



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

ESTANDARIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE CERVEZAS EN  
PLANTA PILOTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA  
E INGENIERO CIVIL QUÍMICO

CARLOS ALBERTO RAMÍREZ RIQUELME

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ CRISTIAN SALGADO HERRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FERNANDO REYES BADILLA  
ZIOMARA GERDTZEN HAKIM

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Maltexco S.A.

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA  
E INGENIERO CIVIL QUÍMICO  
POR: CARLOS ALBERTO RAMÍREZ RIQUELME  
FECHA: SEPTIEMBRE DE 2016  
PROF. GUÍA: J. CRISTIAN SALGADO HERRERA

## ESTANDARIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE CERVEZAS EN PLANTA PILOTO

La cerveza es una bebida alcohólica elaborada principalmente a partir de malta, lúpulo, levadura y agua. El aumento del mercado cervecero, el que alcanzó una producción anual de 1960 millones de hectolitros el año 2014, ha llevado a Maltexco, empresa productora de malta de cebada y derivados, a un plan de diversificación de productos. Este plan considera, entre otras cosas, la construcción y puesta en marcha de una planta piloto para la elaboración de cervezas. El objetivo principal de este trabajo de memoria es la definición y estandarización de un proceso de elaboración de cervezas *lager* y *ale*, utilizando las maltas base y especiales que elabora la empresa, además de los equipos presentes en la planta piloto.

El diseño del proceso cervecero se estableció a partir del análisis de los resultados obtenidos en la elaboración de 4 lotes distintos de cerveza, cada uno compuesto por 4 batches. Paralelamente, se definieron y aplicaron los análisis requeridos para la evaluación de las cervezas, los que incluyen la determinación del grado alcohólico, color, turbidez, entre otros parámetros.

Durante la elaboración de los lotes de cerveza, se presentaron inconvenientes que impidieron una correcta fabricación, dentro de los cuales se mencionan la incapacidad del sistema de refrigeración para disminuir la temperatura de los fermentadores, la contaminación de batches y la baja gasificación del producto. Estos inconvenientes fueron analizados, determinando sus posibles causas, para así proponer mejoras tanto en las condiciones de operación de los equipos, como cambios en el diseño e interconexión de éstos.

Para evaluar la estandarización de los productos se construyeron cartas de control. Se observó que algunos parámetros presentaron control estadístico, mientras que otros mostraron un cambio de nivel al aplicar mejoras entre los distintos lotes de cerveza. Sin embargo, parámetros como la turbidez, pH, estabilidad de espuma, entre otros, no presentaron control estadístico, lo que se debe en parte a los problemas mencionados anteriormente.

Los resultados obtenidos durante el trabajo en Maltexco permitieron la definición de un procedimiento de elaboración de cervezas con una graduación alcohólica entre 4,6 % y 4,8 %, el cual considera: una etapa de maceración escalonada a temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C y 78°C, filtración sin lavado de bagazo, cocción por 60 minutos a 100°C, fermentación a 12°C para *lagers* y 22°C para *ales*, ambas por 2 semanas, para terminar con una etapa de maduración a 0°C por 2 semanas.

El procedimiento presentado en esta memoria también podría ser aplicado al desarrollo de otros productos en la planta piloto, como por ejemplo, la fabricación de extractos, leches vegetales y colorantes de maltas especiales, debido a las similitudes entre sus procesos productivos.

*There's so much to dream about,  
there must be more to my life.*

Alexisonfire

# Agradecimientos

A mis padres, Belsy y José, por su apoyo y preocupación, por todos los sacrificios que han hecho para poder ser la persona que soy ahora. A mis hermanos, Vale y Nico, por todo su cariño, el que a veces no he sabido apreciar.

A “Los Ramírez”, por la gran familia que somos. En particular, agradezco a mis tíos Vero y Monón y su (enorme) familia, a mi tíos Angélica, Mao, Auri, Joel, Chila, Rodrigo y Carol, por su constante preocupación y ayuda. A mi tía Zoila, por parte de mi familia materna.

A mi comisión de titulación. Al profesor Cristian Salgado y su gran disponibilidad para resolver mis dudas y haberme comprendido en momentos complicados durante mi trabajo de memoria. A Fernando Reyes, por aceptarme para hacer este trabajo en Maltexco. A la profesora Ziomara Gerdtzen, por los comentarios y correcciones a mi memoria.

A la gente de Maltexco. A Camila Rodríguez y su apoyo durante mi estadía en la empresa. A Rodrigo Sánchez por ser uno de mis guías en mi trabajo de memoria. A Alejandro Saldías, por su ayuda y consejos en mis viajes a Temuco. A mis compañeros tesisistas: Pancho D., Tami y Yami, con quien compartíamos las alegrías, frustraciones típicas de la tesis. A la gente de los laboratorios de calidad de Talagante y Temuco: Señora Lily, Cristina, Nicole, Mónica, Don Peter, Don Carlos, Vero, Mauri y Cristofer, por su enorme disposición y carisma durante los momentos en que utilicé los laboratorios. A los operarios de la planta Temuco, y su ayuda cuando necesitaba una mano al trabajar en la planta piloto.

A mis amigos. A los que me han acompañado desde primer año: Caleb, Pablo y Pedro, donde las tardes de estudio se transformaron en una amistad que ha durado más de 7 años. A los que conocí al entrar a la especialidad: Carmen, Chino, Dumi, Pancho M., Max, Nacho, Patricio y Porno, por los momentos compartidos. A los que llegaron al final de esta travesía, los enfermos Carlos, Cristian, Fordo, Jose, Pancho D. y Richi, por las juntas para desconectarse del estrés universitario. A los que conocí fuera de la U: Álvaro, Fran, Kari, Gon y Sole, por las conversaciones, preocupación y amistad.

A la gente del DIQBT. A mis compañeros de generación y a los de mis generaciones postizas por la buena onda que existe. A los profesores y la formación que me entregaron. A los funcionarios, en especial a Gina y Celinda, y su ayuda indispensable en todos los asuntos académicos.

A todos aquellos que no he nombrado, debido a que mi memoria es muy frágil.

# Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vii
Índice de Ilustraciones	ix
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Maltexco S.A . . . . .	1
1.2. El mercado de las cervezas y malta . . . . .	1
1.3. Motivación . . . . .	2
1.4. Objetivos . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico y Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. La cerveza . . . . .	4
2.1.1. Características de las cervezas . . . . .	5
2.1.2. Tipos y estilos de cerveza . . . . .	7
2.2. La malta . . . . .	9
2.2.1. Composición química de la malta . . . . .	10
2.2.2. El proceso de malteo . . . . .	14
2.2.3. Maltas base y maltas especiales . . . . .	15
2.2.4. Adjuntos . . . . .	16
2.3. Proceso de elaboración de cervezas . . . . .	17
2.4. Planta Piloto de cervezas y extractos de Maltexco . . . . .	20
<b>3. Metodología</b>	<b>26</b>
3.1. Búsqueda bibliográfica . . . . .	27
3.2. Curso de elaboración de cerveza artesanal . . . . .	27
3.3. Montaje de los análisis fisicoquímicos . . . . .	27
3.4. Ensayos previos a la elaboración de los lotes de cervezas . . . . .	28
3.4.1. Elaboración de lote de prueba . . . . .	28
3.4.2. Tiempos de fermentación a escala laboratorio . . . . .	29
3.4.3. Pruebas y ensayos en equipos de la planta piloto . . . . .	30
3.5. Elaboración de los lotes de cerveza . . . . .	31
3.6. Análisis fisicoquímicos a las cervezas elaboradas . . . . .	34
3.7. Construcción de Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) . . . . .	35
3.8. Análisis estadístico preliminar . . . . .	35
3.9. Redacción de protocolo de elaboración de cervezas . . . . .	35
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>37</b>

4.1.	Montaje de los análisis fisicoquímicos . . . . .	37
4.1.1.	Validación de los análisis fisicoquímicos . . . . .	37
4.1.2.	Propuesta de análisis de turbidez, turbidez forzada y validación . . . . .	38
4.2.	Ensayos previos a la elaboración de los lotes de cerveza . . . . .	40
4.2.1.	Elaboración del lote de prueba . . . . .	40
4.2.2.	Tiempos de fermentación a escala laboratorio . . . . .	41
4.2.3.	Pruebas y ensayos en equipos de la planta piloto . . . . .	42
4.3.	Elaboración y análisis de los lotes de cerveza . . . . .	44
4.3.1.	Primer lote de cervezas: Problemas durante la filtración . . . . .	44
4.3.2.	Segundo lote de cervezas: Fermentación extendida a dos semanas . . . . .	48
4.3.3.	Tercer lote de cervezas: Pruebas con maltas especiales . . . . .	51
4.4.	Cartas de control y estandarización del proceso . . . . .	54
4.5.	Problemas detectados en la planta piloto . . . . .	59
4.5.1.	Fallas en el Sistema de Control . . . . .	59
4.5.2.	Problemas en el sistema de refrigeración de los fermentadores . . . . .	59
4.5.3.	Contaminación de batches . . . . .	62
4.5.4.	Baja gasificación de las cervezas . . . . .	64
4.5.5.	Seguimiento de la fermentación . . . . .	66
4.5.6.	Pérdida de mosto después de la clarificación . . . . .	67
4.5.7.	Zonas de la planta piloto sin limpiar . . . . .	67
4.6.	Procedimiento final de elaboración de cervezas . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>72</b>
5.1.	Conclusiones generales . . . . .	72
5.2.	Recomendaciones y trabajos futuros . . . . .	74
	<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>
	<b>Anexos</b>	<b>80</b>
	<b>A. Estructura del grano de cebada</b>	<b>81</b>
	<b>B. Análisis fisicoquímicos de la malta y adjuntos</b>	<b>83</b>
	<b>C. Proceso de Elaboración de Cervezas</b>	<b>85</b>
C.1.	Molienda del grano . . . . .	85
C.2.	Maceración . . . . .	85
C.3.	Filtración . . . . .	90
C.4.	Cocción . . . . .	92
C.5.	Fermentación . . . . .	95
C.6.	Maduración . . . . .	96
	<b>D. El lúpulo</b>	<b>102</b>
D.1.	Sustancias amargas . . . . .	103
D.2.	Aceites del lúpulo . . . . .	103
D.3.	Productos del lúpulo . . . . .	104
	<b>E. La levadura cervecera</b>	<b>106</b>

E.1. Clasificación de las levaduras . . . . .	106
E.2. Consumo de nutrientes . . . . .	107
E.3. Fermentación alcohólica . . . . .	108
<b>F. Protocolos para los análisis fisicoquímicos de la cerveza</b>	<b>110</b>
F.1. Determinación del grado alcohólico . . . . .	110
F.2. Determinación del color (EBC) . . . . .	111
F.3. Determinación del amargor (IBU) . . . . .	112
F.4. Turbidez y turbidez forzada de la cerveza . . . . .	113
F.5. Estabilidad de la espuma . . . . .	114
F.6. Determinación de la viscosidad . . . . .	115
F.7. Determinación del pH . . . . .	116
<b>G. Estimación de IBUs y Pitching rate de levadura</b>	<b>117</b>
G.1. Estimación de los IBUs entregados por los lúpulos . . . . .	117
G.2. Estimación del pitching rate de levadura . . . . .	118
<b>H. Resultados y precedimientos secundarios del trabajo de memoria</b>	<b>119</b>
H.1. Elaboración del lote de prueba . . . . .	119
H.2. Procedimiento para la determinación del volumen del trub en el estanque whirlpool . . . . .	123
H.3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las cervezas elaboradas . . . . .	123
<b>I. Protocolo de elaboración de cervezas en planta piloto</b>	<b>125</b>
<b>J. Diagrama de Tuberías e Instrumentación de la planta piloto</b>	<b>153</b>

# Índice de Tablas

2.1. Cuadro comparativo entre cervezas <i>ale</i> y <i>lager</i> . . . . .	8
2.2. Características de algunos adjuntos cerveceros. . . . .	16
3.1. Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la fabricación del lote de prueba. . . . .	29
3.2. Condiciones de operación del proceso productivo seguido en los ensayos de laboratorio. . . . .	30
3.3. Estadísticas vitales de cervezas tipo <i>Pilsen</i> y <i>Blonde Ale</i> . . . . .	32
3.4. Características de las maltas utilizadas para la elaboración de los lotes de cerveza. . . . .	32
3.5. Características de los lúpulos utilizados para la elaboración de los lotes de cerveza. . . . .	33
3.6. Características de las levaduras utilizadas en la elaboración de los lotes de cerveza. . . . .	33
3.7. Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del primer lote de cervezas. . . . .	33
3.8. Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del segundo lote de cervezas. . . . .	34
3.9. Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del tercer lote de cervezas. . . . .	34
4.1. Medición de grado alcohólico, color, viscosidad y estabilidad de espuma con sus respectivos valores esperados para una muestra de cerveza Carlsberg. . .	37
4.2. Extracción de azúcares utilizando dos moliendas de malta distintas. . . . .	42
4.3. Temperatura de salida del producto a distintos flujos. . . . .	43
4.4. Rangos esperados para los resultados de los análisis fisicoquímicos de las cervezas elaboradas en la planta piloto de Maltexco. . . . .	44
4.5. Seguimiento del proceso de elaboración del primer lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco. . . . .	44
4.6. Temperaturas de los fermentadores al final del proceso de maduración del primer lote de cervezas. . . . .	46
4.7. Seguimiento del proceso de elaboración del segundo lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco. . . . .	49
4.8. Seguimiento del proceso de elaboración del tercer lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco. . . . .	52



4.9. Temperaturas de los fermentadores durante el proceso de maduración del tercer lote de cervezas. . . . .	52
4.10. Condiciones de operación para la elaboración de cervezas en la planta piloto.	70
B.1. Algunos parámetros de calidad para las maltas. . . . .	84
C.1. Temperatura y pH óptimos de algunas enzimas de la cebada malteada durante la maceración. . . . .	86
H.1. Seguimiento del proceso de elaboración del lote de prueba en la planta piloto de Maltexco. . . . .	120
H.2. Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del lote de prueba. .	123
H.3. Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del primer lote de cervezas. . . . .	124
H.4. Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del segundo lote de cervezas. . . . .	124
H.5. Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del tercer lote de cervezas.	124

# Índice de Ilustraciones

1.1. Producción mundial de cervezas entre los años 2000 y 2014. . . . .	2
2.1. Escala de colores EBC. . . . .	6
2.2. Diagrama de Venn para distintos estilos de cervezas. . . . .	8
2.3. Esquema de la sección longitudinal del grano de cebada. . . . .	10
2.4. Diagrama de las estructuras de amilosa y amilopectina. . . . .	11
2.5. Diagrama de las estructuras semicristalinas de las moléculas del almidón. . .	12
2.6. Representación de Haworth de una cadena de $\beta$ -glucanos. . . . .	13
2.7. Diagrama de bloques del proceso de malteo. . . . .	14
2.8. Diagrama de bloques de los procesos de elaboración de maltas base y especiales.	16
2.9. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cervezas. . . . .	17
2.10. Crecimiento de la levadura en cultivo batch. . . . .	19
2.11. Macerador de la planta piloto. . . . .	20
2.12. Filtro vertical de la planta piloto. . . . .	21
2.13. Estanque <i>whirpool</i> de la planta piloto. . . . .	22
2.14. Concentrador de la planta piloto. . . . .	23
2.15. Fermentadores de la planta piloto. . . . .	23
2.16. Gasificador de la planta piloto. . . . .	24
2.17. Sistema de envasado de la planta piloto. . . . .	25
3.1. Esquema del proceso realizado en el trabajo de memoria. . . . .	26
3.2. Equipos e instrumentos utilizados durante el trabajo de memoria de título. .	36
4.1. Esquema del funcionamiento de un turbidímetro para la medición de la turbidez de una muestra de cerveza. . . . .	38
4.2. Medición de la absorbancia a 700 nm a cuatro cervezas con y sin adición de sulfato de sodio. . . . .	39
4.3. Fotografías a la torta formada durante la filtración de dos batches del lote de prueba. . . . .	40
4.4. Evolución temporal de las fermentaciones realizadas en el Laboratorio de Desarrollo de Maltexco. . . . .	41
4.5. Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del primer lote. . .	47
4.6. Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del segundo lote. .	50
4.7. Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del tercer lote. . .	53
4.8. Carta de control para la gravedad del mosto dulce. . . . .	54
4.9. Carta de control para la gravedad original del mosto. . . . .	55
4.10. Carta de control para la gravedad final de la cerveza. . . . .	55

4.11. Carta de control para grado alcohólico de la cerveza. . . . .	56
4.12. Carta de control para grado alcohólico de la cerveza. . . . .	56
4.13. Cartas de control para la turbidez de la cerveza. . . . .	57
4.14. Cartas de control para la turbidez forzada de la cerveza. . . . .	57
4.15. Carta de control para la viscosidad de la cerveza. . . . .	57
4.16. Carta de control para la estabilidad de espuma de la cerveza. . . . .	58
4.17. Carta de control para el pH de la cerveza. . . . .	58
4.18. Fotografía al panel de control de los fermentadores durante la maduración del tercer lote de cervezas. . . . .	60
4.19. Esquema del sistema de refrigeración de la planta piloto de Maltexco. . . . .	61
4.20. Esquema del balance de energía de uno de los fermentadores. . . . .	61
4.21. Esquema del sistema de inoculación en línea propuesto para la planta piloto.	63
4.22. Comparación entre el sistema de gasificación original de la planta piloto y el usado para la elaboración de los lotes de cerveza. . . . .	65
4.23. Esquema del gasificador y el contenido de cerveza de un fermentador. . . . .	65
4.24. Configuración actual de los fermentadores de la planta piloto de Maltexco. . . . .	66
4.25. Muestras del <i>trub</i> del mosto a distintos volúmenes de recolección. . . . .	68
4.26. Esquemas de la configuración actual del <i>whirpool</i> y la configuración propuesta.	68
4.27. Comparación entre la configuración actual de la línea de alimentación hacia el gasificador y la propuesta. . . . .	69
A.1. Esquemas de la sección longitudinal y transversal del grano de cebada. . . . .	82
C.1. Comparación entre 3 programas de maceración distintos. . . . .	87
C.2. Equipos utilizados para la maceración. . . . .	89
C.3. Diagrama de una cuba-filtro. . . . .	91
C.4. Fotografía a un filtro de membrana compresora. . . . .	91
C.5. Caldera de cobre de base redonda con chaquetas calefactoras ubicadas asimétricamente. . . . .	93
C.6. Patrón de flujo ideal al interior de un estanque <i>whirpool</i> . . . . .	94
C.7. Dos esquemas de estanques <i>whirpool</i> . . . . .	94
C.8. Crecimiento de la levadura en cultivo batch. . . . .	95
C.9. Avance temporal de fermentaciones ale y lager. . . . .	97
C.10. Fermentador cilindrocónico. . . . .	98
C.11. Esquema de un estanque de maduración. . . . .	100
C.12. Relación entre el contenido de CO <sub>2</sub> , temperatura y presión de la cerveza en condiciones de equilibrio. . . . .	100
C.13. Esquema de una unidad de carbonatación típica. . . . .	101
D.1. Morfología de los conos de lúpulo y las glándulas de lupulina. . . . .	102
D.2. Estructura general de los $\alpha$ y $\beta$ -ácidos. . . . .	103
D.3. Comparación entre la humulona y sus 2 formas isomerizadas. . . . .	104
D.4. Fotografías a 3 productos del lúpulo utilizados en la industria cervecera. . . . .	105
E.1. Levaduras de fermentación baja y alta bajo el microscopio. . . . .	107
E.2. Vías metabólicas de la glicólisis y de la fermentación alcohólica con las respectivas enzimas involucradas en cada reacción. . . . .	109

G.1. Utilización del lúpulo a distintos tiempos. . . . .	118
H.1. Fotografías a la torta formada durante la filtración de dos batches del lote de prueba. . . . .	120
H.2. Resultados de los análisis a los 4 batches del lote de prueba. . . . .	122

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Maltexco S.A

Maltexco es una empresa nacional dedicada a la fabricación de cebada malteada y sus derivados, los cuales son comercializados a empresas de la industria de alimentos y bebidas. La cebada malteada, también conocida como malta, corresponde a un grano que posee un alto contenido de almidón. Esta propiedad convierte a la cebada malteada en la materia prima principal para la fabricación de cerveza, pues el almidón puede degradarse en azúcares simples, para luego pasar por un proceso de fermentación, produciendo así el etanol presente en la bebida alcohólica.

Actualmente, Maltexco tiene una capacidad productiva de 100.000 toneladas de cebada malteada por año, la cual es comercializada bajo la marca *Patagonia Malt*. Los productos de Maltexco son comercializados no solo en Chile, sino también en otros países de América, como también en Oceanía y Asia [1].

Maltexco ofrece distintos tipos de malta, las que se pueden catalogar en maltas base y especiales. Las maltas base se utilizan en la mayoría de los procesos cerveceros debido a la capacidad que tienen tales granos de aportar los azúcares requeridos para producción de etanol en el proceso cervecero. Por otro lado, están las maltas especiales, las cuales se utilizan como adjuntos y entregan otras características a las cervezas, tales como color, sabor y aroma. Dentro de los adjuntos que ofrece Maltexco se encuentran las maltas caramelo, maltas tostadas, perla negra y cebada tostada [2].

### 1.2. El mercado de las cervezas y malta

La cerveza es la bebida alcohólica más consumida en el mundo [3], cuya producción ha ido en aumento hasta llegar a 1960 millones de hectolitros el año 2014 (ver figura 1.1), donde la mayor parte de la producción les pertenece a países como China, Estados Unidos, Brasil y Alemania [3,4]. Las empresas con mayor producción de cervezas en el mundo corresponden a

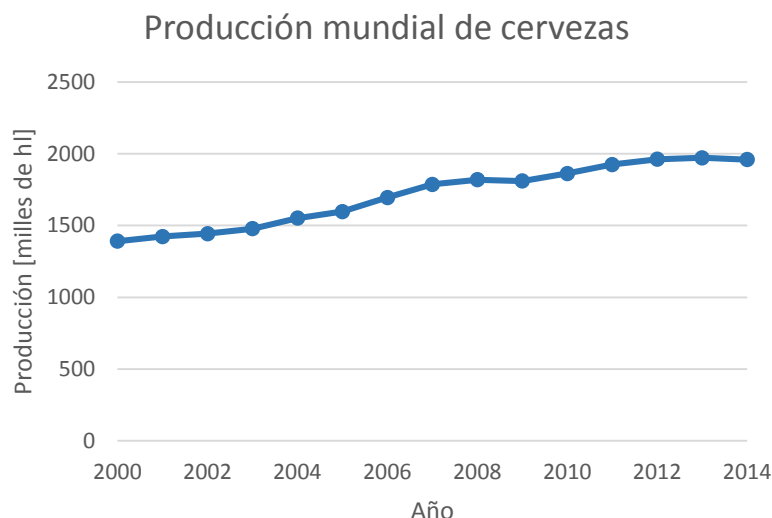


Figura 1.1: Producción mundial de cervezas entre los años 2000 y 2014. Fuente: The Barth-Hass Group, 2016 [4].

AB InBev, SAB Miller y Heineken, las cuales poseen el 40 % de la producción mundial. En el mercado chileno, los mayores productores de cervezas son CCU y Cervecerías Chile, concentrando aproximadamente el 82 % y 14 % del mercado cervecero chileno, respectivamente [5].

Durante los últimos años, el consumo de cerveza en Chile ha ido en aumento, superando los 40 litros per cápita anual el año 2012 [6]. A mediados de la década pasada, los consumidores chilenos comenzaron a apostar por cervezas distintas a las ofrecidas por el mercado hasta ese entonces, que se concentraba sólo en la elaboración de variedades lager, lo que permitió el surgimiento de las cervezas artesanales en Chile [5]. Actualmente, la industria de la cervecería artesanal proyecta crecimientos en sus ventas en más de un 30 % [7].

Según datos de la Asociación de Productores de Cerveza de Chile (ACECHI), en el país existen más de 300 productores de cerveza en el país, lo que ha obligado a las empresas a buscar formas de diferenciarse, incorporando nuevos ingredientes y desarrollando nuevos productos [8].

Con respecto a la malta, durante el año 2013 la producción mundial de malta fue de 22 millones de toneladas métricas, siendo los principales productores Malteries Soufflet, Malteurop Group y Cargill Malt, los cuales concentran aproximadamente el 30 % de toda la producción [9]. En el país, Maltexco es la principal maltería de Chile, y se encuentra ubicada en la posición N° 28 con respecto a la producción mundial [9].

### 1.3. Motivación

Durante los últimos años, Maltexco ha desarrollado un plan de diversificación de sus productos, tanto para consolidar su poder en el mercado maltero mundial, como por el aumento de la demanda de malta asociada a la aparición de nuevas empresas cerveceras.

Dentro de este plan está la creación de la marca Patagonia Malt antes mencionada, que trajo consigo la producción de maltas tostadas y caramelos, aumentando la oferta de productos de Maltexco, aparte de las maltas base producidas por la empresa [10].

Dentro del plan de diversificación de Maltexco también está contemplado la construcción y puesta en marcha de una planta piloto de cervezas dentro de las instalaciones de la Planta de Extractos de la empresa, ubicada en Temuco, Región de la Araucanía. Los fines que posee esta planta piloto incluyen la posibilidad de probar la calidad de las distintas maltas producidas para la fabricación de cerveza además de permitir tanto a los pequeños cerveceros como a los cerveceros industriales experimentar con las maltas especiales producidas por la empresa [10], fomentando y afiatando los lazos con sus clientes.

## **1.4. Objetivos**

Dado los antecedentes mostrados en la sección de motivación, se desarrolla el trabajo de memoria de título en las dependencias de Maltexco S.A., donde los objetivos para este proyecto se muestran a continuación:

### **Objetivo General**

Implementar un proceso estandarizado de producción de cerveza en la planta piloto de Maltexco, utilizando maltas base y especiales que elabora la empresa.

### **Objetivos Específicos**

1. Definir un proceso cervecero en la planta piloto utilizando las maltas bases y especiales de Maltexco.
2. Generar un protocolo que permita operar la planta piloto de Maltexco.
3. Definir los análisis requeridos para la evaluación del producto final en el proceso de elaboración de cerveza.

# Capítulo 2

## Marco Teórico y Antecedentes

### 2.1. La cerveza

La cerveza corresponde a una bebida alcohólica producida a partir de la fermentación del grano malteado de algún cereal. A grandes rasgos, se puede señalar que la cerveza está constituida a partir de 4 ingredientes: malta, lúpulo, levadura y agua [11–16].

El proceso de producción de cervezas comienza con la extracción de los azúcares fermentables presentes en la malta en una etapa de maceración, para luego separar los restos de granos de la solución rica en carbohidratos, llamada mosto, a través de un proceso de filtración. El mosto dulce pasa a una etapa de cocción, donde se adiciona lúpulo para luego ser enfriado y depositado en los fermentadores. Allí se adicionan las levaduras, cuyo metabolismo permite la conversión de los azúcares a etanol y dióxido de carbono por medio de la fermentación alcohólica. Finalmente, ya terminada la fermentación, la “cerveza verde”<sup>1</sup> pasa por una etapa de maduración en frío, desarrollando aromas y sabores característicos de esta bebida.

Se presume que la historia de la cerveza comienza con inicio de la domesticación de los granos por el humano hace más de 10 mil años atrás, [13, 17, 18], aunque las primeras evidencias químicas de la elaboración de cerveza sólo datan del 3.500 AC [13]. Para las civilizaciones y pueblos antiguos, la cerveza y las bebidas fermentadas en general formaron parte importante de su dieta, debido a la euforia alcohólica producida por esta bebida además de sus propiedades nutricionales. Por ejemplo, el bajo pH y el contenido de alcohol hacían de la cerveza un bebestible de mejor calidad microbiológica que el agua disponible en aquel entonces, además de aportar carbohidratos, nitratos asimilables y vitaminas del complejo B [12, 17].

---

<sup>1</sup>El término “cerveza verde” se usa para referirse a la cerveza que aún no ha pasado por la etapa de maduración, no por el color en sí.



### 2.1.1. Características de las cervezas

Dentro de la industria cervecera, tanto a gran como a pequeña escala, existen parámetros básicos usados como descriptores numéricos de la cerveza. Muchos de estos parámetros pueden ser medidos con gran exactitud, y son utilizados dentro del control de calidad del proceso cervecero.

#### Gravedad

El término gravedad está asociado a la densidad del mosto o de la cerveza sin fermentar. Conocer la densidad del mosto permite estimar el contenido de sólidos disueltos, principalmente azúcares fermentables<sup>2</sup>, dextrinas<sup>3</sup>, proteínas, entre otros.

Existen 2 sistemas de medición de la gravedad de la cerveza:

- Grados Plato (°P): Los grados Plato son una medida de concentración de sólidos en porcentaje en peso, es decir, una solución de 10°P contiene 10 gramos de sólidos disueltos por cada 100 gramos de mosto [13, 14]. También suele medirse la concentración de sólidos disueltos en grados Brix, aunque esta última es mayormente utilizada en la industria del vino [13].
- Gravedad Original (OG): La gravedad original es igual a la gravedad específica<sup>4</sup> del mosto [13, 14]. También se suele medir la gravedad final de la cerveza (FG), que representa una medida de la densidad de ésta terminado el proceso fermentativo y da cuenta, en parte, del consumo de azúcares fermentables por las levaduras en la producción de alcohol [13].

#### Atenuación Aparente

La atenuación es una medida de qué tan completa fue la fermentación del mosto. Se presenta en porcentajes y se calcula como la relación entre el cambio entre la gravedad inicial y final dividido por la gravedad inicial, como se muestra en la ecuación 2.1. A mayor atenuación, un porcentaje mayor de los azúcares fueron fermentados. Bajos valores de atenuación indican que la cerveza posee un bajo grado alcohólico y probablemente algunas notas de sabores dulces [13]. La medida de la atenuación se considera aparente, pues, en la medición de la gravedad final, la presencia de alcohol en la cerveza disminuye la densidad del líquido [13].

$$AtAp = \frac{OG - FG}{OG - 1} \quad (2.1)$$

---

<sup>2</sup>Azúcares fermentables: Carbohidratos de bajo peso molecular que pueden ser utilizados por las levaduras durante el proceso fermentativo para la obtención de energía. La glucosa, galactosa, maltosa y sacarosa son considerados como azúcares fermentables, entre otros.

<sup>3</sup>Dextrinas: Carbohidratos (o azúcares) de alto peso molecular que no pueden ser utilizados por las levaduras. A veces también son llamadas como carbohidratos o azúcares no fermentables.

<sup>4</sup>Gravedad específica: Cociente entre la densidad de la solución por la densidad de algún líquido de referencia, generalmente agua.



Figura 2.1: Escala de colores EBC. Los nombres presentados para cada ejemplo no son oficiales, por lo que deben tomarse sólo como una referencia. Adaptado de Mosher, 2015 [13].

## Contenido de alcohol

Un parámetro importante de toda bebida alcohólica es el contenido de etanol presente en ella. Este se presenta en grados alcohólicos (a veces también representado como ABV), que indica la concentración de alcohol en porcentaje volumétrico. Una cerveza de 5° posee 5 ml de etanol por 100 ml de cerveza.

## Color

El color de una cerveza está influenciado por la naturaleza de las materias primas y las condiciones de operación del proceso cervecero. Los colores oscuros provienen principalmente de melanoidinas, compuestos formados por la reacción de Maillard, y de las reacciones de caramelización de los azúcares [15]. La medición del color se realiza por espectrofotometría, determinando la absorbancia de la cerveza a una longitud de onda de 430 nm. La Convención Cervecera Europea (EBC, por sus siglas en inglés) se guía por la expresión indicada en la ecuación 2.2 [19], caracterizando el color de la cerveza de manera similar a lo presentado en la figura 2.1.

$$\text{Color[EBC]} = 25 \cdot E_{430} \quad (2.2)$$

## Amargor

El amargor que poseen las cervezas depende en gran parte por sustancias presentes en el lúpulo, conocidas como  $\alpha$ -ácidos, las cuales se solubilizan en el mosto durante la etapa de cocción [15].

El amargor de una cerveza es expresado en Unidades Internacionales de Amargor (IBU, de sus siglas en inglés), que es una medida de concentración de  $\alpha$ -ácidos en miligramos por litro. Es decir, una cerveza con 10 IBU contiene 10 mg de sustancias amargas por litro de cerveza. En el mercado existen cervezas que pueden llegar hasta los 100 IBU, pero por lo general, este valor varía entre 10 y 50 IBU [15].

## 2.1.2. Tipos y estilos de cerveza

Es posible encontrar en la actualidad un gran número de estilos de cerveza, los que difieren entre sí por su lugar de origen, ingredientes utilizados y condiciones de operación del proceso cervecero. El Programa de Certificación de Jueces Cerveceros (BJCP, de sus siglas en inglés) describe en su guía 2015 más de 110 estilos distintos de cerveza, tales como *Indian Pale Ale*, *Pilsen*, *American Lager*, *Barleywine*, entre otros [20]. Si bien son muchos los estilos de cerveza, estos se pueden agrupar en cuatro categorías distintas: cervezas *ale*, *lager*, híbridas y especiales.

### Cervezas *ale*

El término *ale* está asociado a las cervezas producidas por una etapa de fermentación usando levaduras que, durante la etapa de proliferación celular, se separan de la cerveza verde y ascienden a la superficie [15]. Estos microorganismos son conocidos como “levaduras de fermentación alta”, y corresponden a cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, hongo unicelular utilizado también en la fabricación de vino y pan [11–13].

Las temperaturas de fermentación al utilizar levaduras *ale* varían generalmente entre los 18°C - 22°C, mientras que los tiempos de fermentación y maduración son cortos, del orden de 3 a 5 días cada una de estas etapas [11–15].

La utilización de cepas específicas de *S. cerevisiae* para la producción de *ales* y las altas temperaturas de fermentación favorecen la formación de alcoholes de mayor peso molecular y ésteres, lo que trae como consecuencia la producción de una cerveza con sabores y aromas más robustos que en las *lagers* [15].

Por lo general, los microcerveceros producen en mayor cantidad cervezas *ale* que *lager*, debido a que las etapas de fermentación no requieren un control de temperatura minucioso.

En cuanto a los estilos categorizados como *ale*, se pueden mencionar las *Pale Ale*, *Indian Pale Ale*, *Porter*, *Stout*, *Weizen*, entre muchos otros [20].

### Cervezas *lager*

Las cervezas *lager* son producidas por “levaduras de fermentación baja” ya que estas se ubican en la zona inferior del equipo durante la fermentación. La fermentación en las *lagers* se lleva a cabo a temperaturas inferiores a las *ales*, dentro del rango 7°C - 15°C [11–14]. Las levaduras encargadas de producir cervezas *lager* corresponden a *Saccharomyces pastorianus* [11–13], aunque también existen cepas de *S. cerevisiae* tolerantes a bajas temperaturas que se utilizan para la fabricación de cervezas *lager* [11, 13].

A diferencia de las cervezas *ale*, el tiempo de fermentación de las cervezas *lager* es de 10 días como mínimo, debido al metabolismo reducido de las levaduras por las bajas temperaturas [11–13, 15]. También, el proceso de maduración es mayor, llegando incluso a semanas o meses

[11, 12, 14, 15].

Dentro de los estilos de cerveza categorizados como *lager* se pueden mencionar las *American* y *European Lager*, *Pilsen*, *Bock/Maibock*, entre otras [20].

## Cervezas híbridas

Las cervezas híbridas corresponden a aquellas cervezas que poseen características tanto de *ales* como *lagers*. Por ejemplo, se puede considerar un proceso productivo en el cual se utilicen levaduras *ale* a temperaturas bajas durante la fermentación, o mezclas de levaduras de alta y baja fermentación.

A modo de resumen, se presenta una tabla comparativa entre las características principales de las cervezas *ale* y *lager* (tabla 2.1), además de un esquema con distintos estilos y su clasificación como *ale*, *lager* o híbrida (figura 2.2).

Tabla 2.1: Cuadro comparativo entre cervezas *ale* y *lager*.

Estilo de Cerveza	Ale	Lager
<b>Tipo de fermentación</b>	Fermentación alta	Fermentación baja
<b>Microorganismo utilizado</b>	<i>S. cerevisiae</i>	<i>S. pastorianus</i>
<b>Temperatura de fermentación</b>	18°C - 22°C	7°C - 15°C
<b>Tiempo de fermentación</b>	1 semana	2 semanas
<b>Tiempo de maduración</b>	1 semana	6 semanas



Figura 2.2: Diagrama de Venn para distintos estilos de cervezas. Adaptado de Brookston Beer Bulletin [21].

## Cervezas especiales

Dentro de este grupo se categorizan las cervezas que no pueden ser descritas dentro de las clasificaciones de *ale* o *lager*. En esta categoría se encuentran las cervezas del tipo *lambic*. Estas cervezas se producen mayoritariamente en Bélgica y utilizan un proceso de “fermentación espontánea”, en donde un conjunto de microorganismos presentes en el ambiente son los encargados de realizar la fermentación del mosto [11, 12].

Otras bebidas dentro del grupo de las cervezas especiales corresponden a las cervezas nativas africanas. Utilizan como fuente de almidón granos distintos a la cebada, tales como sorgo, mijo, maíz, además de plátano [15] y omiten etapas del proceso cervecero tradicional, como por ejemplo la filtración de los granos o la cocción del mosto dulce. Se aplica el mismo procedimiento de fermentación espontánea que las *lambic*, y se beben en pleno proceso fermentativo [11, 12].

## 2.2. La malta

La malta es un producto constituido por granos de cereal que han pasado por un proceso llamado malteo, el que consiste en una germinación del grano detenida al utilizar una desecación con aire caliente. Durante la germinación, los nutrientes almacenados en el endospermo del grano comienzan a degradarse por acción de enzimas también sintetizadas durante este proceso. Así, como resultado, al detener la germinación del cereal se obtiene un grano con altas concentraciones de almidón y un alto poder diastásico (capacidad enzimática del grano de malta), lo que convierte a la malta en la materia prima más importante en el proceso de elaboración de cervezas. [11–13].

Si bien son varios los granos de cereal que se pueden maltear, los de cebada (*Hordeum vulgare*) son aquellos que permiten obtener mejores resultados, en comparación a otros como maíz, trigo o sorgo, principalmente por su alto contenido de almidón y baja concentración de proteínas [12]. La cebada es uno de los cereales con mayor presencia en el mundo, siendo Rusia y Canadá los principales exportadores [22]. La cebada se clasifica de acuerdo al número de granos en la espiga de la planta: 2, 4 o 6 hileras. La forma original de la cebada salvaje es de 2 hileras (*Hordeum distichum*), y es la que se utiliza en mayor cantidad en la industria cervecera debido a su sabor limpio y su bajo contenido en proteínas [13]. La cebada de 6 hileras tiene una mayor cantidad de proteínas y cáscara, por lo que si se usa en gran proporción en la fabricación de cerveza podría implicar una cerveza con un alto grado de turbidez, acompañada de sabores astringentes [13]. En el caso específico de Maltexco, la empresa utiliza cebada de 2 hileras proveniente de la Patagonia Argentina y de la zona sur de Chile [23].

Las estructuras que conforman al grano de cebada se muestran esquematizadas en la figura 2.3, donde destacan la aleurona, el embrión y el endospermo. La aleurona es una estructura ubicada al interior del grano, inmediatamente después de la lema, palea, pericarpio y testa, y contiene aproximadamente el 30% de las proteínas del grano de cebada, incluyendo las enzimas requeridas en el proceso cervecero (principalmente  $\alpha$  y  $\beta$  amilasas) [11, 13]. El embrión es la estructura encargada de controlar el proceso de germinación de la planta de

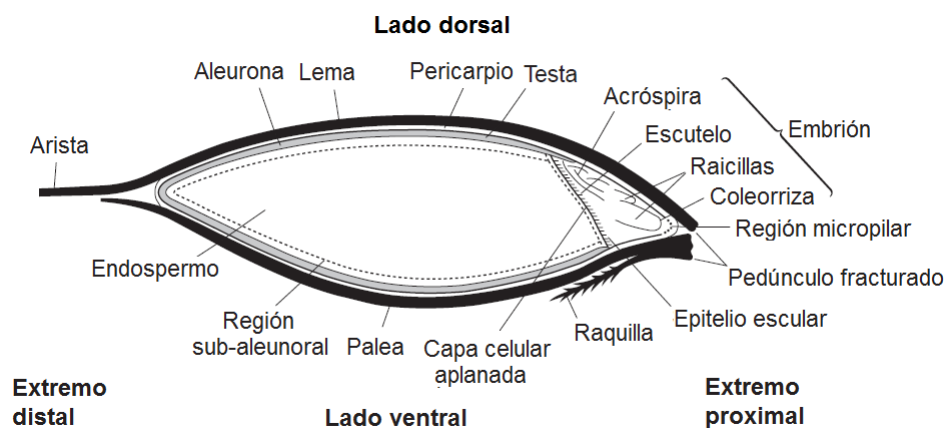


Figura 2.3: Esquema de la sección longitudinal del grano de cebada. Imagen adaptada de Briggs *et al.*, 2004 [11].

cebada cuando se reúnan las condiciones requeridas para esta etapa [11, 13]. Finalmente, el endospermo corresponde a la reserva de almidón del grano, el que se encuentra dentro de gránulos de proteínas y  $\beta$ -glucanos de tamaño pequeño (diámetro 1,7 - 2,5  $\mu m$ ) y grande (diámetro 22,5 - 47,5  $\mu m$ ) [11, 13]. Un mayor detalle de las estructuras del grano de cebada puede encontrarse en el Anexo A.

## 2.2.1. Composición química de la malta

### Proteínas y aminoácidos

En peso seco, un 10,5% de la masa del grano de cebada son proteínas [22], las cuales se pueden clasificar en 3 grupos [11, 12]:

- Albúminas y globulinas: Proteínas cuya función principal es su trabajo como enzimas.
- Hordeínas: Reservas energéticas y de aminoácidos utilizadas durante la germinación.
- Gluteínas: Proteínas estructurales del grano.

Aparte de su trabajo como enzimas, las proteínas contribuyen con características como la sensación en boca y el cuerpo en la cerveza, en la estabilidad de espuma y en la tendencia de formar turbidez [11]. También, las proteínas y aminoácidos en general aportan en el desarrollo del color de la cerveza, ya que pueden reaccionar con azúcares por medio de la reacción de Maillard durante el malteado o en la etapa de cocción del mosto [11].

### Almidón

Dentro de los carbohidratos presentes en el grano de cebada, el almidón es el más importante para el proceso cervecero. El almidón es un polímero de glucosa (en su forma  $\alpha$ -D-glucopiranososa), con fórmula molecular de  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , formando dos estructuras distintas,

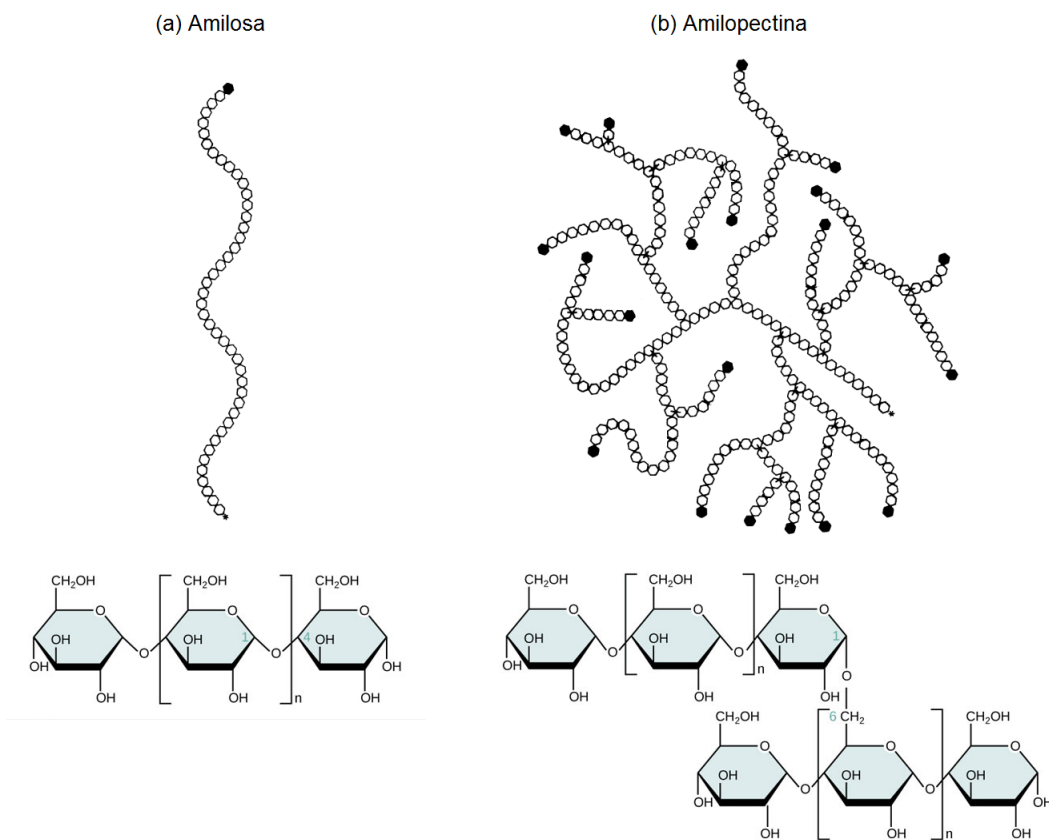


Figura 2.4: Diagrama de las estructuras de amilosa y amilopectina. Los hexágonos representan los residuos de glucosa (D-glucopiranososa). Se presentan los extremos no reductores de la cadena coloreados de negro. Imágenes adaptadas de Briggs *et. al.*, 2004 [11] y Edualimentaria [24].

que corresponden a la amilosa y amilopectina, representadas en la figura 2.4. La amilosa es un polímero lineal que contiene de 1.600 a 1.900 unidades de glucosa (peso molecular entre 260 y 310 kDa), unidas entre sí por un enlace del tipo  $\alpha$ -(1,4). Por otro lado, la amilopectina tiene un peso molecular mayor que la amilosa (superior a 2 MDa). También se encuentra constituida por polímeros de glucosa unidos por enlaces  $\alpha$ -(1,4), pero ocasionalmente de establecen enlaces  $\alpha$ -(1,6), formando una estructura ramificada [11, 12].

Durante el proceso de germinación, el grano utiliza las enzimas presentes en la zona aleurol para digerir las moléculas de amilosa y amilopectina, produciendo carbohidratos de menor tamaño molecular y así obtener energía para el crecimiento de la planta.

El almidón, al interior de los gránulos del endospermo, forma estructuras semicristalinas como las que se muestran en la figura 2.5. Las cadenas de amilopectina forman dobles hélices con otras ramificaciones o con moléculas de amilosa. Esta configuración impide la acción de las enzimas amilolíticas, principalmente por efectos estéricos [11]. Al humectar los gránulos de almidón a altas temperaturas se observa un fenómeno llamado gelatinización, en donde las moléculas de agua comienzan a intercalarse en la estructura semicristalina del almidón, exponiendo su estructura hacia el exterior, lo que favorece la acción enzimática [11]. Las temperaturas de gelatinización varía entre los distintos tipos de grano, siendo para la cebada entre 61°C y 62°C [22] y deben ser alcanzadas durante la etapa de maceración para permitir

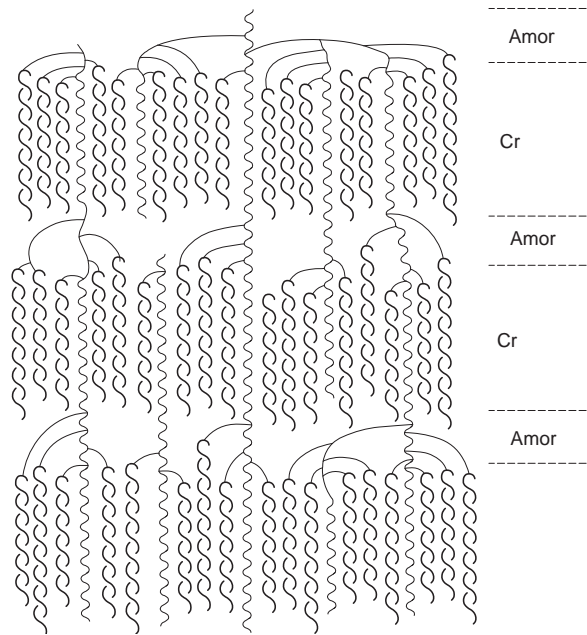


Figura 2.5: Diagrama de las estructuras semicristalinas de las moléculas del almidón. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

la extracción de los azúcares fermentables [11, 12].

### Pentosanos, Holocelulosa y $\beta$ -Glucanos

Luego del almidón, los carbohidratos presentes en las paredes del endospermo también cobran importancia en el proceso cervecero. Abarcan aproximadamente el 10 % del peso del grano de cebada y corresponden principalmente a polímeros de arabinosa, xilosa y glucosa, llamados pentosanos,  $\beta$ -glucanos y holocelulosa [12].

Los  $\beta$ -glucanos, al igual que la amilosa y la amilopectina, son homopolímeros de glucosa, pero en su forma  $\beta$ -D-glucopiranososa. Son polímeros lineales, donde el enlace entre los residuos de glucosa es del tipo  $\beta$ -(1,4) y ocasionalmente  $\beta$ -(1,3) [11, 12], los que se muestran en la figura 2.6. Éstos constituyen un 75 % de los carbohidratos presentes en las paredes del endospermo de cebada [15]. Durante la obtención del mosto, los  $\beta$ -glucanos se solubilizan, los que si se encuentran en grandes concentraciones afectan en la recuperación del mosto durante la filtración, como también generar turbidez en el producto ya terminado [11–13], por lo que deben ser degradados para evitar problemas en las etapas posteriores a la maceración. Durante la germinación y el malteado se sintetizan  $\beta$ -glucanasas, que actúan sobre la pared de los gránulos de almidón, degradando los  $\beta$ -glucanos y permitiendo el contacto entre el almidón y las enzimas amilolíticas. Existe más de un tipo de  $\beta$ -glucanasas, capaces de atacar tanto los enlaces  $\beta$ -(1,4) como los  $\beta$ -(1,3) [25].

Las fibras de  $\beta$ -glucanos se encuentran cubiertas por los pentosanos, que en la cebada corresponden a arabinoxilanos. Éstos son polímeros formados por unidades de arabinosa y xilosa, además de ácido ferúlico y ácido acético [12, 25, 26] y constituyen entre el 20 %



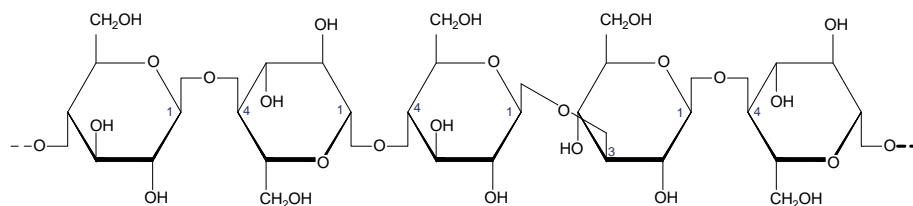


Figura 2.6: Representación de Haworth de una cadena de  $\beta$ -glucanos.

y 24% de las paredes del endospermo [15]. Al igual que los  $\beta$ -glucanos, también pueden generar turbidez y problemas en la filtración por la formación de geles [11, 12], lo que hace necesaria la degradación de estos compuestos. Las enzimas encargadas de la solubilización de los pentosanos son las xilanasas, arabinofuranosidasa, feruloil esterasa, acetoxilana esterasa, entre otras, las que atacan tanto los enlaces glucosídicos entre los residuos de pentosas como los complejos con ácido ferúlico y acético [25].

Finalmente, se encuentran las fibras de holocelulosa, polímeros asociados a la presencia de lignina presente en la cáscara de los granos y que corresponden al 5% restante de los carbohidratos no amiláceos [11, 15].

## Lípidos

Los lípidos en la malta alcanzan a un 3% del peso seco del grano, cantidad mucho menor que las proteínas y carbohidratos. Gran parte de ellos son utilizados por el embrión durante la germinación de la planta, mientras que para el proceso cervecero, el aporte de los lípidos está en la nutrición de las levaduras en la etapa fermentativa de éste [12]. Afectan negativamente en el desarrollo del sabor y en la estabilidad de la espuma de la cerveza [25]. Si bien en el grano de cebada existen lipasas que degradan a los lípidos, la remoción de éstos en el proceso cervecero está asociado a fenómenos físicos más que químicos, como las operaciones de separación como la filtración y la eliminación del *trub*<sup>5</sup> del mosto [11].

## Fosfatos

Los compuestos fosfatados en la malta dan cuenta del 1% del peso seco del grano, en los que se incluyen los fosfolípidos, ácidos nucleicos y el ácido fítico [12]. Los fosfolípidos y ácidos nucleicos son requeridos por la levadura para aumentar su masa celular y proliferar. Por otro lado, el ácido fítico es un compuesto derivado del inositol, una vitamina del grupo B. Este ácido es degradado por la fitasa, liberando mioinositol y grupos fosfatos, los cuales pueden capturar iones calcio presentes en el mosto y reducir el pH de éste durante la maceración [12].

<sup>5</sup>Se conoce como *trub* al sedimento compuesto por proteínas denaturadas, polifenoles, restos de grano, entre otros componentes, formado durante la etapa de clarificación del mosto, la que se describe en la sección 2.3.

## 2.2.2. El proceso de malteo

El proceso de elaboración de malta consta de 3 etapas, las cuales promueven y, posteriormente, detienen la germinación del grano del cereal a maltear. En particular, en este caso, se presenta el proceso de malteo de cebada. A modo de resumen, se presenta en la figura 2.7, un diagrama de bloques del proceso productivo.



Figura 2.7: Diagrama de bloques del proceso de malteo.

El proceso comienza con la recepción del grano de cebada para luego almacenarse en los silos de la maltería. La cebada es más estable si se encuentra seca (bajo un 15 % de humedad) y a baja temperatura (bajo 15°C), ya que si el grano está húmedo, es fácilmente atacado por insectos como escarabajos de dientes de sierra, gorgojos y escarabajos planos, además de microorganismos como mohos, levaduras y bacterias [12].

Luego, los granos pasan a la etapa de remojo. La cebada limpia se envían a un tanque de remojo parcialmente lleno de agua. El contenido de humedad de los granos aumenta a un 42 % en esta etapa, aproximadamente, lo que activa el embrión para comenzar así con la germinación. Parte de los nutrientes del grano son utilizados por el embrión para realizar los procesos de respiración celular, por lo que los estanques de remojo insuflan aire para satisfacer la demanda de oxígeno del grano [12].

Después de un par de días, se transfieren los granos de cebada a las piscinas de germinación. Se mantienen condiciones de humedad y temperatura constantes de manera de mantener homogéneo la germinación de los granos. En esta etapa, el grano comienza con la degradación de sus reservas nutritivas, donde las proteínas sintetizadas en la aleurona de este digieren las paredes celulares que recubren los gránulos de almidón del endospermo [12]. El nivel de desagregación del grano se conoce en la industria maltera como modificación. Una malta con un nivel de modificación alto posee una gran cantidad de enzimas hidrolíticas y un endospermo blando que facilita la liberación de azúcares fermentables para el proceso cervecero [12, 13].

El proceso de malteo termina con el secado. El objetivo de esta etapa es detener la desagregación del grano y disminuir la actividad enzimática de este, sin destruir las enzimas, ya que luego serán utilizadas en el proceso cervecero. Para esto, la malta se seca a bajas temperaturas por largos tiempos, hasta disminuir su humedad a un 4 % aproximadamente [12].

### 2.2.3. Maltas base y maltas especiales

Las maltas se agrupan en dos categorías según la forma en la que éstas son secadas y cómo son usadas en el proceso cervecero. Estas categorías van desde maltas de colores claros y un poder diastásico alto, las maltas base, hasta maltas fuertemente tostadas e incapaces de aportar actividad enzimática, las maltas especiales.

Las maltas de colores claros son conocidas en la industria cervecera como maltas base, dado que éstas son el ingrediente principal en toda receta cervecera, incluso en las cervezas más oscuras, principalmente por su aporte en almidón y poder diastásico. Maltas como la *Pilsen*, *Pale Ale*, *Vienna* y *Munich* caen dentro de esta categoría [11, 13, 14, 16].

Por otro lado, las maltas especiales aportan color, sabor y aromas distintos a las maltas base, pero con un contenido de almidón y poder diastásico reducido o nulo. Durante la elaboración de maltas especiales se utilizan temperaturas mayores que en el proceso productivo de las maltas base, lo que provoca que el almidón del grano se conviertan en azúcares no fermentables, debido al pardeamiento del grano a través de las reacciones de caramelización y de Maillard [13, 14].

Dentro del grupo de las maltas especiales se encuentran las maltas tostadas. Como se observa en la figura 2.8, en la elaboración de este tipo de malta se adiciona una etapa de tostado, la que se realiza a altas temperaturas (sobre los 160°C generalmente [9]) en secadores rotatorios, lo que favorece la formación de melanoidinas, compuestos nitrogenados generados a partir de la interacción entre proteínas (o aminoácidos) con los azúcares que entrega el almidón, lo que se conoce como reacción de Maillard [13, 14], y provoca el color tostado del grano, además de sabores como chocolate, café, tostado, entre otros [13]. Las maltas tostadas pueden tener colores sobre los 600 EBC, llegando incluso hasta los 1.500 EBC [9, 11, 13, 14].

Otro grupo dentro de las maltas especiales son las maltas caramelo. En la figura 2.8 se muestra que, durante la elaboración de las maltas caramelo, los granos no pasan por una etapa de secado, sino que son enviados directamente al tostador. Al igual que en las maltas tostadas, se producen melanoidinas por la reacción de Maillard, pero también, debido al alto contenido de agua del grano, los azúcares del grano reaccionan entre sí por medio de las reacciones de caramelización, lo que trae como consecuencia la aparición de notas dulces en la malta, además de aromas a caramelo, toffee, frutos secos, malvaviscos o azúcar quemada, entre otros [13]. Durante la etapa de caramelización y tostado se utilizan temperaturas inferiores que las utilizadas en el proceso de elaboración de maltas tostadas, entre 70°C y 160°C generalmente [9, 14]. Los colores de las maltas tostadas pueden variar desde los 20 EBC hasta los 500 EBC [9, 11, 13, 14].

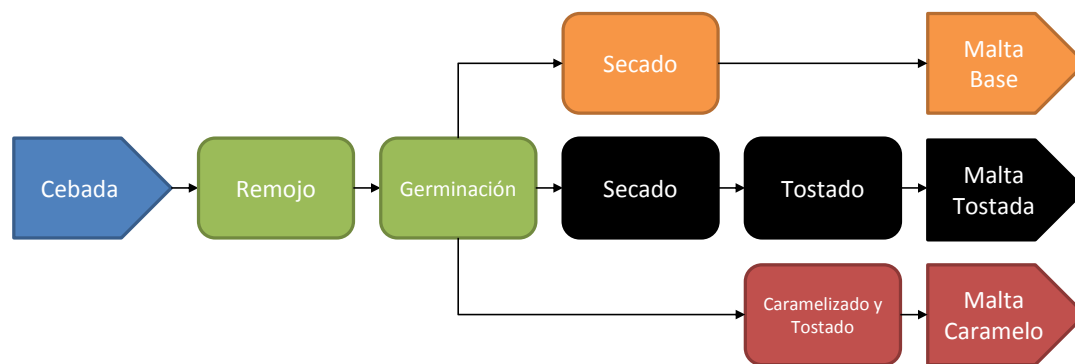


Figura 2.8: Diagrama de bloques de los procesos de elaboración de maltas base y especiales.

## 2.2.4. Adjuntos

Existen otras fuentes de almidón, distintas a la malta de cebada, que se utilizan en la elaboración de cervezas. Éstas pueden ser otros granos malteados (trigo o avena), granos sin maltear (arroz, maíz, cebada, avena, trigo) u cereales exóticos como la quínoa, trigo sarraceno, alforjón, entre otros. La utilización de éstos está influenciada por distintas razones, principalmente por tradición de algún estilo de cerveza en particular como también por reducción de costos, por ejemplo. En la tabla 2.2 se presentan algunos de estos adjuntos y sus características más importantes.

Tabla 2.2: Características de algunos adjuntos cerveceros. La descripción de los parámetros de calidad de color, poder diastásico y extracto puede encontrarse en el Anexo B.

Adjunto	Color EBC	Poder diastásico [°WK]	Extracto [%]	Porcentaje de uso [%]
Cebada malteada	3 <sup>b</sup>	311 <sup>b</sup>	82,0 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>
Trigo malteado	3 - 4 <sup>a</sup>	405 <sup>b</sup>	86,2 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>
Avena malteada	4 <sup>a</sup>	269 <sup>b</sup>	64,4 <sup>b</sup>	30 <sup>a</sup>
Quinoa malteada	5 <sup>b</sup>	81 <sup>b</sup>	83,2 <sup>b</sup>	-
Maíz	1,6 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	60,7 <sup>b</sup>	40 <sup>a</sup>
Arroz	2 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	87,4 <sup>b</sup>	40 <sup>a</sup>
Trigo sin maltear	2,8 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	75,6 <sup>a</sup>	50 <sup>a</sup>
Cebada sin maltear	4 - 6 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	75,6 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>
Avena sin maltear	4 - 6 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	55,2 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>
Centeno	4 - 6 <sup>a</sup>	≈ 0 <sup>a</sup>	75,6 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>

Fuentes: (a) Mosher, 2015 [13], (b) Meusdoerffer, 2009 [22].

## 2.3. Proceso de elaboración de cervezas

A grandes rasgos, el proceso de producción de cerveza consiste en 6 etapas, tal como se muestra en la figura 2.9. Un mayor detalle de las etapas del proceso productivo se presenta en el Anexo C.

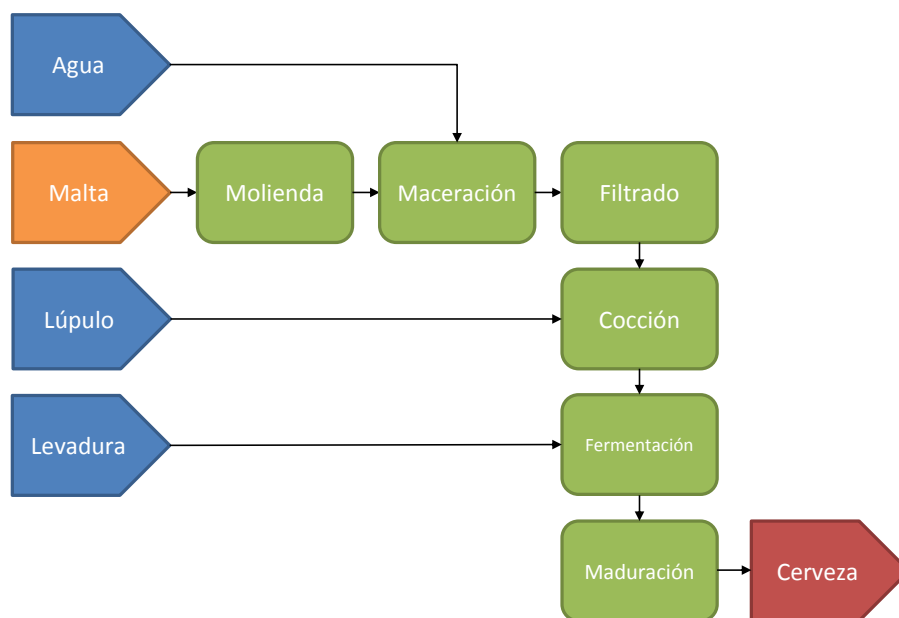


Figura 2.9: Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cervezas.

El proceso de elaboración de cervezas comienza con la molienda del grano de malta. La molienda tiene como finalidad facilitar la extracción de los azúcares durante la maceración [11–14]. Posterior a la molienda, sigue la etapa de maceración. Durante la maceración se produce la extracción de azúcares desde los granos de malta, debido a la degradación enzimática de los gránulos de almidón del endospermo. Un gran número de enzimas provenientes de la malta pueden encontrarse durante la maceración, tal como se muestra en la tabla C.1. Sin embargo, las que toman una mayor relevancia en el proceso cervecero son aquellas que degradan las amilasas y amilopectinas ( $\alpha$  y  $\beta$  amilasas, dextrinasa límite) y las paredes de los gránulos de almidón ( $\beta$ -glucanasas, proteasas).

Las condiciones de operación durante la maceración dependerán de la reacción (o reacciones) enzimáticas que se desean favorecer. Por ejemplo, varios sistemas de maceración utilizan un aumento gradual de la temperatura de la infusión (también conocido como *mash*) desde los 40°C hasta los 75°C. Este aumento gradual permite alcanzar las temperaturas óptimas de las enzimas involucradas en la hidrólisis de las paredes del endospermo (40°C - 54°C), la hidrólisis del almidón (54°C - 65°C) y la inactivación enzimática (75°C), aumentando así el rendimiento del proceso de maceración [11–15, 27].

De la maceración se obtienen un líquido alto en azúcares y los granos agotados de malta, conocidos como mosto y bagazo, respectivamente. La separación entre el mosto y el bagazo se realiza por filtración. En caso que no hayan sido degradados los  $\beta$ -glucanos y pentosanos

solubles durante la maceración, la filtración puede verse dificultada, aumentando los tiempos de proceso, por lo que se debe asegurar la degradación de estos compuestos [11–13]. De manera similar, moliendas finas pueden afectar negativamente el proceso de filtración, al aumentar la resistencia específica de la torta filtrante [12].

Luego, el mosto filtrado pasa a una etapa de cocción, donde se eleva la temperatura del mosto dulce hasta el punto de ebullición por un tiempo entre los 60 y 90 minutos. Durante la cocción del mosto se adiciona el lúpulo, el que corresponde a la inflorescencia femenina de la planta del lúpulo (*Humulus lupulus*). Al interior del lúpulo se pueden encontrar un grupo de compuestos llamados dentro de la jerga cervecera como “sustancias amargas” [15]. Las sustancias amargas, compuestas principalmente por humulona y sus homólogos (que en conjunto también son denominados como  $\alpha$  ácidos), aportan el amargor característico de la cerveza. También participan en la formación de espuma y actúan como estabilizadores biológicos de la cerveza al aportar propiedades antimicrobianas [11, 13, 15, 28]. Un mayor detalle del lúpulo se presenta en el Anexo D.

Las altas temperaturas del proceso de cocción provocan varios efectos en el mosto:

- Esterilización del mosto [12].
- Denaturación y posterior coagulación de proteínas en el mosto [12].
- Isomerización y solubilización de las sustancias amargas. La proporción  $\alpha$  ácidos que solubilizan en el mosto se conoce como utilización, y depende en gran parte del tiempo de cocción [11, 12, 28].
- Aumento del color de cerveza, debido a las reacciones de pardeamiento no enzimático (Caramelización de los azúcares y reacción de Maillard) [11, 13].
- Destilación de compuestos volátiles presentes en el mosto [11].

Terminada la cocción, el mosto pasa por una etapa de clarificación, donde se retiran las proteínas coaguladas y los restos de lúpulo, lo que en conjunto se conoce como *trub*, para luego enfriar el mosto a las temperaturas requeridas para las etapas posteriores. La clarificación suele realizarse en estanques remolinos o *whirpool*, cuya geometría permite concentrar el *trub* en una zona específica del equipo, facilitando su eliminación [11, 12], mientras que el enfriado del mosto utiliza intercambiadores de calor para disminuir la temperatura [11, 12].

Después de la clarificación y enfriado del mosto sigue la etapa de fermentación. Allí, los azúcares de bajo peso molecular presentes en el mosto son metabolizados por las levaduras, produciendo etanol y dióxido de carbono. Tal como se mencionó en la sección 2.1.2, en el proceso cervecero se utilizan levaduras pertenecientes al género *Saccharomyces*, generalmente *S. cerevisiae* y *S. pastorianus*, que se conocen en el mundo cervecero como levaduras de fermentación alta y baja, respectivamente. Un mayor detalle de las levaduras y sus características se presenta en el Anexo E.

La fermentación comienza con la inoculación de las levaduras en el fermentador. Allí, las levaduras siguen una curva de crecimiento como la que se muestra en la figura 2.10. En condiciones anaeróbicas, las levaduras utilizan los azúcares fermentables como fuente de energía, lo que permite el aumento de la biomasa al interior del fermentador, con la consecuente producción de etanol y dióxido de carbono. Después de un tiempo se llega a una

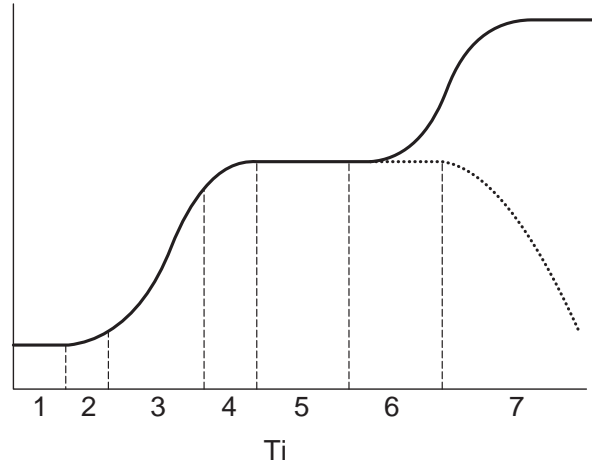


Figura 2.10: Crecimiento de la levadura en cultivo batch. El medio de cultivo contiene azúcares fermentables como fuente principal de carbono. Las etapas indicadas corresponden a: 1: latencia, 2: aceleración del crecimiento, 3: fase de crecimiento exponencial, 4: desaceleración del crecimiento, 5: Fase estacionaria, 6: Etapa de crecimiento diáuxico, 7: segunda fase de crecimiento en presencia de oxígeno (línea sólida) o muerte celular en ausencia de oxígeno (línea punteada). Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

fase estacionaria, donde no se observa un aumento en la biomasa del fermentador, para dar paso después a la muerte de las levaduras debido al agotamiento de los azúcares fermentables en el equipo. Las levaduras inactivas suelen decantar, ubicándose en la zona inferior de los equipos de fermentación.

Las condiciones de operación de la fermentación dependen principalmente de la levadura utilizada. Cervezas *ale* utilizan temperaturas de fermentación sobre los 18°C, mientras que las *lagers* entre 7°C y los 15°C como máximo. Lo anterior trae como consecuencia una diferencia en los tiempos de fermentación entre *ales* y *lagers*; las cervezas *ales* fermentan en tiempos entre 3 a 5 días, mientras que para *lagers* se extiende por sobre los 10 días debido al metabolismo reducido de las levaduras por las bajas temperaturas [11, 12, 29]. También, para las cervezas *ale*, las altas temperaturas provoca la producción de alcoholes de mayor peso molecular y ésteres, haciendo que éstas posean sabores más complejos que las *lagers* [11, 13].

Finalmente, el proceso cervecero termina con la maduración. Durante la maduración se produce la sedimentación de compuestos involucrados en propiedades no deseadas en la cerveza, como por ejemplo, turbidez y presencia de sabores desagradables. El proceso de maduración suele tomar tiempos de 2 semanas, aunque en algunos casos puede extenderse por meses [11]. Las levaduras sedimentadas son retiradas de la cerveza previo a la maduración. Sin embargo, es posible encontrar levaduras en suspensión, las cuales pueden desarrollar una “segunda fermentación” durante la maduración, consumiendo azúcares fermentables remanentes y produciendo la gasificación de la cerveza. En caso que la gasificación sea baja, suele agregarse dióxido de carbono a la cerveza antes de su envasado [11].

## 2.4. Planta Piloto de cervezas y extractos de Maltexco

A mediados del año 2015, Maltexco terminó la construcción de una Planta Piloto dentro de la planta de extractos ubicada en Temuco, Región de la Araucanía. La planta piloto está orientada a la fabricación de extractos de malta y cerveza, principalmente, debido a las similitudes encontradas en ambos procesos productivos.

La planta piloto cuenta con servicios de agua fría, caliente, vapor y refrigerante, siendo estos 2 últimos utilizados en el control de temperatura de parte de los equipos presentes en la planta. En cuanto a los equipos, estos se enlistan a continuación:

### Macerador

El macerador consiste en un estanque agitado axialmente, con una capacidad de 50 litros. Cuenta con una chaqueta calefactora que utiliza vapor proveniente de las calderas de la planta de extractos de Maltexco, lo que permite regular la temperatura del mosto durante la etapa de maceración, permitiendo así la realización de maceraciones escalonadas en la planta piloto. Dadas las características del equipo, éste también puede utilizarse en la cocción del mosto previa a la fermentación. La temperatura al interior del equipo es medida por medio de una termocupla ubicada en la zona superior del macerador. El proveedor del macerador fue Reyne Ltda.



Figura 2.11: Macerador de la planta piloto.



## Filtro vertical

El filtro presente en la planta piloto corresponde a un filtro vertical, de capacidad de 50 litros. Posee una malla, la cual retiene el lecho filtrante, un sistema hidráulico de elevación, lo que permite retirar el bagazo una vez finalizada la filtración y una entrada de aire comprimido, el que puede ser utilizado para aumentar la presión al interior del equipo, intentando emular los sistemas de compresión de los filtros de mosto industriales. El filtro vertical fue fabricado por la empresa SDM Steel Ltda. También posee un estanque receptor, construido también por SDM Steel.



Figura 2.12: Filtro vertical de la planta piloto. A la izquierda, el filtro listo para ser utilizado. A la derecha, alzamiento de la carcasa superior para la remoción de la malla del filtro.

## Estanque *whirlpool*

La planta piloto cuenta con un estanque *whirlpool* para remover el *trub* generado durante la etapa de cocción de la cerveza. Tiene una base cónica de 80° aproximadamente, y cuenta con una línea de entrada tangencial a la superficie del equipo y 3 salidas, 2 de las cuales se pueden utilizar para recuperar el mosto hervido a distintas alturas del equipo, mientras que la tercera es para descartar el producto a piso. También posee una mirilla ubicada en la zona superior del equipo. Al igual que el filtro vertical, el estanque *whirlpool* fue fabricado por la empresa SDM Steel Ltda.



Figura 2.13: Estanque *whirpool* de la planta piloto.

## Concentrador

La planta piloto cuenta también con un concentrador rotatorio que es utilizado en los procesos de elaboración de extracto de malta, no así en el proceso cervecero. Permite elaborar concentrados hasta una concentración de hasta 70°Brix. A diferencia de los otros equipos, no existe una línea directa de alimentación hacia el concentrador.

## Fermentadores

En la planta piloto existen 4 fermentadores, con una capacidad aproximada de 40 litros cada uno. Cuentan con una chaqueta que permite el ingreso de refrigerante para regular la temperatura al interior de los equipos durante la etapa de fermentación y maduración de la cerveza. Los fermentadores poseen una termocupla en la zona media-inferior del equipo y un manómetro para medir la temperatura y presión dentro del equipo, respectivamente. Los fermentadores pueden cerrarse herméticamente, evitando el ingreso de oxígeno al interior de estos. También poseen una purga de gas en caso que la fermentación produzca altos niveles de dióxido de carbono. Los 4 fermentadores fueron adquiridos a través de la empresa Minicervecería S.A..



Figura 2.14: Concentrador de la planta piloto.



Figura 2.15: Fermentadores de la planta piloto.

## Filtro prensa

A la salida de los fermentadores se encuentra un filtro prensa con su respectiva bomba. Cuenta de 10 placas y permite separar la cerveza sin gasificar de las levaduras remanentes en los fermentadores, previo a la etapa de gasificación del producto. El filtro prensa, al igual que las telas filtrantes del equipo fueron adquiridos a través de Minicervecería S.A..

## Gasificador

La planta piloto cuenta con un gasificador, el que permite el contacto entre  $CO_2$  comprimido y la cerveza, permitiendo la gasificación de esta. El gasificador posee una chaqueta enfriadora, con el fin de reducir la temperatura de la cerveza y aumentar la solubilidad del gas en el líquido. También cuenta con una piedra difusora, la que permite ingresar el dióxido de carbono durante el movimiento de la cerveza desde los fermentadores hacia el gasificador. Tanto el gasificador como la piedra difusora fueron adquiridas a través de Minicervecería S.A..



Figura 2.16: Gasificador de la planta piloto.

## Sistema de envasado

Finalmente, la empresa cuenta con un dispositivo de envasado isobárico de la cerveza. Éste permite el ingreso de gas a la botella a utilizar hasta igualar las presiones entre el gasificador y la botella, lo que permite la descarga de cerveza a la botella sin generación de espuma. Este dispositivo fue construido por el Área de mantención de la planta de extractos de Maltexco.

## Sistema de Control

La planta piloto cuenta con un sistema de control del tipo SCADA, que permite monitorear y controlar las temperatura del macerador y de los 4 fermentadores. Se regula la entrada de vapor y refrigerante a los equipos por medio de válvulas neumáticas ON/OFF. Cada uno de

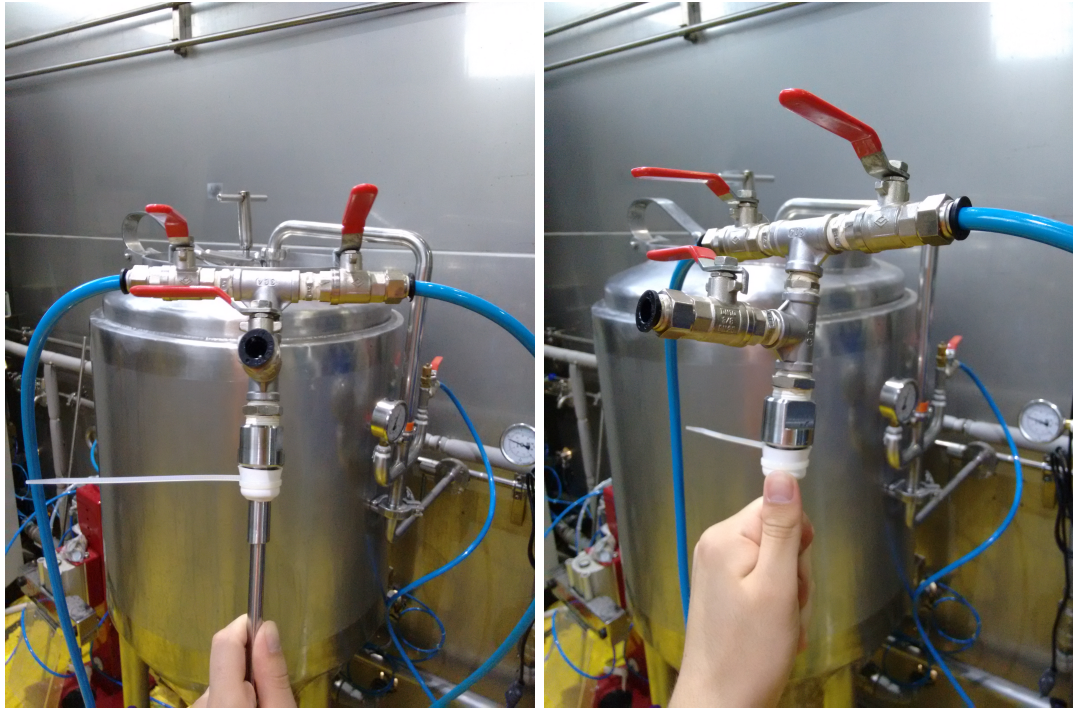


Figura 2.17: Sistema de envasado de la planta piloto. La zona inferior del equipo se inserta en botella, mientras que las 2 válvulas laterales regulan el flujo de gas y cerveza hacia la botella. La válvula central permite despresurizar la botella, lo que provoca la descarga de cerveza en la botella.

estos equipos posee esclavos Wago, utilizando el estándar de comunicación de Profibus DP, los que se comunican con el tablero central conformado por un CPU Siemens S7 317 2DP. El CPU aloja el software Winlog Pro W-R/X 65536 Tags. La alimentación de vapor proviene desde las calderas de la planta de extractos de Maltexco, mientras que el refrigerante, que corresponde a una mezcla glicol-agua al 60 %, proviene de un sistema de refrigeración construido a partir de un congelador horizontal Whirpool WHE3933, el cual contiene 2 bombas al interior de él, y un compresor extra para aumentar la remoción de calor.

# Capítulo 3

## Metodología

En la figura 3.1 se un esquema de la metodología seguida durante el trabajo en Maltexco. Las actividades se detallan a partir de la página siguiente.

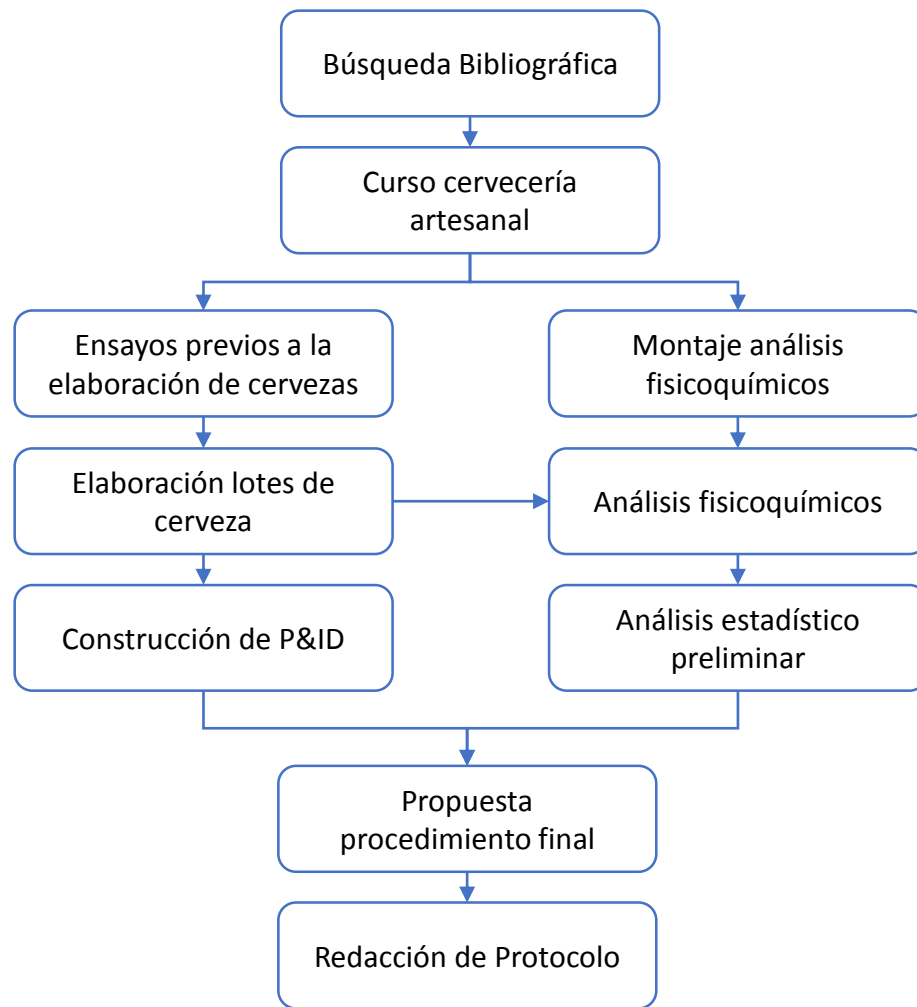


Figura 3.1: Esquema del proceso realizado en el trabajo de memoria.

### 3.1. Búsqueda bibliográfica

El trabajo comenzó con la búsqueda bibliográfica de información del proceso cervecero, tales como materias primas, etapas de la elaboración de cervezas, industria cervecera y cervecería artesanal.

### 3.2. Curso de elaboración de cerveza artesanal

Otra actividad realizada durante las primeras semanas fue el curso básico de elaboración de cerveza artesanal dictado por Cervecerías Prost SpA. El curso fue dictado por Matías Catrileo Cifuentes y se abordaron temas como estilos de cerveza, sanitizado, proceso productivo, evaluación sensorial y errores comunes. También se entregaron herramientas para la estimación del grado alcohólico de las cervezas y para la estimación del amargor entregado a la cerveza en función de la masa y el tiempo de cocción de los lúpulos.

### 3.3. Montaje de los análisis fisicoquímicos

A partir de la información recopilada durante la búsqueda bibliográfica, se decidió someter a 7 análisis las cervezas obtenidas durante el trabajo en Maltexco. Los 7 análisis son:

**Grado alcohólico:** Destilación de la cerveza para separar el etanol del resto de los constituyentes y obtener el contenido de alcohol en volumen midiendo la densidad del destilado. La destilación se realizó utilizando un *kit* de destilación de laboratorio, mientras que la densidad del destilado fue medida usando el densímetro Anton Paar DMA58 del laboratorio de control de calidad (ver figura 3.2).

**Color:** Medición espectrofotométrica de la cerveza, utilizando el procedimiento propuesto por la EBC, que consiste en la medición a 430 nm, utilizando el espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 25 del laboratorio de control de calidad.

**Viscosidad:** Medición de la viscosidad basado en la Ley de Stokes, donde se determina el tiempo requerido por una bola sumergida en el fluido a estudiar para avanzar una distancia conocida. Se utilizó el viscosímetro tipo Höppler atemperado a 20°C del laboratorio de control de calidad (ver figura 3.2).

**Amargor:** Extracción líquido-líquido de los  $\alpha$ -ácidos de la cerveza hacia un solvente orgánico (isooctano) para luego determinar su concentración espectrofotométricamente a una longitud de onda de 280 nm. Se utilizaron la centrífuga Universal 16 de Hettich y el espectrofotómetro Lambda 25 de Perkin Elmer para la evaluación del amargor de las cervezas.

**Estabilidad de espuma:** Determinación del tiempo de residencia de una burbuja de cerveza por medio de correlaciones empíricas al medir volúmenes de espuma generada al

verter la cerveza sobre un embudo de decantación.

**pH:** Medición del pH de las cervezas usando el pHmetro de sobremesa HI2223 de Hanna Instruments, presente en el laboratorio de control de calidad (ver figura 3.2).

**Turbidez y tendencia a enturbiar:** Medición de la turbidez de la cerveza por espectrofotometría a una longitud de onda de 700 nm. Forzamiento de la turbidez al agregar sulfato de sodio.

De los 7 análisis mencionados anteriormente, los 6 primeros se encuentran documentados por distintas asociaciones o entidades, como por ejemplo la Comisión Cervecera Europea (EBC), o la Sociedad Americana de Químicos Cerveceros (ASBC, de sus siglas en inglés), mientras que el sexto, el análisis de turbidez y tendencia a enturbiar fue propuesto durante el trabajo de memoria debido a la no disponibilidad en la empresa de un equipo encargado de medición de turbidez. Cada uno de los análisis de encuentra detallado en el Anexo F.

Los análisis fueron utilizados en primera instancia con las muestras obtenidas de la elaboración del lote de prueba y con cervezas disponibles en el mercado para detectar a tiempo problemas o dificultades previo a la evaluación de los lotes utilizados para la definición del procedimiento final de elaboración de cervezas.

## 3.4. Ensayos previos a la elaboración de los lotes de cervezas

En paralelo con la definición y montaje de los análisis fisicoquímicos descritos anteriormente, se realizaron una serie de ensayos previos, los cuales se detallan a continuación:

### 3.4.1. Elaboración de lote de prueba

Al comienzo del trabajo en la planta piloto de Maltexco se fabricó un lote de 4 batches de cerveza, denominado como “lote de prueba”, con el fin de conocer el funcionamiento de ésta. Las cervezas fabricadas en este lote fueron utilizadas para validar y poner a prueba los análisis fisicoquímicos propuestos para el estudio del producto terminado. Los equipos presentes en la planta piloto, y utilizados para la elaboración de los lotes de cerveza son los descritos en la sección 2.4. En este lote se utilizaron 4 tipos de malta distintos: Maltas *Pilsen* y *Pale Ale* de Patagonia Malt y Castle Malting, siguiendo un proceso productivo según la información recopilada hasta la fecha, que consistió en:

- Masa de cebada malteada: 10 kg.
- Volumen de agua: 50 L.
- Masa de *pellets* de lúpulo: 60 g.
- Masa de levadura deshidratada: 18 g.
- Proceso productivo descrito en la tabla 3.1.



Tabla 3.1: Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la fabricación del lote de prueba.

Etapa	Características
Molienda	Según molino de planta de extractos de Maltexco. Apertura de malla de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C
Filtración	Sin recirculación. Aumento de presión a 0,6 bar. Lavado de torta hasta que la concentración de sólidos disueltos del mosto a la salida del filtro sean igual o inferior a 3° Brix.
Cocción	60 min. Adición de 30 g de lúpulo para amargar al comienzo del proceso. Adición de 30 g de lúpulo de sabor a los 30 min iniciado el proceso.
Clarificación	10 min en recirculación del mosto en el equipo.
Fermentación	2 semanas a 12°C. Levadura de fermentación baja.
Maduración	2 semanas a 0°C.
Gasificación	No se realizó

Durante todo el proceso productivo se midió la gravedad del mosto en grados Brix utilizando un refractómetro Hanna presente en el laboratorio de control de calidad de Maltexco.

### 3.4.2. Tiempos de fermentación a escala laboratorio

Se realizaron ensayos en laboratorio con el fin de estimar los tiempos de fermentación de las levaduras *lager*, para explorar una alternativa de disminución de los tiempos en la etapa de fermentación en la planta piloto. Se siguió un proceso productivo similar al utilizado en la elaboración del lote de prueba, pero ajustado a escala laboratorio:

- Masa de cebada malteada: 100 g.
- Volumen de agua: 500 mL.
- Sin adición de lúpulo.
- Masa de levadura deshidratada: 0,5 g.
- Proceso productivo descrito en la tabla 3.2.
- Seguimiento del proceso productivo en función de los azúcares extraídos (medición de los grados Brix).
- Seguimiento de la fermentación en función de la densidad de la cerveza verde.

La molienda fue realizada utilizando el molino de discos para laboratorio DLFU, de Buhler (ver figura 3.2), del laboratorio de calidad de la planta Talagante de Maltexco. Se realizaron 4 ensayos simultáneos. La densidad fue medida cada día en la mañana (a excepción de los fines de semana) utilizando un densímetro Anton Paar DMA 58 presente también en el laboratorio de control de calidad. El sistema de regulación de temperatura fue la utilización de un recipiente hermético aislante (*cooler*) de 32 litros, marca Wenco.

Tabla 3.2: Condiciones de operación del proceso productivo seguido en los ensayos de laboratorio.

Etapa	Características
Molienda	Utilización del molino del laboratorio de calidad. Apertura de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C
Filtración	Sin recirculación. Aumento de presión a 0,4 bar.
Cocción	60 min.
Clarificación	Sin clarificación.
Fermentación	Hasta no observar variación en la densidad. Temperatura de 15°C aproximadamente.
Maduración	Sin maduración.
Gasificación	Sin gasificación.

### 3.4.3. Pruebas y ensayos en equipos de la planta piloto

Se realizaron pruebas en 4 de los equipos presentes en la planta piloto con el fin de estudiar cómo afectaban pequeños cambios en las condiciones de operación, para proponer mejoras y luego ser aplicadas y descritas en el protocolo final de elaboración de cervezas.

#### Efecto de la molienda en la maceración y filtración

La primera prueba fue el efecto de la molienda del grano en la maceración y filtrado del mosto. Debido a que el grano de malta debe pasar por una etapa de molienda para facilitar la extracción de azúcares, se realizaron dos moliendas distintas de malta, una usando las características del molino utilizado en el proceso de elaboración de extractos de malta de Maltexco, y otro en uno de los molinos de laboratorio de la empresa, simulando la molienda usada en la industria cervecera artesanal. La diferencia principal entre estos dos tipos de molienda es la apertura de la malla del molino, siendo 2,5 mm para la molienda en el molino de la planta de extractos y 10 mm para el molino de laboratorio.

El procedimiento seguido para este ensayo se describe a continuación:

1. Moler 10 kg de malta, específicamente *Pale Ale* de Patagonia Malt, utilizando el molino de discos para laboratorio DLFU, de Buhler (ver figura 3.2).
2. Agregar 50 litros de agua al macerador de la planta piloto.
3. Agregar al macerador los 10 kg de malta molida.
4. Macerar siguiendo un proceso de maceración escalonada:
  - 20 min a 50°C
  - 20 min a 60°C
  - 60 min a 70°C
  - 5 min a 80°C
5. Prueba de sacarificación o prueba de yodo: Tomar con un vaso precipitado de 100 ml una muestra del macerador (no más de 10 ml) y agregar una gotita de solución yodada. El yodo forma complejos con las cadenas de amilopectina, el que posee una coloración azul. Si el yodo cambia de rojo/anaranjado a azul, se dice que la malta no sacarificó.

6. Medir la gravedad del mosto utilizando el densímetro de triple escala y registrar.
7. Enviar el contenido del macerador hacia el filtro vertical.
8. Ingresar aire comprimido al filtro para tener una diferencia de presión de 0,6 bar.
9. Registrar el tiempo que demora la filtración.

Por cada tipo de molienda se realizan 4 ensayos para luego ser comparados.

### **Enfriado del mosto por el intercambiador de calor de placas paralelas**

La segunda prueba por equipo fue el estudio de la capacidad de remoción de calor del intercambiador de placas paralelas de la planta piloto. Dado que la fermentación requiere que la inoculación de las levaduras sea inferior a 26°C para evitar la formación de compuestos oxidados, se estudió la temperatura del fluido caliente a la salida del intercambiador de calor. Este estudio se realizó utilizando agua caliente en vez de mosto hervido, para evitar la pérdida innecesaria de producto para llevar a cabo el análisis. El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Recolectar agua en el macerador de la planta piloto (aproximadamente 50 litros) y llevar a hervir.
2. Enviar el contenido del macerador hacia el filtro, para luego caer en el tanque de recepción.
3. Encender la bomba de recirculación, para enviar el agua hacia el *whirpool*.
4. Recircular el contenido del *whirpool* por 10 minutos.
5. Paralelamente, encender la bomba de drenaje y abrir el paso de agua fría (flujo frío) por el intercambiador de calor.
6. Pasado los 10 minutos de recirculación, enviar el contenido del *whirpool* al intercambiador. Se fija el flujo al valor (o a la posición de la válvula) que se quiere estudiar.
7. Medir la temperatura del fluido a la salida del intercambiador de calor utilizando un termómetro de mercurio.

De los puntos descritos anteriormente, se realizan los 4 primeros con el fin de emular la pérdida de temperatura que sufre el mosto al pasar desde el macerador hacia el *whirpool* después del proceso de hervido.

La válvula que regula el flujo desde el *whirpool* posee 4 “posiciones” fijas, donde la posición 0 corresponde a la válvula cerrada y la posición 3 a la válvula completamente abierta. El proceso se repite para las 3 posiciones donde la válvula está abierta.

## **3.5. Elaboración de los lotes de cerveza**

Se elaboraron 3 lotes de cerveza de 4 batches cada uno, con el fin de poner a prueba distintas alternativas de proceso productivo, y para ayudar a definir el procedimiento requerido por la empresa.

La malta utilizada fue *Pale Ale*, perteneciente a Patagonia Malt. Se utilizó malta de los dos primeros batches que ha producido Maltexco. Los lúpulos utilizados fueron 3: *Apollo*, *Cascade* y *Fuggles*, todos pertenecientes a la empresa belga Castle Malting, los que fueron adquiridos a través de la empresa chilena Minicervecería S.A.. En cuanto a las levaduras, se utilizaron 2 cepas de *S. cerevisiae*, una para la elaboración de cervezas *lager* y otra para *ale*, pertenecientes a AB Mauri y también adquiridas a través de Minicervecería S.A. Las características de las maltas, lúpulos y levaduras se presentan en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente.

El proceso de elaboración de cada batch de cerveza en la planta piloto tomó entre 2 a 4 semanas. Las etapas previas a la fermentación (maceración, filtración, cocción, clarificación y enfriado) sólo toman aproximadamente 8 horas, mientras que la fermentación y la maduración se pueden extender hasta 2 semanas cada una.

Se definió que las cervezas a elaborar estarían basadas en *Pilsen*, representando a las cervezas *lager*, y una *Blonde Ale*, representando a las cervezas *ale*, acotando así los valores de la gravedad específica del mosto previo a la fermentación, o las unidades de amargor (IBU) de la cerveza, entre otros parámetros (Tabla 3.3).

Previa a cada etapa se midió la gravedad del mosto para determinar la tasa de inoculación de levaduras y la masa de lúpulo para lograr los IBUs requerido para cada cerveza. La masa de lúpulo requerida fue estimada según el procedimiento propuesto por Catrileo durante el curso de Cervecería Artesanal de Cervecerías Prost SpA, y la masa de levadura requerida fue calculada según lo indicado por el *toolbox* presente en la página web Brewtoad.com. Ambos métodos son explicados en el Anexo G.

Tabla 3.3: Estadísticas vitales de cervezas tipo *Pilsen* y *Blonde Ale*. Fuente: BJCP, 2008. [20].

<b>Estadísticas vitales</b>	<b>Pilsen</b>	<b>Blonde Ale</b>
Gravedad original (OG)	1.044 - 1.050	1.038 - 1.054
Gravedad final (FG)	1.008 - 1.013	1.008 - 1.013
Color EBC	4 - 8	6 - 12
Amargor (IBU)	25 - 45	15 -28
Grado alcohólico	4,4 % - 5,2 %	3,8 % - 5,5 %

Tabla 3.4: Características de las maltas utilizadas para la elaboración de los lotes de cerveza. Información proporcionada por el Área de Calidad de Maltexco. Las descripciones de las características pueden encontrarse en el Anexo B.

<b>Característica</b>	<b>Batch 1</b>	<b>Batch 2</b>
Humedad	4,3 %	4,6 %
Color EBC	6,0	11,5
Color EBC mosto hervido	8,7	16,5
Extracto fino	78,7 %	80,5 %
FAN	176 mg/100g	155 mg/100g
Índice de Kolbach	45,3 %	39,8 %
Porcentaje de Proteína	9,6 %	10,5 %
Viscosidad Mosto congreso	1,56 cP	1,75 cP

Tabla 3.5: Características de los lúpulos utilizados para la elaboración de los lotes de cerveza. Fuente: Castle Malting, 2016 [30].

<b>Característica</b>	<b>Apollo</b>	<b>Cascade</b>	<b>Fuggles U.K.</b>
Origen	USA	UK - NZ	UK
Uso principal	Amargor	Aroma	Aroma
Contenido de $\alpha$ -ácidos	15 % - 19 %	6 % - 8 %	3 % - 6 %
Contenido de $\beta$ -ácidos	5,5 % - 8,0 %	5,0 % - 5,5 %	2,0 % - 3,0 %
Aromas	Cítrico	Cítrico	Herbal

Tabla 3.6: Características de las levaduras utilizadas en la elaboración de los lotes de cerveza. Fuente: AB Mauri, 2016 [31].

<b>Característica</b>	<b>Lager 497</b>	<b>Ale 514</b>
Microorganismo	<i>S. cerevisiae</i>	<i>S. cerevisiae</i>
Tipo de fermentación	Baja	Alta
Rango de temperatura	10°C - 15°C	20°C - 32°C
Tiempo promedio de fermentación	5 - 6 días	3 - 7 días
Células viables	$2 \cdot 10^5$ células/g.	$2 \cdot 10^5$ células/g

El primer lote de cervezas elaborado en la planta piloto consistía en 2 batches de cerveza *lager* y 2 batches de cerveza *ale*. Se impuso que la gravedad original de los mostos estuvieran dentro del rango indicado en la tabla 3.3. Las condiciones de operación para este lote se muestran en la tabla 3.7. Como se muestra, el proceso para la elaboración tanto para las cervezas *lager* como *ale* fue similar, variando sólo los IBU a lograr en cada tipo de cerveza y las temperaturas de fermentación.

Tabla 3.7: Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del primer lote de cervezas.

<b>Etapas</b>	<b>Características</b>
Molienda	Utilización del molino de la planta de extractos de Maltexco. Apertura de malla de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C. 5 min a 80°C.
Filtración	Recirculación por 10 minutos. Aumento de presión a 0,6 bar.
Cocción	60 min. 30 IBU para <i>lager</i> . 20 IBU para <i>ale</i> .
Clarificación	10 minutos en recirculación en el equipo.
Fermentación	1 semana. 15°C para <i>lager</i> . 22°C para <i>ale</i> .
Maduración	1 semana. 0°C.
Gasificación	8 horas.

El segundo lote de cervezas elaborado en la planta piloto consistió en 4 batches de cerveza *lager*. Al igual que para el primer lote se impuso que la gravedad original de los mostos estuvieran dentro del rango indicado en la tabla 3.3. Las condiciones de operación para este lote se muestran en la tabla 3.8.

El último lote de cervezas elaborado en la planta piloto consistió en 4 batches de cerveza *ale*, donde 2 de éstos contenían un 10 % de malta caramelo 110 L /290 EBC de Patagonia Malt. Se impuso que las características vitales de la cerveza estuvieran dentro de los rangos

Tabla 3.8: Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del segundo lote de cervezas.

<b>Etapa</b>	<b>Características</b>
Molienda	Utilización del molino de la planta de extractos de Maltexco. Apertura de malla de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C. 5 min a 80°C.
Filtración	Recirculación por 10 minutos. Aumento de presión a 0,6 bar.
Cocción	60 min. 30 IBU.
Clarificación	30 minutos en recirculación en el equipo. 30 minutos en sedimentación.
Fermentación	2 semanas. 12°C.
Maduración	2 semanas. 0°C.
Gasificación	8 horas. Gasificación del contenido de 2 batches simultáneamente.

indicados en la tabla 3.3. Las condiciones de operación para este lote se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Condiciones de operación del proceso productivo seguido para la elaboración del tercer lote de cervezas.

<b>Etapa</b>	<b>Características</b>
Molienda	Utilización del molino de la planta de extractos de Maltexco. Apertura de malla de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C. 5 min a 80°C.
Filtración	Recirculación por 10 minutos. Aumento de presión a 0,6 bar.
Cocción	60 min. 25 IBU.
Clarificación	30 minutos en recirculación en el equipo. 30 minutos en sedimentación.
Fermentación	2 semanas. 22°C.
Maduración	2 semanas. 0°C.
Gasificación	8 horas.

### 3.6. Análisis fisicoquímicos a las cervezas elaboradas

Tal como fue señalado en la sección 3.3, se definieron 7 procedimientos a aplicar sobre las cervezas elaboradas en la planta piloto para analizar sus características. Estos 6 análisis fueron aplicados a todos los lotes de cerveza fabricados, a excepción del lote de prueba, donde no se realizó la medición de estabilidad de espuma debido a que las cervezas no fueron gasificadas, lo que disminuye la formación de espuma al verter la cerveza. Cada una de estas pruebas fue realizada con sus respectivo duplicado para disminuir errores aleatorios asociados a los análisis.

### 3.7. Construcción de Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

Dado que no existe un diagrama que muestre los equipos ni la configuración de las cañerías presentes en la planta piloto, se decidió construir un diagrama de tuberías e instrumentación para tener un mayor conocimiento del funcionamiento de la planta, además de facilitar la utilización de esta.

El diagrama de tuberías e instrumentación fue construido utilizando el software AutoCAD 2015, de AutoDesk, bajo la licencia de estudiante que facilita a la Universidad de Chile. Este presenta todos los equipos utilizados en la planta piloto, incluyendo las líneas de alimentación, las válvulas que regulan los movimiento de flujo dentro de la planta y además los lazos de control del macerador y de los fermentadores. Este diagrama se adjunta en el Anexo J, en formato A2.

### 3.8. Análisis estadístico preliminar

Para estudiar la estandarización del proceso productivo seguido en la planta piloto se utilizaron gráficos de control de proceso, específicamente cartas de individuales, para evaluar las variables medidas tanto en la elaboración de las cervezas como en el producto ya envasado. Se utilizó el programa para análisis estadísticos Minitab 17, versión de prueba para estudiantes.

### 3.9. Redacción de protocolo de elaboración de cervezas

A partir de la información recopilada en las sesiones de fabricación de lotes se redacta el protocolo de elaboración de cervezas en la planta piloto, donde se describe el proceso a seguir para la elaboración de cervezas *lager* y *ale*, considerando los siguientes puntos:

- Objetivo del procedimiento.
- Alcances: Personas involucradas en la ejecución del procedimiento.
- Recursos y prohibiciones: Definición de EPPs, prohibiciones y riesgos.
- Antecedentes teóricos para la elaboración de cervezas.
- Descripción del producto esperado.
- Descripción del procedimiento.
- Referencias.
- Anexos.

La redacción del procedimiento de elaboración de cervezas se basó en protocolos ya existentes en la empresa, además guías presentes en internet propuestas por instituciones como Europarc-España [32] o 5Consultores [33].



**A. Densímetro triple escala**



**B. Molino de discos DFLU, Buhler**



**C. Espectrofotómetro Lambda 25, Perkin Elmer**



**D. Densímetro DMA 58, Anton Paar**



**E. Sistema de destilación**



**F. Centrífuga Universal 17, Hettich**



**G. pHmetro HI 2223, Hanna Instruments**



**H. Viscosímetro tipo Höppler, Haake**

Figura 3.2: Equipos e instrumentos utilizados durante el trabajo de memoria de título.



# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

### 4.1. Montaje de los análisis fisicoquímicos

#### 4.1.1. Validación de los análisis fisicoquímicos

Parte de los análisis propuestos para la evaluación de las cervezas elaboradas durante el desarrollo del trabajo de título fueron probados para asegurar la validez de los datos obtenidos. Para esto, se utilizaron cervezas disponibles en el mercado y se determinaron parámetros como el grado alcohólico, color, viscosidad y estabilidad de espuma. Los resultados se presentan en la tabla 4.1. Para la prueba se seleccionó la cerveza Carlsberg, que corresponde a una *Pilsen* Alemana, la cual debería tener parámetros similares a los obtenidos en los análisis a las cervezas elaboradas en la planta piloto. Parámetros como el grado alcohólico fueron obtenidos a partir de la información nutricional presente en el envase de la cerveza, mientras que los otros tres fueron obtenidos a partir de los valores típicos para cervezas pilsen según lo indicado por Briggs *et. al.* [11].

Se puede notar en la tabla 4.1 que los valores obtenidos al aplicar los procedimientos descritos en el Anexo F no varían demasiado con respecto a los valores esperados, por lo que permite asegurar los resultados de los análisis posteriores a las cervezas elaboradas en la planta piloto.

Tabla 4.1: Medición de grado alcohólico, color, viscosidad y estabilidad de espuma con sus respectivos valores esperados para una muestra de cerveza Carlsberg.

Parámetro	Valor esperado	Valor medido
Grado alcohólico	3,8 % <sup>(a)</sup>	3,6 ± 0,5 %
Color EBC	4 - 8 <sup>(b)</sup>	6,9 ± 0,2
Viscosidad	1,45 cP <sup>(c)</sup>	1,45 ± 0,5 cP
Estabilidad de espuma	> 130 s <sup>(c)</sup>	140 ± 3 s

Fuente: (a) Información nutricional del producto, (b) BJCP, 2008 [20], (c) Briggs *et. al.*, 2004. [11]

### 4.1.2. Propuesta de análisis de turbidez, turbidez forzada y validación

Debido a que no había en la empresa los instrumentos necesarios para realizar la medición de turbidez de las muestras de cerveza, se propuso un método alternativo para realizar tal análisis. Según lo que indica la Comisión de Análisis Cerveceros (MEBAK), la turbidez de la cerveza está relacionada con la absorbancia a 700 nm [19], por lo que se propuso medir espectrofotométricamente tal parámetro para luego ser comparado. Además, se propone una segunda medición, agregando una solución saturada de sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ) que induce la denaturación de proteínas, aumentando así la turbidez de la muestra.

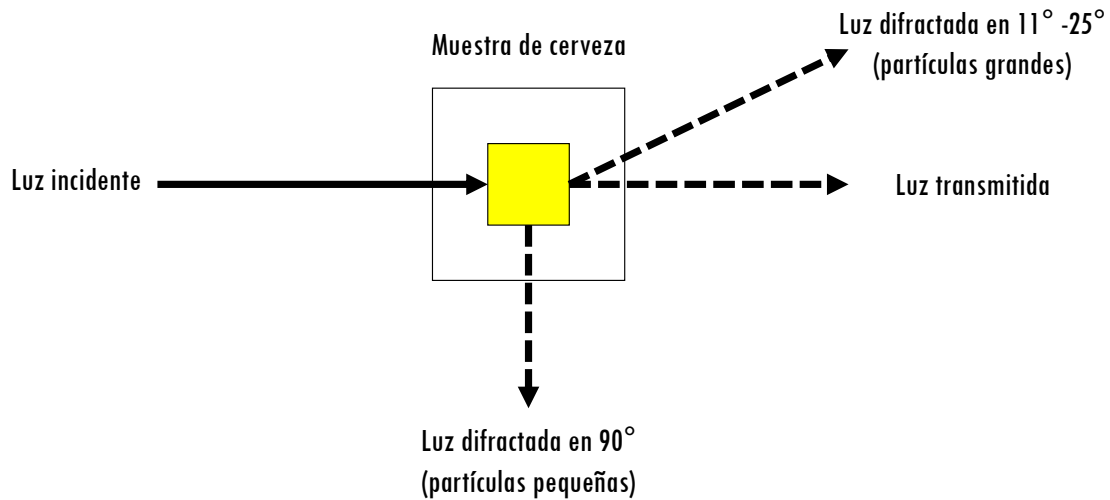


Figura 4.1: Esquema del funcionamiento de un turbidímetro para la medición de la turbidez de una muestra de cerveza. Imagen adaptada de Boulton, 2013 [15].

El método usual de análisis de turbidez se lleva a cabo en equipos llamados turbidímetros o nefelómetros, los que analizan la difracción de un haz de luz visible (típicamente entre 500nm y 1000 nm) a distintos ángulos, generalmente a  $90^\circ$  para la detección de partículas pequeñas en suspensión, y entre  $11^\circ$ - $25^\circ$  para la detección de partículas más grandes (Ver figura 4.1) [15].

El método propuesto se basa en que la luz difractada por la presencia de partículas en suspensión traerá como consecuencia una disminución en la intensidad de la luz transmitida. Un espectrofotómetro mide la relación entre la luz incidente ( $I_0$ ) y la luz transmitida ( $I_1$ ) según la ley de Beer-Lambert (ecuación 4.1). Por tal razón, si una muestra posee una mayor absorbancia que otra, quiere indicar que una mayor fracción de la luz incidente fue difractada por la presencia de partículas en suspensión, por lo que debería tener una mayor turbidez.

$$A = -\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (4.1)$$

Para la validación de este método de análisis de turbidez se utilizaron 4 cervezas disponibles en el mercado: Carlsberg (*Pilsen*), Presidente (*Pilsen*), Mestra Blond Ale (*Blonde Ale*) y Del

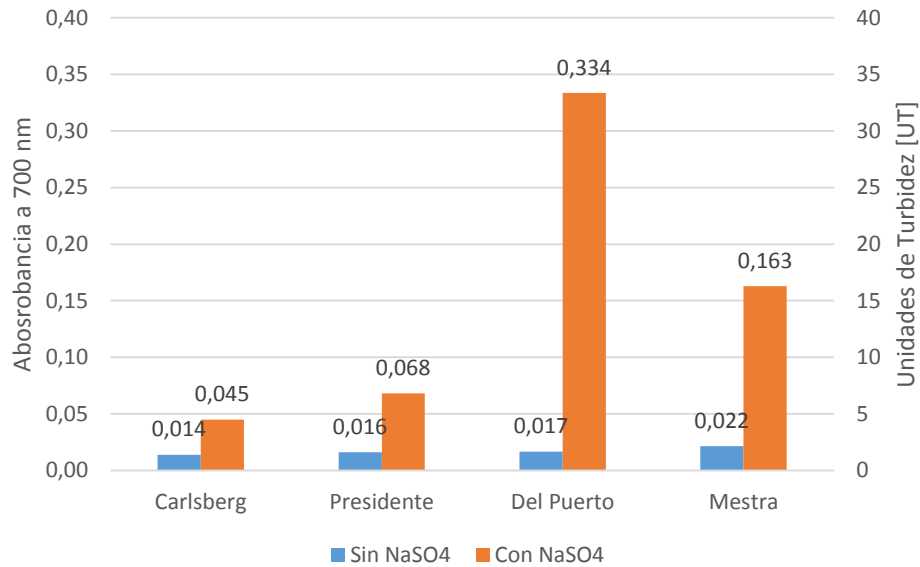


Figura 4.2: Medición de la absorbancia a 700 nm a cuatro cervezas con y sin adición de sulfato de sodio.

Puerto Rubia (*Blonde Ale*), las que fueron escogidas debido a sus similitudes con las cervezas a fabricar en la planta piloto y tener así un punto de comparación en la medición de turbidez.

En la figura 4.2 se presentan las mediciones de la absorbancia a 700 nm de las muestras, sin la adición de sulfato de sodio. Se puede notar que no existen muchas diferencias en los valores de absorbancia de las 4 muestras (0,014 - 0,022), lo que indicaría una baja turbidez. Sin embargo, tras la adición de sulfato de sodio a las muestras se observa un aumento en la absorbancia de todas las muestras, y que es mayor en las cerveza Mestra Blonde Ale y Del Puerto Rubia. Esto podría deberse al nivel de industrialización de las empresas encargadas de la producción de las cervezas Carlsberg y Presidente (Carlsberg y AB InBev respectivamente), a diferencia de las otras 2, que podría indicar en parte la utilización de equipos de fermentación, maduración y filtración menos eficientes que las primeras. Por lo que, según lo propuesto en el análisis de turbidez descrito anteriormente, cervezas como Mestra Blond Ale y Del Puerto Rubia tienen una mayor tendencia a enturbiar que otras cervezas como Carlsberg y Presidente.

Finalmente, para evitar trabajar con valores entre 0 y 1 en los análisis de turbidez, se propone la utilización de una “Unidad de Turbidez [UT]”, calculada como:

$$\text{Turbidez[UT]} = 100 \cdot E_{700}$$

donde  $E_{700}$  corresponde a la medición de absorbancia a 700 nm de la muestra.

## 4.2. Ensayos previos a la elaboración de los lotes de cerveza

### 4.2.1. Elaboración del lote de prueba

Como se mencionó en la sección 3.4.1 de la metodología, el fin principal de la elaboración del lote de prueba era conocer y familiarizarse con los equipos presentes en la planta piloto. Durante esta etapa se observaron las siguientes situaciones:

- El macerador puede ser utilizado para fabricar mosto utilizando 10 kg de malta y 50 litros de agua.
- De la maceración, se obtiene un mosto con gravedades que varían entre los 1,053 y 1,057.
- El proceso de lavado del bagazo durante la filtración puede presentar canalización (ver figura 4.3), lo que no permite la extracción de los azúcares remanentes en la torta filtrante y provoca la disminución de la gravedad del mosto.
- Sólo se pueden medir volúmenes al contenido del macerador, por lo que no se puede determinar el volumen de agua utilizado durante el lavado de la torta.
- El proceso de cocción puede realizarse en el macerador de la planta piloto sin dificultades, al igual que la fermentación.
- El sistema de refrigeración de los fermentadores no permitió alcanzar las temperaturas requeridas de 0°C para realizar la maduración de la cerveza.

De lo comentado anteriormente, se decidió no gasificar la cerveza y tomar muestras directamente de los fermentadores, para realizar, de todas maneras, parte de los análisis físico-químicos definidos durante el trabajo en Maltexco. Los resultados de los análisis y un mayor detalle de esta etapa del trabajo pueden encontrarse en el Anexo H.1.



Figura 4.3: Fotografías a la torta dormada durante la filtración de dos batches del lote de prueba. A la izquierda, una fotografía de la torta del batch P1, que utilizó malta *Pilsen Patagonia Malt*. A la derecha, una fotografía de la torta del batch P2, que utilizó malta *Pilsen Castle Malting*.

## 4.2.2. Tiempos de fermentación a escala laboratorio

Los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de desarrollo de Maltexco para estimar el tiempo de fermentación requerido por las levaduras de fermentación baja se presentan graficados en la figura 4.4. Se realizaron 4 ensayos, donde la densidad inicial del mosto a fermentar bordeaban los 1,050. Al cabo de 7 días se puede observar que la densidad de los mostos ya no disminuye significativamente, lo que es señal de que la fermentación de azúcares simples ha terminado.

Con los resultados anteriores, se da pie a utilizar en la primera propuesta de elaboración de cervezas, aplicada en la fabricación del primer lote, a considerar sólo una semana de fermentación tanto para las cervezas *lager* como *ale*, con el fin de reducir los tiempos totales de elaboración de cerveza. Si bien las fermentaciones de laboratorio utilizaron sólo levadura de fermentación baja, se presume que la fermentación con levadura *ale* tomaría menos tiempo, debido a que los tiempos de fermentación son menores, y que además se realiza a una mayor temperatura (22°C).

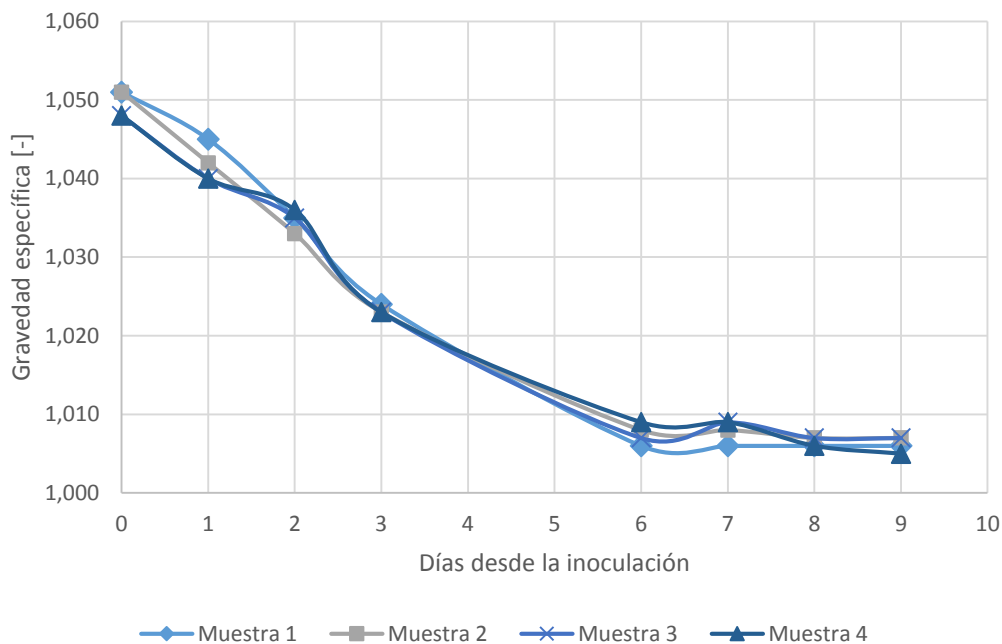


Figura 4.4: Evolución temporal de las fermentaciones realizadas en el Laboratorio de Desarrollo de Maltexco.

### 4.2.3. Pruebas y ensayos en equipos de la planta piloto

Como se mencionó en la sección de metodología, se realizaron pruebas en 4 de los equipos presentes en la planta piloto de Maltexco para ayudar a definir las condiciones de operación y optimizar parte del proceso productivo. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos se muestran a continuación.

#### Efecto de la molienda del grano en la maceración y filtración

Los resultados de los ensayos de maceración y filtración usando 2 moliendas distintas descritos en la sección 3.4.3 de la metodología son presentados en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Extracción de azúcares (en función de la gravedad específica del mosto) utilizando dos moliendas de malta distintas.

Molienda	Sacarificación	Gravedad Específica	Tiempo de filtración [min]
Fina (2,5 mm)	Sí	$1,051 \pm 0,001$	$60 \pm 4$
Gruesa (10 mm)	Sí	$1,047 \pm 0,001$	$53 \pm 2$

Como se observa en la tabla 4.2, la molienda fina permite obtener un mosto con una concentración de sólidos disueltos ligeramente mayor que al utilizar la molienda fina. Si bien en todos los ensayos la prueba de yodo fue positiva, se presume que la diferencia en la extracción de azúcares se debe a la distinta exposición de los gránulos de almidón a las enzimas, además de su estado de desagregación debido a la molienda.

Con respecto a los tiempos de filtración, en la tabla 4.2 se observa que los ensayos realizados con una molienda fina de malta poseen tiempos de filtración más altos que los que utilizan una molienda gruesa. Esto se debe a que las moliendas finas forman lechos filtrantes más compactos, dificultando el movimiento del fluido a filtrar, en este caso, el mosto [11, 34]. Sin embargo, la diferencia de tiempos no supera los 10 minutos aproximadamente, por lo que, sumado a los resultados de extracción de azúcares, es más conveniente utilizar la molienda fina en el proceso de elaboración de cervezas en la planta piloto de Maltexco.

La industria cervecera a pequeña escala utiliza moliendas gruesas para la elaboración de cerveza, debido a la dificultad que tendrían los pequeños cerveceros al separar el mosto de los granos sin la ayuda de un equipo que pueda vencer la resistencia al flujo generada por el lecho filtrante [35]. Por otro lado, la industria cervecera a gran escala utiliza moliendas aún más finas [11], por lo que, eventualmente, podrían evaluarse moliendas inferiores a 2,5 mm de apertura de malla en la planta piloto, con sus respectivas pruebas en el filtro vertical presente en ésta.

## Enfriado del mosto por el intercambiador de placas

Una variable a estudiar fue la temperatura de salida del mosto al ser enfriado por el intercambiador de calor de placas paralelas, debido a que la temperatura a la que se realiza la inoculación de las levaduras previa al proceso fermentativo puede afectar negativamente al desarrollo de sabores de la cerveza.

El flujo fue regulado en función de una de las válvulas que regula el paso de producto desde la bomba de recirculación hacia el intercambiador de calor, por lo que los resultados se presentan en función de la apertura de ésta. La válvula posee 4 posiciones fijas, separadas entre sí por un ángulo de  $30^\circ$ . Se denominó como “posición 0” la posición de la manilla cuando la válvula está completamente cerrada, mientras que la “posición 3” indica que la válvula está completamente abierta. La temperatura de salida del producto en función de la apertura de la válvula se presenta en la tabla 4.3:

Tabla 4.3: Temperatura de salida del producto a distintos flujos.

Posición de la válvula	Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]
1 (Poco abierta)	-
2 (Medianamente abierta)	$23 \pm 1$
3 (Completamente abierta)	$30 \pm 1$

Como se muestra en la tabla 4.3, a medida que aumenta el flujo de fluido caliente, aumenta la temperatura de salida del intercambiador de calor, lo que se debe al menor tiempo de residencia del fluido caliente en el intercambiador. Lo ideal sería utilizar aquel flujo que disminuya al máximo la temperatura, pero al utilizar la primera posición de la válvula, la bomba no es capaz de generar la presión suficiente para enviar el mosto al intercambiador. Por lo mismo, se propone usar la segunda posición dado que la temperatura de salida allí es de  $23^\circ\text{C}$  aproximadamente, menor a la temperatura crítica para la inoculación de levaduras ( $26^\circ\text{C}$ ) que favorece la oxidación de los compuestos generados durante la fermentación [11, 13, 14, 35].

### 4.3. Elaboración y análisis de los lotes de cerveza

Ya montados los análisis fisicoquímicos para la evaluación de los lotes de cerveza, se definieron cuáles serían los resultados esperados para el producto final del proceso productivo, los que se muestran en la tabla 4.4. Parámetros como el grado alcohólico, el color y el amargor de la cerveza fueron determinado a partir de la información entregada por el manual BJCP para la evaluación de cervezas [20]; viscosidad según lo indicado por autores como Briggs *et. al.* y Langstaff [11, 36]; estabilidad de espuma según Briggs *et. al.* [11]; pH según Gresser, Hughes y Baxter [37,38]. Para la turbidez, se definieron los valores máximos de absorbancia en función de los resultados obtenidos durante la validación de la propuesta de análisis descrito en la sección anterior.

Tabla 4.4: Rangos esperados para los resultados de los análisis fisicoquímicos de las cervezas elaboradas en la planta piloto de Maltexco.

<b>Análisis</b>	<b>Rangos esperados</b>
Grado alcohólico	4,4 % - 5,2 %
Color EBC	4 - 8
Amargor (IBU)	15 - 35
Viscosidad	1,45 - 1,65 cP
Estabilidad de espuma	> 130 s
Turbidez	< 3 UT
Turbidez forzada	< 10 UT
pH	4,0 - 4,7

#### 4.3.1. Primer lote de cervezas: Problemas durante la filtración

Siguiendo el proceso productivo descrito en la tabla 3.7 se fabricaron 4 batches de cerveza, los que siguieron el procedimiento para su elaboración hasta la etapa de fermentación, donde 2 fueron inoculados con levadura de fermentación baja (Batches L1 y L2), y los otros 2 con levadura de fermentación alta (Batches A1 y A2).

Tabla 4.5: Seguimiento del proceso de elaboración del primer lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco.

	<b>Batches</b>			
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>
Gravedad mosto dulce	1,049	1,052	1,052	1,053
Tiempo de filtración	37 min	27 min	33 min	34 min
Tiempo de lavado	6 min	2 min	2 min	3 min
Gravedad pre-cocción	1,041	1,042	1,046	1,046
Gravedad original	1,042	1,042	1,048	1,048
Volumen fermentador	≈ 45 L	≈ 45 L	≈ 40 L	≈ 40 L
Masa de inóculo	30 g	30 g	18 g	18 g
Gravedad final	1,010	1,010	1,013	1,014
Atenuación aparente	76 %	76 %	72 %	71 %



En la tabla 4.5 se muestra que el proceso de maceración para los 4 batches del primer lote entregó mostos con una similar concentración de azúcares y sólidos disueltos, debido a que no existen grandes diferencias en las densidades de los mostos. Sin embargo, al momento de la filtración ocurrieron problemas similares a los observados durante la elaboración del lote de prueba: la canalización en la torta filtrante formada. Al momento de realizar el lavado de la torta, el agua utilizada pasaba directamente desde el filtro hacia el estanque de recepción, sin extraer azúcares y disminuyendo la concentración de los mostos. Por esta razón, se decidió que para los batches A1 y A2, de cervezas *ale*, sólo se lavarían con 5 litros de agua en vez de 10, que era lo propuesto originalmente para el procedimiento. Como consecuencia, los dos batches de cerveza *lager*, L1 y L2, tienen una menor gravedad que los otros dos (1,042 versus 1,048). Sin embargo, ambos valores se encuentran dentro de los rangos aceptados para cervezas *Pilsen* y *Blonde Ale* (ver tabla 3.3).

En la misma tabla se puede observar que existe una diferencia en la masa de inóculo entre los batches de cervezas *lager* y *ale*, lo que se debe a que, para la fabricación de cervezas *ale*, se requiere aproximadamente la mitad de la masa de levadura utilizada en cervezas *lager*, bajo las mismas condiciones de gravedad y volumen de mosto [13].

Durante el período de fermentación no se observaron problemas ni en el sistema de refrigeración ni en el sistema de control de la planta piloto. Por el contrario, durante la maduración, ninguno de los fermentadores alcanzó los 0°C requeridos para la maduración de la cerveza. Los cuatro fermentadores operaban a distintas temperaturas (tabla 4.6), donde el cuarto fermentador, que se encuentra próximo al sistema de refrigeración, era aquel con una menor temperatura. Esto trae consecuencias en la cerveza ya envasada, las cuales son discutidas más adelante. También, durante la gasificación, la temperatura de la cerveza aumentaba debido a las altas temperaturas al interior de la planta de extractos de Maltexco. Este tema se discute más adelante en la sección 4.5.4.

Al realizar los análisis fisicoquímicos a las cervezas se obtuvieron los resultados de la figura 4.5. Los batches de cervezas *ale* A1 y A2 poseen un mayor contenido de alcohol que los batches *lager* L1 y L2, lo que se debe a la tasa de fermentación de las levaduras de fermentación alta versus las bajas, ya que las primeras tienen una cinética más rápida que las segundas, sumado a las temperaturas más altas de fermentación. Sin embargo, ni las cervezas *ale* ni *lager* alcanzaron los grados alcohólicos esperados para ambos tipos de cerveza, lo que difiere de lo obtenido en los ensayos de laboratorio descritos en la sección 4.2.2, probablemente por problemas de difusión en los fermentadores.

Para el análisis del color de la cerveza, todas los batches se encuentran fuera del rango esperado, ya que la malta utilizada, *Pale Ale* de Patagonia Malt, tiene un color de mosto hervido mayor que el que entregan maltas más pálidas, como la malta *pilsen*, que es la utilizada para la elaboración de los dos tipos de cerveza que sirvieron como guía para la definición de las características del proceso productivo.

El amargor de las cervezas se encuentra dentro de los rangos esperados, ya que fueron estimados los IBUs entregados por los lúpulos para determinar la masa requerida para el proceso. Como se mencionó en la tabla 3.7, la masa de lúpulo utilizada en la elaboración de las cervezas *lager* fue estimada para alcanzar los 30 IBUs, lo que no difiere de los resultados observados al realizar la medición de sustancias amargas. Para las cervezas *ale*, existen 5 IBUs

Tabla 4.6: Temperaturas de los fermentadores al final del proceso de maduración del primer lote de cervezas.

	<b>Batches</b>			
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>
Fermentador utilizado	1	2	3	4
Temperatura fermentador	12,3°C	9,8°C	5,2°C	3,1°C

de diferencia entre lo estimado (20 IBUs) y lo obtenido en el producto final (25 IBUs). Como los métodos de estimación de IBUs son sólo ajustes empíricos, es probable que el método utilizado por Catrileo, y expuesto en el curso de microcervecería de Prost no se ajuste de buena forma a las condiciones en las que fue llevado a cabo la cocción del mosto para las cervezas *ale*. De todas maneras, los resultados siguen dentro de los rangos esperados para las cervezas *ale*.

En el análisis de turbidez, se nota una clara diferencia entre los resultados para las cervezas *lager* y *ale*. Las primeras tienen valores más altos de unidades de turbidez, los que van disminuyendo hasta obtener 2 UT en las cervezas *ale*. Esto se debe a las diferencias en las temperaturas de maduración de los batches, presentes en la tabla 4.6. A temperaturas más bajas se favorece la sedimentación de las proteínas y levaduras en suspensión, lo que explicaría los bajos valores de turbidez. Sin embargo, al forzar la turbidez, los 4 batches aumentan sus índices a un valor similar.

Finalmente, con respecto a los resultados de estabilidad de espuma, ninguno de los batches alcanzó el valor requerido para considerar una buena retención de la espuma, mientras que para los valores de pH, los batches arrojaron valores similares, aunque sobre el límite superior esperado, lo que podría deberse a la baja atenuación de la cerveza, además de su baja carbonatación.

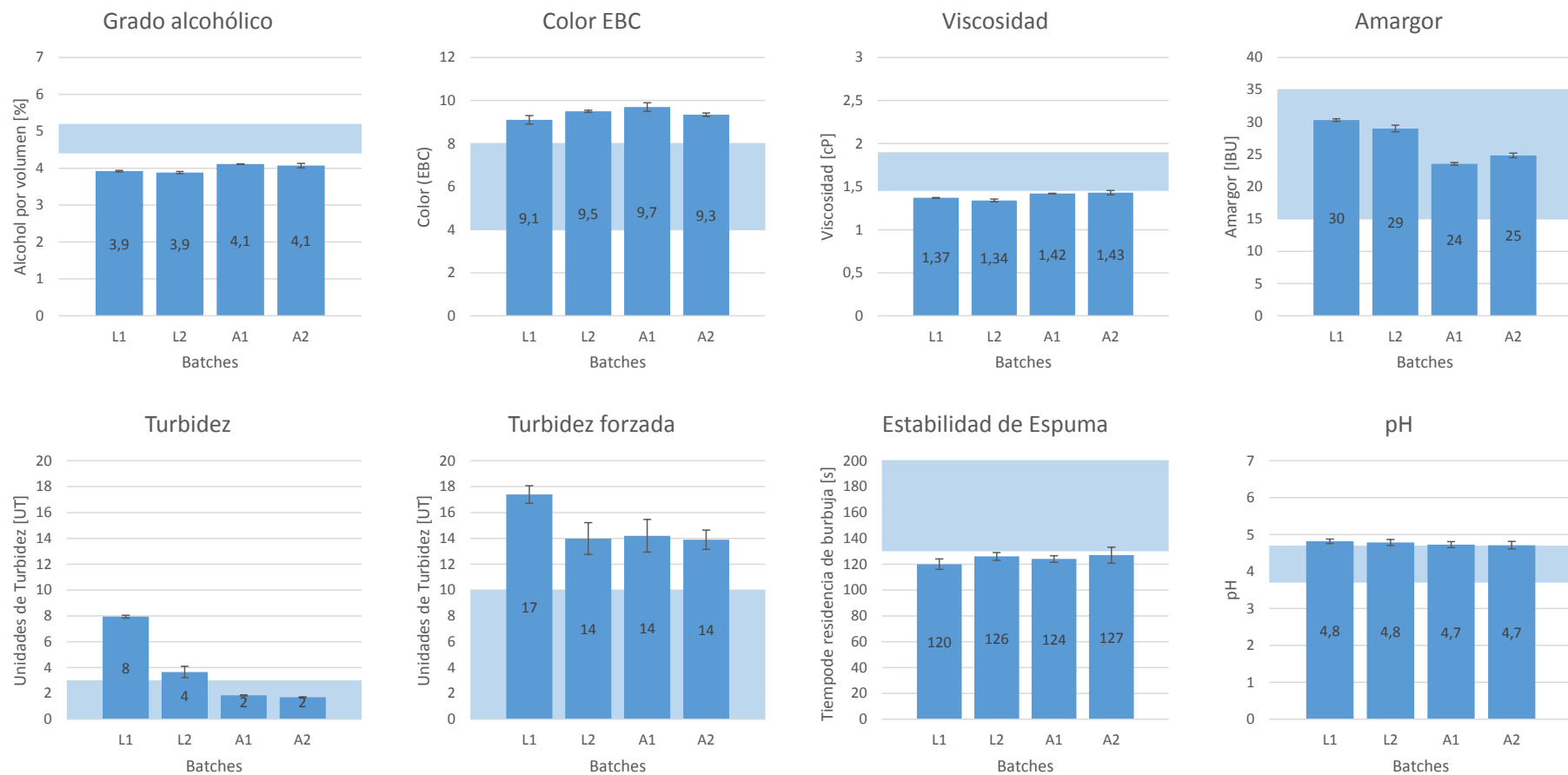


Figura 4.5: Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del primer lote. El bloque celeste indica el rango esperado para los resultados de los análisis. El detalle de los valores obtenidos se presentan en la tabla H.3 del Anexo H.3.

### 4.3.2. Segundo lote de cervezas: Fermentación extendida a dos semanas

Como se describió en la tabla 3.8, se fabricaron 4 batches de cerveza *lager*, donde el plan original era mezclar el contenido de 2 fermentadores en el gasificador para estudiar si existía un aumento en la gasificación de la cerveza.

Al momento de gasificar los batches, se observó que el contenido de los fermentadores N°1 y 2 estarían contaminados, debido a la presencia de sabores ácidos, además de una alta turbidez. Por esta razón, se decidió no mezclar estos 2 fermentadores, mientras que el contenido de los fermentadores N°3 y N°4 si se realizó. Los dos batches no mezclados fueron identificados como L3 y L4, y la mezcla de los otros dos batches como L5.

Según la tabla 4.7, la extracción de azúcares fue similar en los 4 batches elaborados, lo que se demuestra por los valores cercanos de gravedad del mosto dulce. Debido a los aumentos en los tiempos de fermentación, los valores de atenuación de densidad son mayores que los obtenidos en el primer lote, lo que indica un mayor consumo de azúcares por parte de las levaduras, y por ende, también un aumento en la concentración de etanol en la cerveza.

Debido al efecto de dilución ocurridos por el lavado de la torta, para la elaboración del segundo lote de cervezas no se realizó el proceso de lavado. Como consecuencia a esto, la gravedad original de los mostos es mayor que en los batches elaborados en el primer lote.

Durante la filtración, los batches L4 y L5 sufrieron el fenómeno de canalización, lo que redujo los tiempos para esta etapa, pero sin lograr una filtración adecuada, ya que era posible ver partículas en el mosto filtrado. En particular, como se muestra en la tabla 4.7 el batch L5 tuvo un tiempo de filtración de 15 minutos ya que gran parte del mosto dulce pasó a través del filtro sin pasar por la torta filtrante, y por la alta concentración de partículas en suspensión se debió descartar un volumen de 5 litros de sedimento formado por tales partículas, antes de la etapa de cocción del mosto.

Se presume que los problemas de canalización se generan por cambios bruscos en la presión interior del filtro, la que aumentó desde 0,1 bar a 0,6 bar en 1 minuto, por lo que para la elaboración de los lotes siguientes se tendría en consideración un aumento de presión de sólo 0,1 bar por minuto, 5 veces menor que el utilizado.

Al realizar los análisis fisicoquímicos a las muestras del lote 2, se obtuvieron los resultados presentes en los gráficos de la figura 4.6. Como era de esperar, el aumento en los tiempos de fermentación permitió obtener cervezas con una mayor graduación alcohólica, lo que ya ubica a las cervezas dentro del rango esperado para los batches.

El color de las cervezas se aleja bastante de los valores típicos para las cervezas tipo *Pilsen*, lo que se debe al color de la malta utilizada. En primer lugar, para la elaboración de este tipo de cervezas se utilizan maltas *Pilsen*, las cuales son más claras que las maltas *Pale Ale* utilizadas en la elaboración de los batches. Además, en particular, el color de mosto hervido de la malta utilizada (Batch 2 de *Pale Ale* Patagonia Malt) es de 16,5 en escala EBC (ver tabla 3.4), lo que explicaría el color de la cerveza cercano a 15 EBC.

Tabla 4.7: Seguimiento del proceso de elaboración del segundo lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco.

	<b>Batches</b>			
	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L5'</b>
Gravedad mosto dulce	1,054	1,053	1,053	1,053
Tiempo de filtración	67 min	27 min	15 min	62 min
Gravedad pre-cocción	1,054	1,053	1,053	1,053
Gravedad original	1,054	1,053	1,053	1,053
Volumen fermentador	45 L	40 L	35 L	48 L
Masa de inóculo	45 g	40 g	32 g	47 g
Gravedad final	1,010	1,010	1,012	1,012
Atenuación aparente	81 %	81 %	78 %	78 %

En el análisis de viscosidad, las cervezas se encuentran dentro de los rangos esperados tanto para *Pilsen* como *Blonde Ale*, al igual que el amargor, que es cercano a 30 IBU en los tres batches.

Al realizar los análisis de turbidez de las muestras, se puede notar el mismo fenómeno observado en la elaboración del primer lote de cervezas. Las cervezas elaboradas en los fermentadores 1 y 2 (L3 y L4) son mucho más turbias que las elaboradas en los fermentadores 3 y 4 (L5), debido a que estos últimos equipos alcanzan temperaturas más bajas durante la maduración que el resto de los fermentadores. También, otro fenómeno que aumenta la turbidez de las cervezas es la posible contaminación de los batches. Bacterias Gram positivas, principalmente las acidolácticas (*Lactobacillus brevis*, *L. casei*, *L. delbrückii*, *Pediococcus dammosus*, *P. inopinatus*, entre otras) pueden contaminar el mosto previo a la fermentación, generando sabores ácidos y turbidez, además de un aumento en la acidez en la cerveza [11]. Esto explicaría también los valores de pH más bajos de las muestras de los batches L3 y L4 en comparación con el resto de las cervezas elaboradas.

Finalmente, en el análisis de estabilidad de espuma, las muestras arrojaron como resultados valores para la estabilidad de espuma bajo el valor definido como cota mínima para las cervezas.

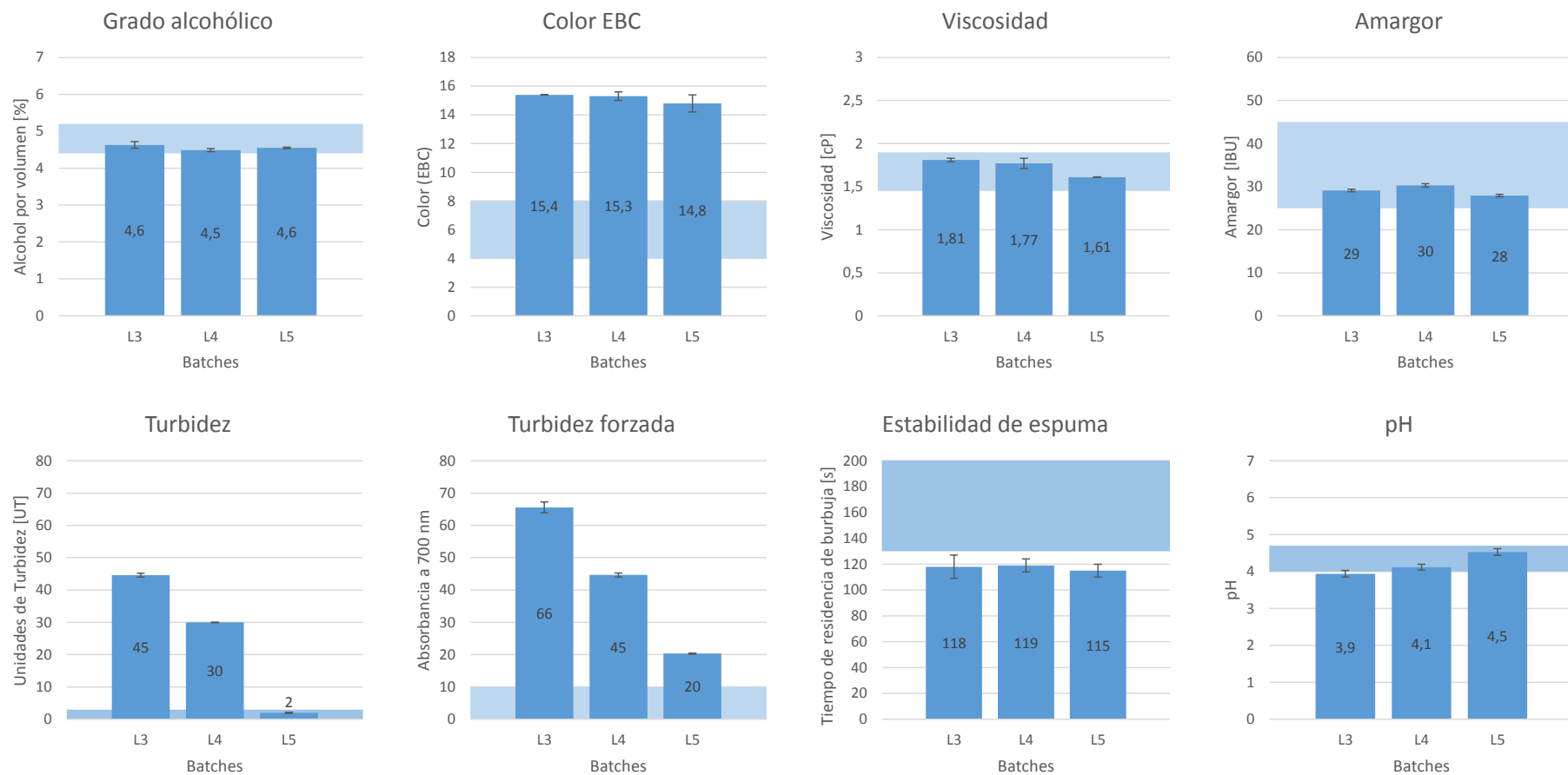


Figura 4.6: Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del segundo lote. El detalle de los valores obtenidos se presentan en la tabla H.4 del Anexo H.3.

### 4.3.3. Tercer lote de cervezas: Pruebas con maltas especiales

El tercer lote de cervezas fueron elaborados 2 batches de cervezas *ale* (A3 y A4), además de 2 batches de cervezas *ale*, pero usando además un 10% de malta caramelo 290 EBC para evaluar la aplicación del mismo proceso productivo a una malta especial (C1 y C2).

Como se muestra en la tabla 4.8, la extracción de azúcares en la maceración entregó mostos de densidades similares a los obtenidos en los lotes anteriores. Durante la filtración no existieron problemas asociados a canalizaciones, lo que entregó mostos sin la presencia de partículas grandes, aunque con tiempos de filtración cercanos a una hora. Al igual que en el lote anterior, no se realizó el lavado de la torta para evitar la disminución de la densidad de los mostos.

Los resultados del volumen del trub generado durante la etapa de clarificación mencionados en la sección 4.5.6 permitieron aumentar los volúmenes de producto en los fermentadores, haciendo que, aún sin lavado, sea posible producir 45 litros de cerveza por batch.

Después de la fermentación y maduración, se alcanzaron gravedades del orden 1,010, valores cercanos a los obtenidos anteriormente. Sin embargo, fallas en el sistema de control de la temperatura de los fermentadores, sumado a la incapacidad del sistema de refrigeración para enfriar a todos los fermentadores afectaron al proceso de maduración de las cervezas, donde las temperaturas de los equipos sobrepasaron los 20°C (ver tabla 4.9).

Otro problema durante la elaboración de cervezas fue el ingreso de agua durante la gasificación del segundo batch de cerveza con malta caramelo, C2. Esto fue ocasionado por un error debido a que había agua retenida en el gasificador por la limpieza que se había hecho en el equipo después de la gasificación del batch anterior. De todas maneras, se tomaron muestras del batch C2 para después aplicar los análisis de grado alcohólico y color, que dependen linealmente del volumen de la muestra, por tratarse de (o por estar basadas en) medidas de concentración.

En la figura 4.7 se muestran los resultados de los análisis realizados a las muestras del tercer lote de cerveza, donde se puede apreciar el efecto del ingreso de agua durante la gasificación del batch C2, debido a los bajos valores de grado alcohólico y color. Como se ve en el gráfico para el contenido alcohólico, tanto las cervezas ale A3 y A4, como la cerveza C1 alcanzaron valores dentro del rango esperado, a diferencia de lo que se muestra para la cerveza C2, donde la graduación alcohólica fue de sólo 2,9%.

En el análisis del color de las cervezas, la utilización de la malta caramelo aumentó el color de la cerveza, alcanzando los 38 EBC, sin tomar en cuenta el color de la cerveza del batch C2 debido a la dilución de la cerveza por la presencia de agua en el gasificador.

Con respecto a la medición de viscosidad de las cervezas, todos los resultados entregaron valores para el rango esperado descrito en la tabla 4.4, al igual que los resultados de amargor, debido a la estimación de los IBU entregados por los lúpulos realizada previa a la etapa de cocción.

Si bien existieron problemas durante la etapa de maduración, en el gráfico de turbidez de la

Tabla 4.8: Seguimiento del proceso de elaboración del tercer lote de cervezas en la planta piloto de Maltexco.

	<b>Batches</b>			
	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
Gravedad mosto dulce	1,052	1,054	1,050	1,050
Tiempo de filtración	71 min	55 min	57 min	57 min
Gravedad pre-cocción	1,052	1,054	1,050	1,050
Gravedad original	1,052	1,054	1,052	1,053
Volumen fermentador	45 L	46 L	45 L	45 L
Masa de inóculo	22 g	22 g	22 g	22 g
Gravedad final	1,011	1,011	1,009	1,010
Atenuación aparente	79 %	80 %	83 %	81 %

Tabla 4.9: Temperaturas de los fermentadores durante el proceso de maduración del tercer lote de cervezas.

	<b>Batches</b>			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>
Fermentador utilizado	1	2	3	4
Temperatura fermentador	24,3°C	20,1°C	18,8°C	9,1°C

figura 4.7 se muestra que los batches A3 y A4 poseían un menor valor de unidades de turbidez que lo definido como cota máxima aceptada, lo que podría deberse a que la maduración de tales batches se realizó en los fermentadores N°3 y 4, los que alcanzan menores temperaturas debido a la cercanía con el sistema de refrigeración, favoreciendo así la sedimentación de los agentes causantes de la turbidez. Sin embargo, al forzar la turbidez de las muestras por la adición de sulfato de sodio se observa que los valores de turbidez aumentan por sobre los valores observados anteriormente (descartando los batches que sufrieron contaminación bacteriana), lo que podría deberse por las altas temperaturas de maduración.

Con respecto a la medición de estabilidad de espuma, siguen obteniéndose valores bajos a la cota mínima aceptable debido probablemente a la baja gasificación de las cervezas.



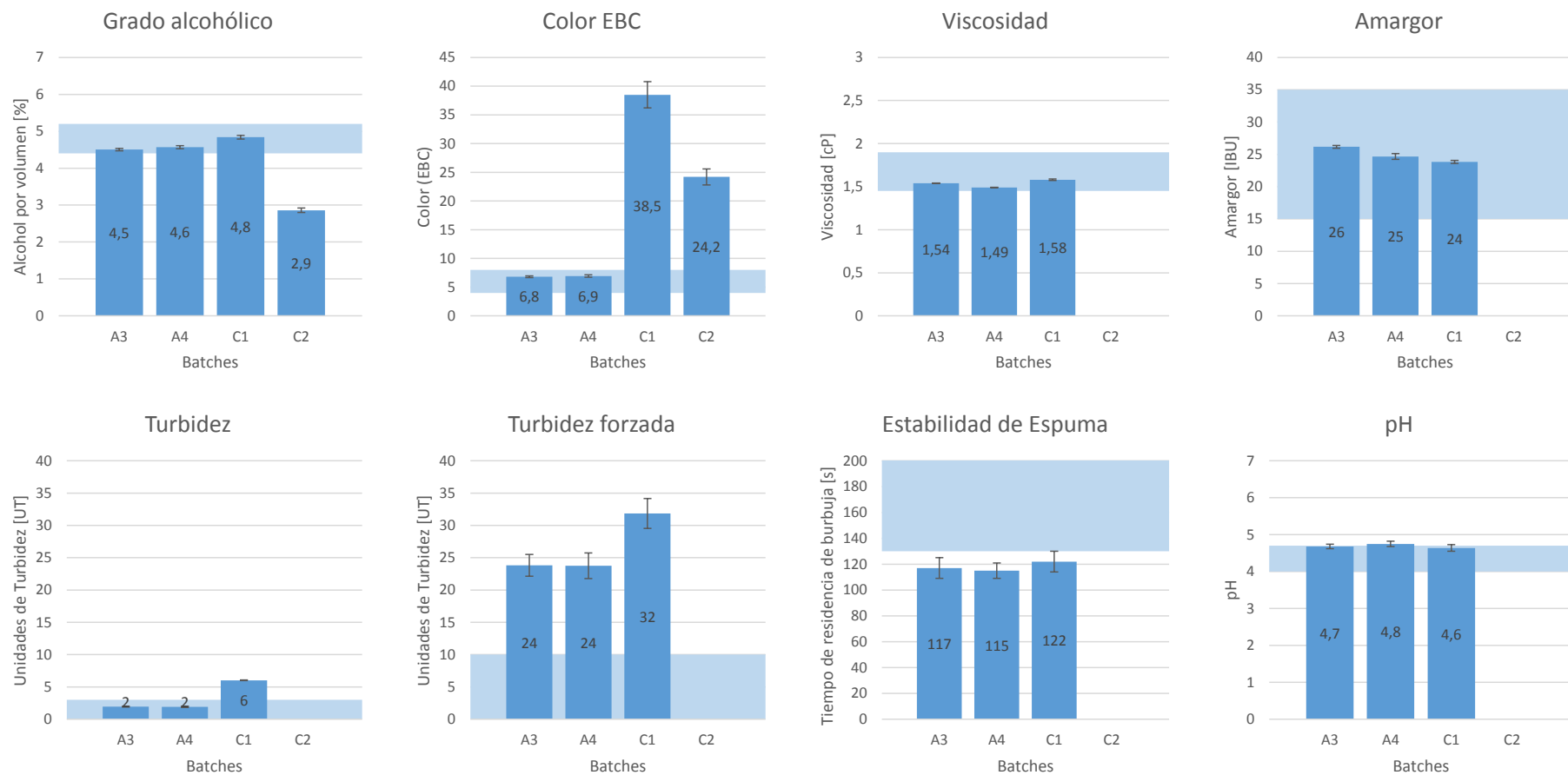


Figura 4.7: Resultados de los análisis fisicoquímicos para las cervezas del tercer lote. El detalle de los valores obtenidos se presentan en la tabla H.5 del Anexo H.3.

## 4.4. Cartas de control y estandarización del proceso

A continuación se presentan las cartas de individuales para parte de las variables medidas analizadas durante la elaboración de cervezas y en la cerveza ya envasada. Los parámetros seleccionados fueron:

- Gravedad mosto dulce
- Gravedad original
- Gravedad final
- Grado alcohólico
- Color
- Viscosidad
- Turbidez
- Turbidez forzada
- Estabilidad de espuma
- pH

En la figura 4.8 se muestra la carta de individuales para la gravedad de mosto dulce. Se observa que 9 de los 10 puntos analizados se encuentran dentro de los límites de control y en torno al promedio de las muestras, lo que es esperable ya que en todos los lotes se utilizaron maltas *Pale Ale*, las que deberían tener un contenido de azúcares similares entre todas ellas debido a que no existen grandes diferencias en el contenido de extracto entre los 2 batches distintos de *Pale Ale* (ver tabla 3.4), además de que se utilizó la misma curva de maceración. Por lo mismo, se presume que el punto fuera de los límites del control, correspondiente al primer batch elaborado, se deba a algún error en la medición de la masa de malta o volumen de agua previo a la maceración.

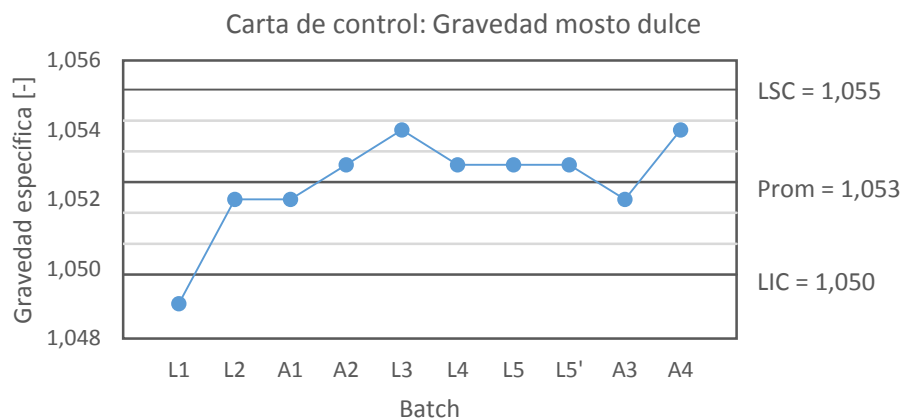


Figura 4.8: Carta de control para la gravedad del mosto dulce.

En cuanto a la gravedad original del mosto, previo a la fermentación, se observa en la carta de control de la figura 4.9 un cambio de nivel en el proceso, ya que los puntos pasan de ubicarse de la zona inferior del promedio a la superior. Mejoras en el proceso productivo provocan un cambio de nivel en la carta de control [39], lo que, en este caso, está asociado a la decisión de no lavar el bagazo durante la filtración, impidiendo así la dilución del mosto.

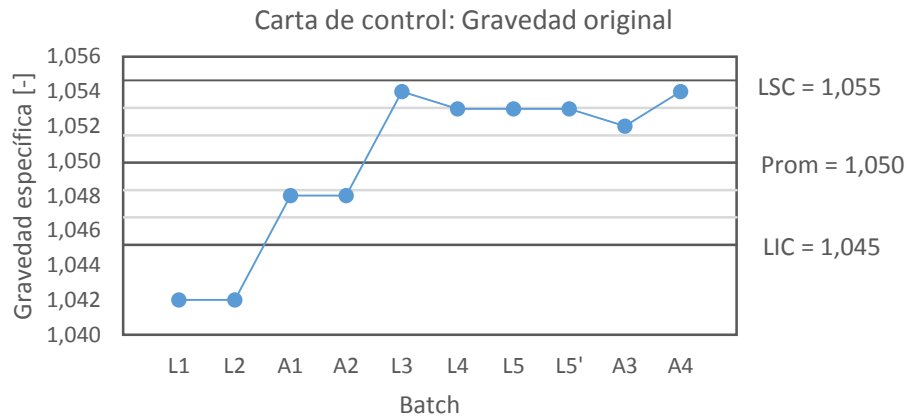


Figura 4.9: Carta de control para la gravedad original del mosto.

Al analizar la carta de control de la gravedad final de la cerveza de la figura 4.10, se nota que los puntos también tienen a concentrarse en el promedio de los valores, a excepción de los resultados para los batches A1 y A2, lo que se debe a los tiempos de fermentación más cortos utilizados en el primer lote de cervezas. Aún así, todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control calculados, sin ninguna tendencia aparente.

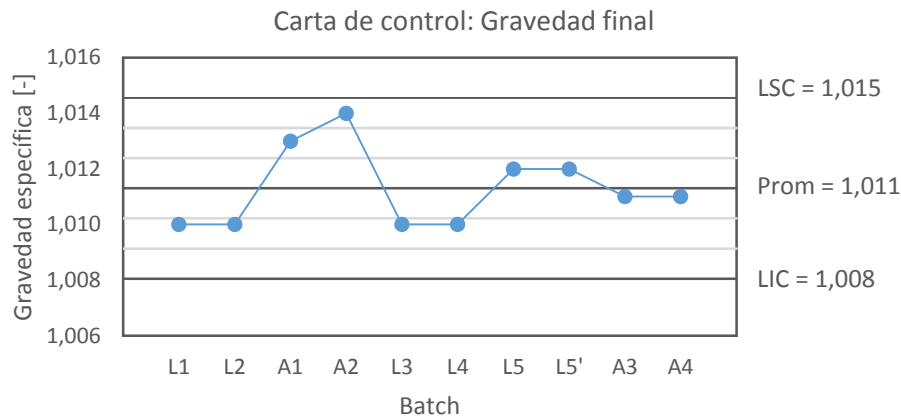


Figura 4.10: Carta de control para la gravedad final de la cerveza.

Con respecto al grado alcohólico, cuya carta se presenta en la figura 4.11, se puede notar también un cambio de nivel en el proceso. La mejora en el proceso que provoca este cambio de nivel es el aumento de los tiempos de fermentación, permitiendo así alcanzar un mayor grado alcohólico.

En la carta de control del color de las cervezas, presente en la figura 4.12, se observa que los valores medidos para el color de la cerveza se mueven dentro de un rango amplio, lo que se ve reflejado por la diferencia entre los límites de control superior e inferior de la carta. Esto se debe a las diferencias de colores entre los 2 batches de maltas *Pale Ale* de Maltexco utilizadas durante el trabajo de memoria (ver tabla 3.4), por lo que no se puede afirmar que exista control estadístico sobre el color de las cervezas.

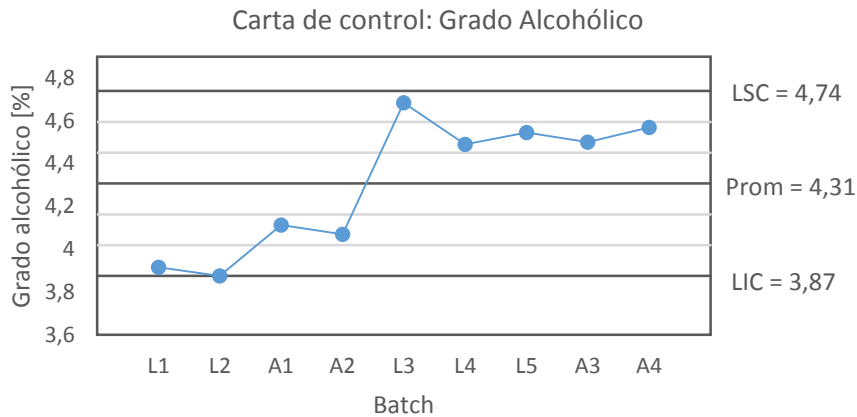


Figura 4.11: Carta de control para grado alcohólico de la cerveza.

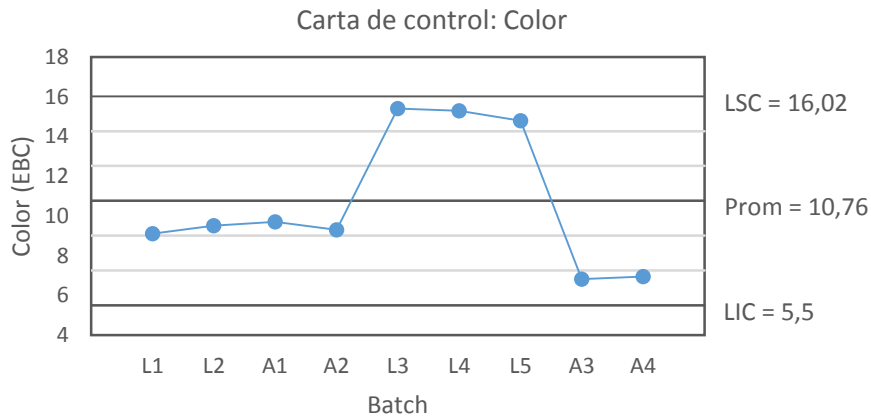


Figura 4.12: Carta de control para grado alcohólico de la cerveza.

Al construir las cartas de control para la turbidez y turbidez forzada se obtienen los gráficos de la figura 4.13 y 4.14. Para la determinación de los límites de control superior e inferior no se consideraron los datos de los batches L3 y L4, ya que se conoce de antemano que la alta turbidez se debe a la contaminación bacteriana de la cerveza, y que corresponderían a puntos fuera de los límites. De todas maneras, no se observa un patrón de comportamiento central en ninguna de las dos cartas, por lo que se podría señalar que la turbidez no está controlada estadísticamente, lo que estaría relacionado con las fallas constantes en el sistema de refrigeración de los fermentadores durante la maduración de las cervezas.

Con respecto a los análisis de viscosidad, se observa en la carta de control de la figura 4.15 que existe un punto posicionado sobre el límite superior de control y otro ubicado en la zona inmediatamente inferior al límite superior. Dado esto, no es posible afirmar que exista control estadístico sobre esta variable. Cabe mencionar que existe una diferencia no menor entre los valores de viscosidad de mosto congreso para los 2 batches de maltas utilizados (ver tabla 3.4), lo que podría afectar en el proceso y no asegurar el control estadístico de la viscosidad.

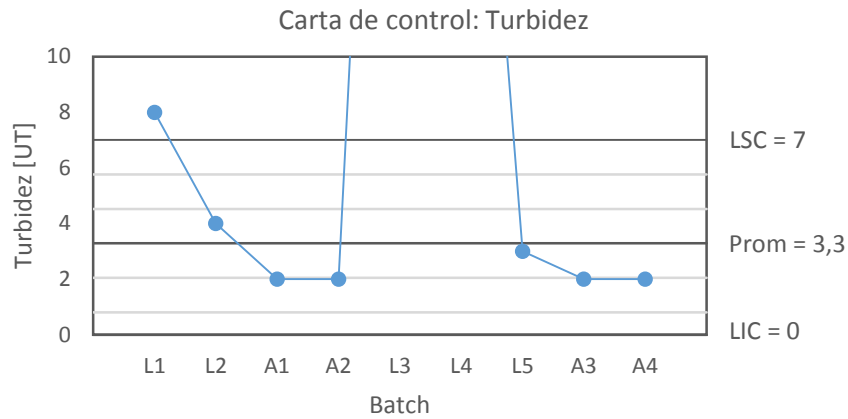


Figura 4.13: Cartas de control para la turbidez de la cerveza. Se excluyen de la figura los valores para los batches L3 y L4.

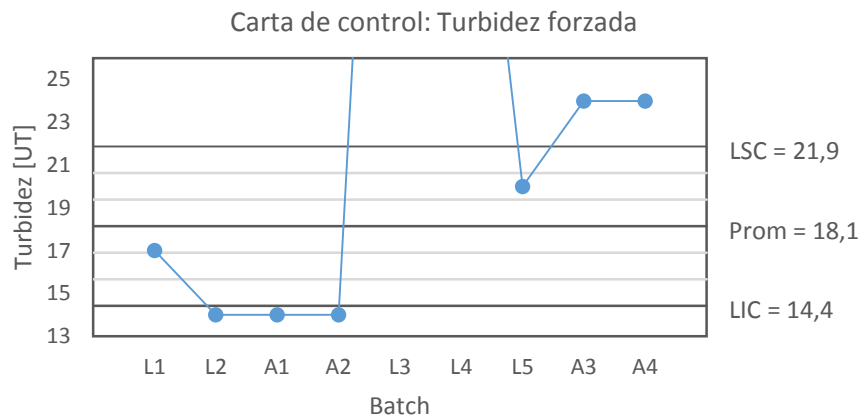


Figura 4.14: Cartas de control para la turbidez forzada de la cerveza. Se excluyen de la figura los valores para los batches L3 y L4.

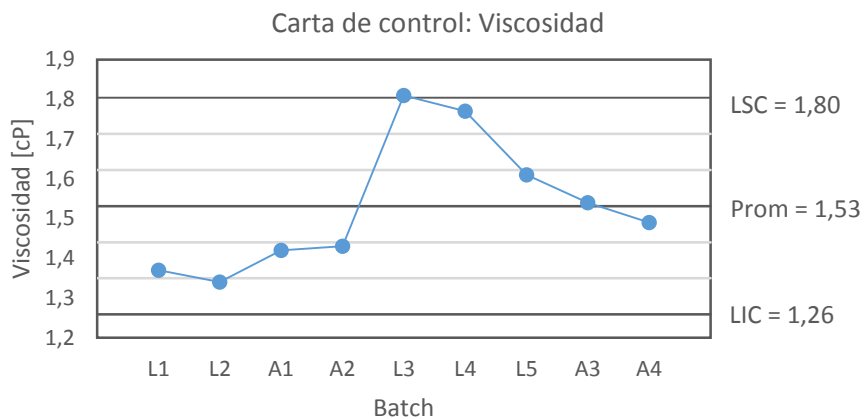


Figura 4.15: Carta de control para la viscosidad de la cerveza.

Para la estabilidad de espuma, es posible observar en la carta de control de la figura 4.16 una tendencia descendiente en la variable. Según lo señalado por Gutierrez y De la Vara,

una tendencia en la carta de control puede indicar cambios graduales en parámetros como las condiciones ambientales en las que se realiza el proceso [39]. La explicación para este comportamiento sería la baja capacidad del gasificador para mantener la cerveza fría, disminuyendo la absorción de dióxido de carbono en el líquido, y, en consecuencia, disminuyendo la gasificación del producto y la estabilidad de espuma.

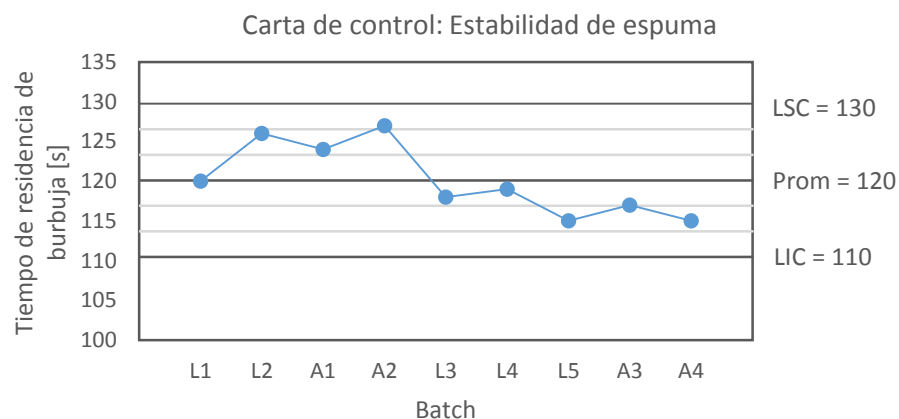


Figura 4.16: Carta de control para la estabilidad de espuma de la cerveza.

Para los valores de pH, se observa un punto fuera de los límites de control en la carta presentada en la figura 4.17. Tal valor corresponde al batch L3, que sufrió contaminación bacteriana. Lo mismo pasa con el valor de pH del batch L4, que también estaba contaminado y que, aunque está dentro de los límites de control, se encuentra alejado del resto de los valores de la carta.

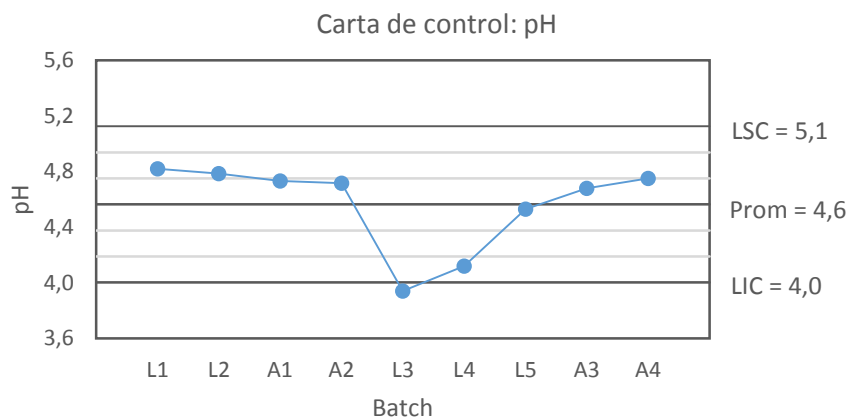


Figura 4.17: Carta de control para el pH de la cerveza.

## 4.5. Problemas detectados en la planta piloto

### 4.5.1. Fallas en el Sistema de Control

Dentro del período de trabajo en la planta piloto de Maltexco se presentaron inconvenientes que impidieron llevar un control y un desarrollo adecuado del proceso de elaboración de cervezas.

El primero de los problemas está asociado al sistema de control de temperatura de los equipos. En reiteradas ocasiones, el computador en donde se aloja el software del SCADA deja de recibir la señal enviada por los PLCs, lo que no permite obtener información sobre éstos, además de no poder definir las temperaturas requeridas para el proceso. Se presume que esto sea debido a un problema de software, ya que se soluciona reiniciando el programa Winlog Pro. Fallas de este tipo no afectan de manera significativa en las etapas previas a la fermentación, ya que, durante la maceración y la cocción, la persona encargada de la elaboración de cervezas se encuentra en la planta piloto, por lo que puede supervisar y solucionar de manera rápida el problema en el sistema de control. Además, en un sistema SCADA, los lazos de control son cerrados por los PLC, por lo que los *set points* definidos para el proceso se mantendrían independientemente de los problemas en el software.

Otro problema observado, y asociado al sistema de control de la Planta Piloto, es la interrupción del sistema de refrigeración. Cuando la planta de extractos es detenida durante los fines de semanas, la alimentación de la red eléctrica de la planta piloto también lo hace, impidiendo el funcionamiento del sistema de control de temperatura de los fermentadores. Como ocurrió en los 2 últimos lotes de elaboración de cervezas, la planta piloto volvió a operar después de estar gran parte del fin de semana detenida.

Una propuesta para evitar los problemas descritos anteriormente es definir un segundo lazo de control, de manera que el sistema de control sea redundante, asegurando así el funcionamiento de los equipos si es que uno de los lazos deja de funcionar [40], además de estudiar la posibilidad de que existan redes eléctricas distintas para la planta piloto y la planta de extractos de Maltexco, para no detener el trabajo en los fermentadores si la planta de extractos de la empresa no está operando.

### 4.5.2. Problemas en el sistema de refrigeración de los fermentadores

Otro de los problemas detectados durante la elaboración de los lotes de cerveza está asociado al sistema de refrigeración de los fermentadores de la planta piloto. Los problemas en el sistema de refrigeración afectan negativamente la calidad de las cervezas fabricadas en la planta piloto, ya que impiden la maduración de éstas, trayendo como consecuencias un mal desarrollo del sabor de las cervezas, además de favorecer la turbidez del producto.

El sistema actual, compuesto por un congelador equipado con un compresor extra, no

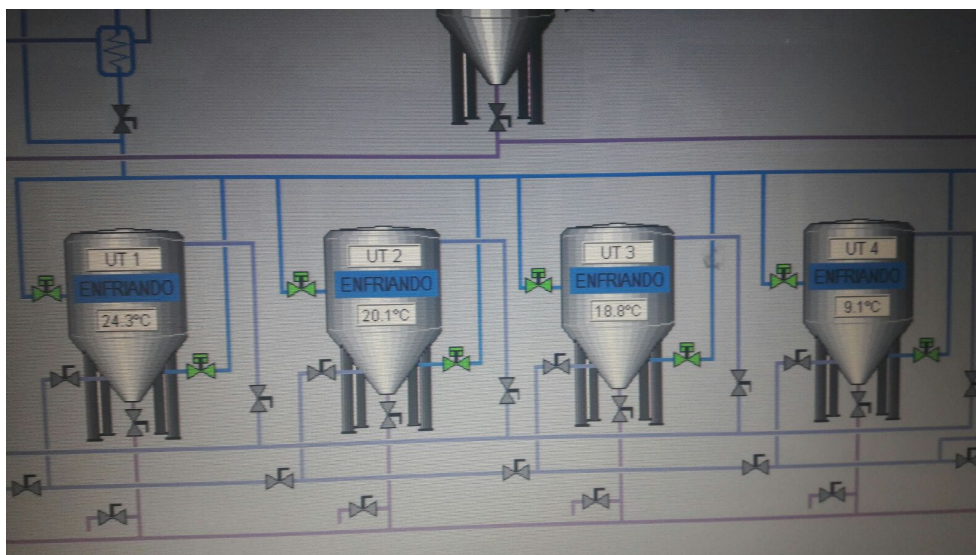


Figura 4.18: Fotografía al panel de control de los fermentadores durante la maduración del tercer lote de cervezas.

permite regular la temperatura de los 4 fermentadores simultáneamente, aún menos durante la época estival. Es posible notar que sólo el fermentador ubicado en las cercanías del equipo de refrigeración es el que llega a temperaturas más bajas que el resto, pero aún así este no logra alcanzar las temperaturas requeridas para la maduración de las cervezas, que corresponde a  $0^{\circ}\text{C}$ . Esto se muestra en la fotografía de la figura 4.18, donde se observa que las temperaturas de los fermentadores fueron de  $24^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$  y  $9^{\circ}\text{C}$  durante la maduración del tercer lote de cervezas, siendo el fermentador N°4 el que se encuentra ubicado inmediatamente después al sistema de refrigeración.

Debido a que los fermentadores se encuentran a distintas distancias del congelador (tal como se muestra en el esquema de la figura 4.19), el flujo de refrigerante tiene preferencia a circular por los fermentadores más cercanos a él, asociado a la mayor pérdida de carga al transportar el fluido a través de las cañerías del sistema de refrigeración. Por lo tanto, al estar los 4 tanques en funcionamiento, el cuarto fermentador será el primero en alcanzar la temperatura del *set point*, deteniendo el flujo de refrigerante hacia éste y dirigiendo el refrigerante preferentemente al tercer fermentador. El proceso se repite hasta que los 4 fermentadores alcancen la temperatura deseada para el proceso de fermentación o maduración.

Durante la época estival, las temperaturas en Temuco pueden superar los  $30^{\circ}\text{C}$ . En particular, durante el verano 2015-2016, una ola de calor azotó la zona centro-sur del país [41], lo que sumado a las altas temperaturas a las que operan equipos de la planta de extractos de Maltexco como los hervidores y secadores, implicó una alta temperatura al interior de la planta piloto, donde se registraron temperaturas de hasta  $35^{\circ}\text{C}$ . Esto trae como consecuencia un aumento del flujo de calor de los alrededores hacia los equipos tanto a la chaqueta de los fermentadores como directamente a la cerveza (ver figura 4.20), impidiendo que los fermentadores, incluso el N°4, alcancen las temperaturas de  $0^{\circ}\text{C}$  requeridas para la maduración.

Frente a esto, una alternativa es estudiar y calcular la pérdida de carga generada por el movimiento del fluido a través de las tuberías del sistema de refrigeración, para así determinar



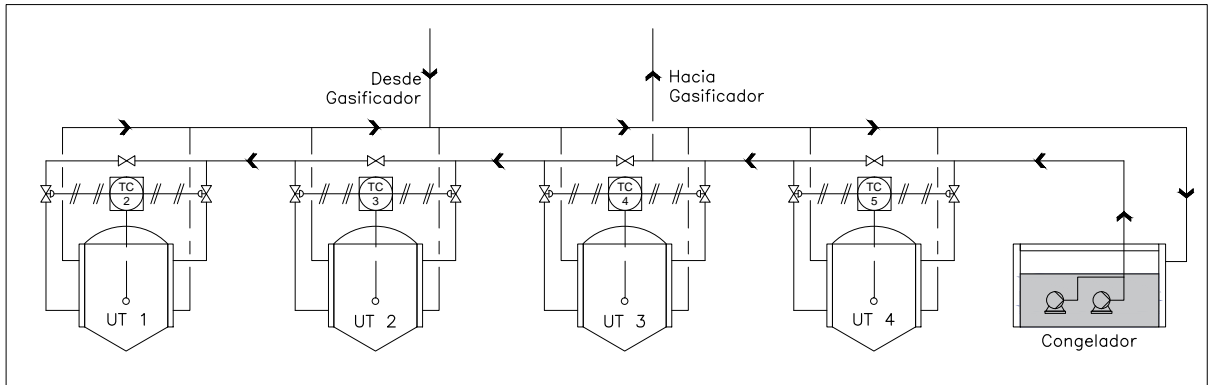


Figura 4.19: Esquema del sistema de refrigeración de la planta piloto de Maltexco. Se han omitido las líneas de alimentación de los equipos utilizados para la producción de cerveza. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

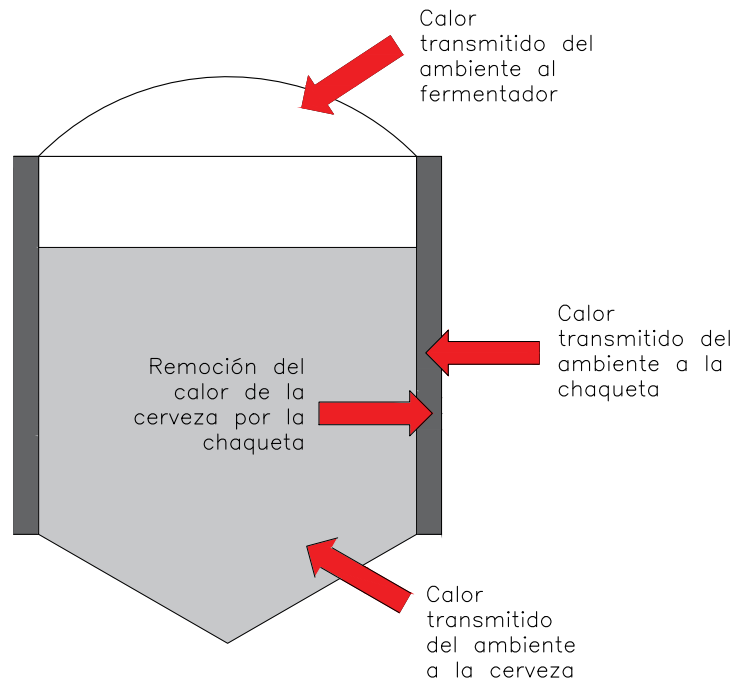


Figura 4.20: Esquema del balance de energía de uno de los fermentadores. Durante el proceso de maduración, la chaqueta del equipo (representada de color gris oscuro) retira calor de la cerveza, disminuyendo la temperatura de ésta. Frente a altas temperaturas al interior de la planta de extractos de Maltexco, aumenta el flujo de calor desde el ambiente hacia el equipo, tanto en la chaqueta como directamente al contenido de éste por la zona superior e inferior del fermentador, disminuyendo la eficiencia del proceso de maduración. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

si es necesario el cambio o la adición de una nueva bomba al sistema. Sin embargo, el efecto “cascada” observado durante la maduración de los batches seguiría presente, ya que aún se mantienen las vías preferenciales del refrigerante, por lo que debería analizarse también un cambio en el *piping* del sistema.

Otra alternativa a estudiar es la de instalar líneas de alimentación y bombas independientes para cada equipo. Deberían considerarse cómo instalar las nuevas líneas de alimentación de refrigerante, las que deberían ir en altura hacia los equipos, para evitar la obstrucción del paso hacia los fermentadores. También se debe tener en cuenta el efecto de aumentar el número de bombas en el sistema de refrigeración, ya que, tal como se mencionó en la sección 2.4, las bombas que impulsan el refrigerante se encuentran al interior del congelador, y al aumentar el número de éstas podría generarse una cantidad no menor de calor, impidiendo la reducción de temperatura del fluido.

Finalmente, en caso que no fuese posible realizar las alternativas descritas anteriormente, podría evaluarse la utilización de una calendarización de los ensayos de manera que sólo 2 fermentadores sean utilizados simultáneamente para la maduración de las cervezas (idealmente los fermentadores 3 y 4), mientras que los otros 2 sean utilizados para la fermentación de los mostos, proceso que requiere temperaturas no tan bajas como para la maduración.

### 4.5.3. Contaminación de batches

Como se mencionó en la sección 4.3.2, los batches L3 y L4 se contaminaron, probablemente con bacterias acidolácticas. Esto es apoyado por los altos valores de turbidez y los bajos valores de pH de tales batches, en comparación a los otros batches fabricados durante el trabajo en Maltexco (figura 4.6). Lo anterior puede deberse a factores como una mala limpieza de los equipos de fermentación o una mal procedimiento de inoculación de levadura.

La contaminación de los batches puede ser evitada inoculando la levadura lo más pronto posible en el fermentador [11, 13, 29]. Las industrias cerveceras a menudo utilizan sistemas de inoculación en línea, las cuales permiten inocular la levadura directamente en la línea de alimentación hacia el fermentador mientras el mosto frío avanza hacia él [11].

En la planta piloto podrían instalarse sistemas de dosificación en línea, como por ejemplo los sistemas de Centec [42] o Protecnica [43], los cuales permiten determinar el número de células vivas en una muestra por conductancia y cargarla automáticamente a la línea de alimentación, reduciendo los riesgos de contaminación. Otra alternativa propuesta, que se muestra en la figura 4.21, podría ser la instalación de un tubo venturi en la línea de alimentación hacia los fermentadores, lo que generaría succión debido a la disminución de la presión en la zona más angosta del tubo, permitiendo así el movimiento del inóculo de levadura desde un dispositivo, como por ejemplo, un embudo de decantación, conectado por mangueras hacia el tubo venturi.

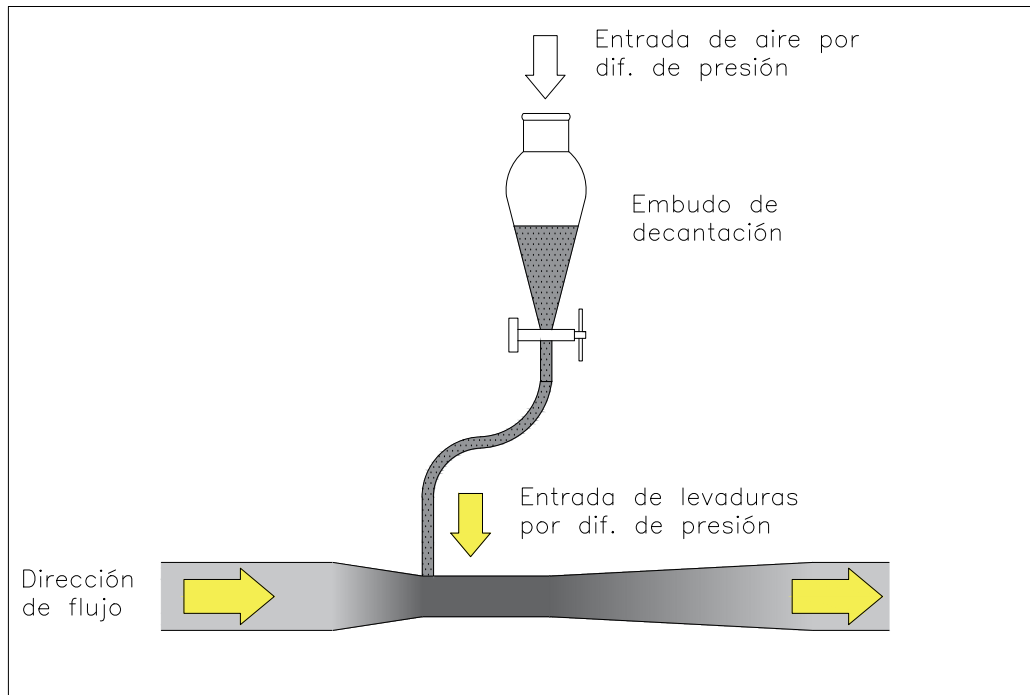


Figura 4.21: Esquema del sistema de inoculación en línea propuesto para la planta piloto. El tubo venturi, debido a la disminución del área transversal de la cañería, provoca un aumento en la velocidad del fluido y, por ende, una disminución en la presión de éste. La diferencia de presión puede utilizarse para cargar a la línea las levaduras en suspensión desde algún dispositivo. Se propone la utilización de un embudo de decantación, ya que la apertura superior (la cual podría ser cubierta con un filtro estéril para reducir los riesgos de contaminación) permite el ingreso de aire para compensar la pérdida de presión generada al interior del embudo. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

#### 4.5.4. Baja gasificación de las cervezas

Al momento de envasar las cervezas producidas en la planta piloto, se realizaba una prueba sensorial preliminar para determinar características generales del producto como sabor, aroma y nivel de carbonatación. Con respecto al último punto, se percibía un bajo nivel de gasificación de las cervezas. Esta deficiencia de dióxido de carbono se asocia a la ineficiencia del proceso de gasificación realizado en la planta piloto.

El sistema de gasificación presente en la planta piloto cuenta con una piedra gasificadora que permite gasificar la cerveza cuando es enviada desde los fermentadores hacia el estanque de gasificación (ver figura 4.22). Sin embargo, ingresar  $\text{CO}_2$  por la línea de alimentación simultáneamente aumenta la presión del sistema, generando problemas en el filtro prensa que retiene a las levaduras que hayan quedado en suspensión después de la maduración. Por tal razón, el método que se adoptó para la gasificación de la cerveza es una gasificación batch, que consiste en enviar todo el contenido del fermentador al estanque gasificador para luego ingresar  $\text{CO}_2$  por la zona inferior del estanque (ver figura 4.22).

El proceso de gasificación requiere bajas temperaturas, pues la solubilidad del  $\text{CO}_2$  (y de los gases en general) en soluciones acuosas disminuye al aumentar la temperatura [11, 13]. Por tal razón, el gasificador de la planta piloto posee una chaqueta conectada al sistema de refrigeración que utilizan los fermentadores. Pese a esto, al tomar muestras de cerveza desde el gasificador se observa un aumento en la temperatura de éstas, las que incluso llegan a los  $15^\circ\text{C}$ , lo que impide una buena gasificación del producto. Se presume que este aumento de la temperatura se deba a un mal diseño del estanque gasificador, cuyas dimensiones no son las adecuadas para permitir el enfriamiento (o la mantención de las bajas temperaturas) de la cerveza. Como se muestra en la figura 4.23, gran parte del contenido del gasificador se ubica en la zona cónica inferior, la que no está cubierta por la chaqueta refrigerante. Esto hace que la cerveza absorba calor del ambiente debido a las altas temperaturas dentro de la planta piloto (que fueron discutidas también en la sección 4.5.2), disminuyendo así la absorción de  $\text{CO}_2$  desde la fase gaseosa.

Se evaluó la opción de ingresar al gasificador el contenido de 2 fermentadores simultáneamente, lo que fue puesto a prueba en la elaboración del segundo lote de cervezas. Sin embargo, la temperatura de muestras de cervezas del gasificador se mantenían altas ( $10^\circ\text{C}$ ) y la gasificación de las cervezas se mantenía baja.

Según el gráfico de la figura C.12, a una presión de 2 bar y temperatura de  $15^\circ\text{C}$ , el contenido de  $\text{CO}_2$  en la cerveza debería ser cercano a 3 volúmenes de gas, que estaría dentro del rango típico para cervezas lager comunes [11], lo que difiere de lo observado al momento de realizar el análisis sensorial.

Según lo mencionado por Mosher, la gasificación batch es utilizada por los pequeños cerveceros utilizando barriles e ingresando  $\text{CO}_2$  desde un cilindro. Sin embargo, el tiempo requerido para alcanzar la gasificación deseada puede superar los 2 días fácilmente [13], por lo que se debe solucionar el problema existente en el filtro prensa durante la gasificación en línea o buscar otras alternativas de gasificación, como por ejemplo, evaluar la posibilidad de instalar una piedra gasificadora al interior del gasificador, lo que permitiría aumentar el

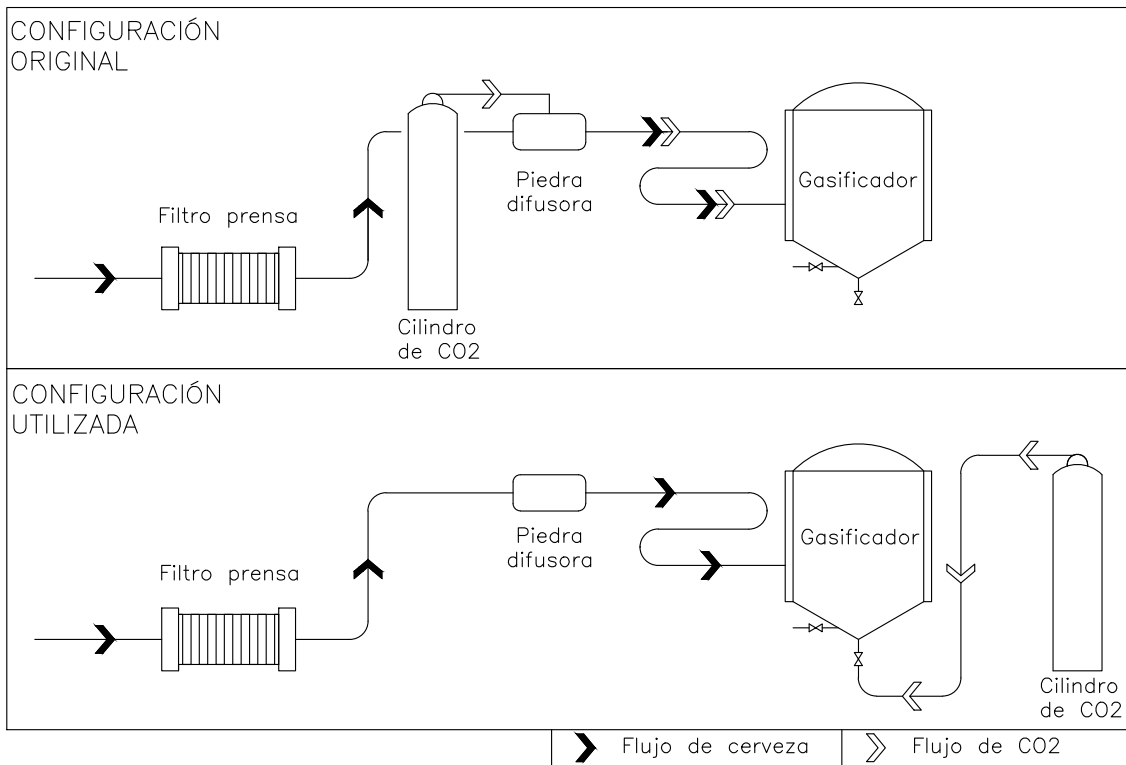


Figura 4.22: Comparación entre el sistema de gasificación original de la planta piloto y el usado para la elaboración de los lotes de cerveza. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

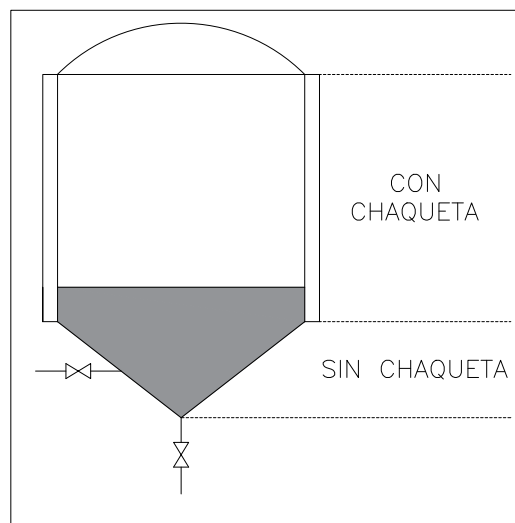


Figura 4.23: Esquema del gasificador y el contenido de cerveza de un fermentador. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

área de transferencia entre las burbujas de  $\text{CO}_2$  y la cerveza, disminuyendo los tiempos del proceso.

La baja gasificación de las cervezas se refleja en parte en los valores de la estabilidad de espuma. Como se mostró en la carta de control para la estabilidad de espuma en la figura 4.16, los valores para esta variable presentaban una tendencia descendente. Sin embargo, se debe estar al tanto que la estabilidad de la espuma no depende sólo del nivel de gasificación de la cerveza, sino que también del contenido de dextrinas sin fermentar,  $\beta$ -glucanos, proteínas y  $\alpha$ -ácidos [11–13]. Para la evaluación de la gasificación de las futuras cervezas elaboradas en la planta piloto se propone utilizar procedimientos como los propuestos por la ASBC, donde se puede determinar la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto por medio de equipos capaces de determinar la presión interna de las botellas envasadas [44], aunque se deberán tener en consideración los costos asociados a la adquisición del equipo requerido.

#### 4.5.5. Seguimiento de la fermentación

Para la elaboración de los lotes de cerveza se definieron tiempos para la fermentación de una semana para el primer lote y 2 semanas en los lotes restantes debido a que en el primer caso la fermentación no había sido completa. A diferencia de las fermentaciones realizadas en los laboratorios de Maltexco, no existe un método o procedimiento para extraer parte del contenido del fermentador para estudiar el avance del proceso fermentativo a través del cambio de la densidad del mosto.

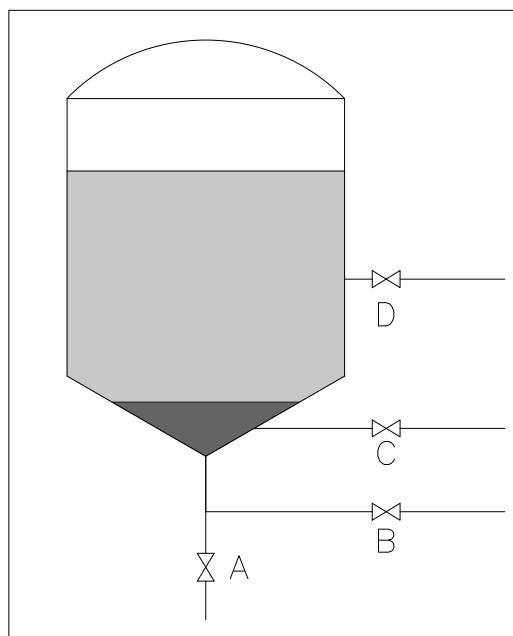


Figura 4.24: Configuración actual de los fermentadores de la planta piloto de Maltexco. A: Salida de descarte a piso. B: Salida a drenaje. C: Salida hacia gasificación. D: Nueva salida propuesta. Diagrama construido con AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

Como se muestra en el diagrama de la figura 4.24, en la zona inferior de los fermentadores existe una salida que permite descartar el contenido de los equipos a piso. Al utilizar

tal salida para realizar el seguimiento de la densidad del mosto se obtendrían muestras no representativas del contenido del fermentador, ya que en tal zona del equipo se concentran las levaduras inactivas que hayan sedimentado, o bien, levaduras activas en el caso que se tratara una fermentación *lager*, lo que alteraría la medición de densidad. Por esta razón, fermentadores industriales tienen una salida extra en la zona media del equipo para poder tomar muestras de mosto y llevar un registro de la evolución temporal de la densidad de la cerveza.

Dado lo anterior, se propone modificar la estructura de los fermentadores de la planta piloto para así poder realizar el seguimiento de la densidad de la cerveza y determinar de mejor manera los tiempos de fermentación.

#### **4.5.6. Pérdida de mosto después de la clarificación**

Después de la etapa de clarificación, al enviar el mosto desde el estanque *whirpool* hacia los fermentadores quedan retenidos en el equipo, específicamente en la base cónica de éste, 9,2 litros de producto, volumen en el cual se encuentra el *trub* sedimentado. Sin embargo, durante el desarrollo del trabajo en Maltexco se planteó la posibilidad fuera menor a los 9,2 litros que quedan retenidos en el equipo, por lo que habría una pérdida de mosto fermentable en tal etapa.

El procedimiento utilizado para la determinación del volumen de *trub* (el que se encuentra detallado en el Anexo H.2) consistió en la toma de muestras del contenido del estanque *whirpool* a través de la válvula inferior del equipo una vez terminado el proceso de clarificación de los mostos. Cada 500 ml se tomaba una muestra, la cual era analizada visualmente, además de espectrofotométricamente para la determinación de la turbidez de ésta.

Al tomar las muestras se obtuvieron los resultados presentados en la figura 4.25. Allí se puede comprobar visualmente que gran parte del *trub* se concentra dentro del primer litro de producto retirado del *whirpool*. Esto se comprobó analíticamente midiendo la absorbancia a 700 nm en el espectrofotómetro del laboratorio de calidad de la planta de extractos de Maltexco, donde la absorbancia disminuye a medida que se descarta un mayor volumen de producto del equipo. Con esto, se propone que el volumen a descartar del equipo sea de 2 litros en vez de los 9,2 litros que se descargan según la configuración actual de las cañerías que conectan al equipo. Para esto, se podría adicionar una nueva salida de producto, ubicada 9,3 cm más abajo que la salida actual, aproximadamente (ver figura 4.26), reduciendo así el volumen de mosto perdido durante la clarificación.

#### **4.5.7. Zonas de la planta piloto sin limpiar**

Si bien gran parte de la planta piloto (equipos y líneas de flujo) puede asearse mediante CIP, existe una zona en las tuberías de alimentación hacia el gasificador que no puede ser limpiada después del proceso de gasificación.

Fotografía	0 ml	500 ml	1000 ml	1500 ml	2000 ml
Volumen retirado	0 ml	500 ml	1000 ml	1500 ml	2000 ml
Absorbancia 700 nm*	0,96	0,77	0,41	0,28	0,26

Figura 4.25: Muestras del *trub* del mosto a distintos volúmenes de recolección. El *trub* es retirado desde la salida inferior del estanque *whirlpool* (válvula 21). \* La absorbancia fue medida a muestras diluídas 5 veces.

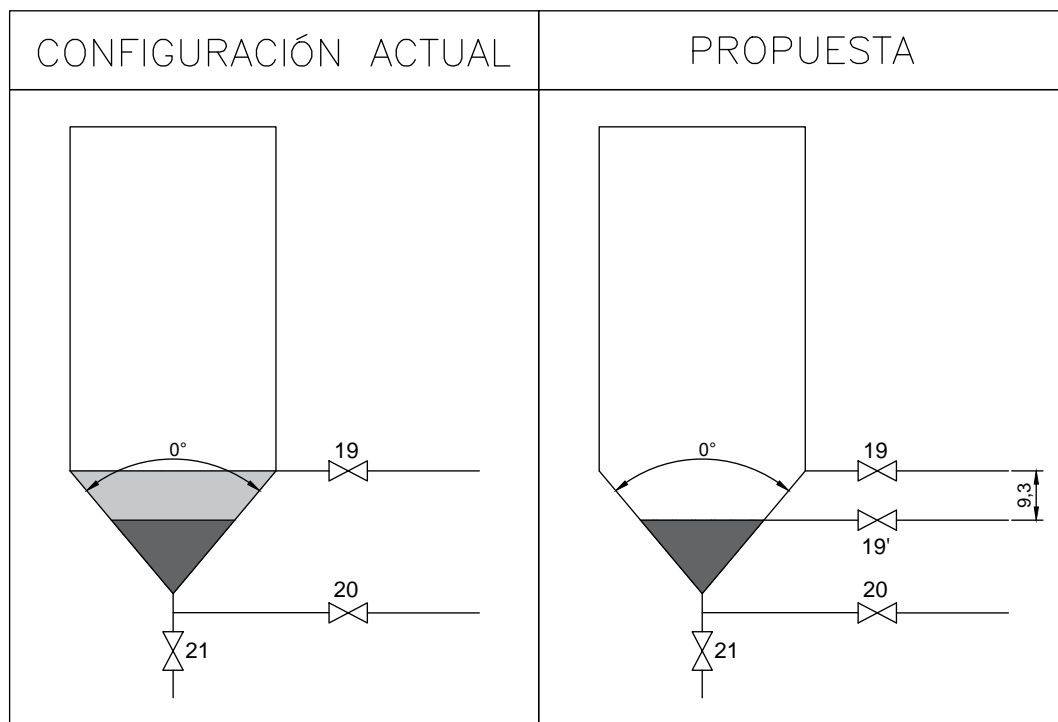


Figura 4.26: Esquemas de la configuración actual del *whirlpool* y la configuración propuesta. Las válvulas 19, 20 y 21 se encuentran presentes en la planta piloto. La válvula 19' es la propuesta para reducir la pérdida del mosto después de la clarificación. Esquemas construidos con Autodesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

Después de realizar la gasificación de algún lote de cerveza, las placas del filtro prensa deben ser retiradas para evitar la formación de *biofilms*. Al realizar esto, la línea de alimentación que conecta los fermentadores con el gasificador queda abierta, por lo que no es posible enviar la solución para la limpieza de la planta hacia el gasificador (ver figura 4.27, configuración actual).

Para evitar esto, y poder limpiar la línea de alimentación al gasificador, se propone la instalación de un *bypass* que conecte la salida de la bomba con la salida del filtro como se



muestra en la figura 4.27, configuración propuesta, permitiendo enviar el flujo desde la bomba sin pasar por el filtro prensa. Con esto se reducirían focos de contaminación del producto, ya que sin el aseo debido a la línea de alimentación al gasificador, restos de levaduras pueden adherirse a las paredes de las cañerías, transformándose en un foco de contaminación.

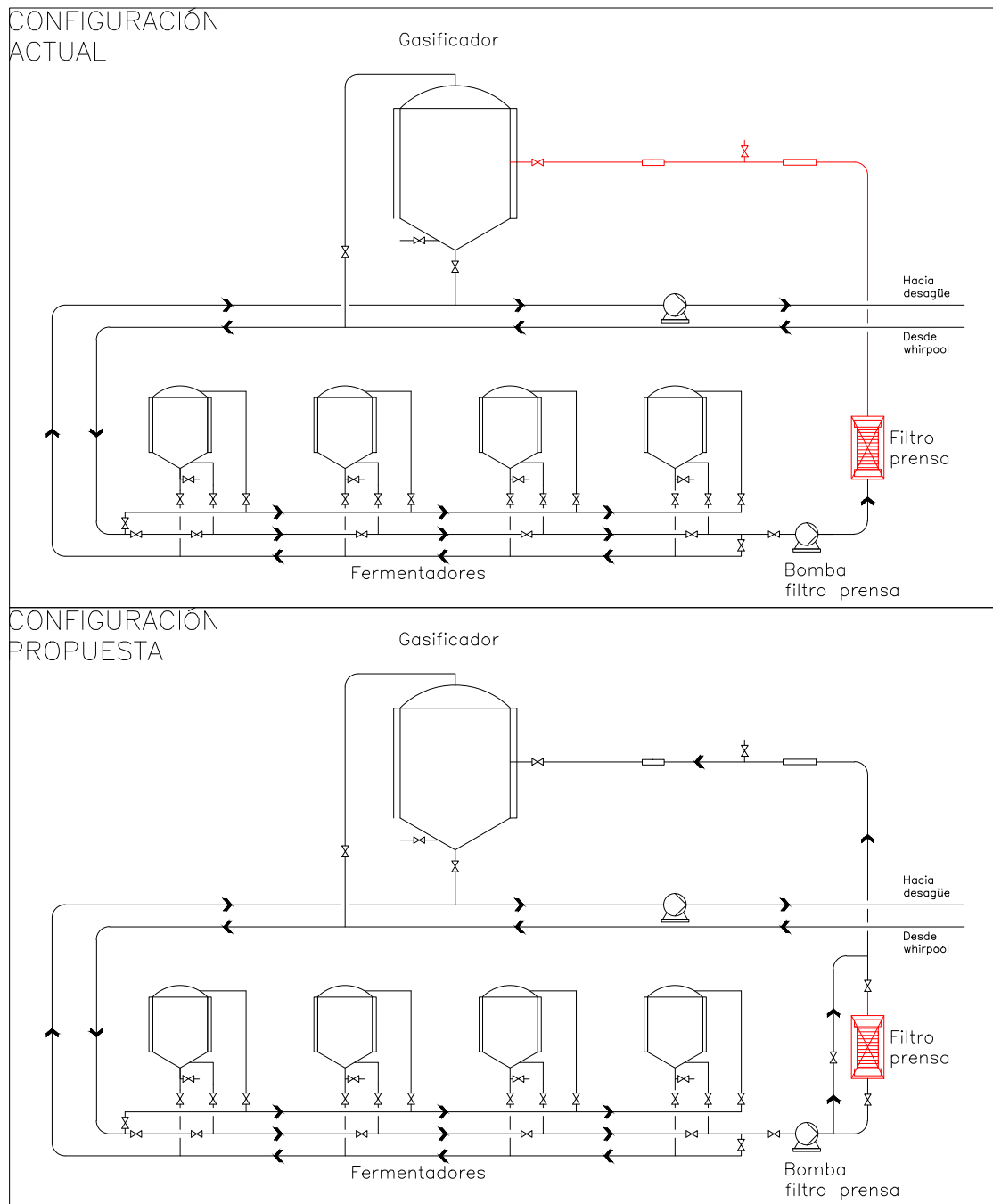


Figura 4.27: Comparación entre la configuración actual de la línea de alimentación hacia el gasificador y la propuesta. En rojo se presentan las secciones de las tuberías que no pueden ser aseadas después de utilizar el filtro prensa. Diagrama construido utilizando AutoDesk AutoCAD 2015, versión del estudiante.

## 4.6. Procedimiento final de elaboración de cervezas

En función de la información recopilada de los ensayos realizados en la planta piloto de Maltexco, se propone utilizar las siguientes condiciones de operación para la elaboración de cervezas:

Tabla 4.10: Condiciones de operación para la elaboración de cervezas en la planta piloto.

Etapa	Características
Molienda	Utilización del molino de la planta de extractos de Maltexco. Apertura de malla de 2,5 mm.
Maceración	20 min a 50°C. 20 min a 60°C. 60 min a 70°C. 5 min a 80°C.
Filtración	Recirculación por 10 minutos. Aumento de presión a 0,6 bar. Sin lavado.
Cocción	60 min. 25 IBU.
Clarificación	30 minutos en recirculación en el equipo. 30 minutos en sedimentación.
Fermentación	2 semanas. 12°C para cervezas <i>lager</i> , 22°C para cervezas <i>ale</i> .
Maduración	2 semanas. 0°C.
Gasificación	A definir.

Se decide utilizar la misma curva de maceración que fue propuesta desde el comienzo debido a la extracción de azúcares alcanzada al seguir las condiciones de operación utilizadas, obteniendo mostos dulces con gravedades entre los 1,050 y 1,055, según lo presentado en la carta de control de la figura 4.8.

La filtración posee una recirculación de 10 minutos para reducir el contenido de partículas de tamaño medio y grande en el mosto. Terminada la recirculación se procede a aumentar la presión al interior del filtro vertical, a una velocidad de 0,1 bar por minuto (para evitar el fenómeno de canalización), hasta alcanzar los 0,6 bar. Se decide no realizar la etapa de lavado del bagazo, debido a la probabilidad de diluir el mosto al no extraer azúcares desde la torta del filtro.

La cocción que se propone es de 60 minutos, al igual que lo realizado desde el comienzo del trabajo en la planta piloto. Se propone que se agregue lúpulo de manera de entregar a la cerveza un amargor 25 IBU.

La clarificación del mosto, realizada en el estanque *whirpool*, se propone con una fase de centrifugación de 30 minutos, para concentrar el *trub* generado en la zona central del equipo, y luego una etapa de sedimentación de 30 minutos, para favorecer la decantación del *trub*. En caso que no se hayan realizado cambios en las salidas del estanque, se propone descartar 2 litros de producto desde la zona inferior del equipo para descartar el *trub* generado antes de pasar a la etapa de fermentación.

Tanto para la elaboración de cervezas *ale* como *lager* se propone una etapa de fermentación de 2 semanas, donde varía la temperatura de fermentación entre un tipo de cerveza u otro: 12°C para *lager*, 22°C para *ale*. Luego de la fermentación, se recomienda realizar la maduración de las cervezas idealmente a una temperatura de 0°C, la que dependerá de la capacidad del sistema de refrigeración de los fermentadores.

Finalmente, se propone una gasificación batch de la cerveza, aunque con una futura revisión para ser cambiado por alguna de las alternativas descritas en la sección 4.5.4.

El detalle del proceso productivo, más la descripción para el uso de la planta piloto, se deja a disposición en el *Protocolo de Elaboración de Cervezas en Planta Piloto*, que se muestra como adjunto en el Anexo I. Se adjuntan también en el protocolo diagramas de los equipos y de las líneas de alimentación para facilitar la comprensión de éste.

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones generales

El objetivo principal de este trabajo de memoria en Maltexco consistió en la implementación de un proceso de elaboración de cervezas en la recientemente construida planta piloto de cervezas y extractos de la empresa, por lo que se definió un proceso productivo basado en la información recopilada en la búsqueda bibliográfica y durante la elaboración de las cervezas, tanto *ales* como *lagers*. El proceso de fabricación de cervezas propuesto consiste en una etapa de maceración con tres escalones de temperatura, una etapa de filtración, con recirculación, un aumento gradual de la presión del filtro y sin lavado del bagazo, una etapa de cocción por 60 minutos, un proceso de clarificación y enfriado del mosto, una fermentación de 2 semanas para terminar con una etapa de maduración de 2 semanas, previa a la gasificación y embotellado de la cerveza.

Se definieron 7 análisis para evaluar las cervezas fabricadas en la planta piloto, los cuales consisten en la determinación del grado alcohólico, color, viscosidad, amargor, estabilidad de espuma, pH y turbidez (el que incluye también un análisis de turbidez forzada), los cuales fueron evaluados con cervezas disponibles en el mercado antes de ser utilizados para confirmar su validez. En particular para los análisis de turbidez se realizó un estudio teórico preliminar dado que fue un procedimiento propuesto durante el trabajo de memoria en Maltexco.

Para la definición del procedimiento final, se elaboraron 3 lotes de cervezas en la planta piloto más un lote de prueba. De los 3 lotes, el primero presentó problemas durante el lavado del bagazo en la filtración, disminuyendo la concentración de azúcares fermentables en el mosto. Sumado a una etapa de fermentación de sólo una semana, se obtuvieron cervezas con una graduación alcohólica de 4,0 % promedio, fuera del rango esperado para el tipo de cerveza elaborada (entre 4,4 % y 5,2 %). Por lo anterior, en los 2 lotes restantes se decidió no realizar el proceso de lavado de la torta y aumentar los tiempos de fermentación a 2 semanas, obteniendo así cervezas con un grado alcohólico entre 4,6 % y 4,8 %.

Al realizar el análisis estadístico de parte de las variables del proceso, se observó que sólo algunos de ellos se encuentran bajo control estadístico, como por ejemplo la gravedad

del mosto dulce y la gravedad final de las cervezas. Otras, como el grado alcohólico y la gravedad original del mosto sufrieron un cambio de nivel, debido a los cambios al proceso productivo original utilizado en la elaboración del primer batch (aumento en los tiempos de fermentación y eliminación de la etapa de lavado del bagazo), lo que podría indicar también una estandarización del proceso, sin considerar los resultados previos al cambio de nivel. Variables como el color y la viscosidad presentaron variaciones importantes entre los batches, lo que se asocia a las diferencias en estos mismos parámetros en las maltas utilizadas en la elaboración de las cervezas

La contaminación de batches de cervezas afecta de manera importante al producto final, tal como se observó al realizar los análisis a los batches L3 y L4. Los valores de turbidez aumentan drásticamente (sobre los 30 UT), mientras que el pH disminuye bajo lo esperado (menor a 4,0), entregando sabores ácidos a las cervezas. Esto queda ilustrado también al construir las cartas de control de estos parámetros, donde se observa que ni el pH ni las mediciones de turbidez poseen control estadístico. Por lo anterior, se debe asegurar la inocuidad del proceso para obtener cervezas sin defectos.

Los problemas en el sistema de refrigeración de la planta piloto impiden llevar a cabo el proceso de maduración de las cervezas, obteniendo cervezas con distintos valores de turbidez y turbidez forzada según la cercanía del fermentador al congelador del sistema de refrigeración. Esto, al igual que la contaminación de los batches, impide el control estadístico de las mediciones de turbidez. La gasificación de las cervezas también se ve afectada por los problemas en el sistema de refrigeración, aunque también están involucrados los problemas en el diseño del gasificador y la imposibilidad de realizar el proceso de inyección de dióxido de carbono en línea. Por lo mismo, la tabla de control de la estabilidad de espuma indica que no existe control estadístico sobre esta variable.

Para estudiar la utilización de maltas especiales en la planta piloto, se fabricaron 2 batches en el último lote de cervezas con un 10 % de malta caramelo 110L de Patagonia Malt, donde se observó que no se requieren mayores cambios al proceso productivos para obtener el mosto y su posterior fermentación. Sin embargo, debido al pequeño número de batches fabricados, se deben realizar más pruebas para confirmar y asegurar que el procedimiento propuesto puede utilizarse con tales maltas.

Independientemente de los problemas mencionados anteriormente, se afirma que la planta piloto de Maltexco puede ser utilizada para la fabricación de cerveza, pero requiere la implementación de mejoras en algunos de los equipos presentes en ella, principalmente en el sistema de refrigeración de los fermentadores.

Finalmente, dentro de una mirada más amplia, se puede recalcar que el trabajo de memoria (y la construcción de la planta piloto en general) permitirá que Maltexco se adentre aún más dentro del mercado cervecero. La opción de poder probar los productos de la empresa en la planta piloto permitirá conocer directamente el desempeño de sus maltas en la cerveza ya elaborada. También, los ensayos de cerveza en la planta piloto dan pie para que, a largo plazo, Maltexco realice un proceso de integración vertical, fabricando y distribuyendo sus propias cervezas.

## 5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- Se recomienda estudiar y mejorar el sistema de refrigeración presente actualmente en la planta piloto de Maltexco, para evitar así los problemas observados durante la maduración de los lotes de cervezas elaborados durante el trabajo de memoria, tomando como base las propuestas presentadas en la sección de resultados.
- Se recomienda la instalación de las nuevas salidas en el estanque *whirpool* y en los fermentadores, además de el *bypass* en el filtro prensa para así aumentar el rendimiento del proceso al perder una menor cantidad de mosto, permitir realizar un seguimiento de la fermentación y reducir las zonas sin limpiar de la planta piloto, respectivamente.
- Una vez solucionados los problemas en la refrigeración y gasificación de las cervezas, se propone realizar nuevos lotes de cerveza, para estudiar vía cartas de control de proceso si existe estandarización en variables como la estabilidad de espuma y turbidez, siguiendo el proceso productivo definido en este trabajo de título.
- Como trabajo futuro quedan pendientes nuevas pruebas con maltas especiales en la planta piloto, ya que sólo se fabricaron 2 batches con maltas especiales fabricadas por Maltexco. Eventualmente, deberían estudiarse pequeños cambios en el proceso productivo definido dependiendo de las características de las maltas utilizadas, como por ejemplo el grado de modificación del grano, el poder diastásico y el contenido de gomas solubles como  $\beta$ -glucanos y pentosanos.
- Para los nuevos ensayos que se realicen en la planta piloto debe considerarse también el desarrollo de una metodología de evaluación sensorial de cervezas, obteniendo así mayor información sobre las características que pueden aportar las maltas que elabora Maltexco.
- Si bien el procedimiento propuesto es para la elaboración de cervezas, existen otros procesos productivos que comparten gran parte de las operaciones unitarias del proceso cervecero, como la elaboración de extractos, leches vegetales y colorantes a partir de maltas especiales, por lo que una propuesta de trabajo podría ser la adaptación de los procedimientos definidos por Díaz [45] y Sepúlveda [46] para la elaboración de colorantes y leche de avena, respectivamente.

# Bibliografía

- [1] MALTEXCO. La calidad nos mueve desde 1896. [en línea]. <[www.maltexco.com](http://www.maltexco.com)>. [Consulta: 12 de junio de 2015].
- [2] PATAGONIA MALT. Sabor del fin del mundo [en línea]. <<http://www.patagoniamalt.com/esp/index.html>>. [Consulta: 12 de junio de 2015].
- [3] STATISTA. Beer production worldwide from 1998 to 2014 [en línea]. <<http://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/>>. [Consulta: 02 de febrero de 2016].
- [4] BARTH-HASS GROUP. The Barth Reports 2000 - 2015 [en línea]. <<http://www.barthhaasgroup.com/en/news-and-reports/the-barth-report-hops/2000-2014>>. [Consulta: 29 de enero de 2016].
- [5] ORELLANA VALENCIA, C.A. 2014. Rompiendo paradigmas en la experiencia del consumidor de cerveza en el punto de venta. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 119 págs.
- [6] Cerveceros enjuician acusación contra CCU y revelan sus estrategias para competir con el mayor actor chileno. Diario El Mercurio, Santiago, Chile. Octubre 2013.
- [7] Cervecerías artesanales proyectan crecimiento de hasta 30 % en 2015. Economía y Negocios, Santiago, Chile. Febrero 2015.
- [8] ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE CERVEZA DE CHILE. Encuesta a cerveceros artesanales [en línea]. <<http://www.acechi.cl/home/encuesta-a-cerveceros-artesanales-la-clave-para-el-desarrollo-radicaria-en-la-pro>>. [Consulta: 03 de abril de 2016].
- [9] MALLETT, J. 2014. Malt: A Practical Guide from Field to Brewhouse. 1ra edición. Brewers Publications.
- [10] Maltexco probará nuevas variedades de cerveza en planta piloto. Diario Financiero, Santiago, Chile. Agosto 2015.
- [11] BRIGGS, D.E., BOULTON, C.A., BROOKES, P.A., STEVENS, R. 2004. Brewing: Science and practice. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Inglaterra, 863 págs.

- [12] HOUGH, J. 1982. Biotecnología de la cerveza y de la malta. 1ra edición. Acribia S.A., Zaragoza, España, 185 págs.
- [13] MOSHER, R. 2015. Mastering Homebrew: The complete guide to brewing delicious beer. 1ra edición. Chronicle Books LLC, San Francisco, CA, U.S.A., 384 págs.
- [14] PALMER, J. 2006. How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time. 3ra edición. Brewers Publications, Monrovia, CA, U.S.A., 400 págs.
- [15] BOULTON, C. 2013. Encyclopaedia of brewing. 1ra edición. John Wiley and Sons, Oxford, Inglaterra, 720 págs.
- [16] NACHEL, M. 2012. Beer for Dummies. 2da edición. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., 360 págs.
- [17] CERVECEROS LATINOAMERICANOS. La cerveza en Latinoamérica [en línea]. <<http://www.cerveceroslatinoamericanos.com/index.php/es/la-cerveza-en-america-latina>>. [Consulta: 29 de enero de 2016].
- [18] MEUSSDOERFFER, F. 2009. A Comprehensive History of Beer Brewing. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 1–42.
- [19] MITTELEUROPÄISCHE BRAUTECHNISCHE ANALYSENKOMMISSION (MEBAK). 1999. Métodos de Análisis Cerveceros, tomo 2. 3ra edición. ALAFACE, Caracas, Venezuela. (Traducción de la tercera edición del original en alemán).
- [20] BEER JUDGE CERTIFICATION PROGRAM. 2015 Style Guidelines [en línea]. <[http://www.bjcp.org/docs/2015\\_Guidelines\\_Beer.pdf](http://www.bjcp.org/docs/2015_Guidelines_Beer.pdf)>. [Consulta: 10 de octubre de 2015].
- [21] BROOKSTON BEER BULLETIN. Varieties Of Beer Venn Diagram [en línea]. <<http://brookstonbeerbulletin.com/varieties-of-beer-venn-diagram/>>. [Consulta: 04 de febrero de 2016].
- [22] MEUSSDOERFFER, F., ZARNKOW, M. 2009. Starchy Raw Materials. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 43–83.
- [23] DÍAZ, MÓNICA. Consulta a Jefe de Calidad, Planta Talagante. Materias primas de Maltexco [entrevista]. Noviembre de 2015.
- [24] EDUALIMENTARIA. Hidratos de carbono (Carbohidratos). Características y Propiedades. Parte I [en línea]. <<http://www.edualimentaria.com/hidratos-de-carbono-caracteristicas-propiedades/parte1>>. [Consulta: 17 de diciembre de 2016].
- [25] BAMFORTH, C.W. Current perspectives on the role of enzymes in brewing. Journal of Cereal Science, 50: 353 – 357, 2009.



- [26] MORALES-ORTEGA, A., NIÑO-MEDINA, G., CARVAJAL-MILLÁN, E., GARDEA-BÉJAR, A., TORRES-CHÁVEZ, P., LÓPEZ-FRANCO, Y., RASCÓN-CHU, A., LIZARDI-MENDOZA, J. Los arabinosilanos ferulados de cereales. Una revisión de sus características fisicoquímicas y capacidad gelificante. Revista Fitotecnia Mexicana, 36 (4): 439 – 446, 2013.
- [27] KROTTENTHALER, M., BACK, W., ZARNKOW, M. 2009. Wort Production. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 165 – 206.
- [28] KROTTENTHALER, M. 2009. Hops. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 85 –104.
- [29] ESSLINGER, H.M. 2009. Fermentation, Maturation and Storage. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 207 –224.
- [30] CASTLE MALTING. Tipos de lúpulo [en línea]. <<http://www.castlemalting.com/CastleMaltingHops.asp?P=105&Language=Spanish>>. [Consulta: 04 de marzo de 2016].
- [31] AB MAURI. Mauribrew brewing yeast [en línea]. <<http://www.maurivin.com/yeast.aspx?id=4&menu=open&parentid=282&menuid=286>>. [Consulta: 04 de marzo de 2016].
- [32] EUROPARC-ESPAÑA. Procedimiento para la redacción de procedimientos operativos e instrucciones de trabajo [en línea]. <[http://www.redeuoparc.org/sistema\\_calidad\\_turistica/ProcedimientoparalaRedaccion\\_Procedimientos.pdf](http://www.redeuoparc.org/sistema_calidad_turistica/ProcedimientoparalaRedaccion_Procedimientos.pdf)>. [Consulta: 27 de noviembre de 2015].
- [33] 5CONSULTORES. ¿Cómo hacer un procedimiento? [en línea]. <<http://www.5consultores.com/hacerprocedimiento/>>. [Consulta: 27 de noviembre de 2015].
- [34] MCCABE, W.L., SMITH, J., HARRIOTT, P. 2007. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ma edición. McGraw Hill/Interamericana Ediciones, Mexico D.F., México, 1190 págs.
- [35] CATRILEO, MATÍAS. Cervecerías Prost SpA. Curso de elaboración de cerveza artesanal. [conferencia]. Octubre de 2015.
- [36] LANGSTAFF, S.A., LEWIS, M.J. The mouthfeel of beer - a review. Journal of Institute of Brewing, 99: 31 – 37, 1993.
- [37] GRESSER, A. 2009. Properties and Quality. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 357 –397.
- [38] BAXTER, E.D., HUGHES, P.S. 2001. Beer: Quality, safety and nutritional aspects. 1ra edición. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, Inglaterra, 138 págs.

- [39] GUTIERREZ PULIDO, H., DE LA VARA SALAZAR, R. 2009. Control Estadístico de la Calidad y Six Sigma. 2da edición. McGraw-Hill, México D.F., México, 482 págs.
- [40] KING, J.P. 1999. Distributed Control Systems. En: MCMILLAN, G.K., CONSIDINE, D.M. (Ed.) Process/Industrial Instruments and Controls Handbook, 5ta edición., McGraw-Hill, Nueva York, U.S.A., págs. 3.6–3.31.
- [41] Ola de calor en el sur llegará a su momento máximo en tres regiones durante este domingo. El Mercurio, Santiago, Chile. Enero 2016.
- [42] CENTEC. Yeast Pitch - Yeast Dosing Sistem [en línea]. <<http://www.centec.de/en/products/food-beverages/brewery/fermentation/hds.html>>. [Consulta: 03 de abril de 2016].
- [43] PROTECNICA SOLUTIONS. ABER COMPACT In-Line Yeast Monitoring Instruments. Accurately Measure Live Cell Concentrations in Breweries [en línea]. <<http://www.protecnica.co.uk/yeast-analysis.html>>. [Consulta: 03 de abril de 2016].
- [44] ASBC METHODS OF ANALYSIS. 2011. Beer Method 13. Dissolved Carbon Dioxide. 14va edición. American Society of Brewing Chemists, St. Paul, MN, U.S.A.
- [45] DÍAZ BARAHONA, F. 2016. Desarrollo de colorantes naturales a partir de la fermentación de extractos de maltas especiales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 50 págs.
- [46] SEPÚLVEDA PÉREZ, T. 2016. Diseño de un proceso enzimático de elaboración de leche de avena con características funcionales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Biotecnología, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 106 págs.
- [47] SOMOS CERVECEROS. Protocolos de Calidad de Malta [en línea]. <<http://www.somoscervceros.com/wp-content/uploads/2013/08/Protocolos-de-Calidad-de-Malta.pdf>>. [Consulta: 12 de marzo de 2016].
- [48] WALLART EQUIPMENT. Brewing Equipment, Beverage Industry [en línea]. <<http://wallart-equipment.com/latest-projects/>>. [Consulta: 04 de abril de 2016].
- [49] BREWTOAD. Pitch Rate Calculator [en línea]. <<https://www.brewtoad.com/tools/pitch-rate-calculator>>. [Consulta: 12 de octubre de 2015].
- [50] NAGEL, J., CULLEY, L.K., LU, Y., LIU, E., MATTHEWS, P.D., STEVENS, J.F., PAGE, J.E. EST analysis of hop glandular trichomes identifies an O-Methyltransferase that catalyzes the biosynthesis of Xanthohumol. The Plant Cell, 20: 186 – 200, 2008.
- [51] TENGE, C. 2009. Yeast. En: ESSLINGER, H.M. (Ed.) Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets, Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, págs. 119–146.
- [52] NELSON, D.L., COX, M.M. 2009. Lehninger. Principios de Bioquímica. 5ta edición.

Ediciones Omega S.A., Barcelona, España, 1286 págs.

- [53] ECUADOR. Servicio Ecuatoriano de Normalización, 1994. NTE INEN 0340: Bebidas alcohólicas. Determinación del grado alcohólico. Inf. téc., octubre, 1994. 16 págs.
- [54] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2013. Destilación de un vino comercial para la determinación de su grado alcohólico [videograbación], 2013. Madrid, Instituto de Ciencias de la Educación. Disponible en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=upBaDKAzXJg>>, 7 minutos, sonido, color.

# Anexos

# Anexo A

## Estructura del grano de cebada

El grano de cebada posee una estructura compleja, la que se encuentra esquematizada en la figura A.1. Dentro del grano de cebada se pueden reconocer las siguientes estructuras:

- **Lema y palea:** La cáscara que recubre al grano de cebada está conformada por la lema en el lado dorsal y la palea por el lado ventral. El fin principal de la lema y la palea es otorgar protección al interior del grano [11].
- **Pericarpio:** Es la estructura que se encuentra inmediatamente bajo la lema y palea. También otorga protección al grano, pero a diferencia de la cáscara, el pericarpio posee actividad fotosintética [13].
- **Arista:** Delgada y puntiaguda espiga unida a la lema previo al trillado del grano de cebada [11].
- **Raquilla:** Eje que sobresale en la unión entre el grano y la planta, sobre el surco ventral. La raquilla varían en tamaños y formas, por lo que se usa para determinar la variedad del grano de cebada a utilizar [11].
- **Testa:** La testa es la región que regula la difusión de nutrientes entre el interior y el exterior del grano [11].
- **Aleurona:** Estructura delgada rica en proteínas. Aporta aproximadamente el 30 % de las proteínas de la cebada y contiene enzimas que participan en el proceso de malteo del grano (principalmente  $\alpha$  y  $\beta$  - amilasas) [13]. También comprende parte de la capa sub-aleuronal, que posee estructuras tanto de la aleurona como del endospermo [11].
- **Embrión:** El embrión está encargado de controlar la germinación de la planta. A diferencia del resto de las estructuras del grano de cebada, posee células vivas, las cuales se activan cuando se reúnen las condiciones necesarias para la germinación. Dentro del embrión se encuentran las raicillas, las que emergen de la coleoriza y que posteriormente formarán las futuras raíces de la planta. El embrión se encuentra protegido por el escutelo, y se separa del endospermo por una pequeña capa de células aplanadas. También se encuentra dentro del embrión la acróspira, estructura que dará origen al tallo [11, 13].

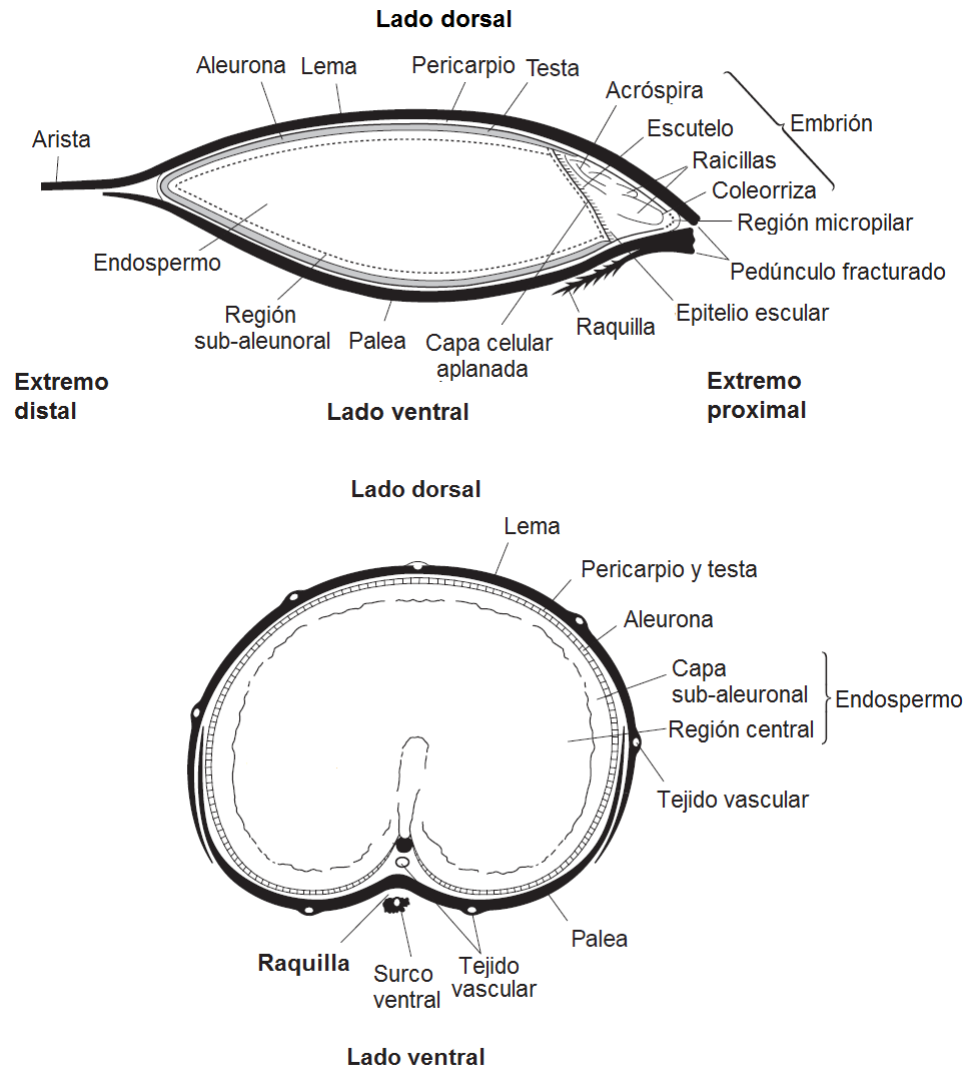


Figura A.1: Esquemas de la sección longitudinal y transversal del grano de cebada. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

- Endospermo:** El endospermo es una estructura muerta que contiene la reserva de almidón del grano. El almidón se encuentra dentro de gránulos de proteínas y  $\beta$  - glucanos de tamaño pequeño (diámetro 1,7 - 2,5  $\mu m$ ) y grande (diámetro 22,5 - 47,5  $\mu m$ ). Durante la germinación, las enzimas presentes en la aleurona y en la capa sub-aleunoral digieren el almidón para así proveer de energía al desarrollo del embrión [11].

## Anexo B

# Análisis fisicoquímicos de la malta y adjuntos

En la industria maltera existen una amplia gama de análisis para evaluar la calidad de las maltas producidas. Tales parámetros son de vital importancia para los cerveceros pues entregan información de la cantidad de azúcares solubles se pueden obtener en la malta, como también tiempos de filtración, color, entre otros.

Algunos de los análisis requieren la preparación de una maceración de laboratorio para poder medir propiedades como el color, o la viscosidad de la malta. Esta maceración se conoce como “maceración de mosto congreso” y fue definida por la EBC. El método comienza con la molienda de 55 g de malta, utilizando un molino de disco con una apertura de 0,2 mm, para luego agregar 200 ml de agua. Se realiza una maceración escalonada, partiendo con un descanso de 30 minutos a 45°C, para luego aumentar gradualmente la temperatura en 1°C por minuto hasta alcanzar los 70°C. Se mantiene la temperatura durante 1 hora para luego filtrar el mosto utilizando papel filtro y tomar mediciones de gravedad específica, contenido de proteínas, viscosidad, entre otros [15, 47]. Algunos de los análisis más importantes se presentan en la tabla B.1.

Tabla B.1: Algunos parámetros de calidad para las maltas. Se presentan los valores típicos para una malta base.

<b>Análisis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valores Típicos</b>
<b>Tiempo de filtración</b>	Medición del tiempo de filtración del mosto congreso. Buenas maltas tienen tiempo de filtración menor a una hora [15]	< 1 hora [15] .
<b>Color</b>	Medición del color del mosto congreso. Depende del tipo de malta utilizada. Ocasionalmente se presenta también el color del mosto hervido [11]	3 EBC [13, 22]
<b>Extracto</b>	Porcentaje en peso de las sustancias que se solubilizan en el mosto durante la maceración. Se calcula obteniendo la fracción de sólidos en solución después de realizar la maceración. [11, 13, 15]	82 % [13, 22]
<b>Proteína total</b>	Contenido de proteína (en peso seco) presentes en el grano de malta. Maltas con un contenido mayor a un 12 % deberían no ser utilizadas en el proceso cervecero [13, 47]	10,5 % [22]
<b>Índice de Kolbach</b>	Relación entre el contenido de proteína soluble y proteína total. A mayor índice de Kolbach, mayor es el grado de modificación de la malta [47].	41 % [22]
<b>Viscosidad</b>	Medición de la viscosidad del mosto congreso. Valores sobre 1,75 cP pueden generar problemas durante la filtración en el proceso cervecero [13]	1,45 cP [22]
<b>Poder Diastásico</b>	Medida de la actividad de las enzimas $\alpha$ y $\beta$ amilasa en la digestión del almidón. Se mide en Unidades Windish-Kolbach ( $^{\circ}$ WS) [15, 22].	311 $^{\circ}$ WS [22]
<b>Amino Nitrógeno Libre</b>	Contenido de aminoácidos de la malta, resultante de la degradación de proteínas. Es requerido por las levaduras durante la fermentación [11, 13, 15, 22].	140 mg/100g [22]



# Anexo C

## Proceso de Elaboración de Cervezas

### C.1. Molienda del grano

El proceso comienza con la recepción de los granos de malta. Generalmente, las industrias cerveceras almacenan la malta en silos de acero inoxidable u hormigón, a una temperatura entre los 12 - 15 °C y humedad reducida, para evitar el desarrollo de colonias de insectos como los gorgojos [12]. Posteriormente, el proceso sigue con la molienda del grano. El objetivo de la molienda es triturar el grano para facilitar la recuperación de azúcares durante la etapa de maceración [11–14]. El tamaño de partícula de la molienda dependerá de las características de los equipos a utilizar en el proceso cervecero, ya que partículas de tamaño pequeño afectarán en el proceso de filtración del mosto, aumentando la resistencia de la torta filtrante [12,34].

En la industria cervecera, los molinos de martillo y los molinos de cilindros son los más usados. Si bien la molienda puede ser húmeda o seca, la molienda seca suele utilizar molinos de cilindros rotatorios. Dependiendo del volumen de malta a moler, se utilizan molinos con uno, dos o tres pares de cilindros rotatorios [27].

### C.2. Maceración

Posterior a la molienda, sigue la etapa de maceración. Durante la maceración se realiza la extracción del almidón soluble, que se encuentra originalmente encapsulado dentro del endospermio triturado del grano de malta. También, se produce la degradación enzimática de las cadenas de amilosa y amilopectina, produciendo carbohidratos de menor tamaño, que posteriormente se utilizarán por las levaduras durante la fermentación [11,12,14]. Existen un número no menor de enzimas que actúan dentro del grano de malta, tales como amilasas, proteasas, glucanasas, las que se describen en la tabla C.1, siendo las más importantes, para el proceso cervecero, las amilasas  $\alpha$  y  $\beta$ . Estas dos últimas enzimas son las encargadas de hidrolizar las cadenas de almidón para formar maltosa y dextrinas.

Tabla C.1: Temperatura y pH óptimos de algunas enzimas de la cebada malteada durante la mace-ración. Adaptado de Krottenthaler *et. al.*, 2009 [27].

<b>Enzima</b>	<b>Temp. óptima [°C]</b>	<b>pH ópti-mo</b>	<b>Sustratos</b>	<b>Productos</b>
$\beta$ -glucano solubilasa	62 - 65	6,8	Matriz de $\beta$ -glucanos	$\beta$ -glucanos solubles
Endo-1-3- $\beta$ -glucanasa	<60	4,6	$\beta$ -glucanos solubles	$\beta$ -glucanos de bajo peso molecular, celobiosa, laminaribiosa
Endo-1-4- $\beta$ -glucanasa	40 - 45	4,5 - 4,8	$\beta$ -glucanos solubles	$\beta$ -glucanos de bajo peso molecular, celobiosa, laminaribiosa
Exo- $\beta$ -glucanasa	<40	4,5	celobiosa, laminari-biosa	glucosa
Endopeptidasa	45 - 50	3,9 - 5,5	proteínas	péptidos, aminoáci-dos libres
Carboxipeptidasa	50	4,8 - 4,6	proteínas, péptidos	aminoácidos libres
Aminopeptidasa	45	7,0 - 7,2	proteínas, péptidos	aminoácidos libres
Dipeptidasa	45	8,8	dipéptidos	aminoácidos libres
$\alpha$ -amilasa	65 - 75	5,6 - 5,8	amilosa, amilopecti-na	oligosacáridos
$\beta$ -amilasa	60 - 65	5,4 -5,6	amilosa, amilopecti-na	maltosa
Maltasa	35 - 40	6,0	maltosa	glucosa
Dextrinasa límite	55 -65	5,1	dextrinas límite	dextrinas
Lipasa	55 - 65	6,8 - 7,0	lípidos, hidroxi-peróxidos de ácidos grasos	glicerina, ácidos gra-sos, hidroxiperóxidos
Lipoxigenasa	45 -55	6,5 - 7,0	ácidos grasos de ca-dena larga	hidroxiperóxidos de ácidos grasos
Polifenol oxidasa	60 - 65	6,5 -7,0	polifenoles	polifenoles oxidados
Peroxidasa	>60	6,2	Sustratos orgánicos e inorgánicos	radicales libres
Fosfatasas	50 - 53	5,0	fosfato orgánico	fosfato inorgánico

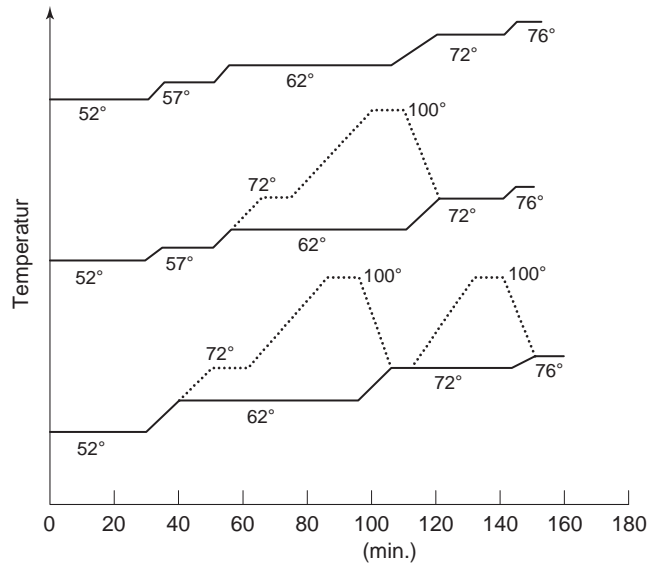


Figura C.1: Comparación entre 3 programas de maceración distintos. El gráfico superior representa una maceración por infusión utilizando un programa de temperatura, mientras que el gráfico central representa un sistema de decocción simple y el último un sistema de doble decocción. Al utilizar una maceración con programación de temperatura pueden definirse los escalones de temperatura utilizando el mismo equipo. En cambio, al utilizar programas de decocción, se requiere la utilización de al menos un equipo extra para llevar a ebullición parte del mosto (lo que se muestra a través de las líneas discontinuas) y así aumentar la temperatura de la mezcla. Imagen adaptada de de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

Las reacciones enzimáticas de la maceración pueden ser controladas por parámetros como la temperatura, viscosidad, pH y tiempo. A lo largo del tiempo se han desarrollado varios métodos de maceración, los que pueden dividirse en dos grupos: maceración por infusión y por decocción [27]. La decocción fue el primer método de maceración utilizado y consistía en la extracción de una fracción del *mash* del recipiente, generalmente un cuarto del total, el que era llevado a ebullición y luego agregado nuevamente al recipiente original, aumentando así gradualmente la temperatura del macerador desde los 40°C hasta los 75°C [12]. El aumento gradual de la temperatura permitía alcanzar las condiciones óptimas para la hidrólisis de las paredes celulares del endospermo (40°C - 54°C), la hidrólisis del almidón (54°C - 65°C) y la inactivación enzimática (73°C) a distintos instantes de tiempo, aumentando el rendimiento del proceso y la extracción de azúcares fermentables [11, 12, 14, 15, 27].

Los métodos de infusión son utilizados en mayor proporción en la actualidad, donde, a diferencia de lo que se realiza en el método de decocción, se utiliza una temperatura fija durante todo el proceso, o bien, el aumento de la temperatura del *mash* se realiza utilizando serpentines y/o chaquetas, siguiendo un programa predeterminado de temperaturas, que puede ser regulado a través de un sistema de control [11, 12, 27], evitando así el traspaso de parte del mosto hacia una caldera para elevar su temperatura. Una comparación entre los programas de maceración para la infusión escalonada y la decocción se presenta en la figura C.1.

Los equipos utilizados en la industria cervecera para la maceración son las cubas de mezcla

(*mash tun*, en inglés), los equipos para decocción y los maceradores con control de temperatura. Un esquema de cada uno de ellos se presenta en la figura C.2. Las cubas de mezclas son utilizadas para elaboración de mostos con maltas altamente modificadas, pues sólo utilizan un descanso de temperatura entre los 60°C y 70°C. Cuentan con un fondo falso, lo que permite que la filtración del mosto se realice en el mismo equipo y no sea necesario contar con un equipo de filtración extra [11, 12]. Los equipos para decocción se encuentran en altura, lo que permite la remoción de parte del *mash* por la zona inferior de éstos, para luego dirigirse a la caldera y llevarlos a ebullición. Luego, cuentan con un sistema de bombas que permiten reingresar el mosto hervido hacia el macerador [11, 12]. Finalmente, están los equipos de maceración con control de temperatura, los cuales poseen chaquetas calefactoras, donde el flujo de vapor puede ser regulado por un sistema de control y así lograr maceraciones con descansos a distintas temperaturas [11, 12].

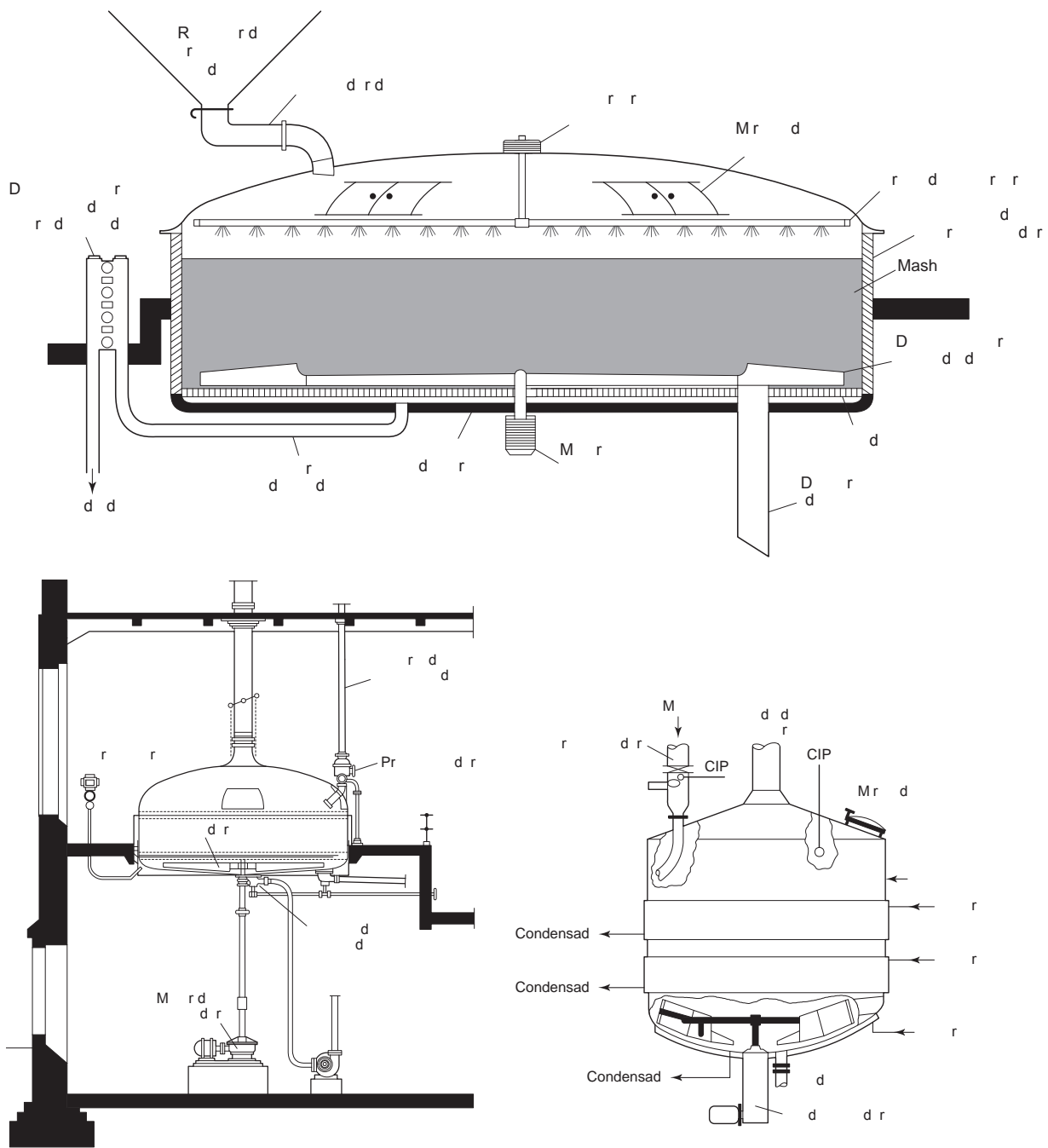


Figura C.2: Equipos utilizados para la maceración. En la zona superior, una cuba de mezcla. En la zona inferior izquierda, un sistema de maceración por decocción y a la derecha un macerador con control de temperatura. Imágenes adaptadas de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

### C.3. Filtración

La filtración tiene como objetivo separar el mosto rico en azúcares fermentables de los granos agotados, lo que se conoce como bagazo. Los principios que rigen la filtración dependen del equipo utilizado, los cuales son tres: La cuba de mezcla, tal como se mostró en la sección anterior, las cubas-filtro (o *lauter tun* en inglés) y los filtros de mosto.

En las cubas de mezcla, la presencia del fondo falso permite retener los granos agotados y retirar el mosto por la zona inferior del equipo. Sin embargo, al comienzo de la filtración en las cubas de mezcla, el mosto contiene restos de granos, lo que se nota por la turbidez presente en él. Por tal razón, el mosto recién filtrado es reingresado a la cuba hasta que se obtenga a la salida del equipo un mosto sin presencia de partículas. Esta etapa de la filtración es llamada recirculación. Luego, durante la filtración del mosto, al momento en que se observa que la capa superior de la torta comienza a secarse, se realiza el lavado de la torta, donde se ingresa agua a 70°C aproximadamente para desplazar al mosto y extraer azúcares fermentables que hayan quedado retenidos. Finalmente, el proceso de lavado se detiene cuando la gravedad del producto a la salida de la cuba se acerca a la gravedad específica del agua (por ejemplo, una gravedad de 1.005) [11, 12].

Las cubas-filtro (que se muestra en la figura C.3) separan el mosto del bagazo cuando se utilizaron equipos de decocción o maceradores con control de temperatura. Tienen una forma similar a las cubas de mezcla, con la diferencia que éstas poseen un sistema de rastrillos que permiten agitar y “rascar” la torta formada en el equipo [11, 12].

En cuanto a los filtros de mosto, existen varios tipos de equipos, pero todos siguen el mismo principio: utilización de una tela filtrante, como algodón o polipropileno, compresión de la torta y lavado. Los nuevos equipos para la filtración de mosto son llamados filtros de membranas compresoras (ver figura C.4), ya que poseen una membrana impermeable que puede aumentar su tamaño al ingresar aire comprimido. Esto permite el desplazamiento de líquido que haya quedado en la torta debido a la compresión que aplica la membrana. Luego, se ingresa agua de lavado, resuspendiendo la torta para luego volver a ser comprimida y así extraer azúcares fermentables que hayan quedado retenidos en el bagazo [11].

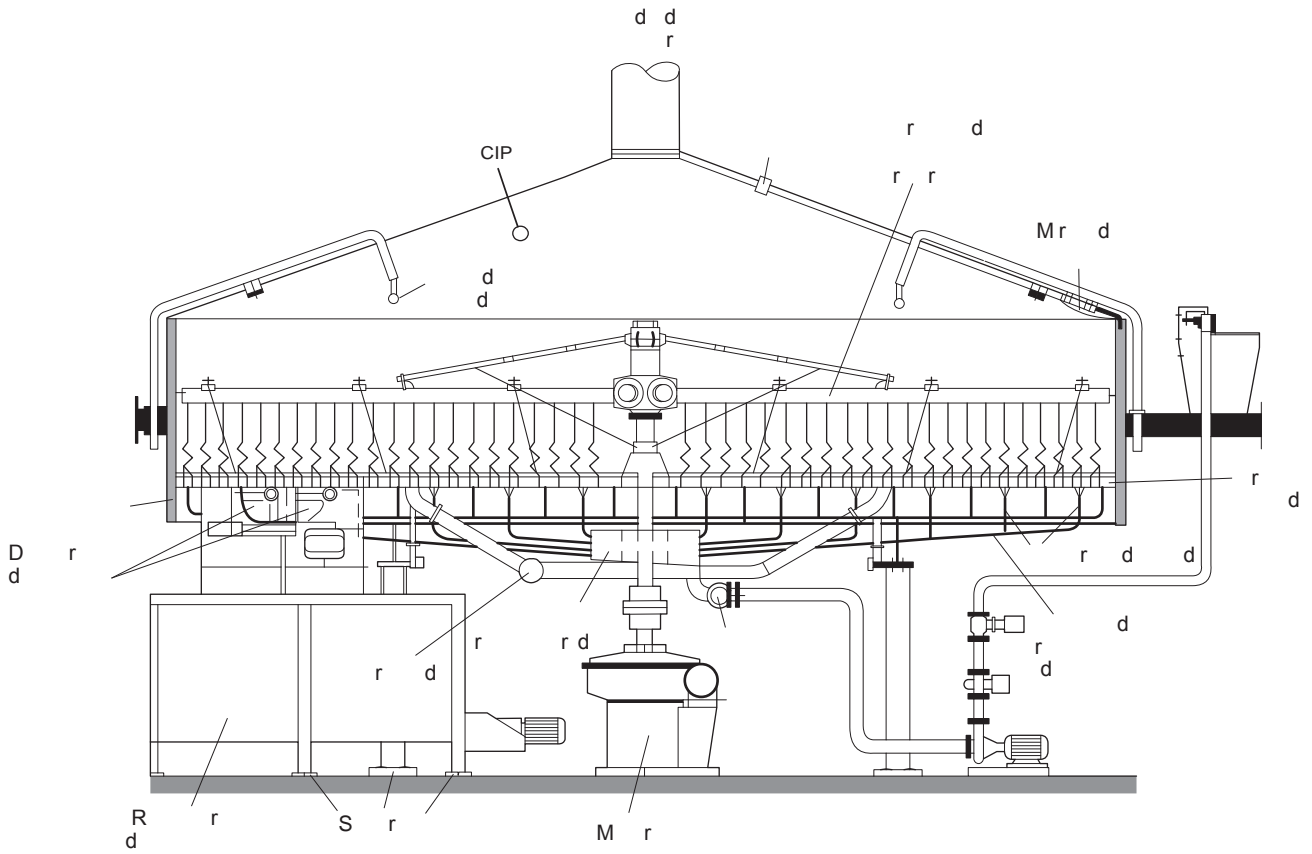


Figura C.3: Diagrama de una cuba-filtro. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].



Figura C.4: Fotografía a un filtro de membrana compresora. Fuente: Wallart Equipments, 2016 [48].

## C.4. Cocción

Luego de la filtración, sigue la etapa de cocción, que consiste en llevar a punto de ebullición el mosto dulce por un tiempo entre los 60 y 90 minutos. Durante la cocción ocurren varios procesos fisicoquímicos, dentro de los cuales se encuentran:

- Esterilización del mosto.
- Coagulación de proteínas y taninos.
- Precipitación de fosfatos de calcio y disminución del pH del mosto.
- Destilación de productos volátiles.
- Concentración del mosto por evaporación de agua.
- Producción de coloración debido a las reacciones de pardeamiento no enzimático (Caramelización y Maillard).
- Isomerización de los  $\alpha$ -ácidos del lúpulo.
- Adición de aceites esenciales del lúpulo.

Tal como se mencionó en la sección D.1, durante la cocción se produce la isomerización de los  $\alpha$ -ácidos del lúpulo, lo que permite la solubilización de las sustancias amargas en el mosto [11, 12, 28]. La adición del lúpulo a comienzos de la cocción aumenta la utilización de éste, entregando una mayor fracción de  $\alpha$ -ácidos a la cerveza. Sin embargo, los aceites esenciales sufren el efecto contrario: la volatilidad de tales compuestos reduce la fracción de sustancias aromáticas presentes en la cerveza. Por tal razón, el tiempo de adición del lúpulo dependerá si se desea utilizar para entregar amargor o aromas a la cerveza [12, 13].

Las altas temperaturas a las que es llevado el mosto provoca su esterilización, eliminando gran parte de los microorganismos que lo hayan infectado. Las altas temperaturas también afectan a las proteínas, produciendo la pérdida de sus estructuras secundarias y terciarias, lo que, en conjunto con la interacción con taninos y metales, provoca la ruptura de éstas, produciendo péptidos de menor tamaño. La disminución en el pH del mosto produce la coagulación de los polipéptidos, los cuales tienden a formar complejos con los polifenoles de la malta y el lúpulo, formando conglomerados de hasta 10 cm de diámetro [12].

Durante la cocción del mosto tiene también una participación importante las reacciones de Maillard y de Caramelización, conocidas en conjunto como reacciones de pardeamiento no enzimático. Los azúcares fermentables interactúan con aminas o aminoácidos presentes en el mosto, lo que lleva a la formación de melanoidinas, moléculas de gran tamaño que aportan color y heterociclos, aportando sabores acaramelados o tostados [11, 13].

Compuestos presentes en la malta que aportan sabores desagradables a la cerveza son eliminados durante la cocción por destilación. El más importante de tales compuestos es el sulfuro de dimetilo (DMS), que es generado en la cocción del mosto por la degradación de compuestos sulfurados presentes en la malta [11]. Sin embargo, el DMS es altamente volátil, por lo que tiempos largos de cocción disminuyen el contenido de DMS en el mosto [11].

La industria cervecera utiliza equipos de cobre o acero inoxidable que permiten calentar el mosto a través de chaquetas tal como el que se muestra en la figura C.5. Generalmente, las su-



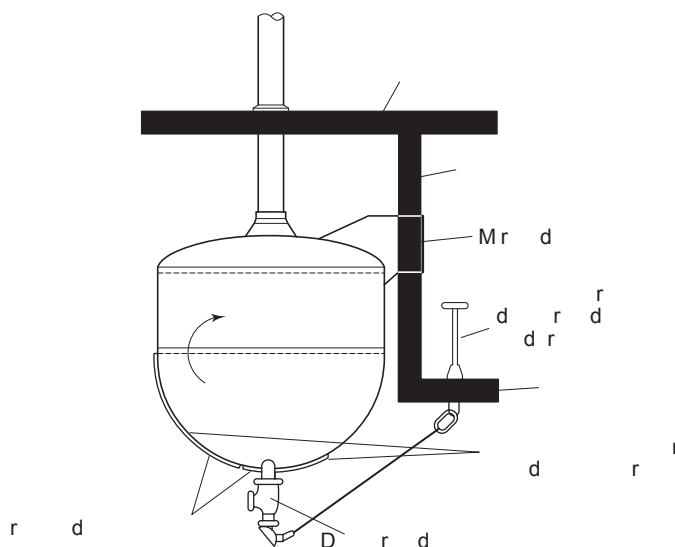


Figura C.5: Caldera de cobre de base redonda con chaquetas calefactoras ubicadas asimétricamente. Imagen adaptadas de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

perfiles de calentamiento de las calderas de cocción se encuentran ubicadas asimétricamente para evitar el sobrecalentamiento del mosto, además de favorecer movimientos convectivos al interior de éste [11]. En los últimos años, equipos de cocción a altas presiones han sido desarrollados, los cuales permiten realizar todo el proceso en sólo 4 minutos [11, 12].

Una vez finalizada la cocción se procede a la clarificación del mosto, que corresponde a la eliminación de las proteínas floculadas y de los restos de lúpulo. El sedimento formado por las proteínas floculadas es conocido en el mundo cervecero como *trub*. Suelen utilizarse equipos denominados “estanques remolino” (whirlpool tank, estanque whirlpool o simplemente whirlpool) donde el principio físico que permite la separación del trub es la inyección de la alimentación a alta velocidad a través de una tubería tangencial a la superficie lateral del estanque, generando un movimiento circunferencial. Por efecto del roce, el fluido pierde momentum, lo que permite la depositación de los sólidos en suspensión en el centro de la base del equipo. El contenido del estanque es recirculado, para mantener el movimiento al interior del whirlpool por un tiempo entre 20 a 45 minutos [12]. Un diagrama de las corrientes al interior del estanque whirlpool se presenta en la figura C.6.

Como se muestra en la figura C.7, los estanques whirlpool pueden tener bases planas con una inclinación pequeña (para facilitar el drenaje del trub), o tener bases cónicas, con inclinaciones de 30°. En el segundo caso, es probable que el trub contenga mosto también, por lo que algunas industrias cerveceras terminan de separar el trub remanente en el equipo por centrifugación [11].

Finalmente, luego de la clarificación, continua la etapa de enfriado del mosto. Esta se realiza utilizando intercambiadores de calor de placas, usando como refrigerantes agua, alcohol, amoniaco, glicol o salmueras [11, 12]. Las temperaturas típicas requeridas para el mosto frío varían entre los 15°C - 22°C para ales y 6°C y 12°C para lagers, que corresponden a las temperaturas de inoculación de las levaduras para la fermentación del mosto.

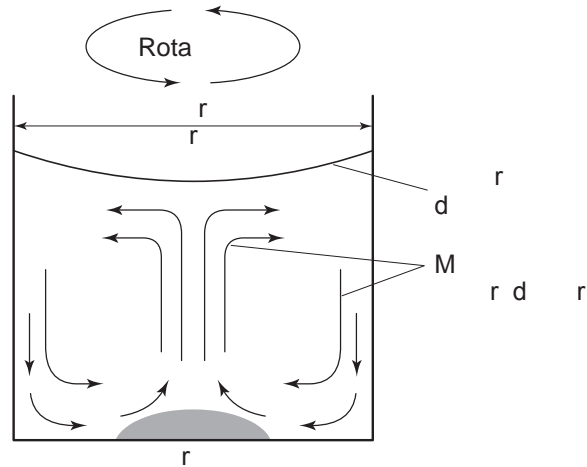


Figura C.6: Patrón de flujo ideal al interior de un estanque whirlpool. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

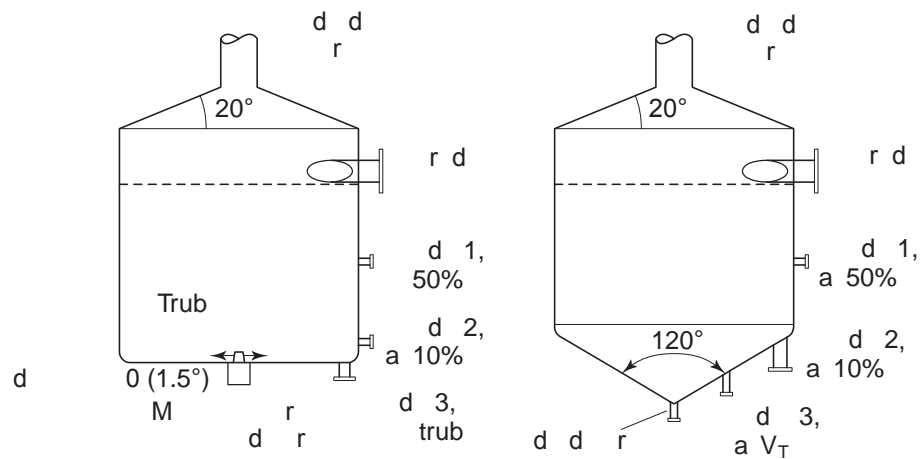


Figura C.7: Dos esquemas de estanques whirlpool. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

Es importante mencionar que la etapa de enfriado debe realizarse rápidamente, y bajo condiciones acépticas, para reducir el riesgo de contaminación biológica [11].

## C.5. Fermentación

La transformación del mosto a cerveza corresponde a una de las etapas más importantes del proceso cervecero. La fermentación corresponde a la utilización de sustratos por microorganismos para la obtención de productos y energía. En el proceso cervecero, los microorganismos corresponden a las levaduras cerveceras, mientras que los productos son el etanol y el dióxido de carbono.

La fermentación comienza con la inoculación de la levadura, la cual puede ser realizada mezclando parte del mosto con la levadura, antes de ser agregada al equipo. La tasa de inoculación recomendada varía entre los  $1 - 2 \cdot 10^7$  células por mililitro de mosto [11, 14, 29], aunque otros autores recomiendan variar la tasa de inoculación de levadura en función de la gravedad del mosto [13, 49].

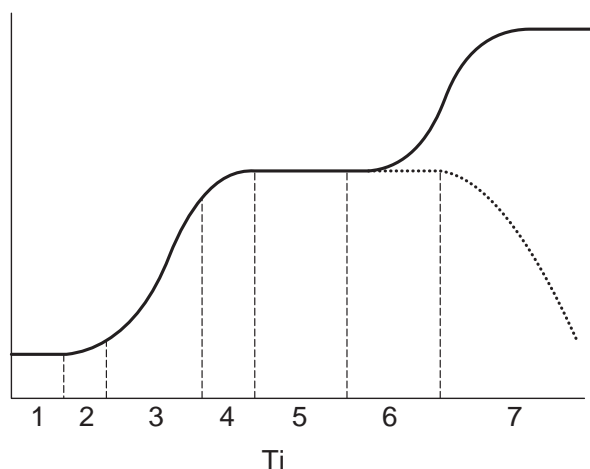


Figura C.8: Crecimiento de la levadura en cultivo batch. El medio de cultivo contiene azúcares fermentables como fuente principal de carbono. Las etapas indicadas corresponden a: 1: latencia, 2: aceleración del crecimiento, 3: fase de crecimiento exponencial, 4: desaceleración del crecimiento, 5: Fase estacionaria, 6: Etapa de crecimiento diáuxico, 7: segunda fase de crecimiento en presencia de oxígeno (línea sólida) o muerte celular en ausencia de oxígeno (línea punteada). Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

Durante la fermentación, la levadura aumenta su masa entre 2 a 3 veces [29], siguiendo un proceso de crecimiento celular como el que se representa en la figura C.8. Después de la inoculación, se observa una etapa de latencia, donde las levaduras comienzan a adaptarse al medio, para luego comenzar a dividirse, dando paso a las fases de aceleración del crecimiento y la etapa de crecimiento exponencial. Cuando el crecimiento se detiene, las levaduras entran a la fase estacionaria, donde la biomasa al interior del fermentador se mantiene constante. Cultivos aeróbicos de levadura poseen una curva de crecimiento bifásica, donde al inicio utilizan los azúcares del mosto para producir etanol, para luego tener una nueva fase de crecimiento utilizando el etanol previamente producido. En condiciones anaeróbicas, como en la fermentación de la cerveza, las levaduras no pueden utilizar etanol como fuente de energía, dando paso a la muerte celular [11].

Además de la producción de etanol, otros subproductos derivados del metabolismo de la levadura son producidos, dentro de los cuales se pueden mencionar alcoholes de mayor peso molecular, ésteres, compuestos carbonílicos, compuestos sulfúricos, y ácidos orgánicos, los cuales aportan sabores y aromas a las cervezas [29]. La producción de tales compuestos provoca una caída en el pH de la cerveza, desde los 5.4 hasta valores cercanos a los 4.3-4.6 [29].

Los niveles de producción de subproductos de la fermentación pueden ser influenciados tanto por las condiciones de operación como de la tecnología cervecera utilizada [11]. Dentro de estos factores se encuentran:

- Mostos de altas densidades iniciales ( $OG > 1,060$ ).
- Aireación del mosto al comienzo de la fermentación.
- Temperaturas de fermentación altas.
- Cepas de levaduras utilizadas.

Los tiempos de fermentación dependen del tipo de cerveza a elaborar. Cervezas ale tienen tiempos de fermentación que pueden ser de 3 días (figura C.9.a) mientras que las cervezas lager pueden extenderse por más de una semana (figura C.9.b). La utilización de temperaturas más altas en la elaboración de cervezas ale aumenta el metabolismo celular, lo que provoca la reducción de los tiempos [11, 12, 29]. Como consecuencia de esto, las cervezas ale poseen mayores concentraciones de alcoholes de mayor peso molecular (alcoholes fúsel) y ésteres, provocando que estas cervezas posean sabores más complejos que las lagers [11, 13].

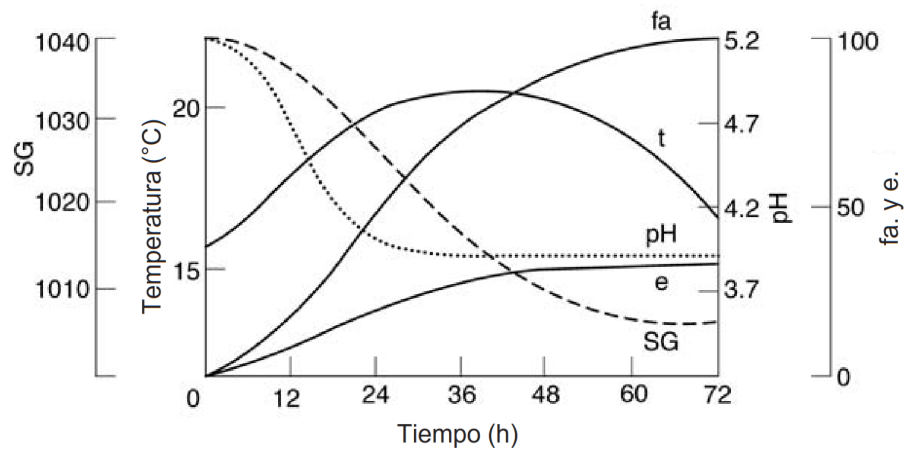
Los fermentadores utilizados en la industria cervecera corresponden mayoritariamente a estanques cilindrocónicos, como el de la figura C.10 ya que la base cilindrocónica favorece la sedimentación de las levaduras al incrementar las corrientes de convección al interior del estanque [12]. También existen equipos de fermentación continua, compuestos por quimios-tatos en serie o por reactores de flujo pistón. Sin embargo, los costos de capital asociados a estos equipos son mucho mayores que los fermentadores cilindrocónicos, haciendo que la fermentación continua de cerveza sea aplicada en sólo un pequeño número de fábricas en el mundo [12].

## C.6. Maduración

La cerveza, después de completar la fermentación, es llamada *cerveza verde*, por lo que debe pasar por una etapa de maduración. A la salida del fermentador, existe una baja concentración de dióxido de carbono en la cerveza, además de tener un alto nivel de turbidez y aromas y sabores mucho menos marcados que en la cerveza lista para ser comercializada. El proceso de maduración, llamado también *lagering* cuando se trata de cervezas lager, toma tiempos de aproximadamente 2 semanas, aunque en algunos otros casos puede extenderse hasta por meses [11].

Durante la maduración suele existir una “segunda fermentación”, la que es ocasionada por levaduras en suspensión que utilizan los azúcares remanentes de la fermentación primaria, o bien, azúcares añadidos para inducir tal fermentación. La fermentación secundaria produce

(a)



(b)

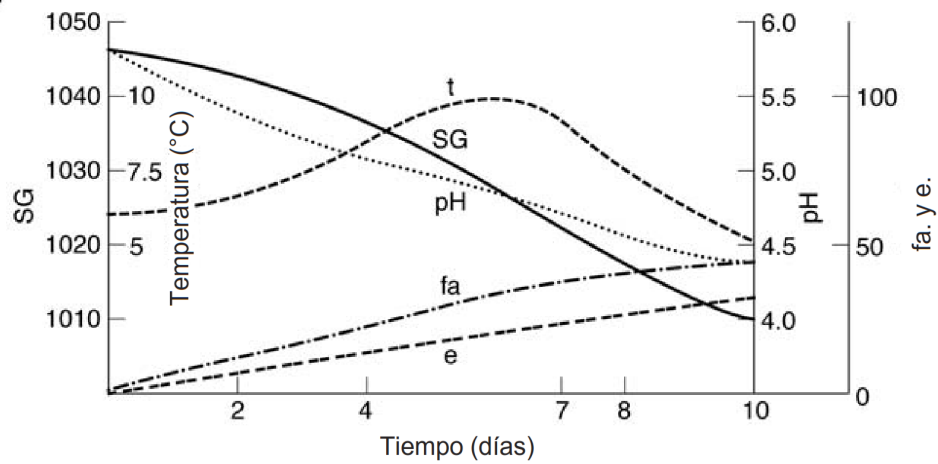


Figura C.9: Avance temporal de fermentaciones ale (a) y lager (b). fa: Concentración de alcoholes fúsel ( $\mu\text{g/l}$ ); e: concentración de ésteres ( $\mu\text{g/l}$ ); t: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); SG: gravedad específica; pH: poder de Hidrógeno. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

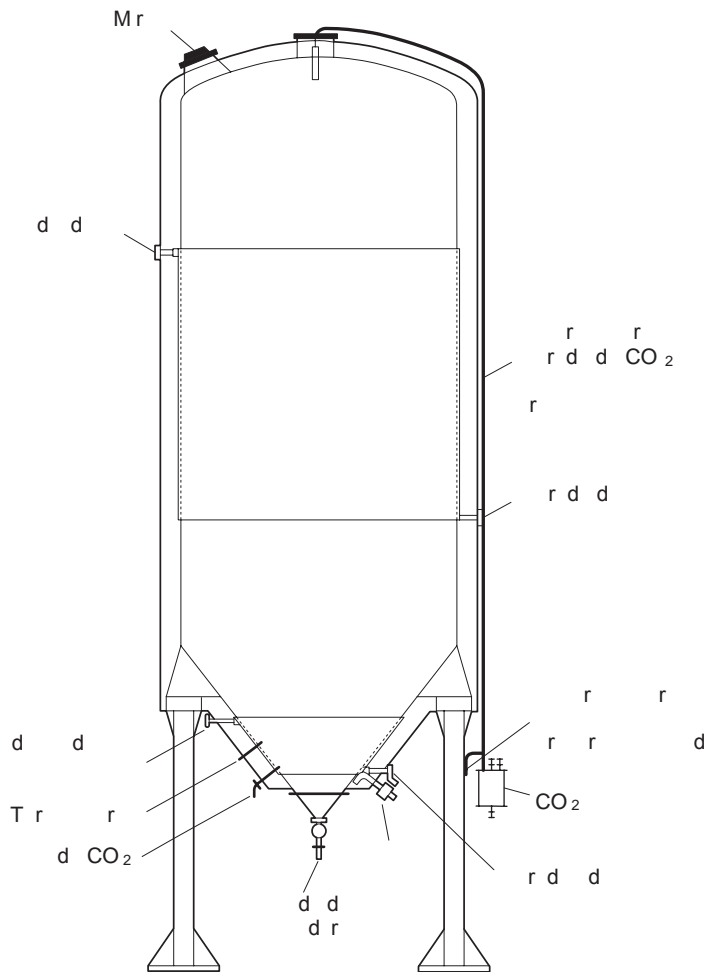


Figura C.10: Fermentador cilindrocónico. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

CO<sub>2</sub>, el que puede disolverse en la cerveza, carbonatándola si se utilizan equipos herméticos para la maduración [11].

Otro fenómeno importante que ocurre durante la maduración es la reduciendo de la turbidez no-biológica de la cerveza [11]. La turbidez se genera por la presencia de los complejos entre proteínas y taninos, los que pueden conglomerar y formar partículas en suspensión. Se han caracterizado dos tipos de turbidez no-biológica: la turbidez por frío, que se genera al enfriar la cerveza a temperaturas cercanas a los 0°C y desaparece al aumentar la temperatura, y la turbidez permanente, que una vez formada se mantiene allí [11–13, 29].

En la industria cervecera suelen agregarse aditivos para reducir la turbidez de la cerveza durante la maduración. La mayoría de los aditivos son proteasas (para hidrolizar las proteínas remanentes), agentes precipitantes (los cuales forman complejos insolubles con las proteínas) o adsorbentes (los que adsorben en su superficie a proteínas por medio de atracción electrostática) [11, 12, 29].

Con respecto al desarrollo del sabor, durante la maduración se eliminan compuestos producidos durante la fermentación como diacetilo, compuestos sulfurados derivados del DMS o aldehídos generados por la oxidación del etanol. Estos compuestos, que afectan negativamente a la cerveza, pueden ser eliminados por la eliminación controlada de dióxido de carbono, e impidiendo el ingreso de oxígeno al estanque de maduración.

Un estanque de maduración típico se presenta en la figura C.11. Los estanques de maduración suelen utilizar chaquetas refrigerantes para mantener bajas las temperaturas al interior de ellos. Deben contener un *head space* mínimo de un 5 % del volumen de cerveza contenido, para evitar un aumento de presión excesivo por la producción de dióxido de carbono en la segunda fermentación, llegando hasta un 25 % en caso que exista también una alta tasa de volatilización de compuestos como diacetilo o derivados del DMS [11].

Luego de la maduración, la cerveza debe pasar por un proceso de clarificación, donde se retiran los agentes causantes de la turbidez, como las proteínas denaturadas y las levaduras en suspensión. Parte de estos componentes son retenidos en los estanques de maduración, los que decantan y tienden a ubicarse en la sección cónica del equipo, mientras que el resto son separados de la cerveza utilizando otros equipos, como filtros de placa o centrífugas [11, 12].

Finalmente, previo al envasado de la cerveza, se debe pasar por una etapa de carbonatación, en la cual se adiciona CO<sub>2</sub>, bajo determinadas condiciones de temperatura y presión. Estas condiciones son definidas en función del nivel de carbonatación que se desea en la cerveza, las que se obtienen a partir de las relaciones de equilibrio para la absorción de CO<sub>2</sub> (Figura C.12). Cervezas lager comúnmente tienen un nivel de gasificación de 2,5 volúmenes de CO<sub>2</sub> (5 g/L) [11]. La adición de dióxido de carbono puede ser realizada en línea, mientras la cerveza es enfriada cuando es dirigida desde los estanques de maduración hacia los estanques gasificadores. Los sistemas de gasificación actuales están conformados por tuberías largas, dobladas en forma de U, con la instalación de una “piedra gasificadora”, que no es más que un difusor de gas, permitiendo la generación de finas burbujas que favorecen el proceso de absorción de CO<sub>2</sub> al aumentar el área de contacto entre las fases [11] (ver figura C.13). La gasificación también puede realizarse de forma batch en un estanque gasificador, siendo mucho menos eficiente que la gasificación en línea [11].

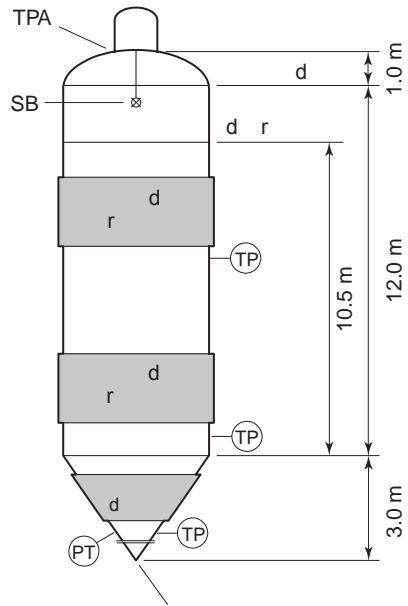


Figura C.11: Esquema de un estanque de maduración de 1600 hl. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

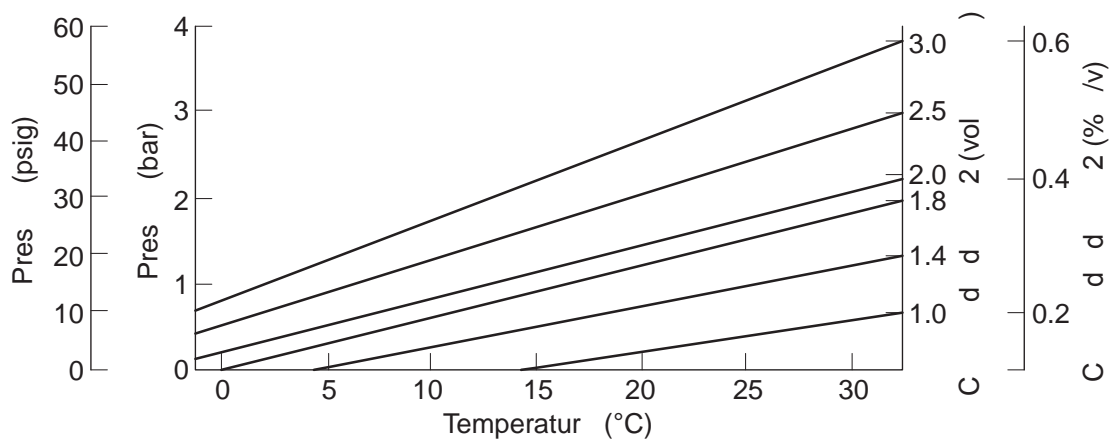


Figura C.12: Relación entre el contenido de CO<sub>2</sub>, temperatura y presión de la cerveza en condiciones de equilibrio. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].



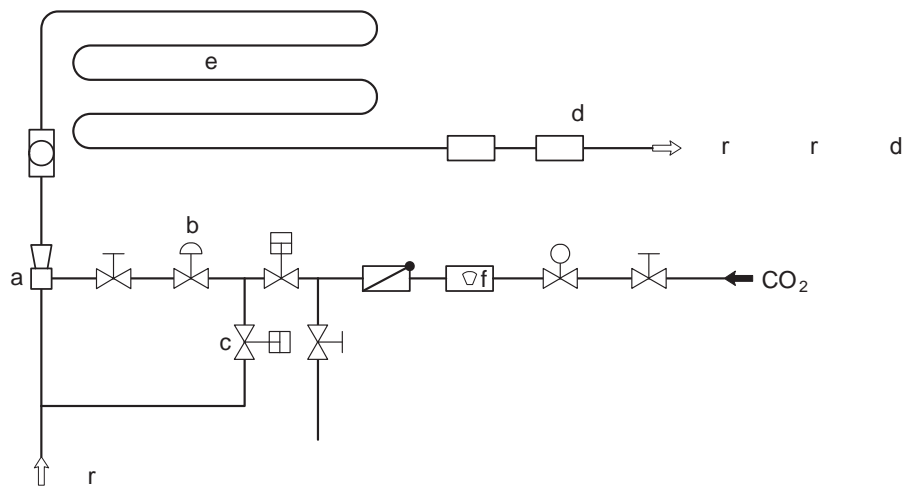


Figura C.13: Esquema de una unidad de carbonatación típica. (a) Boquilla tipo venturi; (b) Válvula de control de CO<sub>2</sub>; (c) Válvula de limpieza; (d) Sensor de CO<sub>2</sub>; (e) Zona de absorción de CO<sub>2</sub>; (f) Medidor de flujo de CO<sub>2</sub>. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

## Anexo D

### El lúpulo

En la industria cervecera, el lúpulo corresponde a la materia prima del proceso cervecero que es utilizada para entregar el amargor característico de ésta, además de otros sabores, aromas y estabilidad biológica. Éste corresponde a la inflorescencia femenina de la planta de lúpulo (ver figura D.1), *Humulus lupulus*, la cual pertenece a la familia de las cannabináceas. El lúpulo es originario del hemisferio norte del planeta, pero ha sido a exportado a otros países y es cultivado a gran escala en Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda [15].

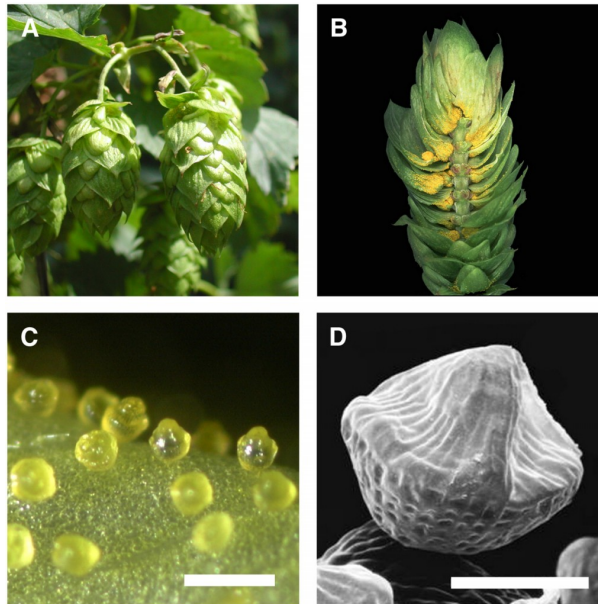


Figura D.1: Morfología de los conos de lúpulo y las glándulas de lupulina. (A) Los conos de lúpulo de  $\sim 5$  cm de longitud. (B) Sección longitudinal de un cono que muestra las glándulas de lupulina. (C) Imagen de microscopio óptico de las glándulas de lupulina maduras ( $500 \mu\text{m}$ ). (D) Imagen al microscopio electrónico de una glándula de lupulina madura ( $100 \mu\text{m}$ ). Fuente: Nagel *et. al.*, 2008 [50].

Al interior de la flor de lúpulo se encuentran las glándulas de lupulina, tal como se muestra en las fotografías de la figura D.1, donde se encuentran las sustancias amargas y las aromáticas, las que se describen a continuación:

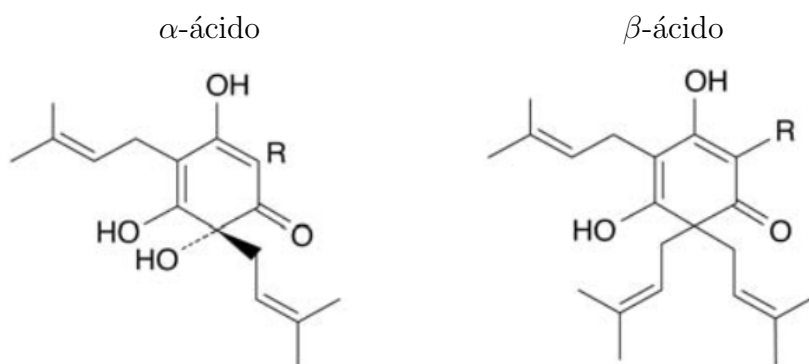


Figura D.2: Estructura general de los  $\alpha$  y  $\beta$ -ácidos. R representa la cadena acilo que diferencia a los distintos homólogos de humulona y lupulona, respectivamente. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

## D.1. Sustancias amargas

Del total de las resinas presentes en el lúpulo, existe un grupo de resinas que son llamadas como *sustancias amargas*. Estas sustancias, a su vez, se dividen en dos subgrupos: los  $\alpha$ -ácidos (humulona y sus 4 homólogos) y  $\beta$ -ácidos (lupulona y otros 4 homólogos) [28], las que se muestran en la figura D.2. Las sustancias amargas, tal como dice su nombre, entregan el amargor característico de las cervezas, aunque también participan en la formación de la espuma de la cerveza, y actúan como estabilizadores microbiológicos, aportando propiedades antibacterianas (principalmente contra bacterias Gram-negativas) [11, 13, 15, 28].

En el proceso cervecero, específicamente en la etapa de cocción del mosto, los  $\alpha$ -ácidos sufren un proceso de llamado isomerización, donde las altas temperaturas a las que se realiza la cocción promueven un cambio conformacional de la estructura de las humulonas (ver figura D.3). Estos isómeros, llamados iso- $\alpha$ -ácidos, son solubles en agua, a diferencia de los  $\alpha$ -ácidos sin isomerizar, quienes finalmente son los que entregan el amargor a la cerveza [11]. Los  $\beta$ -ácidos no pasan por un proceso de isomerización, lo que trae como consecuencia que el aporte de amargor en la cerveza sea mucho menor que el que entregan los  $\alpha$ -ácidos [28]. Durante la cocción no se isomerizan todos los  $\alpha$ -ácidos del lúpulo, por lo que se define el concepto de utilización, que es una medida, en porcentaje, de extracción de humulona. La utilización depende de parámetros como el tiempo que el lúpulo se agrega al mosto y de la densidad de éste, además de otros factores como la agitación o el nivel de ebullición del mosto [11].

## D.2. Aceites del lúpulo

En las glándulas de lupulina también se producen otros compuestos, que son los aceites esenciales, y pueden corresponder hasta un 3% en peso [11]. Los aceites esenciales entregan aromas a la cerveza, ya que corresponden a compuestos volátiles. Se han detectado más de 300 compuestos aromáticos en el lúpulo [11, 28], los cuales se dividen en tres grupos: hidrocarburos, compuestos oxigenados y compuestos sulfurados.

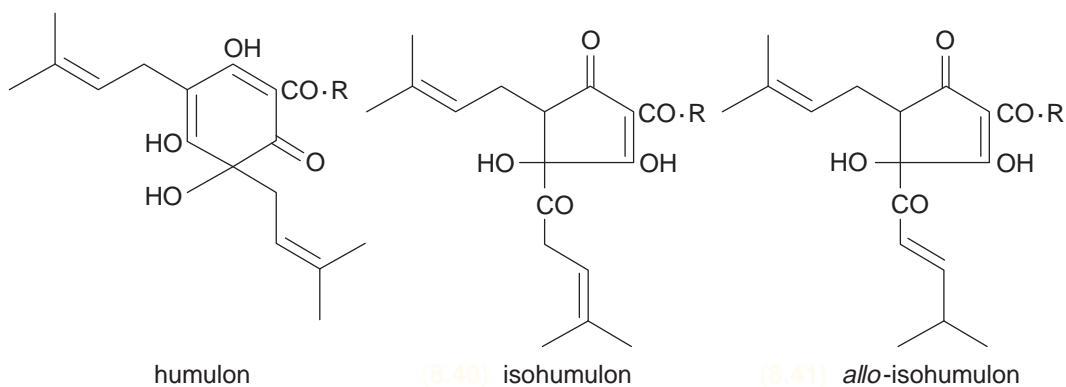


Figura D.3: Comparación entre la humulona y sus 2 formas isomerizadas. Imagen adaptada de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

De los tres grupos de compuestos aromáticos, los hidrocarburos son los que toman una mayor importancia, ya que pueden abarcar hasta un 80% de los aceites esenciales del lúpulo. Los hidrocarburos más encontrados en los lúpulos son 4: mirceno,  $\beta$ -cariofinelo, humuleno y farneseno [11, 15, 28]. Dado que estos compuestos están constituidos sólo por carbono e hidrógeno, tienden a ser apolares, lo que favorece la pérdida de estos aceites durante la cocción del mosto [15].

Los compuestos oxigenados constituyen un grupo diverso de compuestos, y que por la presencia de oxígeno tienden a ser polares, reduciendo la volatilidad de éstos [15]. Muchos de estos compuestos tienen aromas intensos, los que finalmente aportan notas cítricas, florales, picantes, herbales, entre otras. Los compuestos oxigenados se forman debido a la acción de agentes oxidantes sobre los hidrocarburos, principalmente durante la etapa de almacenamiento del lúpulo [11, 15].

Finalmente, los compuestos sulfurados corresponden a la fracción más pequeña de los aceites esenciales. Son difícilmente detectados durante la degustación de la cerveza, además de que gran parte de ellos son eliminados durante la cocción del mosto [15].

### D.3. Productos del lúpulo

El lúpulo puede ser comercializado de diversas formas, donde se incluyen los conos directamente, o lúpulos en forma de pellets o extractos (ver figura D.4). La ventaja de utilizar pellets o extractos incluyen mayor facilidad de almacenamiento y transporte, menor tamaño y aumento de la vida media del producto [15]. Los conos de lúpulo son muy susceptibles a la oxidación de sus resinas y aceites, lo que se evita al pelletizarlos o al fabricar extractos. Existen también otros productos, utilizados en menor proporción, tales como extractos de sustancias amargas isomerizadas o extractos de aceites especiales [15].



Figura D.4: Fotografía a 3 productos del lúpulo utilizados en la industria cervecera. De izquierda a derecha: Conos de lúpulo, pellets y extractos. Imagen adaptada de Mosher, 2015 [13].

# Anexo E

## La levadura cervecera

Levadura es el nombre genérico dado a un grupo de microorganismos pertenecientes al reino *fungi* y que poseen estados vegetativos en que la reproducción sexual se realiza por yemación o fisión. Gran parte de las levaduras crecen como organismos unicelulares aunque muchas especies presentan dimorfismo y poseen fases en su vida en las cuales adoptan una morfología filamentosa y se desarrollan dentro de un micelio. El género *Saccharomyces* forma parte de este grupo, donde residen las levaduras responsables de la transformación del mosto en cerveza [15].

En el proceso cervecero, las levaduras se utilizan debido a su habilidad para transformar los azúcares presentes en el mosto en etanol. Este proceso se conoce como fermentación alcohólica, y forma parte del metabolismo catabólico de la levadura para la obtención de energía y compuestos necesarios para el crecimiento de ésta [11–14].

### E.1. Clasificación de las levaduras

Dos levaduras pertenecientes al género *Saccharomyces* son utilizadas en el proceso cervecero, las levaduras de fermentación alta (levaduras ale) y las levaduras de fermentación baja (levaduras lager). Las levaduras de fermentación alta son clasificadas como *S. cerevisiae*, mientras que las levaduras lager han sido llamadas como *S. carlsbergensis*, *S. uvarum*, *S. cerevisiae*, entre otros, aunque la clasificación utilizada actualmente corresponde a *S. pastorianus* [11, 15, 51]. Las diferencias entre estos dos tipos de levaduras se encuentran en sus habilidades fermentativas, tasa de consumo de azúcares, tolerancia a la temperatura, nivel de floculación y perfil de volátiles [51].

En la figura E.1 se muestran microscopías a un cultivo de levaduras lager y a un cultivo ale. Las levaduras lager crecen formando pequeños agregados celulares, lo que se debe a que éstas no se separan completamente durante el proceso de proliferación celular. En cambio, las levaduras ale se separan rápidamente de la célula madre durante la proliferación celular, por lo que no existen grandes agregados y permite que las células se mantengan en suspensión [51].

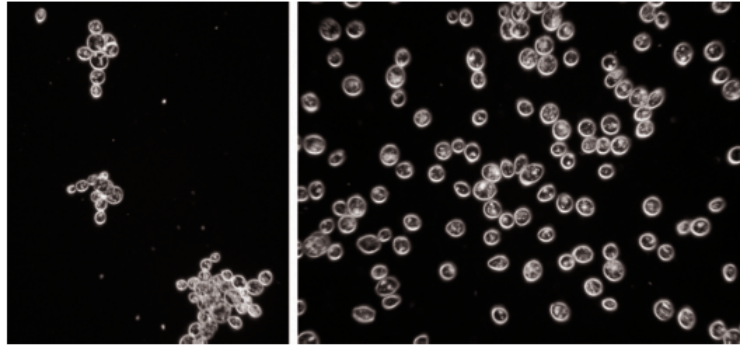


Figura E.1: Levaduras de fermentación baja (izquierda) y alta (derecha) bajo el microscopio (aumento  $\times 640$ ) [51]

Una célula de levadura cervecera tiene un tamaño que varía entre los 8 y 14  $\mu\text{m}$  de diámetro y un peso aproximado de  $40 \cdot 10^{-12}\text{g}$  [12]. Al igual que todas las células eucariontes posee un núcleo y organelos varios como mitocondrias, lisosomas, aparato de Golgi, vacuolas, entre varios más.

Para el proceso cervecero, la pared celular de las levaduras toma importancia ya que se encuentra relacionada con la capacidad de floculación de las células y, por ende, con la división entre levaduras de fermentación alta y baja. La pared celular constituye entre el 20 % y el 30 % del peso seco de la levadura [11, 12]. Está formada por  $\beta$ -glucanos,  $\alpha$ -mananos, glucógeno, proteínas, lípidos y quitina. Es flexible, aunque también tiene un cierto grado de rigidez que impide la lisis de las levaduras frente a estrés mecánico o shock osmótico [11].

Las características de la pared celular determinan si las levaduras serán de fermentación alta o baja durante la fermentación del mosto. Se ha observado que las levaduras altas poseen una pared celular con bajo contenido de grupos fosfatos, haciendo de esta más hidrofóbica y aumentando la afinidad de las paredes celulares hacia las burbujas de dióxido de carbono generadas en la fermentación, elevando las levaduras por flotación [11]. Por el contrario, las levaduras lager poseen una menor afinidad a la fase apolar de las burbujas generadas, por lo que no son arrastradas hacia arriba [11].

## E.2. Consumo de nutrientes

Las levaduras cerveceras sólo pueden utilizar un número pequeño de carbohidratos para su crecimiento. Todas las cepas pueden asimilar D-glucosa, mientras que la utilización de otros carbohidratos son específicos para cada cepa. Por ejemplo, cepas de levaduras ale no pueden utilizar melobiosa<sup>1</sup>, mientras que las levaduras lager poseen actividad  $\alpha$ -D-galactosidasa, lo que permite hidrolizar melobiosa a sus monómeros, los cuales sí son asimilados por el microorganismos. También existen otras diferencias, como la velocidad de asimilación de maltotriosa<sup>2</sup>, que es mayor en levaduras lagers que ales, como también la preferencia de

<sup>1</sup>Melobiosa: Disacárido compuesto por galactosa y glucosa.

<sup>2</sup>Maltotriosa: Trisacárido compuesto por 3 residuos de glucosa.

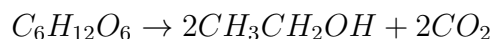
asimilación de ciertos azúcares [11].

Las levaduras no son capaces de fijar nitrógeno gaseoso del aire, ni tampoco utilizar nitratos ni nitritos, por lo que las principales fuentes de nitrógeno para las levaduras son iones amonio, aminoácidos, péptidos pequeños, aminas, pirimidinas y purinas [11]. Por esta razón, el contenido de nitrógeno en el mosto es importante para el proceso cervecero para estimar el rendimiento de la etapa de fermentación [15].

El consumo de lípidos por las levaduras cerveceras se realiza principalmente al comienzo de la fermentación, durante la fase aeróbica. Lípidos como ácidos grasos insaturados deben estar presentes en el medio, ya que las levaduras cerveceras son auxotróficas para este tipo de compuestos [11].

### E.3. Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica corresponde a la vía metabólica en la que las levaduras utilizan azúcares para la obtención de energía, de manera anaeróbica, produciendo etanol y dióxido de carbono. La ecuación general del proceso, llamada Ecuación de Gay-Lussac, corresponde a:



La ecuación de Gay-Lussac presenta como reactivo la glucosa, pues la levadura se encarga de metabolizar los distintos azúcares a glucosa para ser utilizada en las vías metabólicas asociadas a la fermentación alcohólica [11, 12, 15, 51].

La fermentación alcohólica se realiza en las mitocondrias de las levaduras, y comienza con la ruta enzimática de degradación de la glucosa, llamada glicólisis o ruta de Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) [11, 12]. Como se ve en la figura E.2, esta vía comienza con la fosforilación doble de la glucosa, utilizando ATP, para dar origen a una molécula inestable que termina dividiéndose en dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato [52]. Luego, utilizando NADH se fijan otros grupos fosfatos, lo que permite, después de 3 intermediarios, producir piruvato y 4 moléculas de ATP. Finalmente, dadas las condiciones anaeróbicas en la que se encuentra la levadura, el piruvato termina la vía de la fermentación alcohólica, donde libera dióxido de carbono, además de volver a producir NADH [52].



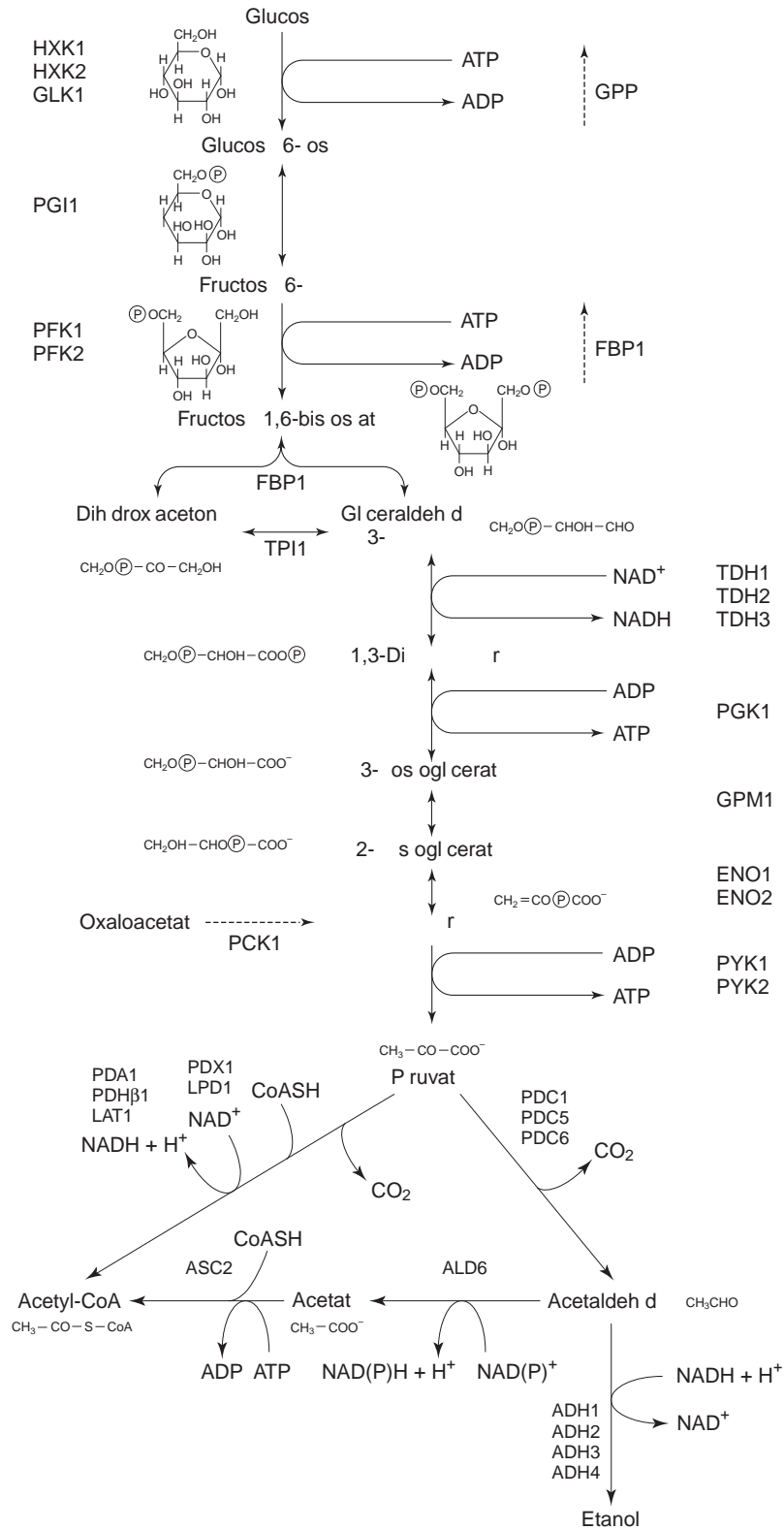


Figura E.2: Vías metabólicas de la glicólisis y de la fermentación alcohólica con las respectivas enzimas involucradas en cada reacción. Adaptado de Briggs *et. al.*, 2004 [11].

# Anexo F

## Protocolos para los análisis fisicoquímicos de la cerveza

### F.1. Determinación del grado alcohólico

El método utilizado para la determinación del grado alcohólico de la cerveza consiste en realizar una destilación simple de la cerveza, para luego determinar por alcoholimetría la concentración de etanol en la muestra recuperada. El protocolo realizado se basó en los métodos propuestos por el Servicio Ecuatoriano de Normalización [53] y por el Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad Politécnica de Madrid [54].

#### Materiales

- Densímetro Anton Paar.
- Termómetro.
- Matraz volumétrico de 500 ml.
- Probeta de 100 ml.
- Sistema de destilación.
- Baño Termorregulado.

#### Reactivos

- Agua destilada.

#### Procedimiento

1. Descarbonatar la cerveza agitando la muestra a analizar.

2. Verter sobre un matraz una cantidad superior a 100 ml y tapar.
3. Colocar el matraz dentro del baño termostático a una temperatura de 20 °C durante 20 minutos y retirar el exceso de muestra que sobrepase los 100 ml.
4. Transferir el contenido del matraz al equipo de destilación y lavar con 10 ml de agua destilada.
5. Destilar lentamente la muestra, hasta recuperar aproximadamente 50 ml de destilado.
6. Aforar con agua destilada la muestra, hasta completar los 100 ml.
7. Después de 10 minutos, efectuar la lectura de densidad utilizando el densímetro.
8. Utilizando una tabla de densidades para distintas concentraciones de alcohol por volumen estimar el grado alcohólico de la muestra.

## F.2. Determinación del color (EBC)

Para la determinación del color de la cerveza, se realizó el método espectrofotométrico, utilizado por la EBC (European Brewery Convention) [19].

### Materiales

- Espectrofotómetro.
- Filtro de membrana de 0,45  $\mu m$ .

### Reactivos

- Tierras diatomeas.

### Procedimiento

1. Descarbonatar la cerveza agitando la muestra a analizar.
2. Diluir la muestra de tal manera que la absorbancia a 430 nm quede debajo de 0,8.
3. Medir la absorbancia a 700 nm ( $E_{700}$ ) y a 430 nm ( $E_{430}$ ). Se debe cumplir la siguiente relación:

$$E_{430} \geq 25 \cdot E_{700}$$

En caso que la expresión anterior no se cumpla, significa que el grado de turbidez de la cerveza es alto y se debe agregar 0,1% de tierras diatomeas para luego filtrar la muestra, hasta que la relación entre las absorbancias a 430 nm y 700 nm sea mayor a 25.

## Cálculo

El color de la cerveza en unidades EBC corresponde a:

$$\text{Color} = E_{430} \cdot 25 \cdot F$$

donde  $F$  es el factor de dilución de muestra.

## F.3. Determinación del amargor (IBU)

Las sustancias amargas en la cerveza, principalmente los  $\alpha$ -ácidos, se extraen de la muestra acidificada con iso-octano y se mide la concentración de estos espectrofotométricamente [19].

### Materiales

- Recipientes para centrífuga con tapones herméticos al solvente.
- Centrífuga.
- Mesa agitadora o shaker.
- Espectrofotómetro.

### Reactivos

- Ácido Clorhídrico 6 N.
- Iso-octano (2,2,4-trimetilpentano)

### Procedimiento

1. Centrifugar la cerveza por 15 minutos a 3.000 rpm.
2. Pipetear 10 ml de la muestra al recipiente para centrífuga.
3. Añadir a la muestra 0,5 ml de ácido clorhídrico y 20 ml de iso-octano.
4. Agitar durante 15 minutos en la mesa agitadora.
5. Centrifugar la muestra por 3 minutos a 3.000 rpm.
6. Recuperar la fase con iso-octano y medir la absorbancia a 275 nm contra iso-octano puro.

## Cálculo

El amargor de la cerveza, expresado en Unidades de amargor (IBU) corresponde a:

$$IBU = 50 \cdot E_{275}$$

donde  $E_{275}$  es la absorbancia de la fase de iso-octano a 275 nm.

## F.4. Turbidez y turbidez forzada de la cerveza

Se puede estimar la turbidez de una cerveza al medir la absorbancia de una muestra a una longitud de onda de 700 nm, a diferencia otros métodos de medición de turbidez que analizan la difracción de un haz de luz dirigido hacia la muestra. También, se puede inducir la formación de turbidez en la cerveza al agregar una solución saturada de sulfato de sodio, que afecta denaturando las proteínas en la muestra. La realizar la medición de turbidez para muestras con y sin sulfato de sodio se puede estimar la tendencia a enturbiar de la cerveza.

### Materiales

- Tubos de ensayo.
- Pipeta graduada con divisiones de 0,01 ml.
- Agitador magnético.
- Espectrofotómetro.
- Baño termostático.

### Reactivos

- Sulfato de sodio.
- Agua destilada.

### Procedimiento

1. Formar la solución de sulfato de sodio saturada. Para esto, disolver 20 g de sulfato de amonio en 40 ml de agua destilada, utilizando el agitador magnético.
2. Distribuir en 2 tubos de ensayos muestras de 10 ml de cerveza.
3. Agregar a un tubo de ensayo 2 ml de agua destilada.
4. Agregar al segundo tubo de ensayo 2 ml de la solución de sulfato de sodio saturada.
5. Atemperar por 20 minutos, a 20°C, las 2 muestras.
6. Medir la absorbancia de ambas muestras a una longitud de onda de 700 nm.

### Cálculo

La turbidez de las muestras, en unidades de turbidez (UT) se calcula como:

$$\text{Turbidez[UT]} = 100 \cdot 1,2 \cdot E_{700}$$

donde  $E_{700}$  es la absorbancia de la muestra a 700 nm, y 1,2 el factor de dilución debido a la adición de 2 ml de agua destilada o de la solución de sulfato de sodio.

## F.5. Estabilidad de la espuma

El método utilizado para analizar la estabilidad de espuma es uno de los propuestos por la ASBC, denominado Método del valor sigma o Método Carlsberg modificado.

### Materiales

- Baño termostático.
- Embudo de decantación de 1000 ml.
- Cronómetro.
- Probeta de 100 ml.

### Reactivos

- Agua destilada.
- Etanol al 95 %.

### Procedimiento

1. Ambientar la muestra de cerveza en su envase, cerrado aún, a una temperatura de 25°C.
2. Lavar el embudo de decantación con agua destilada a 25°C.
3. Verter la muestra de cerveza de manera de obtener espuma que supere un volumen de 800 ml e iniciar el conteo del cronómetro.
4. Luego de 30 segundos, abrir la válvula del embudo para permitir fluir a la cerveza durante un tiempo de 25 a 30 segundos a un flujo lo más constante posible. Mantener la válvula abierta hasta que una pequeña cantidad de espuma sea descartada. Inmediatamente después, cerrar la válvula, volver el cronómetro a cero y volver a tomar a tiempo.
5. Luego de 200 segundos, abrir la válvula del embudo para dejar fluir hacia la probeta de 100 ml la cerveza generada por el colapso de la espuma a una velocidad que permita a toda la cerveza drenarse en un tiempo entre 25 a 30 segundos. Al momento en que la última gota de cerveza caiga, cerrar la válvula y detener el cronómetro.
6. Anotar el tiempo del cronómetro en segundos ( $t$ ) y el volumen de cerveza en la probeta ( $b$ ) en mililitros.

7. Para colapsar la espuma remanente en el embudo, limpiar el equipo con 2 ml de alcohol.
8. Abrir la válvula del embudo y drenar el líquido hacia la probeta de 25 ml. Anotar el volumen recuperado en la probeta ( $c$ ).

## Cálculo

El tiempo promedio de permanencia de una burbuja,  $\Sigma$  se calcula según la fórmula de Ross y Clarke:

$$\Sigma = \frac{t}{2,303 \cdot \log\left(\frac{b+c}{c}\right)}$$

## F.6. Determinación de la viscosidad

Para realizar la medición de viscosidad, se emplea un viscosímetro de bolas presente en el laboratorio, cuyo principio de funcionamiento se basa en la ley de Stokes.

### Materiales

- Viscosímetro de bolas.
- Cronómetro.

### Procedimiento

1. Cargar el tubo vertical del viscosímetro con la muestra de cerveza.
2. Introducir la bola en el viscosímetro y determinar el tiempo que demora la bola en recorrer la distancia marcada en el equipo.

## Cálculo

La viscosidad de la muestra se puede calcular como:

$$\mu = K \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot t$$

donde  $K$  es una constante que depende del equipo,  $\rho_s$  y  $\rho_l$  las densidades de la bola y del líquido respectivamente, y  $t$  el tiempo determinado experimentalmente.

## **F.7. Determinación del pH**

Para la medición del pH se utiliza un pHmetro de sobremesa, calibrado para pH entre 4,0 y 7,0.

### **Materiales**

- pHmetro de sobremesa.
- Vaso precipitado de 100 ml

### **Procedimiento**

1. Cargar 60 ml de cerveza en el vaso precipitado.
2. Introducir el electrodo del pHmetro en el vaso precipitado y esperar a que se establezca el valor de pH mostrado en el visor.

### **Cálculo**

El resultado se presenta tal cual como indica el medidor de pH.



## Anexo G

# Estimación de IBUs y Pitching rate de levadura

### G.1. Estimación de los IBUs entregados por los lúpulos

Para estimar los gramos de lúpulo requeridos para alcanzar los IBUs de las cervezas se utiliza la aproximación propuesta por Catrileo en su curso de cervecería artesanal (Cervecerías Prost SpA). La expresión general para el cálculo de la masa de lúpulo corresponde a:

$$W = \frac{IBU \cdot V}{10 \cdot AA \cdot U}$$

donde W es la masa de lúpulo en gramos, IBU es el amargor a alcanzar, V el volumen del batch durante la cocción en litros, AA el porcentaje de  $\alpha$ -ácidos del lúpulo y U la utilización del lúpulo.

La utilización depende tanto del tiempo de cocción del lúpulo como de la gravedad del mosto. Para mostos con gravedades cercanas a los 1.050, la utilización a distintos tiempos puede estimarse gráficamente según los datos presentes en la figura G.1, según el método de Catrileo.

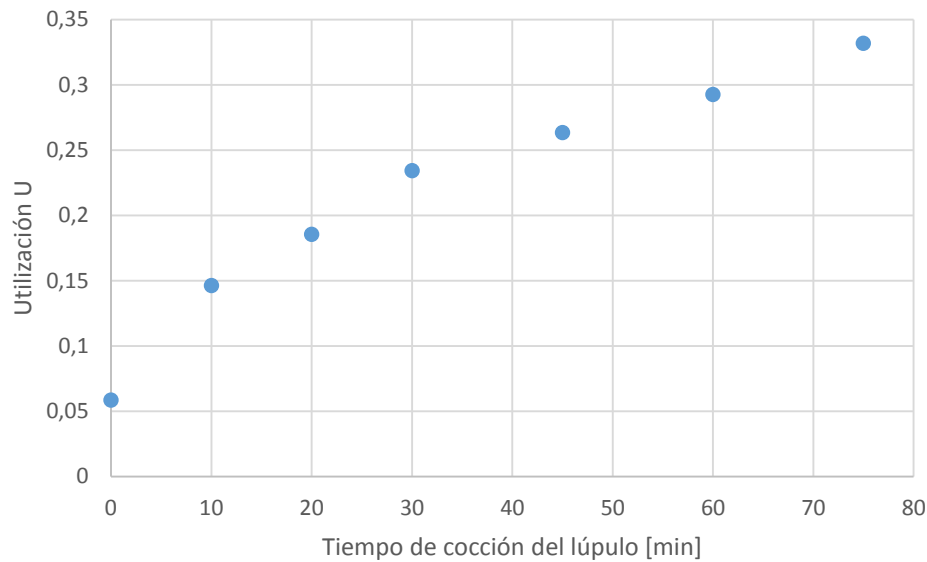


Figura G.1: Utilización del lúpulo a distintos tiempos [35].

## G.2. Estimación del pitching rate de levadura

Según Mosher, la tasa de inoculación de levaduras depende de la gravedad original del mosto [13]. Para mostos con gravedades inferiores a 1,040 se deben inocular  $7 \cdot 10^6$  células por ml de mosto para cervezas ale, mientras que para lager  $1,5 \cdot 10^7$  células por ml. Para gravedades mayores, se deben calcular según la expresión siguiente:

$$\text{Pitching rate} = (7 + 0,17 \cdot (OG - 1,040) \cdot 1000) \cdot 10^6 \text{ [cell/ml]} \quad \text{Para ales.}$$

$$\text{Pitching rate} = (15 + 0,34 \cdot (OG - 1,040) \cdot 1000) \cdot 10^6 \text{ [cell/ml]} \quad \text{Para lagers.}$$

Si bien se pueden realizar los cálculos, conociendo el número de células que aporta 1 gramo de levadura seca, se pueden estimar los valores, siguiendo el mismo método antes descrito, en la página web de Brewtoad:

<https://www.brewtoad.com/tools/pitch-rate-calculator>.

# Anexo H

## Resultados y precedimientos secundarios del trabajo de memoria

### H.1. Elaboración del lote de prueba

Los parámetros estudiados para el seguimiento de la elaboración del lote de prueba (como gravedad del mosto o tiempos de filtración) se presentan en la tabla H.1. La malta utilizada en cada batch corresponde a:

**P1:** Pilsen Patagonia Malt.

**P3:** Pale Ale Patagonia Malt.

**P2:** Pilsen Castle Malting.

**P4:** Pilsen Castle Malting.

En la tabla H.1 se observa que los tiempos de lavado varían en función de la malta utilizada. También, se debe notar que los tiempos de lavado no siguen una relación ni entre la gravedad del mosto después de la maceración, ni con la gravedad obtenida antes de la etapa de cocción. Sin embargo, durante la filtración de 2 de los batches del lote de prueba, la concentración de sólidos disueltos a la salida del filtro al momento de realizar el lavado cayó abruptamente, llegando incluso a los 2° Brix, lo que trajo como consecuencia una disminución importante en la densidad de los mostos previo a la etapa de cocción debido al efecto de dilución al agregar agua con baja concentración de azúcares. Al momento de la limpieza del filtro se observó que la torta de los batches P1 y P3 tenían una consistencia lisa, mientras que para los batches P2 y P4 la torta poseía varios canales en su superficie (figura H.1), por lo que se presume que la aparición de tales canales facilitaron el movimiento del agua de lavado hacia la salida del filtro, impidiendo el contacto con la torta y, por ende, disminuyendo la extracción de azúcares desde esta, diluyendo el mosto obtenido en la etapa de filtración.

Uno de los problemas al momento de realizar el seguimiento del proceso productivo es la imposibilidad de cuantificar los volúmenes de producto para estimar rendimientos o pérdidas de éste. A comienzos del trabajo en la planta piloto de Maltexco sólo el macerador poseía un sistema de medición de volumen, por lo que el volumen de producto podía determinarse únicamente durante la maceración y al comienzo de la cocción del mosto. Por tal razón, los volúmenes que se presentan en la tabla H.1 sólo muestran valores aproximados. Para solucio-

Tabla H.1: Seguimiento del proceso de elaboración del lote de prueba en la planta piloto de Maltexco.

	Batches			
	P1	P2	P3	P4
Gravedad mosto dulce	1,053	1,057	1,053	1,056
Tiempo de filtración	30 min	37 min	31 min	42 min
Tiempo de lavado	8 min	2 min	10 min	3 min
Gravedad pre-cocción	1,050	1,042	1,048	1,044
Gravedad original	1,050	1,042	1,048	1,040
Volumen fermentador	≈ 30 L	≈ 40 L	≈ 40 L	≈ 40 L
Masa de inóculo	12 g	18 g	18 g	18 g
Gravedad final	1,011	1,006	1,009	1,002



Figura H.1: Fotografías a la torta dormada durante la filtración de dos batches del lote de prueba. A la izquierda, una fotografía de la torta del batch P1, que utilizó malta Pilsen Patagonia Malt. A la derecha, una fotografía de la torta del batch P2, que utilizó malta Pilsen Castle Malting.

nar este problema, se modificó el estanque de recepción ubicado en la zona inferior del equipo, agregando un visor de nivel graduado cada 2,5 litros, lo que permitió conocer los volúmenes de producto después de la filtración y cocción del mosto. Sin embargo, esta modificación al estanque sólo estuvo presente desde la elaboración del segundo lote de cervezas.

Otro problema que acarrea la imposibilidad de medir volúmenes en la planta piloto fue la determinación de la masa de agua utilizada para el lavado de la torta, ya que, como se describe en la tabla 3.1 en la sección de metodología, el parámetro para decidir el fin del proceso de lavado de la torta era la disminución de los grados Brix del producto de salida del filtro, y no un volumen de agua. Debido a esto, se propuso que para la elaboración del primer lote de cervezas se agregara 10 litros de agua para el lavado, los que serían recolectados en el macerador (donde se puede medir el volumen de producto dentro de él) para luego ser enviados hacia el filtro vertical.

Durante la etapa de maduración del lote de prueba existieron problemas en el sistema de refrigeración de los fermentadores de la planta piloto. El sistema no era capaz de reducir la temperatura de los 4 fermentadores bajo los 10°C, por lo que el proceso de maduración no pudo llevarse a cabo. A modo de buscar una solución, se decidió detener el sistema de control de temperatura en 2 de los 4 fermentadores, particularmente los equipos que contenían los

batches P3 y P4, con maltas Pale Ale Patagonia Malt y Castle Malting, respectivamente. Sin embargo, aún así el sistema de refrigeración no podía alcanzar los 0°C requeridos para la maduración de las cervezas, por lo que se decidió no continuar con el proceso productivo y tomar muestras de los 4 fermentadores.

A las muestras de los 4 fermentadores se aplicaron 5 de los 7 análisis propuestos para la evaluación de las cervezas, ya que se excluyó la medida de estabilidad de espuma debido a la no gasificación de las muestras, mientras que la medición de pH no había sido considerada al comienzo del trabajo en la planta piloto. Los resultados de los análisis se presentan en los gráficos de la figura H.2.

Al ver la figura H.2 se puede notar que la mayoría de los análisis arrojaron resultados sin una tendencia clara entre los 4 batches fabricados. Esto se debe a que se utilizaron 4 maltas distintas, por lo que, como cambió la materia prima a utilizar en cada uno de los batches, se obtuvieron productos totalmente distintos. Por esta razón, se decidió que para la elaboración de los 3 lotes siguientes se utilizaría sólo un tipo de malta, que sería la malta Pale Ale de Patagonia Malt. Sin embargo, dado que el objetivo de la elaboración del lote de prueba era conocer el funcionamiento de la planta piloto de Maltexco, no se considera como un problema todas las diferencias observadas en los resultados de los análisis.

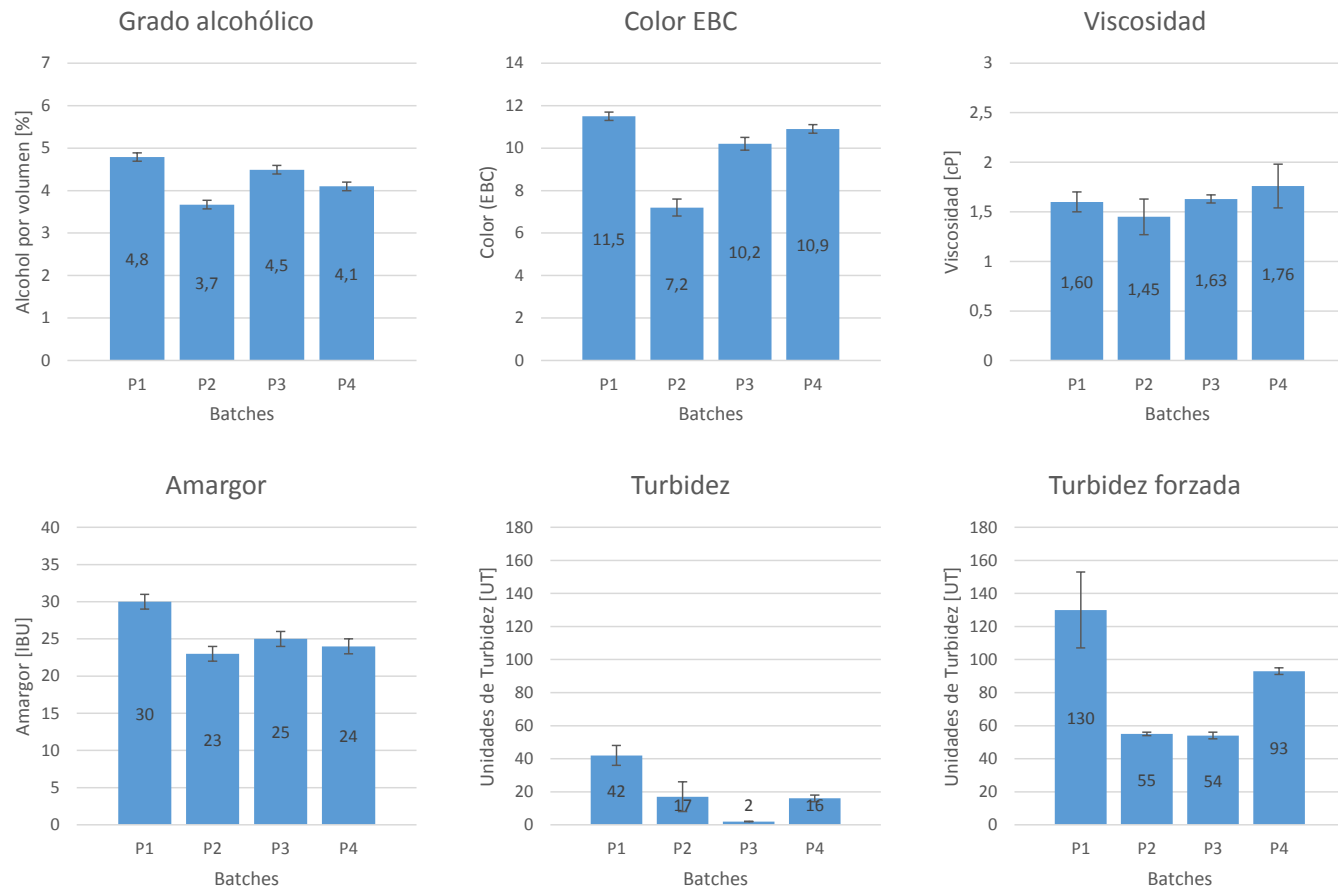


Figura H.2: Resultado de los análisis a los 4 batches del lote de prueba. El detalle de los valores obtenidos se presentan en la tabla H.2 del Anexo H.3.

## H.2. Procedimiento para la determinación del volumen del trub en el estanque whirpool

Como se mencionó en la sección C.4, durante la clarificación del mosto se produce la formación del *trub*. En la planta piloto, el *trub* se separa en el estanque whirpool. Éste queda retenido en la sección cónica inferior del equipo, pero se desconoce el volumen de producto que se pierde en esta etapa, por lo que se determinó el volumen de trub para proponer una nueva configuración y así aumentar el rendimiento del proceso.

Para determinar el volumen de *trub* que se genera en el proceso cervecero se utilizaron los sedimentos generados durante la elaboración de los lotes de cerveza, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

1. Antes de enviar el mosto a la zona de fermentación, tomar una muestra del contenido del equipo obtenida por la zona inferior del whirpool, usando un vaso precipitado de 100 ml. Analizar visualmente la muestra y medir espectrofotométricamente la turbidez como se menciona en el Anexo F.4, usando el espectrofotómetro Lambda 25 de la empresa Perkin Elmer, presente en el laboratorio de control de calidad de extractos de la planta (ver figura 3.2).
2. Descartar producto hasta completar 500 ml para tomar nuevamente una muestra para ser analizada visual y espectrofotométricamente como en el paso 1.
3. Repetir el procedimiento descartando volúmenes de 1000 ml, 1500 ml y 2000 ml.

## H.3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las cervezas elaboradas

Tabla H.2: Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del lote de prueba.

	Batches			
	P1	P2	P3	P4
Grado alcohólico [%]	4,79±0,08	3,67±0,07	4,49±0,08	4,1±0,12
Color EBC	11,5±0,2	7,2±0,4	10,2±0,3	10,9±0,2
Viscosidad [cP]	1,6±0,09	1,45±0,18	1,63±0,04	1,76±0,22
Amargor [IBU]	30,2±0,8	23,4±0,7	24,6±0,9	24,1±1,2
Turbidez [UT]	42±6	17±9	2±0,1	16±2
Turbidez Forzada [UT]	130±23	55±1	54±2	93±2

Tabla H.3: Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del primer lote de cervezas.

	<b>Batches</b>			
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>
Grado alcohólico [%]	3,92±0,02	3,88±0,03	4,11±0,01	4,07±0,06
Color EBC	9,1±0,2	9,5±0,1	9,7±0,2	9,3±0,1
Viscosidad [cP]	1,37±0,004	1,34±0,02	1,42±0,002	1,43±0,02
Amargor [IBU]	30,3±0,2	29,3±0,5	23,5±0,2	24,8±0,4
Turbidez [UT]	7,94±0,1	3,66±0,4	1,85±0,04	1,705±0,04
Turbidez Forzada [UT]	17,4±0,7	14±1,2	14,2±1,3	13,9±0,7
Estabilidad de Espuma [s]	120±4	126±3	124±3	127±6
pH	4,82±0,06	4,79±0,08	4,73±0,08	4,72±0,1

Tabla H.4: Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del segundo lote de cervezas.

	<b>Batches</b>		
	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>
Grado alcohólico [%]	4,63±0,09	4,49±0,04	4,55±0,02
Color EBC	15,4±0,02	15,3±0,3	14,8±0,6
Viscosidad [cP]	1,81±0,02	1,77±0,06	1,61±0,003
Amargor [IBU]	29,1±0,3	30,3±0,4	27,9±0,3
Turbidez [UT]	44,6±0,6	29,5±0,1	1,78±0,18
Turbidez Forzada [UT]	65,6±1,7	44,6±0,6	20,3±0,1
Estabilidad de Espuma [s]	118±9	119±5	115±5
pH	3,94±0,86	4,12±0,76	4,53±0,94

Tabla H.5: Resultados de los análisis fisicoquímicos a las muestras del tercer lote de cervezas.

	<b>Batches</b>			
	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
Grado alcohólico [%]	4,5±0,03	4,57±0,04	4,84±0,05	2,86±0,06
Color EBC	6,81±0,1	6,94±0,2	38,5±2,3	24,2±1,4
Viscosidad [cP]	1,54±0,002	1,49±0,003	1,58±0,008	-
Amargor [IBU]	26,2±0,2	24,7±0,4	23,8±0,2	-
Turbidez [UT]	1,96±0,07	1,92±0,09	6,03±0,06	-
Turbidez Forzada [UT]	23,8±1,7	23,8±1,9	31,8±2,3	-
Estabilidad de Espuma [s]	117±8	115±6	122±8	-
pH	4,68±0,06	4,75±0,07	4,64±0,09	-



# Anexo I

## Protocolo de elaboración de cervezas en planta piloto

En las páginas siguientes se presenta el protocolo redactado para la elaboración de cervezas en la planta piloto.

ÍNDICE

1.	OBJETIVO .....	2
2.	ALCANCE .....	2
3.	RECURSOS Y PROHIBICIONES .....	2
3.1.	Elementos de Protección Personal .....	2
3.2.	De las prohibiciones .....	2
3.3.	Cuidados de seguridad .....	2
4.	ANTECEDENTES .....	3
5.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO.....	4
6.	CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO FINAL.....	5
7.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	6
7.1.	Preparación de los equipos .....	6
7.2.	Molienda .....	6
7.3.	Maceración .....	6
7.4.	Filtración .....	10
7.5.	Cocción.....	13
7.6.	Clarificación .....	14
7.7.	Fermentación.....	16
7.8.	Maduración.....	18
7.9.	Gasificación .....	19
8.	REGISTROS .....	22
9.	REFERENCIAS .....	23
10.	ULTIMAS MODIFICACIONES.....	23
11.	ANEXOS.....	23
11.1.	Estimación de IBUs .....	23
11.2.	Diagramas de la planta piloto.....	24

	<b>Elaboró</b>	<b>Revisó</b>	<b>Aprobó</b>
Nombre	Carlos Ramírez		
Cargo	Alumno Memorista		
Firma			

## 1. OBJETIVO

Establecer un procedimiento estandarizado que le permita la elaboración de cervezas Lager y Ale en la planta piloto de cervezas y extractos en las dependencias de Maltexco en Temuco.

## 2. ALCANCE

El procedimiento involucra directamente a la persona a realizar el procedimiento en la planta piloto, además de supervisores, operarios, y encargado de planta piloto.

## 3. RECURSOS Y PROHIBICIONES

### 3.1. Elementos de Protección Personal

Debe utilizar los siguientes elementos, aparatos y/o dispositivos destinados a su protección personal:

- Casco de seguridad.
- Guantes de corte.
- Ropa de trabajo adecuada.
- Zapatos de seguridad.
- Protector auditivo.
- Cofia para el pelo.

### 3.2. De las prohibiciones

Está estrictamente prohibido:

- Usar joyas en general (gargantillas, pulseras, anillos, aros), el pelo suelto y ropa suelta, ya que facilita el atrapamiento en los elementos.
- Consumir cualquier alimento cuando está realizando todas las maniobras descritas en este procedimiento.

### 3.3. Cuidados de seguridad

Riesgo	Daños Potenciales	Controles Recomendados
Contacto con superficies calientes	Quemaduras	Usar guantes, usar ropa de trabajo adecuada.
Caídas al mismo nivel	Contusión.	No Correr, orden y limpieza del sector.
Caídas a distinto nivel	Contusión.	Verificar estado de escalerilla, utilizar pasamanos.
Atrapamiento	Amputaciones / Fracturas.	No usar ropa suelta.

#### 4. ANTECEDENTES

La cerveza corresponde a una bebida alcohólica producida a partir de la fermentación del grano malteado de algún cereal. A grandes rasgos, se puede señalar que la cerveza está constituida a partir de 4 ingredientes: malta, lúpulo, levadura y agua.

El proceso de producción de cervezas comienza con la extracción de los azúcares fermentables presentes en la malta en una etapa de maceración, para luego separar los restos de granos de la solución rica en carbohidratos, llamada mosto, a través de un proceso de filtración. El mosto dulce pasa a una etapa de cocción, donde se adiciona lúpulo para luego ser enfriado y depositado en los fermentadores. Allí se adicionan las levaduras, cuyo metabolismo permite la conversión de los azúcares a etanol y dióxido de carbono por medio de la fermentación alcohólica. Finalmente, ya terminada la fermentación, la cerveza verde pasa por una etapa de maduración en frío, desarrollando aromas y sabores característicos de esta bebida.

La materia prima principal del proceso cervecero es la malta. Del grano malteado de cebada se obtienen los azúcares fermentables (principalmente maltosa) que son requeridos por las levaduras durante la etapa de fermentación, transformándolos en etanol y otros compuestos como ésteres, aldehídos u otros alcoholes de mayor peso molecular.

El grano de malta posee:

- Almidón: Polímeros de glucosa con o sin ramificaciones (amilopectina y amilosa respectivamente), presentes en formas de gránulos en el endospermo del grano.
- Beta-glucanos: Polímeros de glucosa sin ramificaciones que constituyen las paredes de los gránulos de almidón.
- Proteínas: Constituyentes, al igual que los glucanos, de las paredes del endospermo y de los gránulos de almidón.
- Enzimas: Conjunto especial de proteínas que catalizan reacciones químicas. Para el proceso cervecero son importantes las que digieren al almidón, los beta-glucanos y las proteínas estructurales.

Enzimas importantes:

- Alfa-amilasa: Hidroliza el almidón, atacando en un enlace al azar entre los residuos de glucosa (excepto en los puntos de ramificación)
- Beta-amilasa: Hidroliza el almidón, atacando en los extremos de las cadenas del almidón, produciendo maltosa.
- Alfa-glucosidasa: Hidroliza el almidón, atacando en los extremos de las cadenas del almidón, produciendo glucosa.
- Dextrinasas límite: Hidroliza el almidón, atacando en los puntos de ramificación de la amilopectina.
- Beta-glucanasas: Hidrolizan los beta-glucanos, Algunas atacan al azar algún enlace entre los residuos de glucosa, mientras que otros atacan sólo los extremos, produciendo glucosa.
- Proteasas: Hidrolizan las proteínas estructurales, acortando las cadenas de polipéptidos y liberando aminoácidos.

Existen otras maltas, las maltas especiales, cuya función no es aportar azúcares fermentables ni proteínas. Aportan color, sabores y aromas que las maltas base, la descrita anteriormente, no puede entregar, ya que por su proceso de elaboración se forman caramelos o melanoidinas, obteniendo así sabores acaramelados (toffee, malvaviscos, azúcar quemada) o tostados (café, chocolate, expresso). Se utilizan en porcentajes bajos (del orden del 10% o menos) ya que, como fue mencionado, no aportan azúcares fermentables.

Código	
Versión	01
Fecha	15-03-2016
Páginas	4 de 27

El lúpulo es una flor que posee compuestos amargos llamados alfa-ácidos que entregan el amargor a la cerveza. Además poseen otros compuestos, principalmente aceites, que pueden entregar sabores y aromas a la bebida. Durante la cocción del mosto, se agrega el lúpulo, en forma de pellets generalmente, donde el juego entre la cantidad de lúpulo y el tiempo de cocción de éste determina el amargor, sabor y aroma de la cerveza. Lúpulos adicionados al comienzo de la cocción aportan amargor, mientras que lúpulos agregados al final del proceso aportan sabor y aroma.

La levadura es un microorganismo unicelular perteneciente al reino de los hongos. En ambientes sin oxígeno (anaeróbico) las levaduras obtienen energía a través de la vía metabólica de la fermentación alcohólica, donde utilizan azúcares fermentables como la maltosa, glucosa, fructosa, entre otros, para producir energía, entregando como producto etanol y dióxido de carbono. Por esta razón, las levaduras son utilizadas en la elaboración de cervezas y vino. Existen dos grupos de levaduras cerveceras:

- Levaduras de fermentación alta, o levaduras ale, que fermentan en la zona superior del equipo fermentativo, y a temperaturas entre los 18°C y 22°C generalmente. Tienen tiempos de fermentación relativamente cortos (5 días) y producen además otros compuestos que aportan sabores frutales o a especias.
- Levaduras de fermentación baja, o levaduras lager, que fermentan en la zona inferior del equipo fermentativo, a temperaturas entre los 5°C hasta los 15°C. Tienen tiempos de fermentación más largos que las ales (10 días) y poseen sabores más limpios que su contraparte.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto cuenta con servicios de agua fría, caliente, vapor y refrigerante, siendo estos 2 últimos utilizados en el control de temperatura de parte de los equipos presentes en la planta. En cuanto a los equipos, estos se enlistan a continuación:

- **Macerador:** El macerador consiste en un estanque agitado axialmente, con una capacidad de 50 litros. Cuenta con una chaqueta calefactora que utiliza vapor proveniente de las calderas de la planta de extractos de Maltexco, lo que permite regular la temperatura del mosto durante la etapa de maceración, permitiendo así la realización de maceraciones escalonadas en la planta piloto. Dadas las características del equipo, este también puede utilizarse en la cocción del mosto previa a la fermentación. La temperatura al interior del equipo es medida por medio de una termocupla ubicada en la zona superior de este.
- **Filtro vertical:** El filtro presente en la planta piloto corresponde a un filtro vertical, de capacidad de 50 litros. Posee una malla, la cual puede ser removida de éste por medio de un sistema hidráulico que permite elevar la carcasa superior del equipo. También cuenta con una entrada de aire comprimido y un manómetro, permitiendo elevar la presión dentro del equipo hasta 1 bar.
- **Estanque decantador (whirpool):** Este equipo corresponde a un estanque con una base cónica. La alimentación al equipo ingresa de manera tangencial a la superficie cónica de este, generando un movimiento circular, lo que favorece la separación de componentes debido a la presencia de la fuerza centrípeta.
- **Concentrador:** La planta piloto cuenta también con un concentrador rotatorio que es utilizado en los procesos de elaboración de extracto de malta, no así en el proceso cervecero.
- **Intercambiador de calor:** El intercambiador de calor presente en la planta piloto corresponde a uno de placas paralelas, que está conectado al suministro de agua fría de la planta, permitiendo así reducir la temperatura del mosto antes de pasar a los procesos de fermentación.

- **Fermentadores:** En la planta piloto existen 4 fermentadores, con una capacidad aproximada de 40 litros cada uno. Cuentan con una chaqueta que permite el ingreso de refrigerante para regular la temperatura al interior de los equipos durante la etapa de fermentación y maduración de la cerveza. Los fermentadores poseen una termocupla en la zona media-inferior del equipo y un manómetro para medir la temperatura y presión dentro del equipo.
- **Filtro Prensa:** A la salida de los fermentadores se encuentra un filtro prensa con su respectiva bomba. Cuenta de 11 placas y permite separar la cerveza sin gasificar de las levaduras remanentes en los fermentadores.
- **Gasificador:** Finalmente, la planta piloto cuenta con un gasificador, el que permite el contacto entre CO<sub>2</sub> comprimido y la cerveza, permitiendo la gasificación de esta. El gasificador posee una chaqueta enfriadora, con el fin de reducir la temperatura de la cerveza y favorecer el proceso de absorción de gas en el líquido.

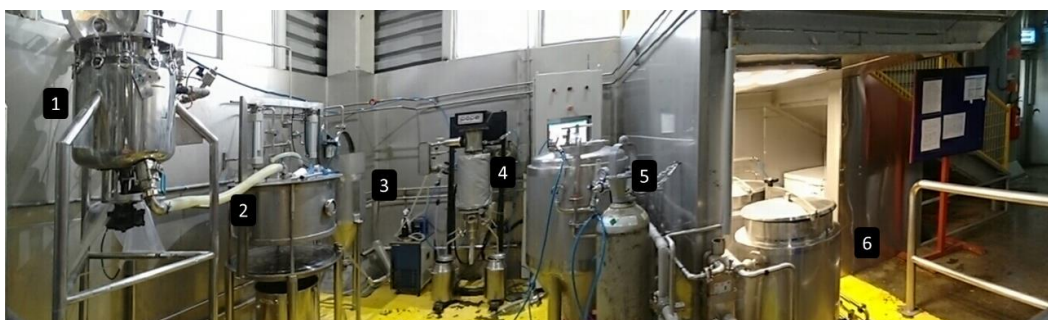


Figura 1: Fotografía panorámica a la planta piloto de cervezas y extractos. De izquierda a derecha: 1: Macerador, 2: Filtro Vertical, 3: Whirlpool, 4: Concentrador, 5: Gasificador, 6: Fermentadores.

En la sección de anexos se pueden encontrar diagramas de la planta piloto, con los respectivos equipos y válvulas presentes en la línea. Se recomienda tener a mano los diagramas para conocer las válvulas que se nombran durante el proceso descrito en la sección siguiente.

## 6. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO FINAL

El procedimiento de elaboración de cervezas en la planta piloto está pensado para elaborar 2 tipos de cervezas: Una tipo lager (Pilsen) y una ale (Blonde Ale). Se espera que el producto final posea las siguientes características:

Gravedad inicial de la cerveza (antes de la fermentación) OG: 1,050 – 1,055.

Gravedad final de la cerveza (finalizada la fermentación) FG: 1,008 – 1,013.

Amargor: 25 IBUs.

Grado alcohólico: 4,5% - 5,0%

## 7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

### 7.1. Preparación de los equipos

Se recomienda que previo a la elaboración de cervezas en la planta piloto se realice una limpieza superficial de los equipos para eliminar restos de sanitizante o hidróxido de sodio utilizados durante la limpieza tipo CIP. Para esto, se debe seguir el procedimiento descrito a continuación:

1. Verificar que todas las válvulas se encuentren cerradas.
2. Abrir válvulas 1, 18 y 14 para permitir el ingreso de agua caliente al macerador.
3. Almacenar agua caliente hasta que el volumen de líquido dentro del equipo supere la mitad de la capacidad total de éste.
4. Abrir válvula 2, permitiendo el ingreso de agua caliente al filtro.
5. Abrir válvula 3, enviando el agua caliente al estanque de recepción.
6. Cerrar válvula 14, cortando el suministro de agua caliente al macerador.
7. Una vez que todo el contenido de agua del macerador haya pasado al filtro, abrir válvulas, abrir válvulas 4, 6 y 7.
8. Encender la bomba de recirculación, cuyo interruptor se encuentra en el PC de la planta piloto, lo que permite recircular agua desde el estanque de recepción hacia el macerador.
9. Después de 5 minutos, apagar bomba de recirculación y cerrar válvula 7.
10. Abrir válvula 8 y encender la bomba de recirculación, enviando el contenido del estanque de recepción al whirlpool.
11. Después de 5 minutos, abrir la válvula 21, en la zona inferior del whirlpool, descartando el contenido de éste.
12. Una vez que no haya agua en el estanque de recepción, apagar la bomba de recirculación y cerrar las válvulas 4, 6, 8.

### 7.2. Molienda

La molienda del grano facilita la extracción de azúcares del grano malteado durante la maceración, ya que aumenta el área de transferencia de masa entre el grano y el mosto. La molienda del grano debe realizarse en el molino de martillo de la planta de extractos de Temuco, obteniendo la misma granulometría que se usa para la elaboración de extractos.

### 7.3. Maceración

La maceración es la etapa del proceso cervecero donde se extraen los azúcares desde los granos de malta. Éstos poseen una gran cantidad de almidón, el cual se transforma en azúcares fermentables y en dextrinas de menor tamaño, gracias a la acción de las enzimas amilolíticas presentes en el grano.

La maceración utiliza una curva de calentamiento escalonada. Cada escalón favorece la acción de una (o un grupo de enzimas) en particular. El primero de los tres escalones utilizados en el proceso cervecero descrito en este protocolo favorece la acción de las enzimas encargadas de la degradación de la pared del endospermo (beta-glucanasas, proteasas), mientras que el segundo y tercero la acción de la beta-amilasa y alfa-amilasa respectivamente. Granos sin maltear, o con una alta concentración de beta glucanos (como la malta de trigo), requerirán mayores tiempos de maceración, debido a que se debe aumentar la acción de las beta-glucanasas, por lo que se deben considerar tales variables al momento de utilizar otro tipo de materias primas en la planta piloto.



Figura 2: Macerador de la planta piloto de cervezas y extractos. Ubicación de las válvulas 1 y 2.

Para la maceración, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Verificar que la válvula 2, ubicada en la zona inferior del equipo, se encuentra cerrada.
2. Verificar que las válvulas V1 y V2 están abiertas, ya que permiten el ingreso de vapor a la chaqueta del reactor.
3. Abrir las válvulas 1, 18, 14 y 15, para permitir el ingreso de agua fría y caliente hacia el macerador. Recolectar 50 L de agua.
4. Verificar la temperatura del agua del macerador. Para esto, revisar la temperatura en el PC de la planta piloto. Idealmente, la temperatura no debería estar por debajo de 5°C del primer escalón de la curva de maceración del procedimiento a realizar.
5. Levantar la tapa del macerador y agregar 10 kg de malta molida al equipo. Se recomienda agregar lentamente la malta, para evitar la formación de conglomerados que puedan afectar en la extracción de azúcares del grano. Luego, cerrar la tapa del equipo.
6. Encender el agitador del equipo con el interruptor "Agitador 2" presente en el PC de la planta piloto (Ver Figura 3).
7. Definir el escalón de temperaturas para la maceración. Para esto, dirigirse a la sección "Curva de Calentamiento" presente en la pestaña "Planta Piloto" del equipo. Se debe realizar la siguiente configuración:  
 Etapa 1: 50°C – 1200 seg.  
 Etapa 2: 60°C – 1200 seg.  
 Etapa 3: 70°C – 2000 seg.  
 Etapa 4: 70°C – 1600 seg.  
 Cada uno de los escalones de la curva de maceración favorecen la acción de una o más enzimas en particular (ver Figura 5). El tiempo máximo que el sistema puede ingresar para cada escalón es de 2000 segundos, por ende, el último escalón, que tiene una duración de 1 hora, debe ser ingresado en dos etapas por separado (etapa 3 y etapa 4).  
 Luego de ingresar la curva de calentamiento, hacer clic en start.



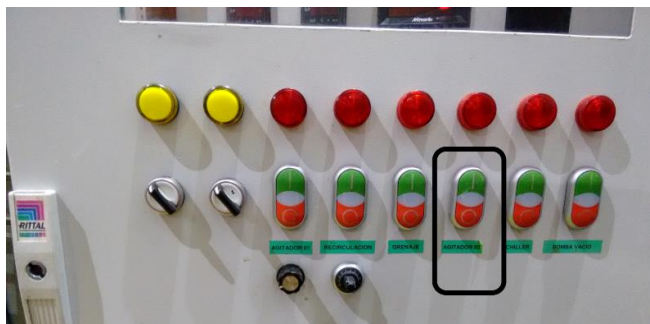


Figura 3: Interruptor del agitador del macerador (Agitador 2).

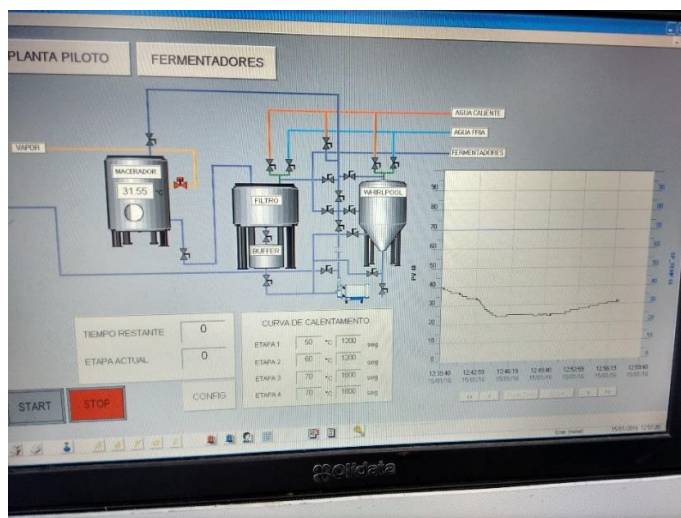


Figura 4: Fotografía a la pestaña "Planta Piloto" del computador de la planta piloto.

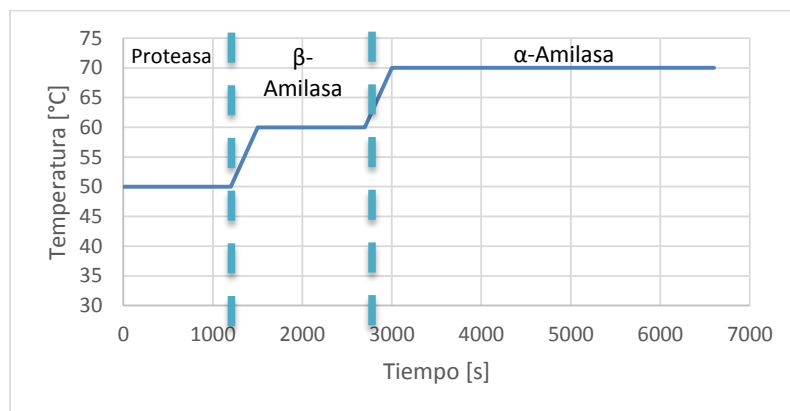


Figura 5: Curva de maceración esperada.

Código	
Versión	01
Fecha	15-03-2016
Páginas	9 de 27

8. Finalizadas las 4 etapas, tomar una muestra del mosto del macerador en un vaso precipitado (no más de 10 ml) y agregar 1 gotita de yodo. Si la muestra toma una coloración azul/negra, se deben aumentar los tiempos de maceración. Sino, pasar a la siguiente etapa.
9. Volver a la sección "Curva de Calentamiento" y setear la siguiente configuración:

Etapa 1: 80°C – 300 seg.

Etapa 2: 60°C – 0 seg.

Etapa 3: 70°C – 0 seg.

Etapa 4: 70°C – 0 seg.

Esto permite la inactivación de las enzimas del grano, además de facilitar la filtración del mosto.

#### 7.4. Filtración

La filtración tiene como finalidad separar el mosto dulce de los granos agotados de malta, ya que si estos se mantienen en el proceso cervecero podrían aportar sabores no deseados al producto final. En la planta piloto, la filtración se lleva a cabo en el filtro vertical de la Figura 6.

Propiedades del fluido como la viscosidad o la temperatura del mosto influyen en el proceso de filtración, ya que a mayor viscosidad, mayor es la resistencia al movimiento del mosto a través de la torta. De manera similar, a mayor temperatura, menor es la viscosidad, por lo que la filtración se realiza en un menor tiempo.

El ingreso de producto se realiza por la parte superior del equipo. Dentro de éste existe un difusor, para distribuir el producto de manera uniforme en la base del equipo. También posee un sistema hidráulico que permite levantar la carcasa superior y poder retirar la malla que soporta al lecho filtrante.



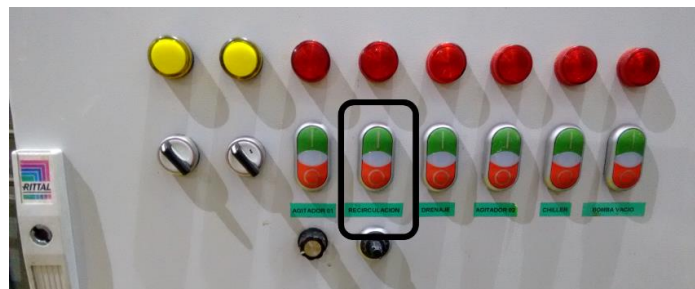
Figura 6: Filtro vertical de la planta piloto.

Para la filtración, se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. En caso que el filtro se encuentre desarmado, seguir el procedimiento indicado en la Figura 7. La goma que soporta la malla debe instalarse en la zona demarcada en el equipo, para luego instalar la malla sobre la goma. Luego, accionar la palanca del sistema hidráulico (ubicada a la derecha del equipo) para bajar la carcasa. Finalmente, asegurar el cierre hermético del filtro apretando los 4 pernos que se muestran en la zona superior del equipo.
2. Verificar que no existan restos de líquidos como agua de lavado en el filtro vertical y en el estanque de recepción. Verificar también que la purga de aire del filtro se encuentra abierta.
3. Abrir la válvula 3, ubicada en la zona inferior del filtro.
4. Abrir parcialmente la válvula 2 permitiendo el movimiento del mosto desde el macerador hacia el filtro.
5. Abrir las válvulas 4, 6 y 18 y encender la bomba de recirculación. Se iniciará la recirculación del mosto desde el estanque de recepción hacia el macerador. La tapa del macerador debe estar CERRADA. Si esta se encuentra abierta, o sus pernos no fueron ajustados, se perderá parte del mosto filtrado hacia la zona exterior del equipo. Recircular mosto por 10 minutos.



*Figura 7: Instalación de la malla en el filtro vertical. En la primera imagen, filtro sin malla. Segunda imagen, la malla del filtro y la goma de soporte. Tercera imagen, posicionamiento de la goma de soporte abajo la malla del filtro. Cuarta imagen, filtro cerrado.*



*Figura 8: Interruptor de la bomba de recirculación de la planta piloto.*

Código	
Versión	01
Fecha	15-03-2016
Páginas	12 de 27

6. Verificar que el mosto filtrado no posee restos de grano o partículas en suspensión. Para esto, tomar una muestra de mosto por debajo del filtro (bajo la válvula 3) y comprobar visualmente si hay presencia de partículas. En caso que aún se observen partículas, mantener la recirculación hasta que ya no existan partículas en suspensión.
7. Detener la bomba de recirculación y cerrar las válvulas 4, 6 y 18.
8. Abrir completamente la válvula 2.
9. Una vez que el macerador haya sido completamente vaciado, cerrar la válvula 2 y la purga de aire del filtro vertical.
10. Ingresar LENTAMENTE aire comprimido al filtro vertical. Se recomienda abrir la válvula de gas hasta que la presión al interior del filtro no supere los 0,1 bar. Verificar que el mosto filtrado no contenga partículas al igual que en el punto 5.
11. Aumentar el flujo de aire comprimido LENTAMENTE hasta, en un tiempo no menor a 5 minutos, alcanzar una presión de 0,5 – 0,6 bar en el filtro. Verificar nuevamente la presencia de partículas en el mosto filtrado.
12. Aproximadamente, después de 30 minutos, verificar el avance de la filtración. De los 50 litros iniciales es posible recuperar hasta 48 litros.
13. Tomar una muestra del mosto filtrado (250 ml) y medir su densidad o gravedad específica.
14. Para la limpieza de la malla y del equipo, retirar los 4 pernos que posee el equipo en la zona superior para luego accionar el sistema hidráulico. Se levantará la carcasa del equipo, permitiendo retirar la torta formada y limpiar la malla y el interior de éste usando la manguera de la planta de extractos.

Código	
Versión	01
Fecha	15-03-2016
Páginas	13 de 27

### 7.5. Cocción

La cocción tiene como finalidad principal esterilizar el mosto por calor. También se agrega el lúpulo, el que posee las sustancias amargas (alfa-ácidos) que son solubilizadas por el calor. Hay un desarrollo de color en esta etapa debido a la reacción entre compuestos nitrogenados y azúcares, conocida como reacción de Maillard. El proceso de cocción lleva al mosto a su punto de ebullición y toma un poco más de una hora.

1. Abrir las válvulas 4, 6, 7 y 18 y encender la bomba de recirculación. Se iniciará la recirculación del mosto desde el estanque de recepción hacia el macerador. La tapa del macerador debe estar CERRADA. Si esta se encuentra abierta, o sus pernos no fueron ajustados, se perderá parte del mosto filtrado hacia la zona exterior del equipo.
2. Una vez vaciado el estanque de recepción, cerrar la válvula 4 y detener la bomba de recirculación. Luego, cerrar las válvulas 6, 7 y 18.
3. En el PC de la planta piloto, setear la siguiente curva de calentamiento:  
Etapa 1: 100°C – 2000 seg.  
Etapa 2: 100°C – 1600 seg.  
Etapa 3: 70°C – 0 seg.  
Etapa 4: 70°C – 0 seg.
4. Paralelamente, se debe masar la cantidad de lúpulo a adicionar en la etapa de cocción. En la sección de Anexos se detalla el cálculo de la masa de pellets de lúpulo requerida para lograr los 25 IBUs de la cerveza a fabricar.
5. Se incorporan los pelets de lúpulo al mosto, a los tiempos que sean definidos según el estilo de cerveza a fabricar.

## 7.6. Clarificación



Figura 9: Estanque whirlpool de la planta piloto.

La clarificación elimina compuestos que aportan sabores no deseados a la cerveza, además de sólidos como restos de grano o lúpulo.

Durante la cocción, una fracción importante de proteínas son denaturadas, las que forman agregados y tienden a decantar, junto con restos de los pellets de lúpulo agregados al mosto, al igual que granos que no hayan sido detenidos por la torta durante la filtración.

En la planta piloto, el estanque whirlpool es utilizado para la clarificación. En éste, la alimentación ingresa de forma tangencial a la zona cónica del equipo, lo que permite la separación del trub (el sedimento formado) del resto del mosto gracias a la presencia de la aceleración centrípeta/centrífuga.

Para la clarificación, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Verificar que no existan restos de líquidos como agua de lavado en el filtro vertical, en el estanque de recepción y en el whirlpool. Verificar también que la purga de aire del filtro se encuentra abierta.
2. Abrir la válvula 3, ubicada en la zona inferior del filtro.
3. Abrir parcialmente la válvula 2 permitiendo el movimiento del mosto desde el macerador hacia el filtro.
4. Recolectar todo el contenido del macerador en el estanque de recepción y determinar el volumen de mosto hervido recuperado y la densidad de éste.
5. Abrir válvulas 4, 6 y 8, y encender la bomba de recirculación. El mosto hervido ingresará de forma tangencial al whirlpool, generando un movimiento circunferencial al interior del equipo.
6. Después de vaciar el contenido del estanque de recepción, cerrar la válvula 4 y detener la bomba de recirculación.
7. Abrir la válvula 19 y volver a encender la bomba de recirculación, para mantener el movimiento circunferencial del mosto en el equipo.
8. Después de 30 minutos, detener la bomba de recirculación y cerrar las válvulas 19, 6 y 8.
9. Paralelamente, según la densidad del mosto y el volumen en el fermentador (el que se puede estimar como volumen de mosto hervido menos 2 litros perdidos por la eliminación

Código	
Versión	01
Fecha	15-03-2016
Páginas	15 de 27

- del trub y menos 1 litro más que quedará estancado en las líneas de alimentación), determinar la masa de levadura seca a inocular para el proceso de fermentación. La masa de levadura puede determinarse en el toolbox de Brewtoad (<https://www.brewtoad.com/tools/pitch-rate-calculator>).
10. Masar la levadura en un vaso precipitado de 500 ml, previamente sanitizado con alcohol al 90% o ácido peracético al 1%. Agregar agua entre 30°C y 35°C hasta que el peso final del contenido del vaso precipitado sea 10 veces el peso original (indicaciones del proveedor de las levaduras, Mauribrew) y dejar reposar al menos 30 minutos, cubriendo el vaso con parafilm o papel aluminio.
  11. 30 minutos después de la detención de la bomba, abrir la válvula 21 y descartar 2 litros del contenido del whirlpool, que corresponde al trub, sedimento compuesto por proteínas denaturadas por acción del calor, restos de grano y de pellets de lúpulo.



### 7.7. Fermentación



Figura 10: Fermentadores de la planta piloto.

La fermentación es la etapa donde las levaduras cerveceras transforman los azúcares del mosto en etanol. En condiciones anaeróbicas, la vía metabólica de obtención de energía de las levaduras corresponde a la de la fermentación alcohólica, donde una molécula de glucosa (que la levadura la puede obtener a partir de maltosa, sacarosa y otros azúcares fermentables) forma etanol y dióxido de carbono.

Las levaduras de fermentación alta usan temperaturas altas (18°C – 22°C), por lo que tienen menores tiempos de fermentación, a diferencia de las levaduras bajas, que fermentan entre 5°C a 12°C. Sin embargo, las 2 pueden utilizarse en los fermentadores de la planta piloto, por lo que no habrían diferencias sustanciales (exceptuando las ya mencionadas, temperatura y tiempo) en el proceso productivo.

Para el proceso de fermentación, seguir las indicaciones:

1. Abrir las válvulas 10 y 22, que permiten el ingreso de agua fría al intercambiador de placas de la planta piloto y luego ser descartada hacia el drenaje. Encender la bomba de drenaje (ver Figura 11).



Figura 11: Interruptor de la bomba de drenaje de la planta piloto.

2. Después de 5 minutos, abrir las válvulas 6 y 20, y verificar que las válvulas 4, 7 y 8 se encuentran cerradas.

3. Dependiendo del fermentador a utilizar, se deben abrir las siguientes combinaciones de válvulas:

Fermentador 1	Fermentador 2	Fermentador 3	Fermentador 4
25, 26, 29	25, 26, 31, 34	25, 26, 31, 36, 39	25, 26, 31, 36, 41, 44

Verificar que el resto de las válvulas de los fermentadores se encuentren cerradas para evitar la pérdida de mosto frío.

- Encender la bomba de recirculación y abrir hasta la 2da posición (60° aprox.) la válvula 9. Esto transfiere el contenido del whirlpool hacia el fermentador a utilizar, pasando por el intercambiador de calor. Abrir la válvula completamente reduce el calor retirado del mosto, teniendo temperaturas de salida que podrían afectar negativamente en el proceso cervecero.
- Una vez que todo el mosto haya sido transferido al fermentador, cerrar la válvula de la línea que conecta el equipo a la línea de alimentación (Válvulas 29, 34, 39 y 44 para los fermentadores 1, 2, 3 y 4, respectivamente) y detener las bombas de recirculación y drenaje. Cerrar la válvula 22.
- Agregar lo más pronto posible la levadura preparada según las indicaciones anteriores y cerrar el fermentador, además de la purga de aire del equipo.
- En el PC de la planta piloto, hacer click en la pestaña "Fermentadores" (Figura 12). Luego, hacer click sobre el fermentador que se está utilizando e ingresar la temperatura a la que se llevará a cabo la fermentación. Para fermentación con levaduras lager, utilizar 12°C. Para levaduras ale, 22°C (ver Figura 13). Hacer click sobre las bombas que se muestran en la interfaz para encenderlas. Si están de color verde, es porque ya están encendidas.

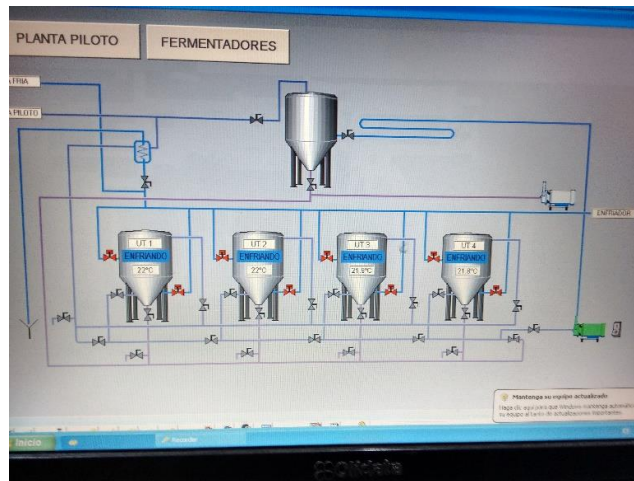


Figura 12: Pestaña "Fermentadores" del PC de la planta piloto.

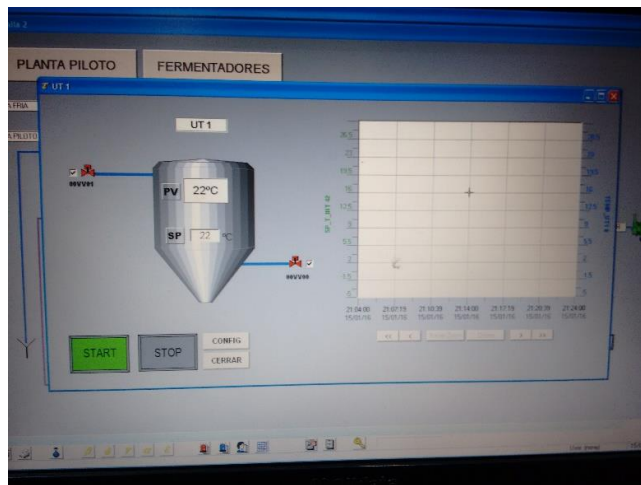


Figura 13: Pestaña del control de uno de los fermentadores de la planta piloto.

8. Cerrar todas las válvulas que hayan sido abiertas durante la transferencia del mosto hacia los fermentadores.
9. Fermentar durante 2 semanas.

### 7.8. Maduración

La maduración es la etapa posterior a la fermentación donde se deja descansar la cerveza para permitir la sedimentación de levaduras, proteínas y otros compuestos y clarificar la cerveza, además de desarrollar el sabor final del producto, al arrastrar en la sedimentación también compuestos que aportan sabores no deseados. La maduración se hace en frío, por lo que se utilizan los mismos equipos que fueron usados en la fermentación, después de un cambio en el set point de la temperatura de los fermentadores.

Para la maduración de la cerveza, seguir el procedimiento descrito a continuación:

1. Dirigirse al PC de la planta piloto, hacer click en la pestaña "Fermentadores" y luego en el fermentador que se está utilizando para setear la temperatura de maduración, que corresponde a 0°C (ver Figura 12 y Figura 13).
2. Dirigirse al fermentador que se utilizará para la maduración y descartar 2 litros del contenido de éste, usando la válvula que se encuentra en la zona inferior del equipo (Válvulas 28, 33, 38 o 43, para los fermentadores 1, 2, 3 y 4, respectivamente).
3. Madurar por 2 semanas.

## 7.9. Gasificación



Figura 14: Gasificador de la planta piloto. Al inferior, la válvula 51.

La gasificación de la cerveza tiene como finalidad agregar dióxido de carbono a la bebida alcohólica. Este proceso se realiza a bajas temperaturas y a presión, para favorecer la solubilidad del dióxido de carbono en la cerveza.

En la planta piloto existe un gasificador con una piedra difusora de gas en la línea de alimentación. Sin embargo, ingresar CO<sub>2</sub> por la vía de alimentación afecta negativamente en el proceso productivo, ya que facilita las fugas de producto en el filtro prensa ubicado río arriba, el que se utiliza para separar las levaduras de la cerveza. Dado esto, se utiliza un sistema de gasificación alterando la configuración de las tuberías del equipo para inyectar gas desde la zona inferior del equipo.

El proceso completo para la gasificación se detalla a continuación:

1. Poner entre las placas del filtro prensa la tela filtrante que retendrá las levaduras antes de gasificar. El filtro prensa posee 11 placas, por lo que se utilizan en cada proceso 10 telas de 20 cm x 20 cm. La posición de las telas debe ser alternada, es decir, entre las 2 primeras placas la cara rugosa debe ir hacia adelante, mientras que la lisa hacia atrás, la segunda tela debe tener su cara lisa hacia delante y la rugosa hacia atrás y así hasta colocar las 10 telas. Apretar las manijas para presionar las placas del filtro.
2. Verificar si el filtro no tiene fugas de producto. Para eso, abrir las válvulas 7, 9, 25, 26, 31, 36, 41 y 47, que permitirán el paso de agua fría hacia el filtro prensa, y la válvula 48, por donde será descartada el agua que pase por el filtro. Luego, abrir la válvula 15, que suministrará el agua helada.
3. Comprobar visualmente si existen fugas de agua en el filtro. En caso que existan, cerrar la válvula 15 y volver a apretar las manijas del filtro. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que no se observen fugas.
4. Cerrar la válvula 48.
5. Soltar la unión entre la línea de drenaje y la salida del gasificador ubicada bajo la válvula 51.
6. Abrir la válvula 51 y descartar el agua contenida dentro del gasificador, si es que hubiese.

7. Abrir la válvula 49.
8. Dependiendo del fermentador que contenga la cerveza a gasificar, abrir (o mantener abiertas) las siguientes combinaciones de válvulas:

Fermentador 1	Fermentador 2	Fermentador 3	Fermentador 4
29, 31, 36, 41, 47	34, 36, 41, 47	39, 41, 47	44, 47

Las otras válvulas no mencionadas deben ser cerradas, sino parte del producto será redirigido a otra zona de la planta piloto.

9. Abrir la purga de aire del fermentador a utilizar.
10. Verificar que la tapa del gasificador está completamente cerrada y abrir la purga de aire del gasificador.
11. Abrir las válvulas R6 y R7, que permiten el ingreso de refrigerante a la chaqueta del gasificador.
12. Encender la bomba del filtro prensa e INMEDIATAMENTE dirigirse al gasificador.
13. Debido a que había agua en la línea de alimentación al gasificador, se debe descartar el agua presente en ellas, por lo que se debe mantener la válvula 51 abierta hasta que ya no salga agua por ella, sino que cerveza. Luego, cerrar la válvula 51.
14. Abrir la tapa del fermentador utilizado y comprobar visualmente la disminución del nivel de cerveza dentro de éste. Además, siempre comprobar que no existan fugas en el filtro prensa. En caso que existan, detener la bomba y volver a apretar las manijas del filtro.
15. Una vez que todo el contenido del fermentador haya sido enviado al gasificador, cerrar la válvula 49 y detener la bomba del filtro prensa.
16. Conectar el adaptador para la entrada de CO<sub>2</sub> debajo de la válvula 51 del gasificador (Figura 15).



*Figura 15: Adaptador para el ingreso de gas al gasificador.*

17. Conectar la salida del adaptador con el cilindro de CO<sub>2</sub> de la planta piloto usando una manguera.
18. Abrir la válvula 51.
19. Abrir la primera manilla del cilindro de CO<sub>2</sub> y regular el flujo de gas hacia el gasificador con la manilla del compresor al que está conectado el cilindro.
20. Después de 5 min, cerrar la purga de aire del gasificador.
21. Mantener el ingreso de CO<sub>2</sub> al gasificador hasta que la presión al interior de éste sea igual a 2 bar.
22. Cortar el suministro de CO<sub>2</sub>, cerrando las dos manillas del cilindro para luego cerrar la válvula 51.
23. Dejar gasificar la cerveza por 8 horas.

## 7.10. Envasado

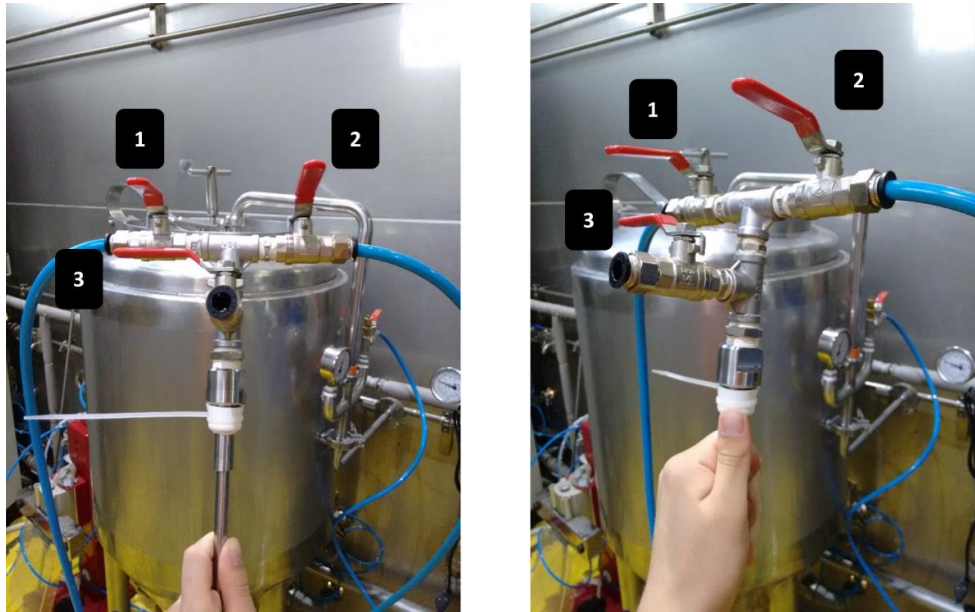


Figura 16: Sistema de envasado de cerveza construido por el área de mantenimiento de la planta de extractos de Maltexco. 1: Válvula de alimentación, 2: Válvula de entrada de gas, 3: Válvula de despresurización.

Para el envasado de las cervezas, Maltexco cuenta con un dispositivo que permite el ingreso de cerveza de forma isobárica, igualando las presiones de la botella donde se depositará el producto y el gasificador, para así reducir la generación de espuma y la pérdida de dióxido de carbono por la diferencia de presión. El dispositivo se muestra en la Figura 16, el que posee 2 entradas (una para gas y otra para cerveza) y 2 salidas (una hacia el interior de la botella y otra hacia el ambiente). A modo de resumen, el funcionamiento del dispositivo permite el ingreso de gas desde el gasificador hacia la botella hasta igualar las presiones, para luego abrir una válvula de despresurización, que permite la salida de gas y el ingreso de cerveza a la botella.

El proceso completo de gasificación se detalla a continuación:

1. Conectar el adaptador ubicado en la zona inferior del gasificador con la entrada de la alimentación del dispositivo de envasado.
2. Conectar la purga de gas del gasificador con el cilindro de CO<sub>2</sub> y con la entrada de gas del dispositivo de envasado.
3. Conectar el suministro de aire comprimido utilizado en el filtro vertical con la entrada de aire comprimido del sistema Star Cap.
4. Abrir la válvula 51 y la purga de aire del gasificador.
5. Suministrar CO<sub>2</sub> al gasificador a un flujo pequeño de manera de mantener constante la presión al interior de éste en 2 bar.
6. Lavar las botellas a utilizar con agua potable, descartar el agua y rociar con etanol al 90% o ácido peracético al 1% al interior de éstas.
7. Rociar etanol al 90% o ácido peracético al 1% a la salida de cerveza gasificada del dispositivo de envasado.
8. Insertar el dispositivo de envasado en una botella.
9. Abrir la válvula de despresurización del dispositivo de envasado.
10. Abrir la válvula de entrada de gas del dispositivo de envasado para desplazar el oxígeno contenido en la botella.
11. Después de unos segundos, cerrar la válvula de despresurización.

12. Cerrar la válvula de entrada de gas del dispositivo de envasado.
13. Abrir la válvula de entrada de alimentación del dispositivo de envasado.
14. Abrir LENTAMENTE la válvula de despresurización del dispositivo de envasado. La cerveza ingresará lentamente a la botella.
15. Cerrar la válvula de envasado cuando esté pronto a llenarse la botella con cerveza.
16. Descartar el resto de espuma o gas que haya quedado en la cerveza y cerrar la válvula de despresurización.
17. Desmontar de la botella el dispositivo de envasado.
18. Colocar una tapa en la zona inferior del sistema neumático del tapador Star Cap.
19. Poner la botella de cerveza en el equipo Star Cap.
20. Presionar los 2 botones del equipo para poner la tapa en la botella de cerveza.
21. Repetir el proceso desde el punto 8 en adelante según la cantidad de botellas que se quieran envasar.

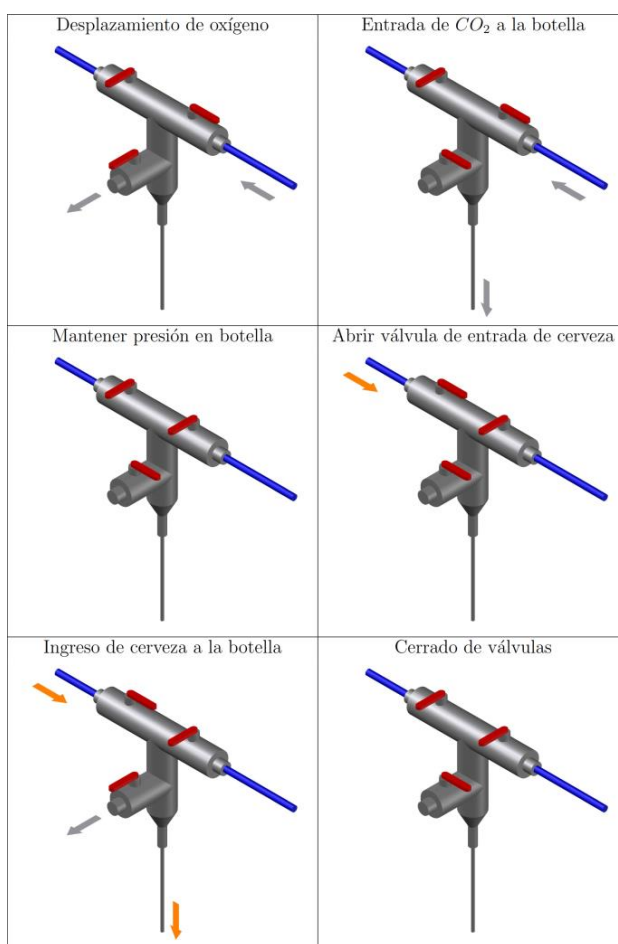


Figura 17: Funcionamiento del dispositivo de envasado de cervezas. En gris los flujos de gas, en naranja los flujos de cerveza.

## 8. REGISTROS

No aplica.

## 9. REFERENCIAS

Para cualquier duda con respecto al proceso productivo o fenomenología detrás del proceso cervecero consultar el trabajo de memoria "Estandarización de los procesos de elaboración de cervezas en planta piloto" de Carlos Ramírez R.

## 10. ULTIMAS MODIFICACIONES

Versión	Fecha	Modificaciones
001	15-03-2016	Documento original

## 11. ANEXOS

### 11.1. Estimación de IBUs

Para estimar los gramos de lúpulo requeridos para alcanzar los IBUs de las cervezas se utiliza la aproximación propuesta por Catrileo en su curso de cervecería artesanal (Cervecerías Prost SpA).

La expresión general para el cálculo de la masa de lúpulo corresponde a:

$$W = \frac{IBU \cdot V}{10 \cdot \%AA \cdot U}$$

Donde  $W$  es la masa de lúpulo en gramos,  $IBU$  son los IBUs que se deben alcanzar,  $V$  el volumen en litros del batch durante la cocción,  $\%AA$  es el porcentaje de alfa-ácidos del lúpulo y  $U$  es la utilización, que corresponde a la fracción de alfa-ácidos del lúpulo que son lixiviados durante la cocción.

Los lúpulos utilizados en la planta piloto son 3:

- Apollo, lúpulo de amargor. Contenido de alfa-ácidos promedio: 18%.
- Cascade, lúpulo para sabor. Contenido de alfa-ácidos promedio: 7%.
- Fuggle, lúpulo para aroma. Contenido de alfa-ácidos promedio: 4,7%.

La utilización depende tanto del tiempo de cocción del lúpulo como de la gravedad del mosto. Para mostos con gravedades cercanas a los 1.050, la utilización a distintos tiempos toma los siguientes valores, según el método de Catrileo:

- A 60 min,  $U = 0,293$ .
- A 30 min,  $U = 0,234$ .
- A 0 min,  $U = 0,059$ .

Si no varían los tiempos de cocción de cada lúpulo, ni tampoco el contenido de alfa-ácidos de esto, la masa de lúpulo a agregar es directamente proporcional al volumen de mosto durante la cocción, así, para lograr los 25 IBUs, se debe calcular la masa de lúpulo según lo indicado en la Tabla 1.



Tabla 1: Masa de lúpulo para la elaboración de cervezas de 25 IBUs. La masa calculada es en gramos. El volumen a utilizar debe ser en litros.

Lúpulo	IBUs a aportar	Tiempo de cocción	Masa requerida
Apollo (18% AA)	20 IBU	60 min	$0,380 \cdot V$
Cascade (7% AA)	4 IBU	30 min	$0,244 \cdot V$
Fuggles (4,7% AA)	1 IBU	0 min	$0,364 \cdot V$

En caso que se requieran utilizar otros tiempos de cocción, la utilización puede estimarse gráficamente según lo presentado en la Figura 18:

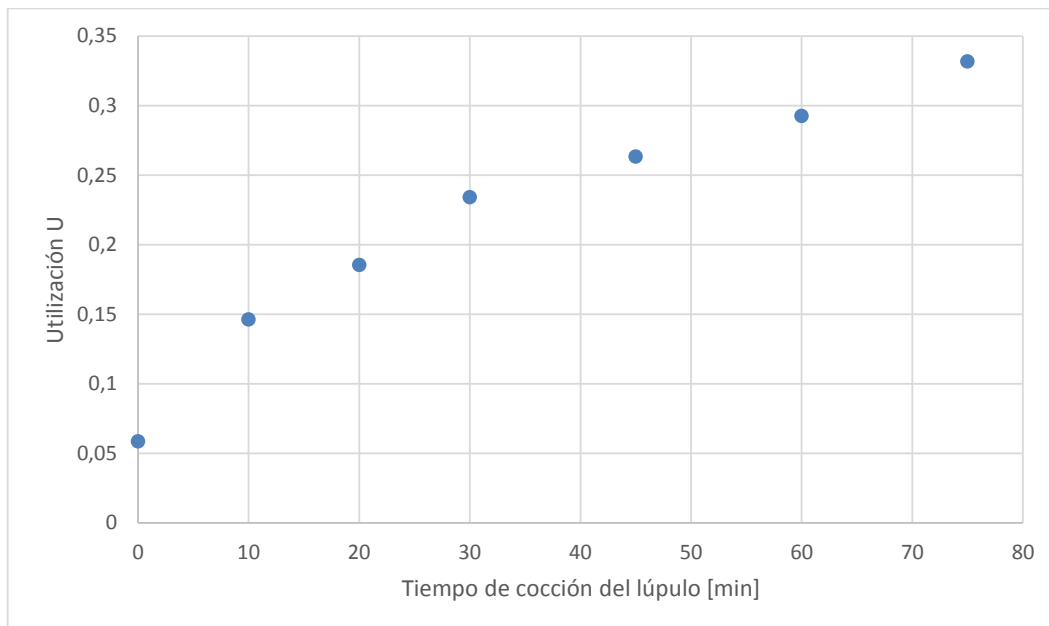
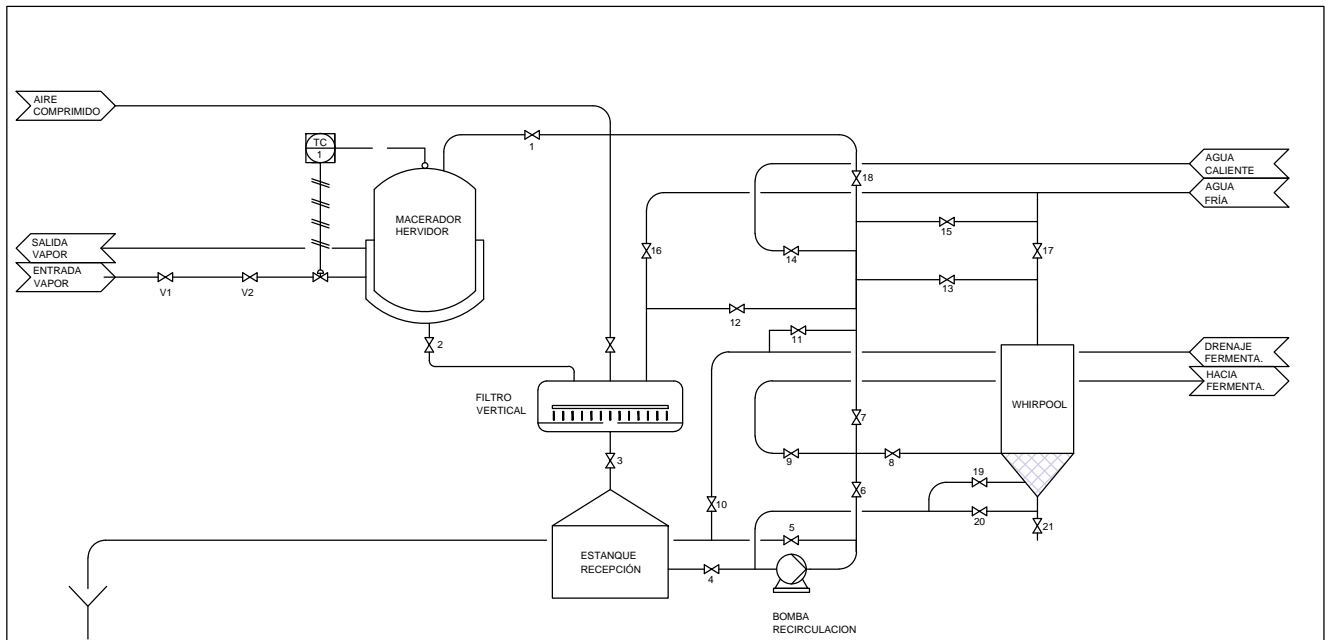


Figura 18: Utilización del lúpulo a distintos tiempos de cocción.

## 11.2. Diagramas de la planta piloto

En las páginas siguientes se presentan tres diagramas de la planta piloto de Maltexco, incluyendo los equipos y las válvulas presentes en ésta.



## MALTEXCO S.A.

PLANTA PILOTO DE CERVEZAS Y EXTRACTOS

Macerador, Filtro vertical,  
whirpool

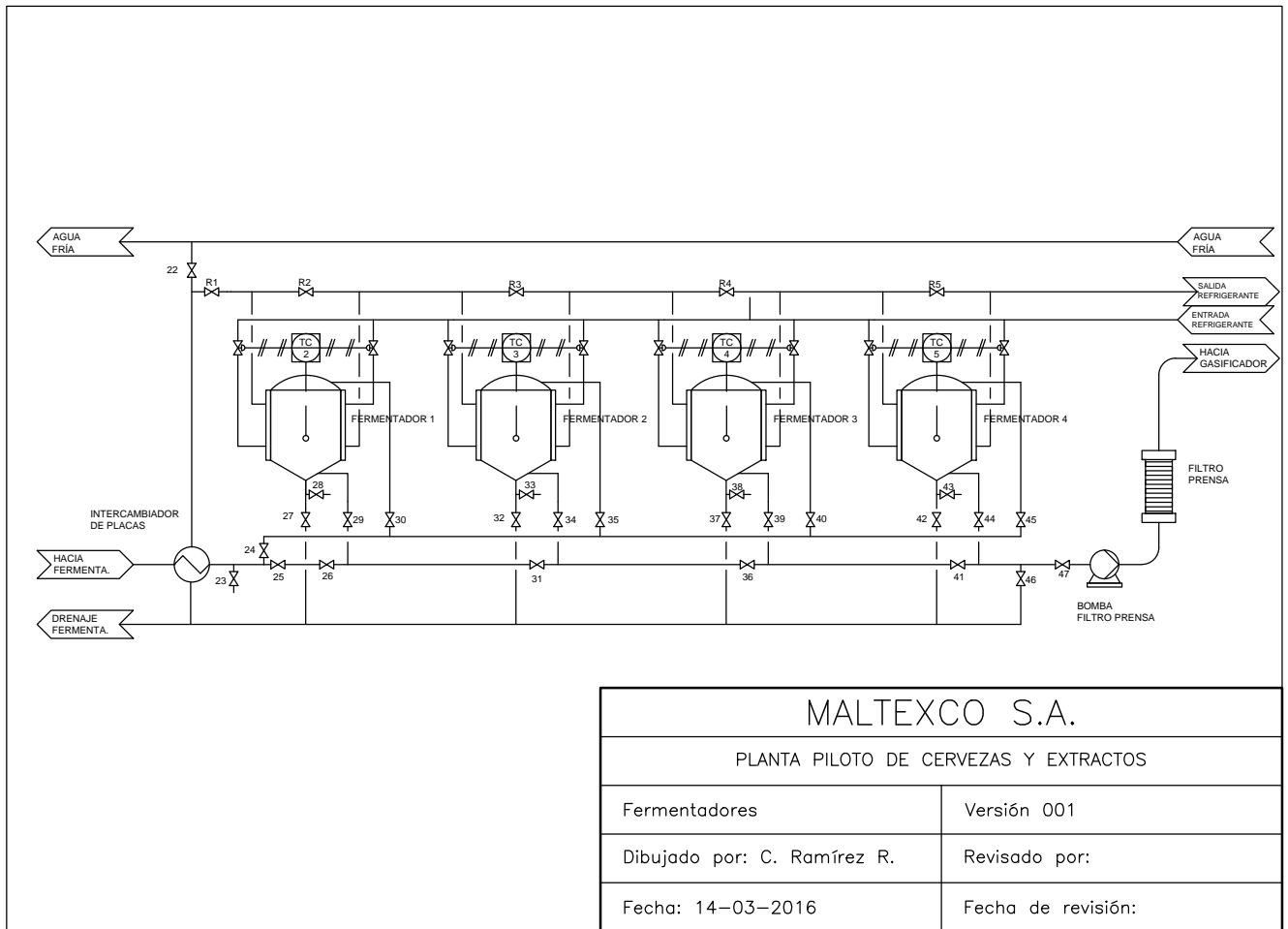
Versión 001

Dibujado por: C. Ramírez R.

Revisado por:

Fecha: 14-03-2016

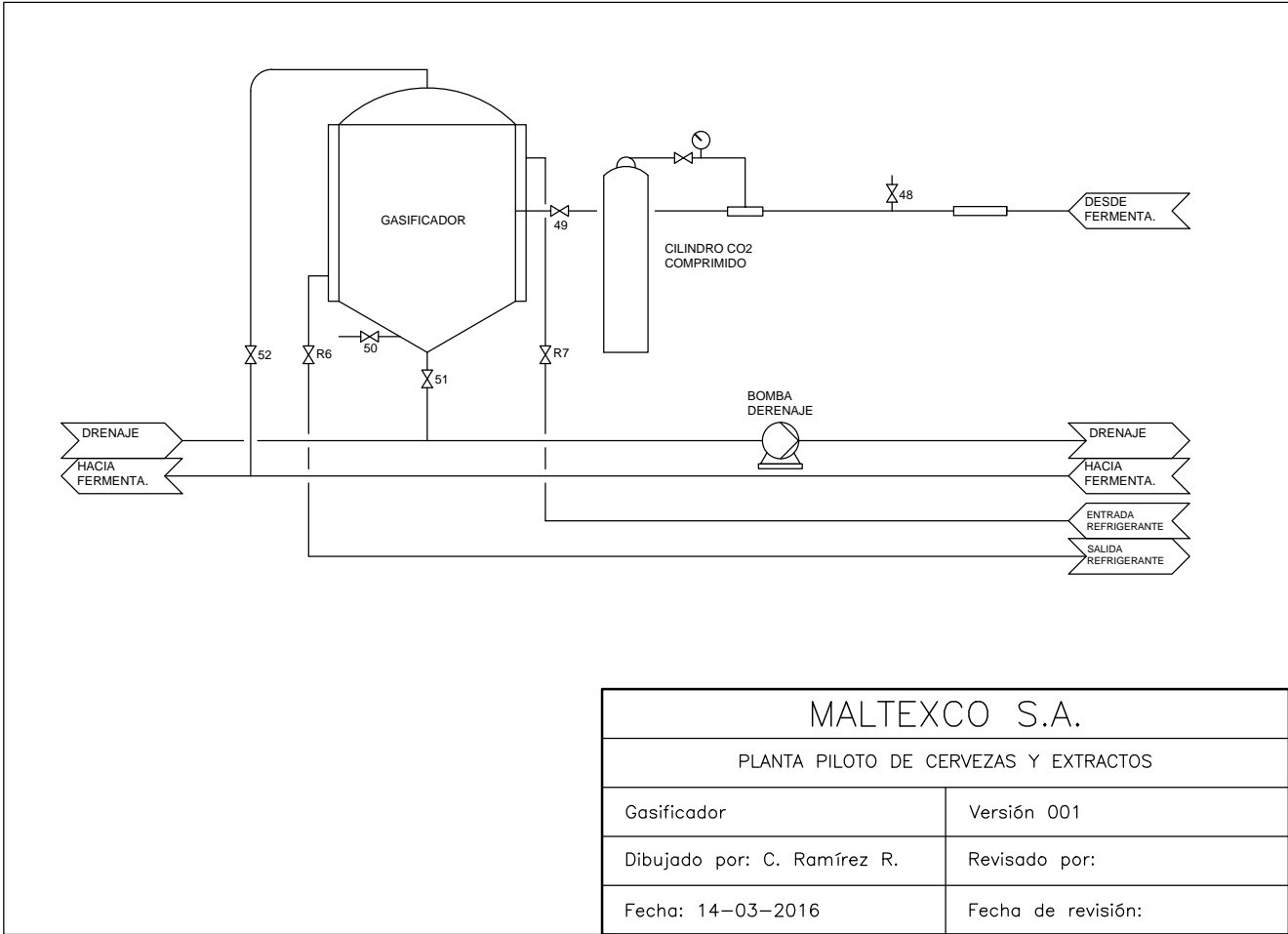
Fecha de revisión:



# MALTEXCO S.A.

## PLANTA PILOTO DE CERVEZAS Y EXTRACTOS

Fermentadores	Versión 001
Dibujado por: C. Ramírez R.	Revisado por:
Fecha: 14-03-2016	Fecha de revisión:



MALTEXCO S.A.

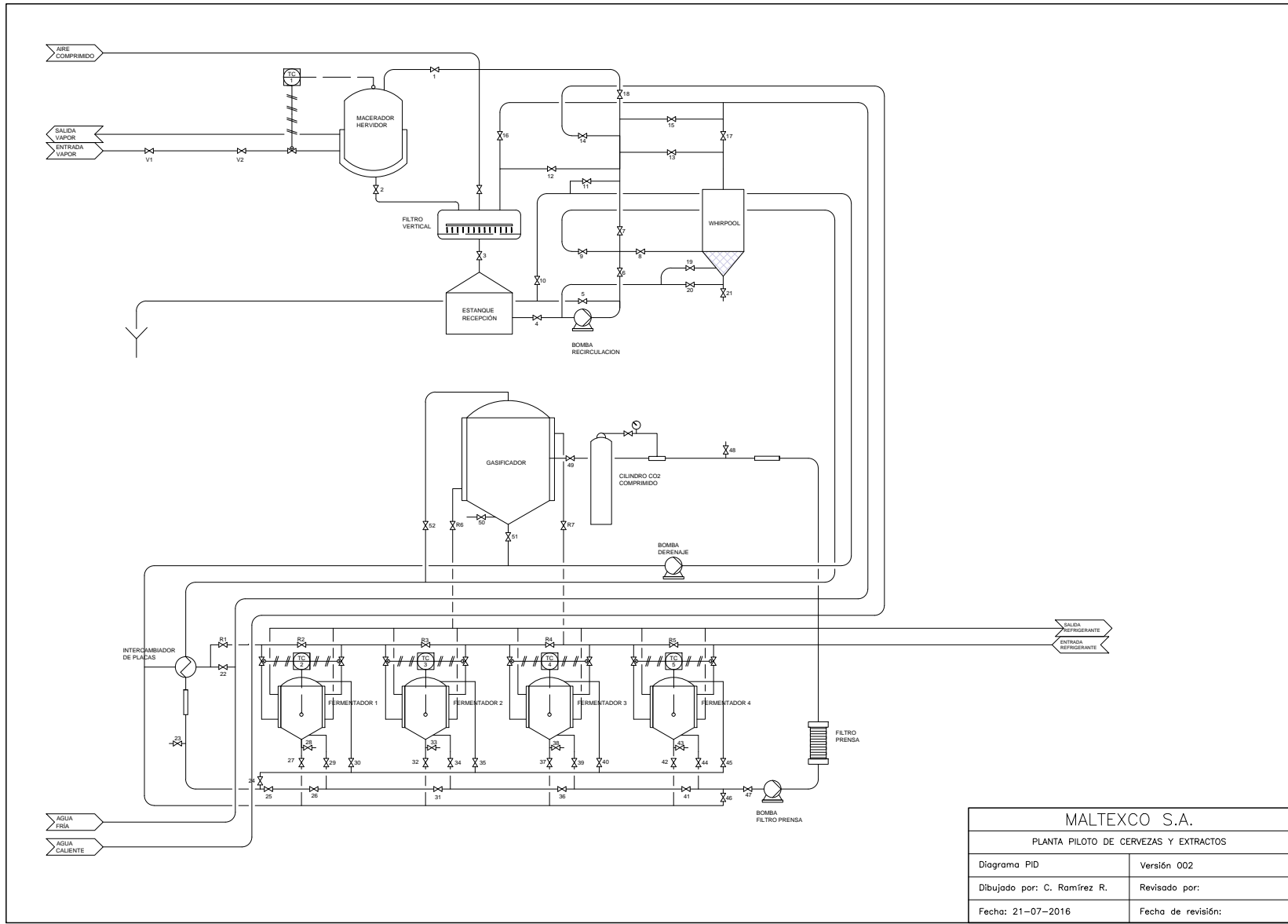
PLANTA PILOTO DE CERVEZAS Y EXTRACTOS

Gasificador	Versión 001
Dibujado por: C. Ramírez R.	Revisado por:
Fecha: 14-03-2016	Fecha de revisión:

## Anexo J

# Diagrama de Tuberías e Instrumentación de la planta piloto

En la página siguiente se adjunta el diagrama de tuberías e instrumentación de la planta piloto de Maltexco elaborado durante el trabajo de título. Si bien el P&ID se encuentra en formato A2, la versión que se adjunta en este informe se encuentra ajustada a tamaño carta.



<b>MALTEXCO S.A.</b>	
PLANTA PILOTO DE CERVEZAS Y EXTRACTOS	
Diagrama PID	Versión 002
Dibujado por: C. Ramírez R.	Revisado por:
Fecha: 21-07-2016	Fecha de revisión: