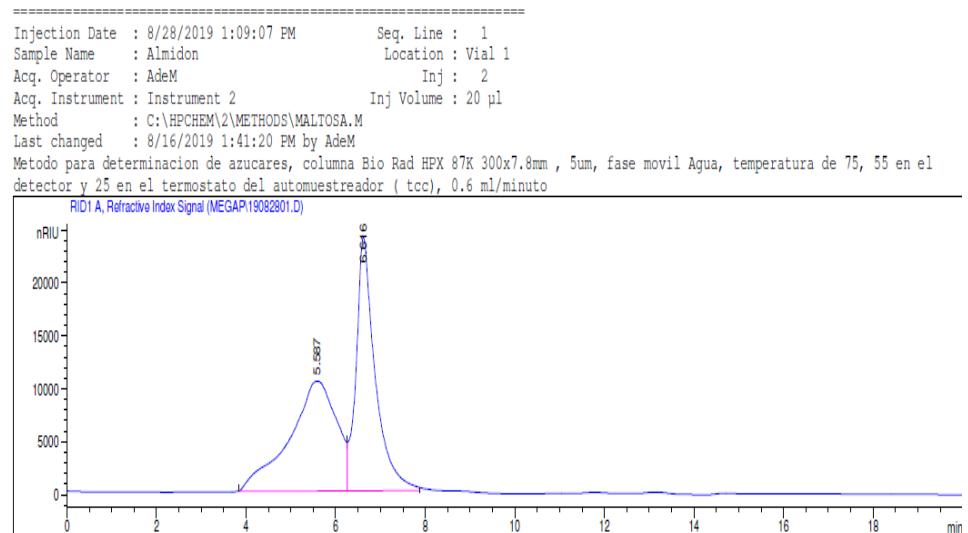
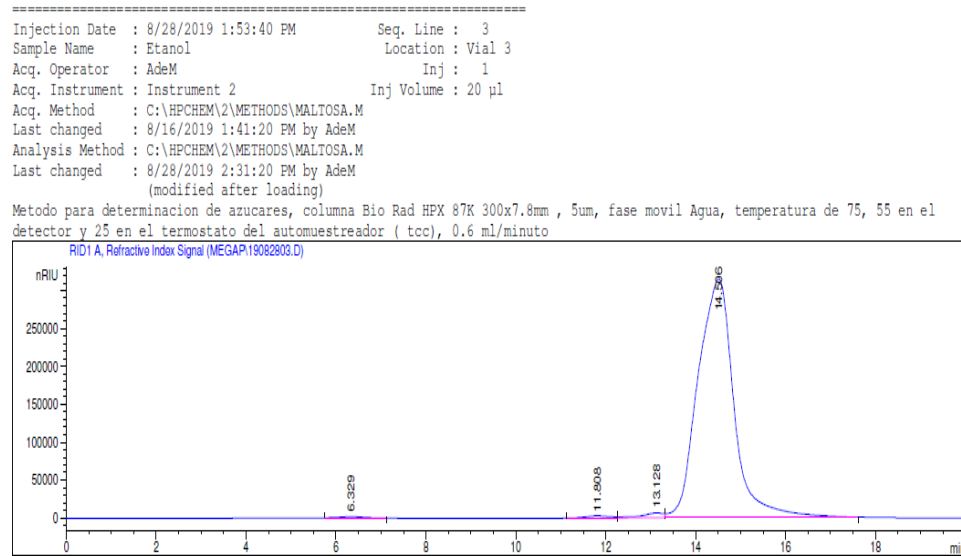
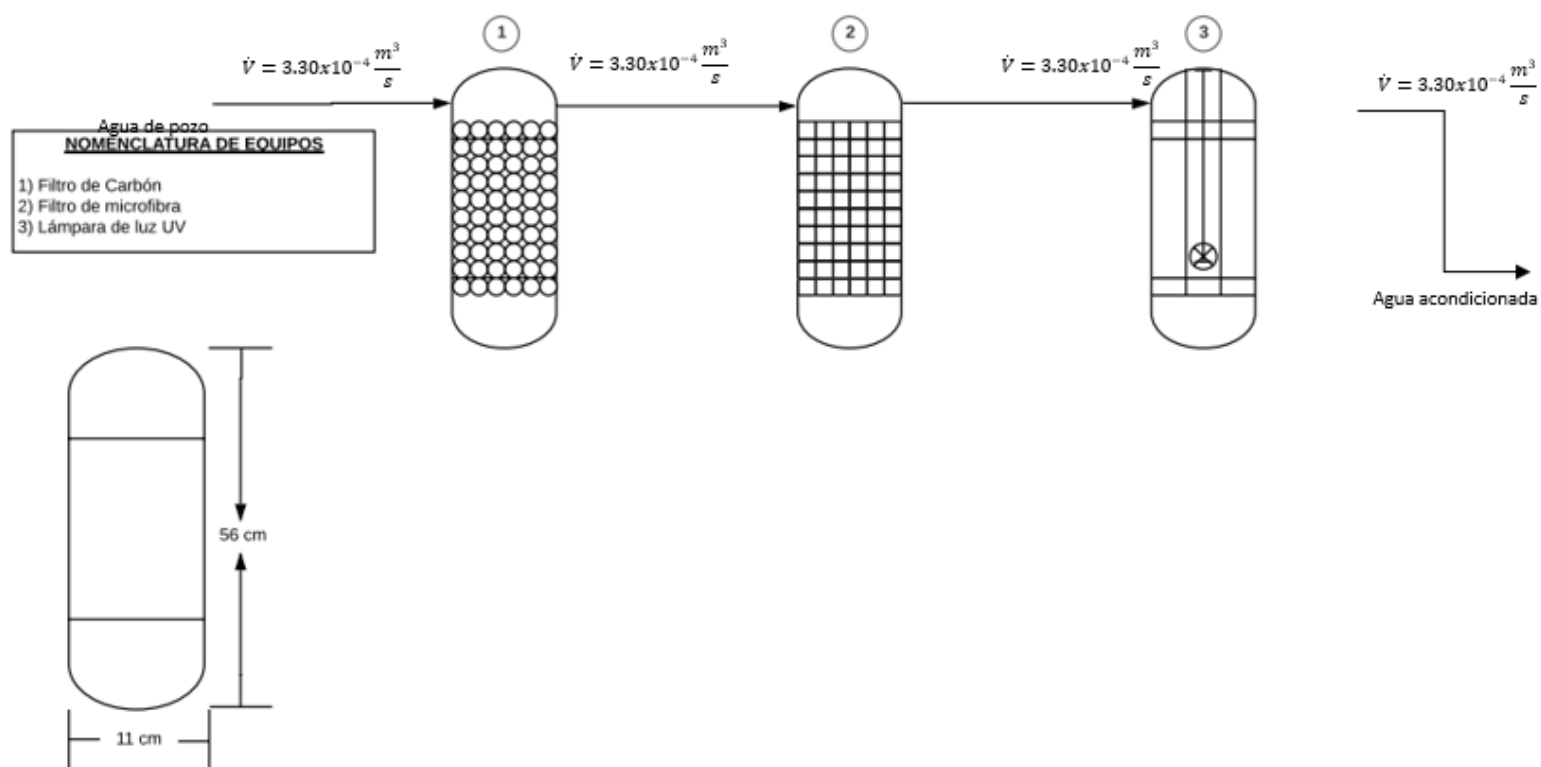


Figura 241. Prueba de identificación de presencia de alcohol en cromatograma



7. Esquemas de procesos.

Figura 242: Sistema existente de acondicionamiento de agua presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.



Este diagrama de flujo ilustra el proceso de tratamiento de agua de pozo para la planta de producción de agua potable. El agua de pozo (L1) entra por la izquierda y pasa por una serie de válvulas (V1, V2) y líneas (L2, L3, L4, L5, L6). Se divide en tres flujos principales: uno que pasa por un tanque de retrolavado (L9) y otro que pasa por un tanque de retrolavado (L10). Ambos flujos se combinan y pasan por un tanque de retrolavado (L11). El agua luego fluye a través de una línea (L12) y una válvula (V7) hacia un tanque de almacenamiento (L13). Desde allí, el agua pasa por una válvula (V8) y una línea (L14) hacia un tanque de almacenamiento (L15). El agua luego fluye a través de una válvula (V9) y una línea (L16) hacia un tanque de almacenamiento (L17). El agua finalmente fluye a través de una válvula (V10) y una línea (L18) hacia una bomba (L19). La bomba envía el agua a través de una válvula (V11) y una línea (L20) hacia la planta de producción de agua potable (L21). El diagrama también muestra flujos de retrolavado (Agua de retrolavado) y agua acondicionada (recirculación) que devuelven el agua al sistema.

1. Los equinos no están a escala.

2. La descripción de cada línea de flujo, equipo y accesorio se encuentra en la siguiente página.

Línea	Tipo	Material	Diámetro	Flujo
L1	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L2	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L3	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L4	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L5	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L6	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$5.10 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (8.10 gal/min)
L7	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L8	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L9	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L10	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L11	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L12	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L13	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)

L14	Tubería	SS 304	0.019 m (¾ in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L15	Tubería	SS 304	0.019 m (¾ in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L16	Tubería	SS 304	0.019 m (¾ in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L17	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L18	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L19	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L20	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L21	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L22	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L23	Tubería	SS 304	0.025 m (1.00 in)	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.40 gal//min)
L24	Tubbing	PTFE	0.009 m (3/8 in)	$7.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{día}$ (1.85×10^{-3} gal/día)
L25	Tubbing	PTFE	0.009 m (3/8 in)	$7.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{día}$ (1.85×10^{-3} gal/día)

J. Balances de masa y energía

Figura 244: Balance de masa del sistema de acondicionamiento de agua presente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

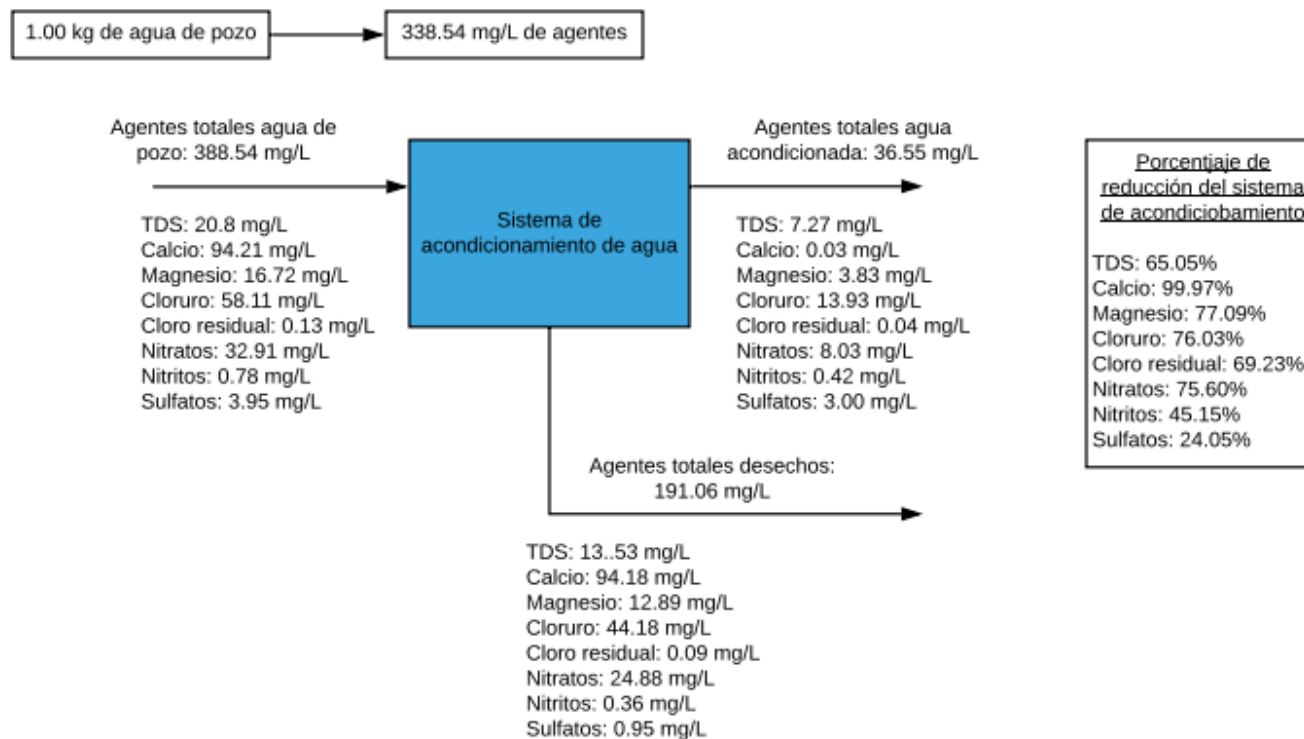
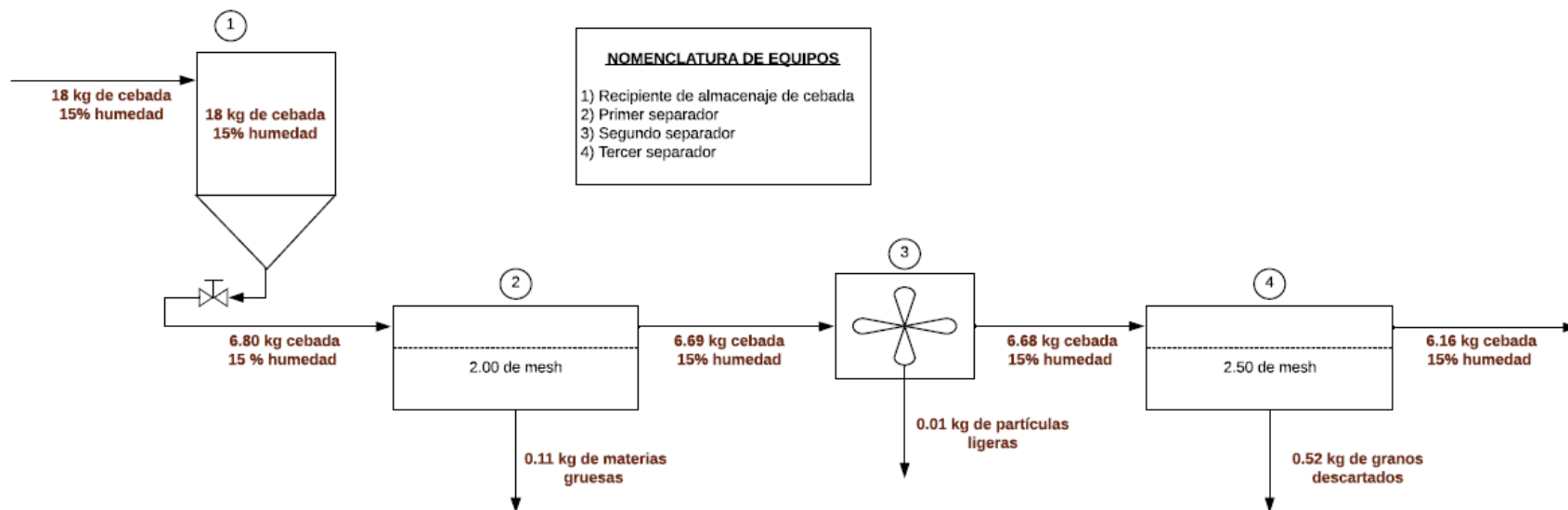


Figura 245: Balance de masa del proceso de tratamientos previos.



Nota:

1. El recipiente de almacenaje tiene una capacidad máxima de 18 kg de cebada.
2. La base tomada es para 6.80 kg de cebada.

Figura 246: Balance de masa del proceso de remojo.

<u>Características del agua acondicionada</u>
Temperatura: 24.3°C
Densidad: 997 kg/m ³
pH: 7.0
Dureza total: 3.59 mg/L
Conductividad: 650 us/cm
Calcio: 0.05 mg/L
Magnesio: 3.54 mg/L
Cloruro: 14.9 mg/L
Sulfatos: 3.0 mg/L

NOMENCLATURA DE EQUIPOS

1) Tanque de remojo de cebada

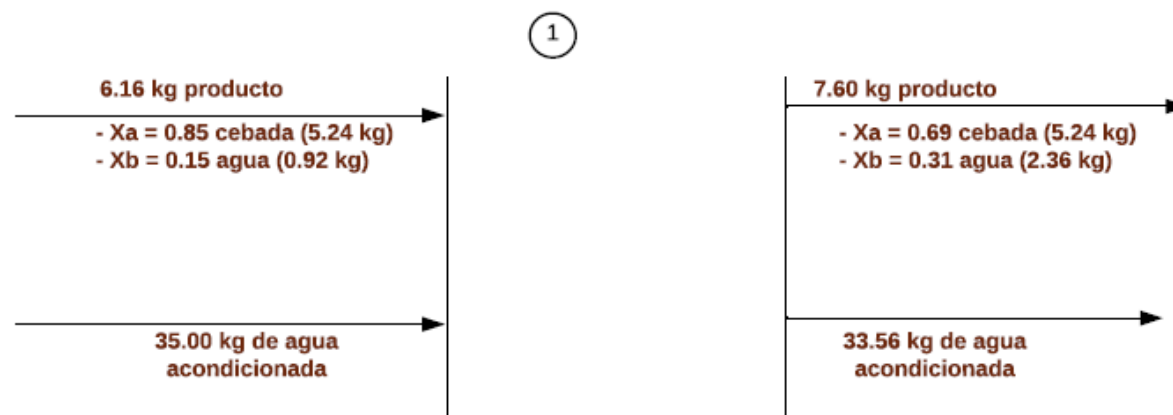
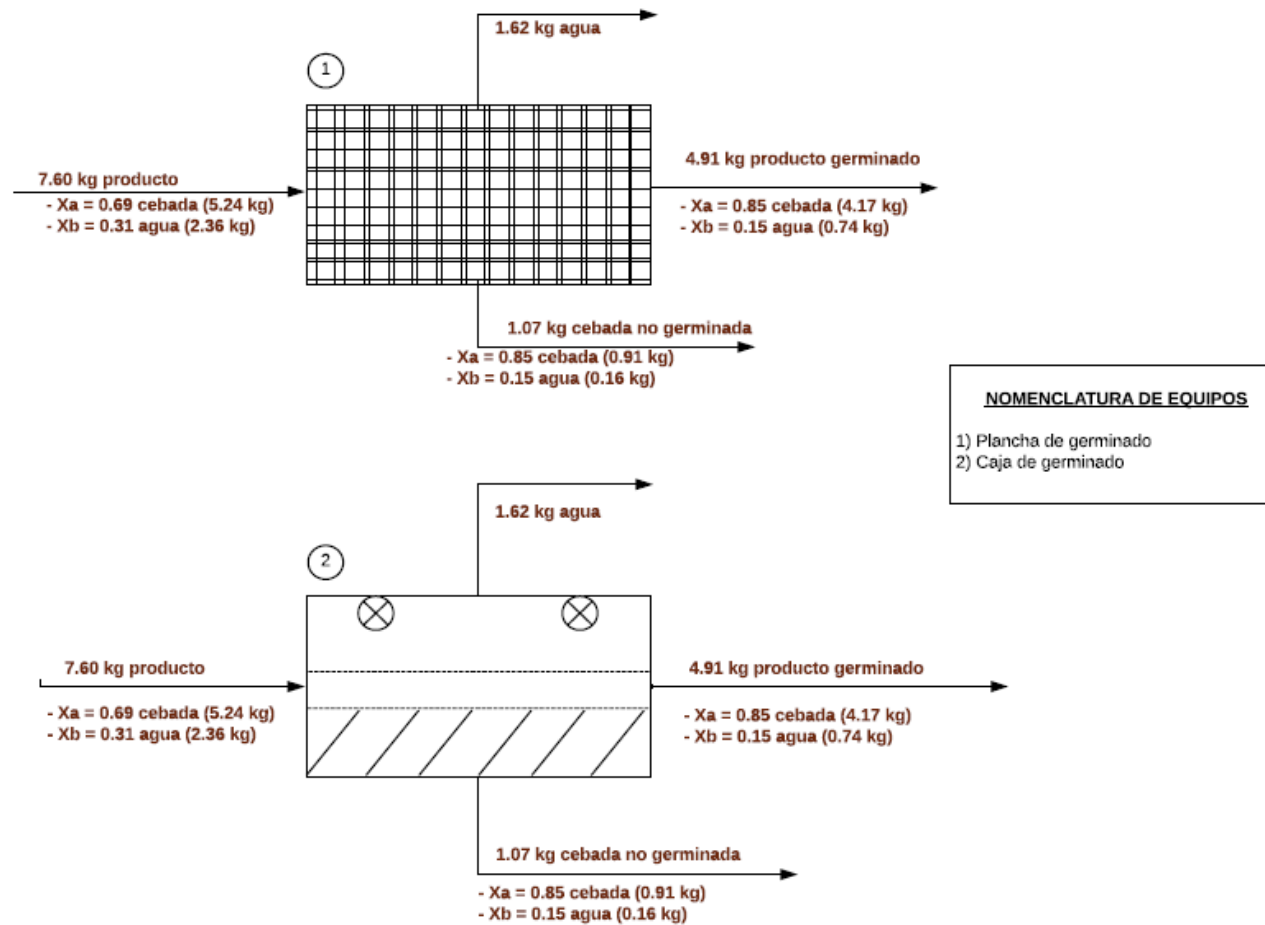


Figura 247: Balance de masa del proceso de germinado.



8. Resultados de análisis microbiológicos

Figura 248. Resultados de muestra de lote 2 con control negativo por método de Petrifilm™ 3M EC

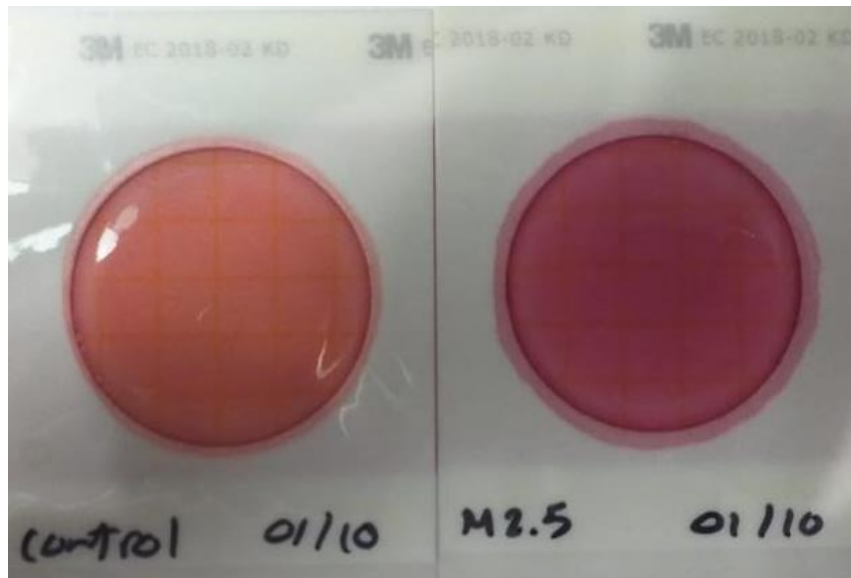


Figura 249. Repetición de resultados de muestras de lotes 1 y 2 con controles positivos y negativos por método de Petrifilm™ 3M EC



Figura 250. Resultados de burbujas observadas en control negativo de agua destilada estéril y de la dilución 1/100 de la muestra obtenida del lote 1 en Petrifilm™ 3M EC

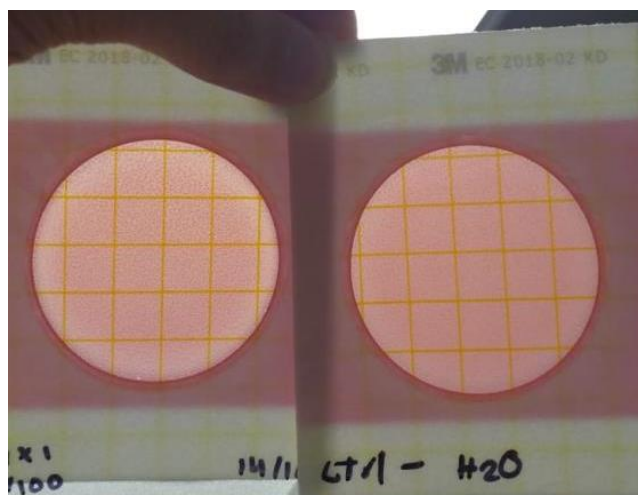


Figura 251. Resultado positivo obtenido en dilución 1/10 de muestra del tercer lote comparada con controles.

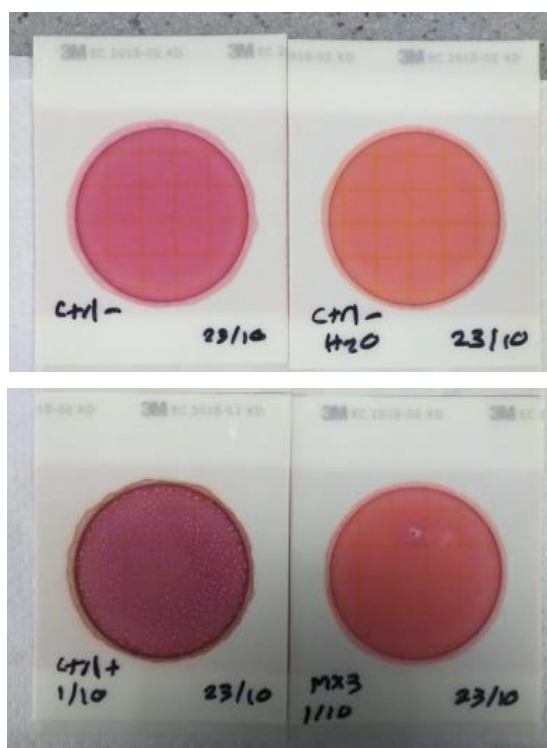


Figura 252. Resultados de controles obtenidos utilizando Colitag™ (*E. coli*, *Klebsiella*, Control Negativo)



Figura 253. Colonias observadas en placas sembradas con muestras del lote 2 y 3 en agar EMB

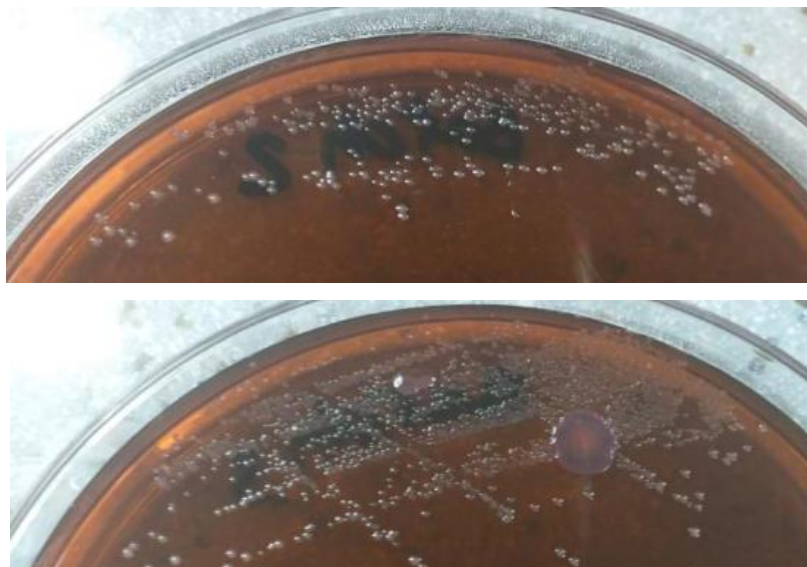


Figura 254. Hongos observados en filtros 0.45µm sembrados en agar EMB



Figura 255. Tinción Gram realizada a colonias aisladas de agar EMB

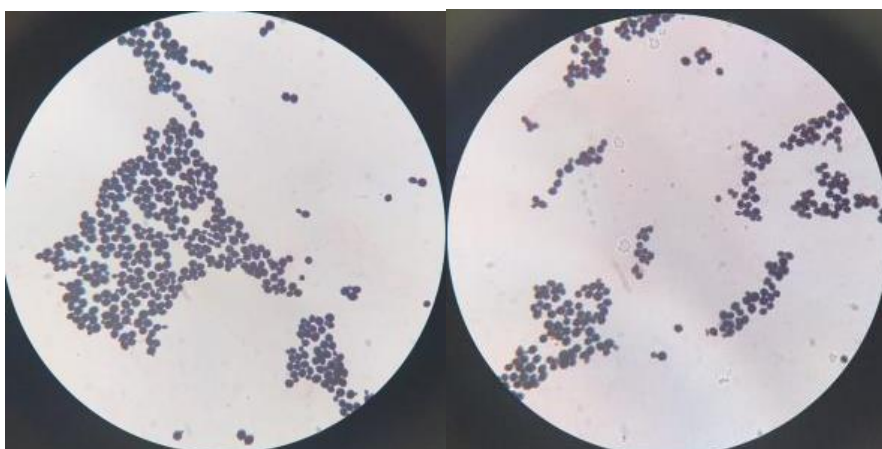


Figura 256. Tinción con Azul de metileno a muestra de levaduras de lote 3 al iniciar fermentación

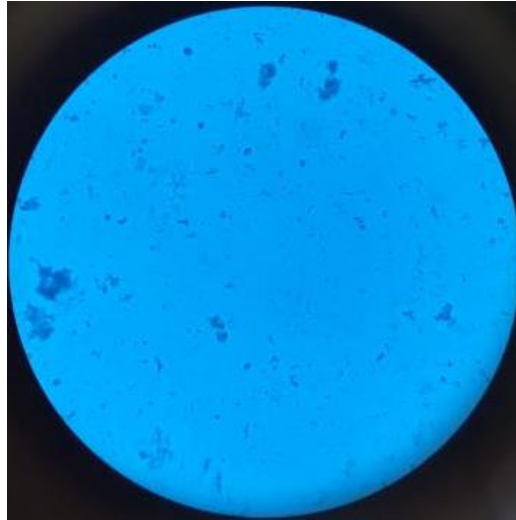
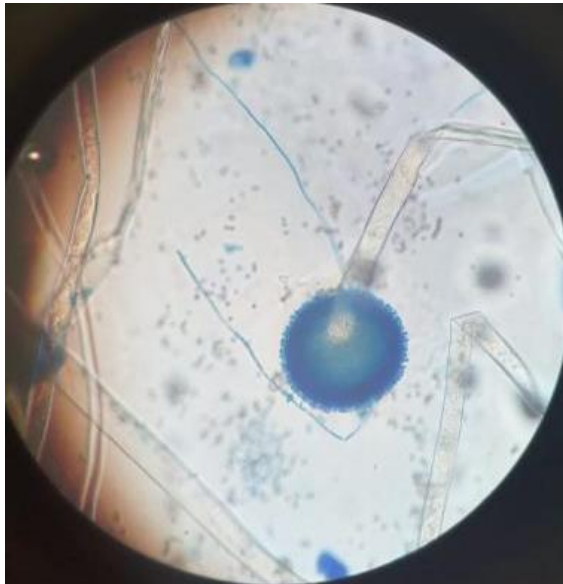


Figura 257. Tinción con azul de lactofenol a hongo presente en filtros sembrados en Agar EMB



9. Equipos propuestos

Figura 258. Sensor de temperatura para el fermentador disponible



Figura 259. Sensor de pH para fermentador disponible



Figura 260. Controlador digital para sensor de pH para fermentador disponible



Figura 261. Sistema de agitación mecánica propuesto para el fermentador disponible

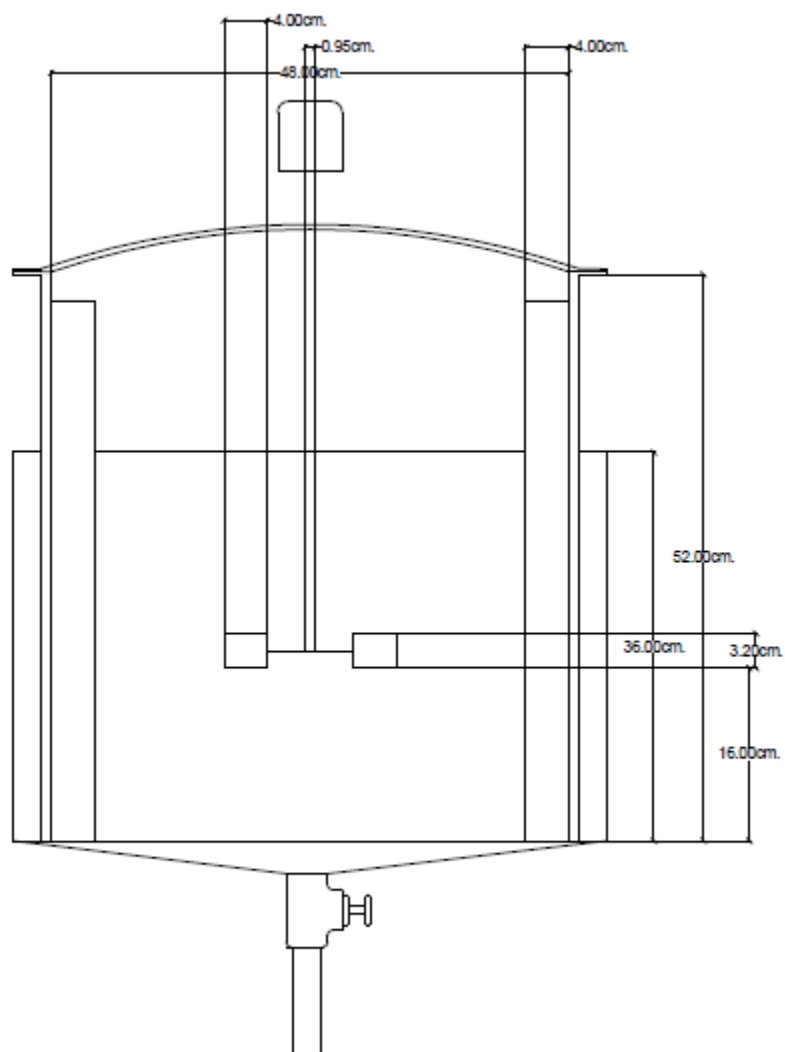


Figura 262. Tipo de impulsor para el agitador mecánico

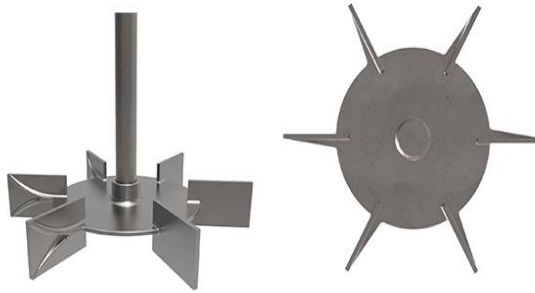


Figura 263. Motorreductor seleccionado



Figura 264. Válvula de alivio de presión para el fermentador disponible



Figura 265. Válvula de retención de acero inoxidable soldable



Figura 266. Sistema de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias



Figura 267. Bomba centrífuga conectada al sistema de enfriamiento



*En la Figura anterior se observa la bomba instalada en el sistema de enfriamiento para la conducción de agua fría hacia la chaqueta del fermentador disponible.

Figura 268. Turbidímetro marca Hanna modelo HI 98703



Figura 269. Filtro de cartuchos suspendido en estructura para filtración



Figura 270. Viscosímetro marca Ez Zahn de copa 5



Figura 271. Bomba centrífuga de 0.45 kW instalada para bombeo de cerveza marca Aquastrong



Figura 272. Bomba aurora analizada para bombeo de cerveza



Figura 273. Centrífuga continua utilizada para análisis



Figura 274. Centrífuga por lotes utilizada para análisis



Figura 275. Tamizadora marca W.S. Tyler modelo RX-29



Figura 276. Tacómetro marca Extech modelo 461920



Figura 277. Molino de rodillos utilizado con separación de 2 mm a 30.8 rpm



XIII. GLOSARIO

Acróspire: El comienzo del brote. Señal de germinación en un grano de cebada.

Adsorción: Es el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase (González, 2017).

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

Agua potable: Es aquella que, por sus características organolépticas, físicas, químicas y bacteriológicas, no representa un riesgo para la salud del consumidor y cumple con lo establecido en la norma COGUANOR NGO 29001 (COGURANOR NGO, 2013).

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

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

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).

Cinética de reacción: Es el estudio empírico y experimental de las velocidades de las reacciones químicas y el cambio de la rapidez de reacción bajo condiciones variables y los eventos moleculares que se efectúan durante la reacción.

Coeficiente convectivo de transferencia de calor: Es un parámetro que se determina experimentalmente y cuyos valores dependen de todas las variables que influyen en la convección como: la geometría del sistema, las características del flujo el fluido y la temperatura.

Coliformes Fecales: Bacterias que forman parte del grupo coliforme total. (COGURANOR NGO, 2013).

Coliformes Totales: Pertenecen a la familia Enterobacteriaceae y se caracterizan por su capacidad para fermentar la lactosa con producción de ácido y gas, más o menos rápidamente, en un periodo

de 48 horas y con una temperatura de incubación comprendida entre 30-37°C (COGURANOR NGO, 2013).

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.

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.

Dextrinas: Grupo de carbohidratos de bajo peso molecular formados por la hidrólisis de almidón o glucógeno.

Ecuación de Monod: Es un modelo matemático para el crecimiento de microorganismos que relaciona las tasas de crecimiento microbiano en un ambiente acuoso con la concentración de sustrato limitante.

E. Coli: Bacterias coliformes fecales que producen indol a partir de triptófano (Camilo et. Al, 2016).

Filtración: 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 (Gonzáles, 2017).

Germinado: El desarrolló des acrospire o embrión del grano de cebada hasta que se convierte en planta (Olmedo, 1965).

Glucólisis: Es un proceso que forma parte de la respiración celular y se define como una serie de reacciones que constituyen la primera fase de la mayoría del catabolismo de los carbohidratos. En la glucólisis, se rompe la glucosa y se forma piruvato con dos moléculas de ATP.

Golpe de fuego: Aumento de temperatura en un programa de tostado.

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

IBU: Grados internacionales de amargor en la cerveza

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 IBU equivale a un miligramo de iso-alpha ácidos por litro de cerveza (Russell, 2009).

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

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.

Límite Máximo Aceptable (LMA): Es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual estas características son percibidas por los consumidores desde el punto de vista sensorial, pero sin que implique un daño a la salud del consumidor (COGURANOR NGO, 2013).

Límite Máximo Permisible (LMP): Es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano (COGURANOR NGO, 2013).

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).

Luminiscencia: Propiedad que tienen ciertos cuerpos de emitir luz tras haber absorbido energía de otra radiación (principalmente ultravioleta) sin elevar su temperatura (González, 2017).

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.

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

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

Malta base: Malta que ha sido secada a temperaturas bajas (35°C-60°C) y conserva gran cantidad de enzimas por dentro.

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.

Malta verde: Cebada que sale del proceso de germinado (Olmedo, 1965).

Malteado: Proceso de remojar un grano, germinarlo (por cierta cantidad de días) y secarlo.

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

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).

Número de Grashof: Es un número adimensional proporcional al cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido.

Número de Nusselt: Es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido pasa, es decir, por convección; comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera únicamente por conducción.

Número de Prandtl: Es un número adimensional que expresa el cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad entre la capa límite viscosa y la capa límite térmica.

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.

Número Más Probable (LMP): Es una forma de obtener datos cuantitativos en concentraciones de elementos discretos a partir de datos de incidencia positiva/negativa. Es una estrategia eficiente para estimar densidades de población que se emplea cuando una evaluación cuantitativa de elementos individuales no es factible (COGURANOR NGO, 2013).

Piruvato: Es el anión del ácido pirúvico y en la respiración anaeróbica, se utiliza como punto de partida en la fermentación para producir etanol con la acción de la enzima alcohol deshidrogenasa.

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 Formadora de Colonias (UFM): Este se puede describir como un valor que indica el grado de contaminación microbiológica de un ambiente. Expresa el número relativo de microorganismos de un taxón determinado en un volumen de un metro cúbico de agua (Hammond, 1999).

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

Velocidad de crecimiento celular: Se define como el crecimiento de concentración de células con el tiempo con relación a la masa a lo largo de la reacción.