



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y**  
**BIOTECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA**



---

Diseño del proceso de producción de cerveza con cannabidiol a escala piloto

---

Informe Final de Integración Curricular, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Biotecnólogo, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología

**AUTORES:** Joao Xavier Corrales Freire

Joseph Andrés López Benavides

**TUTOR:** Ing. Daniel Alfonso Cabrera Valle, MSc.

**Ambato - Ecuador**

**Marzo - 2023**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Ing. Daniel Alfonso Cabrera Valle, MSc.

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final de Integración Curricular ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autoriza la presentación de este Informe Final de Integración Curricular, Modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 13 de febrero del 2023.

---

Ing. Daniel Alfonso Cabrera Valle, MSc.

C.I. 180256159-5

**TUTOR**

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Joao Xavier Corrales Freire y Joseph Andrés López Benavides, manifestamos que los resultados obtenidos en el presente Informe Final de Integración Curricular, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingenieros Biotecnólogos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



---

Joao Xavier Corrales Freire

C.I. 0504070608

**AUTOR**



---

Joseph Andrés López Benavides

C.I. 1804716726

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO**

Los suscritos docentes calificadores, aprueban el presente Informe Final de Integración Curricular, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para la constancia firman:

---

Presidente del Tribunal

---

Mg. Juan de Dios Espinoza Moya

C.I.: 1803201431

---

Mg. Julio Cesar Sosa Cárdenas

C.I.:1716650849

Ambato, 03 de Marzo del 2023

## DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final de Integración Curricular o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los derechos en línea patrimoniales de nuestro Informe Final de Integración Curricular, con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.



---

Joao Xavier Corrales Freire

C.I. 0504070608

**AUTOR**



---

Joseph Andrés López Benavides

C.I. 1804716726

**AUTOR**

## **DEDICATORIA**

A mi familia y a mis padres por su apoyo constante e incondicional, gracias a sus enseñanzas y paciencia que han inculcado para mi formación.

Joao Xavier Corrales Freire

A mis padres, por el apoyo incondicional durante toda mi vida, por ser una pieza clave en mi educación y por todas las enseñanzas que me han permitido culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Joseph Andrés López Benavides

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme alcanzar mis objetivos y bendecir mi camino, a mi familia por el apoyo, paciencia y ayuda en todo lo necesario. A mis amigos, por su ayuda, compañía y amistad.

A mi tutor, Ing. Daniel Cabrera, por guiarme y dedicar su tiempo para la culminación de este proyecto.

A la Universidad Técnica de Ambato que, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, y al proyecto de canje de deuda España, hicieron posible la realización de este trabajo.

A todos mis docentes, por brindarme los conocimientos necesarios para formarme como profesional.

Joao Xavier Corrales Freire

A mi familia por sus consejos y enseñanzas que me han permitido salir adelante. A mis amigos, por el apoyo brindado durante todo este proceso.

A mi tutor, Ing. Daniel Cabrera, por guiarme y dedicar su tiempo para la culminación de este proyecto.

A la Universidad Técnica de Ambato que, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, y al proyecto de canje de deuda España, hicieron posible la realización de este trabajo.

A todos mis docentes, por brindarme los conocimientos necesarios para formarme como profesional.

Joseph Andrés López Benavides

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO .....	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Antecedentes históricos de la cerveza.....	1
1.2. Materia prima.....	1
1.2.1. Malta.....	1
1.2.2. Lúpulo.....	2
1.2.3. Levadura .....	2
1.2.4. Agua.....	3
1.2.5. Cannabidiol.....	3
1.3. Brewing.....	4
1.3.1. Molienda.....	4
1.3.2. Maceración.....	4
1.3.3. Cocción.....	5
1.3.4. Fermentación .....	5
1.3.5. Maduración .....	6
1.4. Criterios de diseño.....	6
1.4.1. Balances de materia y energía .....	6
1.4.2. Diseño de biorreactores .....	8



1.4.3.	Operaciones unitarias.....	8
1.4.4.	Escalado del proceso.....	9
1.5.	Diagramas del proceso .....	11
1.5.1.	Diagrama BFD.....	11
1.5.2.	Diagrama PFD .....	12
1.6.	Objetivos .....	13
1.6.1.	Objetivos General .....	13
1.6.2.	Objetivos Específicos .....	13
CAPÍTULO II.- MATERIALES Y MÉTODOS .....		14
2.1.	Materiales.....	14
2.1.1.	Equipos de laboratorio.....	14
2.1.2.	Instrumentos de laboratorio.....	14
2.1.3.	Reactivos de laboratorio .....	15
2.1.4.	Materia prima .....	15
2.1.5.	Adjuntos .....	15
2.1.6.	Insumos de laboratorio .....	16
2.1.7.	Materiales de escritorio .....	16
2.2.	Métodos.....	16
2.2.1.	Producción de un lote de 5 litros de cerveza.....	16
2.2.1.1.	Molienda.....	17
2.2.1.2.	Maceración .....	17
2.2.1.3.	Filtración.....	17
2.2.1.4.	Cocción.....	18
2.2.1.5.	Enfriamiento .....	18
2.2.1.6.	Fermentación .....	18
2.2.1.7.	Adición del aceite de CBD .....	18
2.2.1.8.	Maduración.....	19

2.2.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica a la cerveza.....	19
2.2.3. Cálculo de los balances de materia y energía para la producción de 50 litros de cerveza artesanal .....	21
2.2.4. Elaboración de los diagramas BFD y PFD del proceso a escala piloto .....	26
2.2.4.1. Diagrama BFD.....	27
2.2.4.2. Diagrama PFD .....	27
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
3.1. Análisis y discusión de los resultados .....	28
3.1.1. Condiciones de operación de un biorreactor a escala de laboratorio.....	28
3.1.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la cerveza .....	30
3.1.2.1. Caracterización fisicoquímica.....	30
3.1.2.2. Caracterización microbiológica .....	32
3.1.2.3. Caracterización del contenido de cannabidiol .....	33
3.1.3. Balances de materia y energía para la producción de 50 litros de cerveza ..	34
3.1.3.1. Producción del lote de cerveza a escala de laboratorio .....	34
3.1.3.2. Escalado de las corrientes de proceso .....	36
3.1.3.3. Balances de materia y energía del proceso a escala piloto .....	36
3.1.3.4. Diseño de un fermentador a escala piloto.....	37
3.1.4. Diagrama BFD y PFD del proceso a escala piloto.....	41
3.1.4.1. Diagrama de Gantt.....	41
3.1.4.2. Diagrama BFD.....	41
3.1.4.3. Diagrama PFD .....	44
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
4.1. Conclusiones.....	48
4.2 Recomendaciones .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXOS.....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipos de Laboratorio .....	14
Tabla 2. Instrumentos de laboratorio .....	14
Tabla 3. Reactivos de laboratorio.....	15
Tabla 4. Materia prima.....	15
Tabla 5. Adjuntos del proceso de producción de cerveza.....	15
Tabla 6. Insumos de laboratorio.....	16
Tabla 7. Materiales de escritorio .....	16
Tabla 8. Materias primas utilizadas en la producción del lote de 5 L.....	17
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos analizados en la cerveza .....	19
Tabla 10. Parámetros microbiológicos analizados en la cerveza.....	20
Tabla 11. Parámetros analizados para el contenido de CBD .....	20
Tabla 12. Especificaciones y Parámetros de operación analizados del Biorreactor Winpact EVO (FS-02 Series).....	28
Tabla 13. Condiciones de operación del Winpact chiller WCC-101 .....	29
Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos caracterizados .....	30
Tabla 15. Parámetros microbiológicos caracterizados.....	32
Tabla 16. Caracterización del contenido de CBD en la cerveza .....	33
Tabla 17. Datos obtenidos del proceso de producción de 5 L de cerveza .....	34
Tabla 18. Propiedades fisicoquímicas obtenidas .....	34
Tabla 19. Productos generados en la fermentación de 5 L de cerveza .....	36
Tabla 20. Productos generados en la fermentación de 50 L de cerveza .....	36
Tabla 21. Dimensiones del fermentador y sus componentes .....	37
Tabla 22. Resúmenes corrientes del proceso .....	46
Tabla 23. Resúmenes corrientes del proceso (continuación).....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del CBD en su forma ácida y descarboxilada.....	4
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cerveza.....	12
Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cerveza.....	40
Figura 4. Diagrama de Gantt del proceso de producción de cerveza.....	42
Figura 5. Diagrama BFD del proceso de producción de cerveza.....	43
Figura 6. Diagrama PFD del proceso de producción de cerveza.....	45
Figura 7. Diagrama BFD del proceso de producción de cerveza escala laboratorio .	64
Figura 8. Certificado de análisis de laboratorio propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.....	65
Figura 9. Diagrama PFD del proceso a escala de laboratorio.....	66
Figura 10. Producto terminado cerveza 330ml.....	80
Figura 11. Control de temperatura del agua.....	80
Figura 12. Prueba de la mezcla del emulsificante y aceite de CBD.....	81
Figura 13. Maceracion de la malta.....	81
Figura 14. Activación de la levadura.....	82
Figura 15. Fermentación en el biorreactor.....	82

## RESUMEN

La cerveza, al ser uno de los productos biotecnológicos más antiguos de la humanidad, posee cierto trasfondo que constituye un producto de interés desde el punto de vista tecnológico e industrial. El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar un proceso para la producción de cerveza con cannabidiol a escala piloto, para ello, se elaboró un lote de 5 litros a escala de laboratorio. Se recopilaron datos que, mediante balances de materia y energía, permitieron escalar el proceso y diseñar el diagrama de bloques y de flujo de proceso (BFD y PFD), además del diseño conceptual de un fermentador de 50 litros de capacidad. Las condiciones de operación del biorreactor determinaron el pH óptimo con un rango de entre 5 a 6 y una temperatura constante de 20 grados Celsius para lograr una fermentación alta sin agitación ni oxígeno disuelto. Además, la caracterización fisicoquímica y microbiológica mostró valores normales según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y la Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales (AOAC) para la elaboración de cerveza, con excepción de la acidez total y la presencia de mesófilos aerobios. Por otro lado, se calculó el factor de escalado mediante los balances de materia y energía con un valor de 10.35 para escalar todas las corrientes del proceso a escala piloto. Adicionalmente, se diseñó un serpentín helicoidal y un agitador de turbina de placas planas según los criterios de semejanza para el fermentador. Finalmente, se presentó el proceso en diagramas BFD y PFD.

**PALABRAS CLAVE:** Productos biotecnológicos, cerveza, cannabidiol, bebidas alcohólicas, fermentación, diagrama BFD, diagrama PFD.

## ABSTRACT

Beer, being one of humanity's oldest biotechnological products, has a certain background that constitutes a product of interest from a technological and industrial point of view. The objective of this work was to design a process for the production of beer with cannabidiol on a pilot scale, for which a 5-liter batch was prepared on a laboratory scale. Data was collected that, through material and energy balances, allowed scaling the process and designing the block diagram and process flow (BFD and PFD), in addition to the conceptual design of a 50-liter capacity fermenter. The operating conditions of the bioreactor determined the optimum pH with a range between 5 to 6 and a constant temperature of 20 degrees Celsius to achieve high fermentation without agitation or dissolved oxygen. In addition, the physicochemical and microbiological characterization showed normal values according to the Ecuadorian Institute for Standardization (INEN) and the Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) for brewing, with the exception of total acidity and the presence of aerobic mesophiles. On the other hand, the scaling factor was calculated through the material and energy balances with a value of 10.35 to scale all the process streams to a pilot scale. Additionally, a helical coil and a flat plate turbine agitator were designed according to the similarity criteria for the fermenter. Finally, the process was presented in BFD and PFD diagrams.

**KEYWORDS:** Biotechnology products, beer, cannabidiol, alcoholic beverages, fermentation, BFD diagram, PFD diagram.

## CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes históricos de la cerveza

La cerveza representa uno de los logros tecnológicos más relevantes en la historia de la humanidad. Algunos autores remontan su aparición en la llamada “Revolución Neolítica” (12.000 AC), periodo donde la humanidad evidenció un cambio radical en su estilo de vida centrándose en la agricultura y ganadería **(DeSalle & Tattersall, 2019)**. Sin embargo, diversas fuentes atribuyen su desarrollo como resultado de una influencia cultural por parte de los Sumerios hace aproximadamente 4.700 años. Desde el surgimiento de la agricultura, se presume que la cerveza fue el resultado del procesamiento de los granos posteriores a la cosecha, siendo muy posible que se convirtiera en un proceso muy común para la conservación y consumo **(Cabras & Higgins, 2016)**.

Su descubrimiento resultó por casualidad al mezclar granos con agua y al remojar el pan en el brebaje. Las levaduras contenidas en el pan se encargaban de fermentar la mezcla teniendo como resultado una muy primigenia bebida alcohólica **(Steward et al., 2018)**. La evidencia más antigua encontrada es una tablilla sumeria en donde se observan a varias personas reunidas tomando cerveza (4.000 AC), además de su formulación **(Mosher & Trantham, 2021)**. De igual forma, en el antiguo Egipto, la cerveza era producida y comercializada junto con el pan siendo exportada al resto de territorios mediante las rutas del mediterráneo sur. Al llegar a territorios germánicos la adición de lúpulos supuso una gran innovación que modificó la forma de hacer cerveza, la cual prevalece hasta nuestros días **(DeSalle & Tattersall, 2019)**.

### 1.2. Materia prima

#### 1.2.1. Malta

Es uno de los constituyentes principales en el proceso de elaboración de cerveza partiendo en su mayoría de los granos de cebada. Son los granos de cereal resultantes del proceso de malteado que contienen los carbohidratos necesarios con un 12-13% de proteína baja en grasa **(Hornsey, 2003)**. El endospermo del grano es la estructura de

interés, debido a que aquí se encuentran todos los nutrientes necesarios que se extraerán para servir de sustrato en el proceso de fermentación a cargo de las levaduras. Existen diversas variedades de maltas empleadas en el proceso de elaboración para otorgar a la cerveza propiedades organolépticas propias de cada estilo **(Kok et al., 2019)**.

### **1.2.2. Lúpulo**

El lúpulo (*Humulus lupulus*) es una planta herbácea perenne perteneciente a la familia *Cannabaceae*, muy relacionada con el cáñamo. Es el responsable de brindar equilibrio, intensidad y madurez a la cerveza, siendo la flor que produce la planta hembra la más utilizada en el proceso de elaboración **(Iglesias et al., 2020)**. Además, funciona como antimicrobiano y, dependiendo de su concentración y tipo, proporciona a la cerveza de toques de amargor característicos de cada clase **(DiSorbo, 2022)**. Los lúpulos agregados en fases tempranas son los responsables de brindar un sabor amargo, los ácidos alfa (humulonas) se isomerizan en el mosto caliente. Un lúpulo con un alto contenido de ácido alfa está destinado a ser un lúpulo amargo **(Farber & Barth, 2019)**.

### **1.2.3. Levadura**

Las levaduras juegan un papel predominante en la producción de bebidas alcohólicas por su papel determinante en la fermentación. Además, la selección de la variedad apropiada resulta esencial para maximizar los rendimientos del producto a causa de su variado genoma **(Saada et al., 2022)**. La especie predominante para la producción de bebidas alcohólicas es *Saccharomyces cerevisiae* y, dentro de la elaboración de cerveza, las cepas particulares de esta especie empleadas en el proceso de fermentación son las responsables de otorgarle un sabor y aroma característico **(Ogu et al., 2022)**. En procesos a gran escala se utilizan cultivos puros de cepas seleccionadas de *S. cerevisiae*, mientras que, en procesos de menor escala ocurren fermentaciones espontáneas a cargo de la microbiota nativa (levaduras y bacterias) presentes en los insumos y materia prima **(Walker & Stewart, 2016)**.



#### 1.2.4. Agua

El agua es el componente principal de la cerveza estando presente desde el principio hasta el fin del proceso de elaboración. Representa más del 90% de su composición y debe cumplir con ciertos parámetros como las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable (**Habschied et al., 2022**). Para elaborar cerveza el agua debe estar limpia, es decir, libre de gérmenes y sustancias nocivas. Además, el contenido de calcio y su alcalinidad también están relacionados para su uso en una cervecería. En el pasado, la calidad del agua determinaba el estilo de cerveza, por ende, para producir un cierto tipo de cerveza se necesitaba de la calidad de agua correspondiente (**Bamforth, 2016**).

#### 1.2.5. Cannabidiol

El cannabidiol (CBD) es uno de los componentes más importantes de la planta de cáñamo presente en diferentes cantidades en función de la variedad de la planta utilizada. *Cannabis sativa* es una planta herbácea de floración anual de la familia *Cannabaceae* que, al igual que el lúpulo, es una especie dioica con flores masculinas y femeninas en plantas separadas (**Peng et al., 2022**). Debido a su relevancia biomédica por sus propiedades psicoactivas, se ha centrado su estudio en sus principales cannabinoides (compuestos terpenofenólicos C<sub>21</sub>). El CBD es un componente vegetal terpenofenólico de 21 carbonos no psicotrópico del cannabis (**Moreno et al., 2020**). Generalmente es utilizado por sus propiedades ansiolíticas, antidepresivas, antipsicóticas, anticonvulsivas y antiinflamatorias. El CBD muestra una menor afinidad por los receptores CB<sub>1</sub> y CB<sub>2</sub> con respecto al  $\Delta^9$ -THC (**Ramírez & Viveros, 2021**).

## Figura 1

*Estructura química del CBD en su forma ácida y descarboxilada.*



*Nota.* La flecha naranja indica la pérdida del grupo funcional carboxilo (-COOH). Adaptado de “Cannabidiol Decarboxylation: A Comparative Kinetic Study” (p. B), por Moreno et al., 2020, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(46).

### 1.3. Brewing

#### 1.3.1. Molienda

Para poder utilizar la malta se debe triturar la cáscara del grano para exponer el almidón y las enzimas resultantes del proceso de germinación. Para lograr el aplastamiento deseado se debe ajustar el equipo necesario en función del tamaño de partícula que se desee obtener (**Shopska et al., 2022**). Cuanto más pequeñas son las partículas más rápido se someten al proceso de maceración, sin embargo, se someten más lentamente al rociado. El equipo utilizado para triturar la malta usualmente está compuesto por un conjunto de placas o rodillos que se ajustan para lograr el tamaño de malta triturada deseada. Se introduce la malta en el espacio entre las placas o rodillos y se acciona el equipo (**Albanese et al., 2017**).

#### 1.3.2. Maceración

La maceración es el proceso por el cual la cerveza se diferencia del vino. En esta etapa la malta triturada y el agua caliente se agregan en el macerador hasta lograr una consistencia similar a la avena líquida a temperatura de gelatinización (60-70°C). Este paso hace que el almidón contenido en el endospermo se libere en la mezcla, estando disponible para su conversión en azúcares fermentables (**Koller & Perkins, 2022**). El

objetivo de la maceración es convertir el almidón en moléculas más pequeñas que puedan ser digeridas por las levaduras, es decir, la sacarificación. El proceso de maceración puede involucrar variaciones en la temperatura y tiempo dependiendo del estilo cervecero al que se desee llegar **(Kok et al., 2019)**.

### **1.3.3. Cocción**

Para este punto se debe filtrar la solución resultante de la maceración, esta solución se denomina “mosto”. El mosto filtrado se trasvasa a la olla de cocción y se lleva a ebullición por un tiempo determinado en función del estilo de cerveza deseado (30 a 90 min) **(Villacreces et al., 2022)**. De la misma forma, en esta etapa del proceso se agregan los lúpulos característicos que otorgan propiedades organolépticas típicas. Otra función del proceso de cocción es aumentar el contenido relativo de azúcares al eliminar parcialmente el agua contenida en el mosto, dando un mayor contenido de alcohol. Otro efecto que se produce es el pardeamiento adicional resultante de las reacciones de Maillard **(Allen, 2018)**.

### **1.3.4. Fermentación**

En esta etapa el mosto clarificado se debe enfriar y trasvasar al fermentador para que, mediante la oxigenación y la inoculación de la levadura, comience la fermentación. La fermentación es el proceso mediante el cual las levaduras convierten los azúcares contenidos en el mosto en etanol y dióxido de carbono **(Godbey, 2022)**. Existen diversas cepas de levaduras que se emplean según el metabolismo de cada cepa, la composición del mosto y las temperaturas utilizadas por el cervecero en cada cepa de levadura le dará a la cerveza un sabor distinto **(DiSorbo, 2022)**. Las temperaturas de fermentación también pueden influir en el perfil de sabor final de la cerveza (lager 5-10°C; ale 17-25°C). Para cervezas de tipo ale la fermentación puede durar de 2 a 14 días, mientras que, para cervezas de tipo lager puede tomar varios meses. Durante la fermentación, la levadura remanente se precipita al fondo y se elimina por floculación **(Mosher & Trantham, 2021)**.

### **1.3.5. Maduración**

La mayoría de la cerveza está sujeta a un procesamiento posterior a la fermentación para producir un producto envasado que sea estable, tanto desde el punto de vista microbiológico como físico y de sabor. Este proceso tiene lugar en recipientes cerrados y tradicionalmente consiste en una fermentación secundaria debido a las pequeñas cantidades de levadura remanentes donde se produce el resto de los alcoholes superiores **(Georgieva et al., 2021)**. Esta levadura puede utilizar como fuente de carbono los carbohidratos fermentables que quedan después de la primera fermentación o pequeñas cantidades de carbohidratos fermentables añadidos en forma de "azúcar de cebado" **(Guido, 2019)**.

## **1.4. Criterios de diseño**

### **1.4.1. Balances de materia y energía**

Dentro de la ingeniería de procesos los balances de materia y energía son utilizados para determinar las diferentes condiciones y características de trabajo de un proceso concreto. En el análisis de un proceso se pueden observar múltiples factores que se relacionan durante el desarrollo de una operación como la ley de conservación de la materia y de la energía, el flujo de materia y energía que ingresa y sale del sistema **(Durdán et al., 2020)**. Las transformaciones a lo largo del proceso son definidas por una clasificación ya determinada de acuerdo a como se desarrolla el proceso, el comportamiento del flujo y también los cambios que se manifiestan mediante las variables analizadas o en los puntos determinados **(Shaeiwitz & Turton, 2017)**.

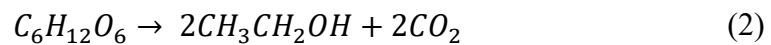
#### **1.4.1.1. Balances de Materia**

En los balances de materia se determinan los diferentes aspectos relacionados con la ley de conservación de la masa que actúa dentro de un sistema y proceso, se relaciona información necesaria para cuantificar y analizar los diferentes aspectos que conllevan un proceso **(Doran, 2012)**. El estudio de un proceso es necesario para una mejor comprensión de los requerimientos que son determinados por las materias primas requeridas, el producto obtenido y el flujo masico total en la corriente **(Fito et al.,**

2020). Es necesario establecer la ecuación general que se utilizan para describir el sistema en cuestión:

$$[Entrada - Salida] = [Acumulación] \quad (1)$$

Por ejemplo, en el proceso del malteado puede efectuarse una determinación de entrada y salida de materia transformada al desarrollarse el proceso, que luego de la combinación de varios procesos individuales confluyen en una operación unitaria. También, durante la etapa de fermentación se libera una cierta cantidad de energía, debido a que corresponde a una reacción exotérmica donde la fermentación etílica es producida por medio de la glicolisis.



#### 1.4.1.2. Balances de Energía

En los balances de energía se determinan los diferentes análisis de acuerdo con las propiedades que manifiestan a las formas de energía, debido a que existen varias maneras de expresar la energía como el calor, trabajo, energía cinética, etc. La ley de conservación de la energía es fundamental para conocer que la energía puede cambiar de un tipo a otro, siempre conservándose en un proceso para determinar aspectos necesarios como transferencia de calor en distintos sistemas energéticos que sean de interés (Fito et al., 2020).

#### 1.4.1.3. Clasificación

Los distintos estados se resumen a: estado estacionario, donde las variables en cuestión no cambian a través del tiempo y; estados transitorios, son aquellos en donde las variables si cambian a través del tiempo. Esta clasificación se determina por medio de ecuaciones y en el proceso de la cerveza se deben tomar en cuenta ciertas variables como el flujo masico que es un flujo de cantidad de masa con respecto a una unidad de tiempo (Himmelblau & Riggs, 2022).

### 1.4.2. Diseño de biorreactores

El diseño de un biorreactor es una herramienta encaminada a alcanzar una demanda específica de propiedades favorables para el desarrollo de condiciones biológicas requeridas por un proceso de interés. Es imperativo que se conozca el proceso que se va a llevar a cabo con el fin de abordar toda perspectiva para el desarrollo de operaciones necesarias en el biorreactor **(Kanwar et al., 2022)**. En los procesos biotecnológicos, las interacciones entre los fenómenos de transporte y la cinética microbiana en un biorreactor se hacen cada vez más complejas.

Por ende, dentro del proceso de fermentación de la cerveza se debe abordar un sistema específico que tiene que ver con las condiciones necesarias para el desarrollo del bioproceso mediante el monitoreo, control y optimización en el rendimiento para la obtención de resultados óptimos **(Kanwar et al., 2022)**. Para la realización de este proceso se utilizan metodologías basadas en modelos matemáticos junto con principios de semejanza y análisis dimensional. Los principios de semejanza funcionan en sistemas homólogos, es decir, aquellos que se diferencian en cuanto al tamaño y a la escala. Estos principios se fundamentan en las relaciones entre sistemas físicos de diferentes tamaños y, por ende, son indispensables para ampliar o disminuir la escala de estos **(Mandenius, 2016)**.

### 1.4.3. Operaciones unitarias

Una operación unitaria se define como la unidad básica de un proceso que implica un cambio físico o una transformación química. Los cambios físicos sirven como preámbulos antes de someter las materias primas a varios procesos, con el fin de obtener productos terminados **(Kumar, 2023)**. En los procesos industriales las operaciones pueden darse de manera continua y discontinua, siendo esta última en donde se carga la materia prima en la unidad de proceso y, después de realizarse la transformación, se descargan. Los procesos continuos son aquellos en donde las operaciones de carga, transformación y descarga se realizan de manera simultánea **(Block & Miller, 2021)**. Los procesos pueden esquematizarse en diagramas de flujo, que indican las diferentes etapas y se representan de forma secuencial con figuras

geométricas determinadas. Las operaciones unitarias se pueden clasificar de acuerdo con la transformación física, química o bioquímica (**Ibarz & Barbosa, 2005**).

- a) Transformaciones físicas: Malteado, molienda, tamizado, cocción, sedimentación, absorción, intercambio de calor, evaporación, etc.
- b) Transformaciones químicas: Refinado, pelado químico, isomerización, etc.
- c) Transformaciones bioquímicas: Fermentación, esterilización, pasteurización, etc.

En otras palabras, todas las etapas físicas, químicas y bioquímicas se dan en los procesos de transformación en la industria biotecnológica constituyendo las operaciones unitarias que la conforman.

#### **1.4.4. Escalado del proceso**

Al momento de diseñar una planta el escalado de los procesos resulta imperativo para su correcto funcionamiento. Los resultados únicamente se conocen a escala de laboratorio, entonces, se deben escalar los procesos para maximizar los rendimientos y tener una producción rentable (**Gill et al., 2008**). Generalmente, el escalado de los procesos se ha realizado tomando como punto de partida el análisis dimensional, los criterios de semejanza geométrica y el análisis de datos empíricos. El modelado de un proceso debe proporcionar la mayor cantidad de información para que el escalado resulte confiable, resaltando la validación del modelo a diferentes escalas y regímenes de operación (**Ruiz & Álvarez, 2011**).

##### **1.4.4.1. Principios de semejanza**

El principio de semejanza está ligado al concepto de forma en sistemas complejos y no solamente incluye la definición de forma, sino también parámetros como flujos, perfiles de concentración, temperaturas, etc. A su vez, cuando se comparan cuerpos geoméricamente semejantes se obtienen relaciones semejantes entre sus dimensiones, lo que se denomina “factor de escala” (**Doran, 2012**). Por otro lado, cuando se realizan

comparaciones entre variables diferentes como velocidades, fuerza o temperatura, se recurren a relaciones intrínsecas de cada sistema, lo que constituyen los “números adimensionales” (McCabe et al., 2007). Se consideran cuatro tipos de semejanza en aplicaciones de ingeniería:

#### **1.4.4.1.1. Semejanza geométrica**

Este principio se maneja en términos de correspondencia y, por lo tanto, el factor de escala. Se refiere a las relaciones entre las distintas dimensiones lineales de un sistema con las de otro. Entonces, dos cuerpos son geoméricamente semejantes cuando para cada punto del cuerpo de partida existe al menos un punto semejante en el cuerpo de llegada (Páez, 2011).

#### **1.4.4.1.2. Semejanza mecánica**

Bajo la influencia de fuerzas, este principio puede ser considerado como una extensión del concepto de semejanza geométrica en sistemas estacionarios o en movimiento. Dependiendo del tipo de fuerza, la semejanza mecánica puede ser estática (deformaciones proporcionales), cinemática (tiempos proporcionales) o dinámica (fuerzas proporcionales) (Harmsen, 2019).

#### **1.4.4.1.3. Semejanza térmica**

Este concepto relaciona sistemas en donde existe un flujo de calor (temperaturas), además de parámetros como longitud, masa y tiempo. Es decir, dos sistemas geoméricamente semejantes son térmicamente semejantes cuando sus diferenciales de temperatura permanecen constantes y cuando los sistemas en movimiento son cinemáticamente semejantes (Páez, 2011).

#### **1.4.4.1.4. Semejanza química**

La semejanza química está presente en sistemas en donde existen reacciones químicas en donde la composición varía de un punto a otro, no siendo necesaria una igual composición química en ambos sistemas. Entonces, dos sistemas geométrica y



térmicamente semejantes serán químicamente semejantes siempre y cuando los diferenciales de concentraciones correspondientes mantienen una relación constante **(González, 2000)**.

## **1.5. Diagramas del proceso**

Dentro de la ingeniería de bioprocesos es importante conocer las necesidades que tiene la industria, en base a la solución de problemas que se llevan a cabo en la diversificación de los procesos que se manejan a través del uso de diagramas de flujo **(Turton et al., 2018)**. Debido a que es crítico poder controlar y entender los diversos escenarios que se presenten como potenciales consecuencias por una falta u omisión en la comunicación de la información acerca del proceso, se formulan diagramas de flujo apropiados para analizar e interpretar los procesos que se manejan.

Los diagramas de procesos generalmente para un proceso como la producción de cerveza están estandarizados. Sin embargo, se inicia desde una escala de laboratorio y paulatinamente por medio de construcción, diseños y mejoras se concretará una operación a nivel de industria. Por ello, existen formatos de diagramas que se pueden utilizar para describir y representar múltiples diseños de los procesos que se abordan y son comprensibles en una escala de proceso variado **(Doran, 2012)**.

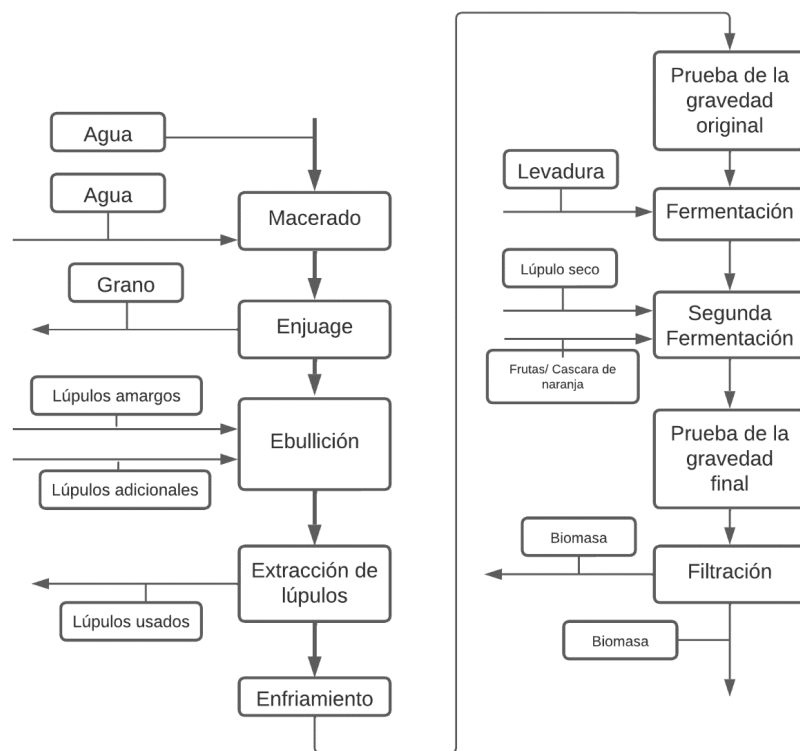
### **1.5.1. Diagrama BFD**

El diagrama BFD corresponde a la representación más utilizada y simple en los diagramas de flujo para la comprensión de un problema. Consiste en una conexión de flujos de entradas y salidas que están complementadas con información necesaria para las operaciones que se llevan a cabo **(Amantayeva et al., 2021)**. Aunque no contiene detalles como equipos que son vistos en otros tipos de diagramas, debido a que no es muy frecuente que valores del proceso sean representados, pero se pueden usar números para representar ciertos flujos.

En un diagrama correspondiente a la producción de cerveza los procesos están concatenados por bloques similares, de acuerdo con el diseño la información extra puede ser detallada en una tabla aparte con los números de flujos ordenados en la corriente y la cantidad adecuada (Ashrafizadeh & Tan, 2018).

**Figura 2**

*Diagrama de bloques del proceso de elaboración de cerveza.*



**Nota:** El diagrama de flujo de bloques indica el proceso de los diferentes pasos que conlleva la elaboración de cerveza. Adaptado de “Fruits in Craft Beer: A study to Evaluate the impact of Fruits on the pH in the Brewing Process and the Breweries Waste water”, por Ritter et al., 2016, p. 5. *ResearchGate*.

### 1.5.2. Diagrama PFD

El diagrama PFD corresponde a la representación más amplia de un diagrama de flujo con información requerida acerca de los procesos. Es necesario para todo proceso desarrollar un diagrama PFD porque los datos que componen su diseño son

representativos (Turton et al., 2018). Las partes de cada equipo que lo componen son diferenciadas por una descripción y las corrientes por números, describiendo las condiciones y composiciones; también se puede mostrar la función de los equipos principales.

En el diagrama PFD para la producción de cerveza es posible conocer y diferenciar los flujos de cada proceso, además de ser más interactivo con la visualización del equipo a utilizar. Es posible comprender la operación que se realiza y con la información adicional de una tabla resumen la información del proceso se puede discernir con más facilidad (Ashrafizadeh & Tan, 2018).

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivos General**

Diseñar un proceso para la producción de cerveza potenciada con CBD a escala piloto.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las condiciones de operación de un biorreactor para la producción de un lote de cerveza a escala de laboratorio.
- Realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica a la cerveza.
- Calcular los balances de materia y energía para la producción de 50 litros de cerveza artesanal.
- Desarrollar los diagramas BFD y PFD correspondientes al proceso de producción a escala piloto.

## CAPÍTULO II.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Equipos de laboratorio

**Tabla 1**

*Equipos de Laboratorio.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Molino manual	1
Biorreactor Winpact EVO (FS-07 Series)	1
Multímetro Digital Modelo DT858L	1
Balanza Geniweigher HGM-20K	1
Autoclave Hirayma/HV-110	1
Plancha de Calentamiento magnética IKA C-MAG HS 7	1
Cocina Industrial	1
Balanza de humedad Citizen Scale	1

#### 2.1.2. Instrumentos de laboratorio

**Tabla 2**

*Instrumentos de laboratorio.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Vasos de precipitación de 10, 80 y 100 mL	5 unidades
Varillas de agitación	3
Probetas de 250 mL	2
Pipetas Pasteur de 3 mL	2
Tijeras	1
Botella de reactivo de vidrio	1
Matraces Erlenmeyer de 200 mL	2
Balones de aforo de 200 mL	2
Lámparas de alcohol	2

### 2.1.3. Reactivos de laboratorio

**Tabla 3**

*Reactivos de laboratorio.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Alcohol 96%	1 L
Sulfato cúprico	50 g
polisorbato 20	60 g
Ácido Peracético 4%	1 L

### 2.1.4. Materia prima

**Tabla 4**

*Materia prima.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Malta Pale Ale	2500
Malta Cara Munich II	80
Malta Viking Munich Light	100
Lúpulo cascade	35
Levadura American West Coast Ale Bry-97	5

### 2.1.5. Adjuntos

**Tabla 5**

*Adjuntos del proceso de producción de cerveza.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Aceite de Cannabis CME (Cannabis Medicinal Ec)	10 mL

### 2.1.6. Insumos de laboratorio

**Tabla 6**

*Insumos de laboratorio.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Guantes de Nitrilo	1 caja
Cofias	1 caja
Papel Aluminio	1 rollo
Alcohol antiséptico	1 galón
Papel parafilm	1 rollo
Botas	2 pares

### 2.1.7. Materiales de escritorio

**Tabla 7**

*Materiales de escritorio.*

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>
Computadora	2
Calculadora	2
Esferos y lápices	1 paquete
Rotuladores	2
Cuadernos	2

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Producción de un lote de 5 litros de cerveza

La Tabla 8 muestra los valores correspondientes a las cantidades de materia prima utilizadas para la producción de un lote de 5 L de cerveza en el laboratorio, receta adaptada de **Mosher & Trantham (2021)**. Las materias primas (malta, lúpulo y levadura) fueron obtenidas en la empresa Republikan Brewing en la ciudad de Quito y estimadas para la elaboración de una cerveza de tipo Pale Ale.

**Tabla 8**

*Materias primas utilizadas en la producción del lote de 5 L.*

<b>Materia Prima</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje masico</b>
Malta	2.74 kg	21%
Lúpulo	0.035 kg	0.27%
Levadura	0.005 kg	0.04%
Agua	10 kg	78.24%

### **2.2.1.1. Molienda**

Mediante el uso del molino manual se rompieron parcialmente los granos de malta pale Ale, Viking Munich light y cara Munich II; regulando la separación entre las placas para únicamente partir la cascarilla de cada uno de los granos y dejar el endospermo expuesto. Al final de la molienda se mezclaron las tres maltas para obtener una composición homogénea para la maceración (**Hughes, 2019**).

### **2.2.1.2. Maceración**

Previo a la maceración, se calentaron 10 L de agua potable purificada obtenida de la planta de filtrado Aqua vida en la ciudad de Ambato hasta llevarlos a ebullición. El agua se enfrió hasta llegar a una temperatura de 72°C. Posteriormente, la malta molida se trasvasó a una olla de acero inoxidable de 20 L de capacidad y se añadió el agua caliente. Se homogeneizó la mezcla y se la dejó reposar durante aproximadamente 90 minutos, monitoreando la temperatura para que no descienda por debajo de 65°C (**Mason et al., 2016**).

### **2.2.1.3. Filtración**

El proceso se desarrolló utilizando varias mallas de tela de lino las cuales se posicionaron en los bordes de una olla de acero inoxidable de 20 L capacidad. Posteriormente, se trasvasó el mosto de la primera olla con la finalidad de filtrar únicamente el mosto dulce líquido y captando los residuos de malta, estos residuos se

los colocó en dos cubetas de plástico para su posterior uso (**dos Santos Bernardi et al., 2019**).

#### **2.2.1.4. Cocción**

Se preparó una solución de ácido peracético al 0.3% de concentración en peso para sanitizar los utensilios de laboratorio previo a la cocción (**Ocampo et al., 2022**). El mosto dulce filtrado se pasó a una olla de acero inoxidable de 10 L de capacidad y se lo llevó a ebullición. Se añadió el lúpulo en dos partes. Primero se colocaron 20 g de lúpulo cascade dejándolo reposar 40 minutos desde que el mosto dulce llegó a ebullición. Después, se añadieron 15 g de lúpulo residual durante el tiempo restante de la cocción (**Mason et al., 2016**).

#### **2.2.1.5. Enfriamiento**

Se preparó un baño térmico con una mezcla de agua y hielo. Luego, se midió la temperatura del mosto lupulado antes de proceder a inducir el shock térmico. Posteriormente, se sumergió parcialmente la olla para bajar la temperatura del mosto hasta alcanzar los 23°C (**Villacreces et al., 2022**).

#### **2.2.1.6. Fermentación**

Previo a la fermentación, se esterilizó el biorreactor de 10 L y todos sus implementos en un autoclave Hirayma/HV-110. Se hidrataron 5 g de levadura American West Coast Ale Bry-97 en 10 mL de agua destilada a 30°C y se agitaron en un matraz Erlenmeyer (**Walker & Stewart, 2016**). Posterior a ello, el mosto lupulado se trasvasó al biorreactor y se inoculó la levadura en condiciones de esterilidad. Adicionalmente, se preparó una trampa de aire en la salida del biorreactor con una solución saturada de sulfato cúprico. Se configuró el equipo para mantener una temperatura constante de 20°C y se dio paso a la fermentación durante 9 días (**Spevacek et al., 2016**).

#### **2.2.1.7. Adición del aceite de CBD**

Se obtuvo aceite comercial de CBD del distribuidor autorizado TU LUK con actividades económicas de masajes faciales, manicura y pedicura, tatuajes, maquillaje, etcétera., con Ruc: 1803278074001. Se preparó una emulsión estable en la que se utilizó una relación de 1:1 de aceite comercial de CBD y Tween-20. Se colocó la



emulsión en un recipiente de 10 L adecuado para la maduración y se trasvasó la solución resultante del biorreactor para que esta se homogeneice (Jelínek et al., 2022).

#### 2.2.1.8. Maduración

Se dejó reposar la cerveza en el recipiente a temperatura ambiente durante un periodo de 8 días posteriores a la fermentación. Finalmente, se añadió una cantidad adecuada de glucosa para lograr la carbonatación deseada y se embotelló la cerveza en botellas de 330 mL (Aroh, 2019).

#### 2.2.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica

##### 2.2.2.1. Ensayos Fisicoquímicos

La caracterización fisicoquímica se la realizó en el Laboratorio de Análisis y Control de Alimentos (LACONAL) de la Universidad Técnica de Ambato. Los parámetros y protocolos utilizados se basaron en normativas INEN referentes a bebidas alcohólicas con mención a cerveza (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). Los requisitos fisicoquímicos analizados se muestran en las Tabla 9.

**Tabla 9**

*Parámetros fisicoquímicos analizados en la cerveza.*

Parámetros	Unidades	Método de ensayo
Grado alcohólico	% v/v	NTE INEN 2322
Acidez total	% p/p	NTE INEN 2323
pH	-	NTE INEN 2325
Sólidos solubles	Mg/dm <sup>3</sup>	NTE INEN 2326-2330

##### 2.2.2.2. Ensayos Microbiológicos

De igual forma, los ensayos microbiológicos se realizaron en los laboratorios LACONAL de la Universidad Técnica de Ambato. Se aplicaron protocolos basados en la normativa INEN correspondiente al recuento de microorganismos aerobios,

mohos y levaduras como se muestra en la Tabla 10 (**Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013**).

**Tabla 10**

*Parámetros microbiológicos analizados en la cerveza.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método de ensayo</b>
Microorganismos aerobios	ufc/cm <sup>3</sup>	NTE INEN 1 529-17
Mohos y levaduras	ufc/cm <sup>3</sup>	NTE INEN 1 529-10

La caracterización del contenido de cannabinoides se la realizó en los laboratorios LASA ubicados en la ciudad de Quito. Los parámetros analizados se observan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Parámetros analizados para el contenido de CBD.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método de ensayo</b>
CBD (cannabidiol)	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
THC (tetrahidrocannabidiol)	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBD-A	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
THC-A	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBD Total	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
THC Total	% p/p	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
Humedad	%	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01

### 2.2.3. Cálculo de los balances de materia y energía para la producción de 50 litros de cerveza artesanal

Se aplicaron balances de masa para estimar las cantidades de materia prima necesarias para una producción de 50 L de cerveza a partir de un lote de 5 L producido en el laboratorio. Además, se calcularon cada una de las corrientes involucradas en el proceso. De igual forma, se aplicaron balances de energía en las unidades de proceso en donde se produjo un intercambio de calor para estimar las necesidades energéticas de los equipos. Se adaptó a las condiciones de laboratorio el protocolo descrito por **Bamforth (2017)**, para la elaboración de cerveza artesanal. Los balances de materia se llevaron a cabo a partir de los datos obtenidos del proceso a escala de laboratorio mediante la aplicación de la ecuación general del balance de materia (Ecuación 3).

$$\textit{entrada} - \textit{salida} + \textit{generación} - \textit{consumo} = \textit{acumulación} \quad (3)$$

Para los cálculos se modeló el proceso asumiendo un estado estacionario en todas las unidades de proceso (**Fito et al., 2020**). Además, al no existir reacción química, se utilizó la Ecuación 4 para modelar todos los procesos sin reacción química.

$$\textit{entrada} = \textit{salida} \quad (4)$$

Para determinar los requerimientos energéticos del intercambiador de calor para enfriar el mosto se aplicó la Ecuación 5, correlacionando el calor (Q) que intercambia una sustancia en función de su masa (m), su capacidad calorífica ( $c_p$ ) y su diferencial de temperaturas ( $\Delta T$ ) (**Cengel et al., 2019**).

$$Q_{\textit{mosto}} = m * c_p * \Delta T \quad (5)$$

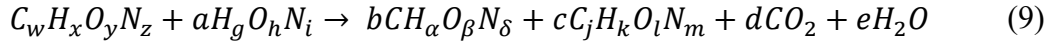
Adicional a ello, se aplicó un balance de energía para determinar la temperatura de salida del agua de enfriamiento, utilizando las Ecuaciones 6, 7 y 8. Donde  $c_p$  corresponde a la capacidad calorífica del agua.

$$-Q_{\textit{mosto}} = Q_{\textit{agua}} \quad (6)$$

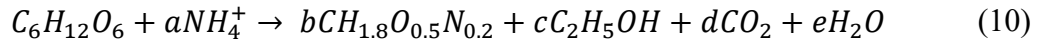
$$Q_{\textit{agua}} = m_{\textit{agua}} * c_{p,\textit{agua}} * (T_f - T_o) \quad (7)$$

$$T_f = \frac{Q_{agua} + m_{agua} * c_{p,agua} * T_o}{m_{agua} * c_{p,agua}} \quad (8)$$

Según **Castañeda (2019)**, la ecuación general para la reacción de fermentación anaerobia se expresó de la siguiente manera:



En donde los términos involucrados representan la fuente de carbono, fuente de nitrógeno, biomasa producida, etanol producido, dióxido de carbono generado y agua; respectivamente. Para simplificar la Ecuación 9 se establecieron los azúcares fermentables en base al monosacárido más simple, el cual corresponde a la glucosa. Por lo tanto, se determinó la Ecuación 10 como la reacción de fermentación para la producción de cerveza. Donde a, b, c y d corresponden a los coeficientes estequiométricos.



Las Ecuaciones 11, 12 y 13 permitieron calcular cada uno de los coeficientes estequiométricos según lo establecido por **Felder et al., (2016)**. Se relacionó el rendimiento de biomasa en función del sustrato ( $Y_{x/s}$ ) con la masa de biomasa y glucosa, además de sus pesos moleculares para calcular el coeficiente estequiométrico de la biomasa (b).

$$Y_{x/s} = \frac{m_{biomasa}}{m_{glucosa}} \quad (11)$$

$$Y_{x/s} = \frac{b * PM_{biomasa}}{PM_{glucosa}} \quad (12)$$

$$b = \frac{Y_{x/s} * PM_{glucosa}}{PM_{biomasa}} \quad (13)$$

Se aplicaron balances de materia de cada una de las especies atómicas obteniéndose ecuaciones que, al resolverlas, determinaron los coeficientes estequiométricos restantes. Además, el calor producido por la reacción se calculó a partir de un balance de energía para sistemas reactivos (Ecuación 14), relacionando la entalpía de reacción ( $\Delta H_{rxn}$ ), la masa y entalpía de evaporación ( $M_v \Delta h_v$ ), el calor producido (Q) y el trabajo ( $W_s$ ) (**Himmelblau & Riggs, 2022**).

$$-\Delta H_{rxn} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0 \quad (14)$$

Debido a que no se produjo trabajo el término correspondiente a  $W_s$  se eliminó, además de la masa de líquido evaporado ( $M_v$ ) (**Helmenstine, 2020**). Simplificando la Ecuación 14 se obtuvieron las Ecuaciones 15 y 16.

$$-\Delta H_{rxn} - Q = 0 \quad (15)$$

$$-\Delta H_{rxn} = Q \quad (16)$$

En donde el calor que desprende la reacción es igual a la entalpía de reacción (**Murphy, 2007**). Se utilizó la entalpía estándar de formación ( $\Delta \hat{H}_{fi}^{\circ}$ ) de los reactivos y productos para estimar la entalpía de reacción de acuerdo con la Ecuación 17.

$$\Delta \hat{H}_r^{\circ} = \sum_i m_i \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ} = \sum_{\text{productos}} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ} - \sum_{\text{reactivos}} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ} \quad (17)$$

Para escalar cada una de las corrientes involucradas en el proceso se utilizó un factor de escala, Ecuación 18, que relacionó la cantidad de cerveza obtenida a escala de laboratorio (cantidad inicial) con la cantidad de cerveza a escala piloto a la que se quiso llegar (cantidad final).

$$\text{Factor de escalado} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\text{Cantidad final}}{\text{Cantidad inicial}} \quad (18)$$

Los balances para el proceso a escala piloto se obtuvieron de manera análoga al apartado de balances de materia y energía del proceso a escala de laboratorio (Ecuaciones 2-6) utilizando las corrientes escaladas. Utilizando un diagrama compuesto a detalle se resumió la información de las variables que se relacionaron con cada operación unitaria especificando la cantidad de cada componente en la corriente establecida.

Adicional a ello se añadió una etapa de carbonatación forzada al proceso de producción a escala piloto. Se determinó el volumen adecuado según el volumen final y tipo de cerveza deseada aplicando la ecuación de los gases ideales para estimar la masa de dióxido de carbono.

$$PV = \frac{m}{PM}RT \quad (19)$$

### 2.2.3.1. Diseño de un fermentador a escala piloto

Se planteó el diseño de un fermentador de 50 L de capacidad con agitación como alternativa de mejora para el diseño del proceso a escala piloto. Entonces, se aplicaron los principios de semejanza geométrica para el diseño del recipiente en base al volumen de un fermentador cilíndrico de fondo cónico y su diámetro (D). Se utilizó la Ecuación 20 para la forma cilíndrica y la Ecuación 21 para la parte cónica.

$$V = \left( \frac{\pi * D^2}{4} * H \right) \quad (20)$$

$$V = \left( \frac{\pi * D^2}{12} * h \right) \quad (21)$$

Las dimensiones del agitador se obtuvieron en base a los parámetros de diseño establecidos por **McCabe et al., (2007)**, aplicando las Ecuaciones 22, 23 y 24. En donde,  $d$  correspondió al diámetro del agitador,  $D$  al diámetro del tanque,  $Z$  la distancia del agitador al fondo y  $\varepsilon$  el ancho de la paleta.

$$\frac{d}{D} = \frac{1}{3} \quad (22)$$

$$\frac{Z}{D} = \frac{1}{3} \quad (23)$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{1}{5} \quad (24)$$

Posteriormente, se estimó el número de Reynolds de mezcla, Ecuación 25, para determinar el régimen de flujo y diseñar el sistema de agitación más adecuado, además de la potencia necesaria (Ecuación 26). Donde  $\rho$  corresponde a la densidad del medio,  $n$  a la velocidad de agitación,  $d$  al diámetro del agitador,  $\mu$  a la viscosidad y  $K_n$  al número de potencia (**Cengel & Cimbala, 2018**).

$$Re = \frac{\rho * n * d^2}{\mu} \quad (25)$$

$$N = K_n * \rho * n^3 * d^5 \quad (26)$$

Adicional a ello, se planteó el diseño de un serpentín helicoidal como sistema de refrigeración para el medio de fermentación. En consecuencia, se estimó la longitud necesaria del serpentín (L) en función de la cantidad de calor (Q) que desprendió la reacción de fermentación (Ecuaciones 27, 28 y 34) **(Merle & Craig, 2020)**.

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T_a \quad (27)$$

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_A} \quad (28)$$

$$\Delta T_A = \frac{2 * T_F - (T_1 - T_2)}{2} \quad (29)$$

Para sistemas de fermentación con agitación se estimó la diferencia de temperatura mediante la diferencia aritmética media (Ecuación 29) **(Balaji et al., 2021)**. El coeficiente universal de transmisión de calor (U) se determinó mediante la Ecuación 30 en función de los coeficientes de convección del medio y del agua ( $h_h$  y  $h_c$ ); los factores de ensuciamiento del medio y el agua de enfriamiento dentro del serpentín ( $h_{hf}$  y  $h_{cf}$ ) y el coeficiente de conducción del serpentín (k) junto con su espesor (B) **(Doran, 2012)**.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{hf}} + \frac{1}{h_h} + \frac{B}{k} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_{cf}} \quad (30)$$

El coeficiente de convección del medio (Ecuación 31) se correlacionó con el número de Nusselt (Nu); que a su vez está en función del número de Prandtl (Pr) y las viscosidades del medio ( $\mu_b$ ) y del agua ( $\mu_w$ ) (Ecuaciones 32 y 33); la conductividad térmica ( $k_{fb}$ ) y el diámetro del tanque **(Shaeiwitz & Turton, 2017)**.

$$h_h = \frac{Nu * K_{fb}}{D} \quad (31)$$

$$Nu = 0.87Re_i^{0.62} * Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (32)$$

$$Pr = \frac{Cp * \mu_b}{k_{fb}} \quad (33)$$

$$A = \pi * \Phi_{out} * L \quad (34)$$

$$L = \frac{A}{\pi * \Phi_{out}} \quad (35)$$

Una vez estimada la longitud se calcularon parámetros correspondientes a la altura del serpentín con respecto al fondo ( $h_z$ ), la altura ( $h_s$ ), el diámetro de la hélice ( $d_H$ ), el paso ( $p$ ) y el número teórico de vueltas ( $\#N$ ) mediante las Ecuaciones 36, 37, 38, 39 y 40 (Pérez Sánchez et al., 2019).

$$h_z = 0.15 * D \quad (36)$$

$$h_s = 0.65 * H \quad (37)$$

$$d_H = 0.75 * D \quad (38)$$

$$p = 1.5 * \Phi_{out} \quad (39)$$

$$\#N = \frac{L}{\sqrt{(2\pi * \frac{d_H}{2})^2 + p^2}} \quad (40)$$

#### 2.2.4. Elaboración de los diagramas BFD y PFD del proceso a escala piloto

Los diagramas se desarrollaron con la ayuda del paquete informático Microsoft Office Visio Professional perteneciente a Microsoft 365. Se tomó en cuenta la información obtenida de los balances de materia y energía, además del escalado del proceso. Todas las variables y sus respectivos valores calculados se presentaron en tablas en donde se visualizaron todas las corrientes involucradas en el proceso.



#### **2.2.4.1. Diagrama BFD**

Una vez realizados los balances de materia y energía correspondientes se elaboró el diagrama BFD sin la necesidad de tomar en cuenta una norma específica. No obstante, se consideraron cuatro puntos según lo planteado por **(Murphy, 2007)**:

- Las operaciones unitarias se representaron mediante bloques debidamente etiquetados.
- Las corrientes de flujo se representaron con flechas en la dirección del flujo del proceso.
- La dirección de flujo fue de izquierda a derecha. Los subproductos se representaron como líneas verticales.
- Solo se colocaron flujos másicos en los flujos de entrada y de salida.

#### **2.2.4.2. Diagrama PFD**

Los equipos utilizados en el proceso se representaron de acuerdo con la simbología ANSI/ISA-S5.5 para diagramas en el diseño de plantas industriales. Se escogieron los equipos en función de las capacidades energéticas proporcionadas por los balances de materia y energía. Se utilizó una nomenclatura específica para diferenciar a cada una de las corrientes y los equipos utilizados en el sistema. Bajo este sentido, cada equipo, a excepción de bombas y válvulas, contó con una nomenclatura específica y estandarizada **(Center for the Advancement of Process Technology, 2011)**. Por último, el resumen de corrientes se lo representó en una tabla junto al diagrama en una hoja formato A3.

## CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis y discusión de los resultados

#### 3.1.1. Condiciones de operación de un biorreactor a escala de laboratorio

Las condiciones de operación del biorreactor de laboratorio tipo Winpact EVO (FS-02 Series) y del Winpact chiller WCC-101 fueron determinadas en base a la producción de un lote de 5 L de cerveza. Las especificaciones y parámetros de operación se describen en las siguientes tablas:

**Tabla 12**

*Especificaciones y Parámetros de operación analizados del Biorreactor Winpact EVO (FS-02 Series).*

Especificaciones	Parámetros de operación	
Recipiente	Volumen de trabajo	5 L
	Volumen total	13 L
pH		5.41
Temperatura medio		20°C
Impulsor de agitación		Impulsor de Rushton
Temperatura	Sistema de calentamiento	Placa calefactora inferior (unidad base)
	Sistema de refrigeración	Bobina de refrigeración
	Rango	5°C por encima del refrigerante hasta 90°C
Sistema de Enfriamiento		Serpentín
	Altura	43 cm
	Diámetro del tanque	20.5 cm
	Altura Mojada	32.5 cm

<b>Especificaciones</b>	<b>Parámetros de operación</b>
Fondo	Plano
Tapa	Plano

**Tabla 13**

*Condiciones de operación del Wimpact chiller WCC-101.*

<b>Especificaciones</b>	<b>Parámetros de operación</b>
Capacidad de la bañera	10 L
Volumen de circulación	Ciclos hasta 5.5 L/min

Las condiciones de operación del biorreactor descritas en las Tablas 12 y 13 fueron recopiladas de acuerdo con los parámetros definidos para el proceso de fermentación, además de un análisis análogo de procesos de fermentación similares a escala banco. De acuerdo con **Noriega et al., (2020)** un reactor batch, por tandas o lotes es definido como un reactor intermitente empleado generalmente para efectuar distintos tipos de operaciones en una escala definida, definir condiciones de operación principalmente en la fermentación. Por ende, se definió un volumen de trabajo de 5 litros siendo este el adecuado para la obtención de datos que posteriormente se utilizaron en el diseño del proceso de mayor escala.

En la industria se utilizan diversos equipos para mantener una temperatura adecuada en una operación de fermentación, generalmente en un biorreactor la mayoría de las fermentaciones tienen lugar a temperaturas comprendidas entre 30 y 37°C (**Doran, 2012**). Sin embargo, en este estudio se utilizaron cepas del género *S. cerevisiae* para obtener una cerveza de tipo Ale, las cuales crecen de manera adecuada a temperaturas de entre 20 a 30°C, por lo que se decidió mantener el medio a 20°C (**Walker & Stewart, 2016**). Además, se tomaron en cuenta los costos de producción a la hora de elegir el equipo adecuado de refrigeración.

Dentro de un sistema energéticamente activo existen diversas formas en que la transferencia de calor tiene lugar: conducción, convección o radiación (**Kreith et al., 2012**). El equipo utilizado contó con dos sistemas, uno de enfriamiento y otro de calentamiento, en este caso un serpentín y una unidad de calentamiento base, respectivamente. La manera en que el serpentín absorbió el calor generado por la reacción de fermentación fue por conducción y convección a través de las paredes de la tubería y el agua de enfriamiento, respectivamente. Mientras que, la unidad de calentamiento transfiere y absorbe calor por conducción a través de un material fijo como su pared estacionaria (**Venkateshan, 2021**).

El biorreactor de laboratorio contó con un impulsor de tipo Rushton, el cual produce un flujo radial en las zonas cercanas al impulsor, de igual forma la geometría de los impulsores permite mover el fluido sin afectar la sedimentación (**Qiu et al., 2021**). No obstante, se optó por omitir la agitación durante todo el proceso de fermentación para acercar el modelo a la realidad de los procesos artesanales a pequeña escala en donde no se utiliza agitación.

### 3.1.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la cerveza

#### 3.1.2.1. Caracterización fisicoquímica

**Tabla 14**

*Parámetros fisicoquímicos caracterizados.*

Parámetros	Unidades	Resultado	Método utilizado
Grado alcohólico, volumetría	% (v/v)	6,96	INEN 340
Acidez total, Potenciometría	% (ácido láctico)	0,472	INEN 341
pH, Potenciometría	Unidades de pH	4,32	AOAC 981.12. Ed. 21. 2019
Sólidos solubles, Reflectometría	°Bx	12,3	AOAC 932.12 Ed. 21. 2019/ INEN 380
Cenizas, Gravimetría	%	0,325	INEN 348
Densidad, volumetría	g/cm <sup>3</sup>	1,0035	INEN 349
Extracto seco, Gravimetría	%	8,52	Ref.: AOAC 925.09 Ed. 21.2019

La Tabla 14 muestra los resultados correspondientes a los análisis fisicoquímicos, los cuales mostraron que el grado alcohólico y pH corresponden al rango establecido por la norma NTE INEN 2262 siendo adecuados los resultados de 6,96% (v/v) y 4,32 respectivamente. No obstante, la acidez total excedió su valor referencial máximo establecido, con un valor de 0,472. Esta variación dependió de diversos factores siendo el más probable la alta concentración de mesófilos aerobios y el oxígeno disuelto, entre los cuales es probable la presencia de bacterias acéticas produciendo una fermentación acética (**Bouatenin et al., 2021**).

Los parámetros correspondientes a sólidos solubles ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) tienen relación con la densidad de la cerveza. No obstante, los resultados obtenidos al ser comparados con el Anexo 2 no presentan una correlación exacta. De acuerdo con **Skogg et al., (2019)**, Las propiedades turbidimétricas están relacionadas con la concentración de partículas suspendidas, por lo que el aumento puede ser causa de diversas partículas diferentes al propio líquido. En el caso de la cerveza es la alta concentración de biomasa y los productos del proceso de elaboración de la cerveza en el medio.

Por otra parte, el parámetro de extracto seco corresponde a las diversas clasificaciones de la cerveza. En la caracterización se obtuvo un resultado de 8,52% de extracto seco y se evidencio que corresponde al rango de cerveza liviana entre 5% a 9% en masa establecido en la norma NTE INEN 2262. También, el extracto seco constituye un criterio de calidad, ya que se expresa la cantidad de gramos “cereales” por cada 100 gramos de mosto (**Martínez & Jiménez, 2022**).

El contenido de cenizas en la cerveza correspondió al contenido total de minerales y materia orgánica (**da Silva Santos et al., 2021**). Los resultados indicaron un porcentaje de 0.325, un nivel bajo comparado con el estudio realizado por (**Medina et al., 2018**). El resultado puede ser bajo ya que no se adiciono minerales en la preparación del lote de cerveza (**Mendoza et al., 2022**).

### 3.1.2.2. Caracterización microbiológica

**Tabla 15**

*Parámetros microbiológicos caracterizados.*

Ensayo	Unidades	Resultado	Método utilizado
Aerobios Mesófilos, PetriFilm	UFC/g	$1,4 \times 10^5$	PE-02-7 2-MB AOAC 997.12. Ed. 21,2019
Mohos	UPM/g	<10	PE-02-7 2-MB AOAC 997.02. Ed. 21,2019
Levaduras	UPL/g	$3 \times 10^3$ (e)	PE-02-7 2-MB AOAC 997.02. Ed. 21,2019

**Nota:** La letra (e) corresponde a un resultado aproximado.

Realizado el análisis microbiológico (Tabla 15) se obtuvo un resultado de  $1,4 \times 10^5$  UFC/g de aerobios mesófilos presentes en la cerveza. El resultado corresponde a un rango alto de concentración para una fermentación, sobrepasando el límite de especificación máximo de 50 UFC/g del método de ensayo PE-02-7 2-MB AOAC 997.12. Ed. 21,2019 correspondiente al Servicio de Acreditación Ecuatoriano. El valor es mayor al estipulado por la norma INEN 1529-5 que manifiesta un valor máximo de 80 UFC/ml para cerveza no pasteurizada.

Por otro lado, el resultado obtenido de mohos y levaduras fue de <10 UPM/g y  $3 \times 10^3$  UPL/g respectivamente. De acuerdo con el método utilizado PE-02-7 2-MB AOAC 997.02. Ed. 21,2019 el contenido de Mohos se mantiene dentro del rango de especificación. Sin embargo, el resultado de levaduras resulta superior al rango de especificación comparado con la Norma NTE INEN 2 262:2003 para cerveza no pasteurizada. Además, se sabe que una cantidad elevada de oxígeno disuelto en el mosto produce una fermentación rápida y proliferación de la biomasa dentro de las primeras 12 o 24 horas (Lv et al., 2020).

### 3.1.2.3. Caracterización del contenido de cannabidiol

**Tabla 16**

*Caracterización del contenido de CBD en la cerveza.*

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>	<b>Método de ensayo</b>
d9-THC (A)	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
d9-THC	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBD(A)	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBD	7,53 mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBC (A)	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
D8-THC	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01
CBN	N/D mg/ml	PEE.LASA.INS.16 AOAC.2018.01

Los resultados mostrados en la Tabla 16 presentan una caracterización de los principales cannabinoides utilizados en la industria. Sin embargo, en el presente proyecto se utilizó CBD como extracto diluido en aceite de oliva al 5%. Por ende, los resultados no reflejan datos para el resto de cannabinoides. **Food Standards Agency (2022)**, recomienda para adultos con un peso promedio de 70 kg no consumir más de 70 mg de CBD por día, lo que equivale aproximadamente a 28 gotas de una concentración de CBD al 5%. Por otro lado, el análisis cuantificó una cantidad de 7,53 mg/ml en una muestra de 330 mL de cerveza lo que supone una concentración demasiado elevada de acuerdo con el estándar británico. No obstante, en la preparación del lote se utilizaron 28 gotas de aceite comercial de CBD al 5%, lo que supone una variación significativa en los resultados de la caracterización, mismos que se atribuyen a errores sistemáticos al momento del análisis.

### 3.1.3. Balances de materia y energía para la producción de 50 litros de cerveza

#### 3.1.3.1. Producción del lote de cerveza a escala de laboratorio

Se midieron datos en cada una de las etapas del proceso, los cuales se observan en las Tablas 17 y 18.

**Tabla 17**

*Datos obtenidos del proceso de producción de 5 L de cerveza.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Agua para maceración	8.04 L
Mosto	10.73 kg
pH mosto	5
Desechos sólidos	3.34 kg
Mosto filtrado	7 L
Mosto lupulado	5 L
Grados Brix del mosto lupulado (°Bx)	19.2°Bx
Biomasa producida	137.17 g
Cerveza	5 L
Grados Brix de la cerveza (°Bx)	3.83°Bx

**Tabla 18**

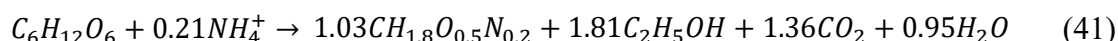
*Propiedades fisicoquímicas obtenidas.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Densidad del mosto lupulado ( $\delta_m$ )	1.079 kg/L
Viscosidad del mosto lupulado ( $\mu_m$ )	0.0016 kg/m*s



Capacidad calorífica del mosto lupulado ( $c_{p,m}$ )	3.768 kJ/kg*°C
Conductividad térmica del mosto ( $k_m$ )	0.44 W/m°C
Densidad de la cerveza ( $\delta_c$ )	1.015 kg/L
Viscosidad de la cerveza ( $\mu_c$ )	0.0013 kg/m*s
Capacidad calorífica de la cerveza ( $c_{p,c}$ )	4.190 kJ/kg°C
Conductividad térmica de la cerveza ( $k_c$ )	0.52 – 0.64 W/m°C

En el bioproceso, los reactivos se convirtieron en los nutrientes que las levaduras consumieron a lo largo de la fermentación, por lo que resultó necesario plantear el crecimiento microbiano como una reacción química. Según lo establecido por **Steward (2017)**, en el periplasma de la levadura varias enzimas están localizadas y producen la hidrólisis y la absorción de los azúcares como glucosa. Siguiendo esta premisa se obtuvo la ecuación de la reacción de fermentación anaerobia (Ecuación 41) mediada por *S. cerevisiae* con glucosa como sustrato a partir de la Ecuación 10.



Al ser una reacción exotérmica, la reacción de fermentación desprendió energía en forma de calor que tuvo que ser retirado del sistema. Sin embargo, según **Doran (2012)**, las fermentaciones a pequeña escala difieren de las fermentaciones a gran escala en cuanto a sus requerimientos energéticos, teniendo que suministrar calor en vez de refrigerar los medios para mantener una temperatura adecuada. Los resultados estequiométricos para el proceso a escala de laboratorio y escala piloto se muestran en las Tablas 19 y 20, respectivamente. Se estimó una eficiencia del 85% de conversión de sustrato en producto a cargo de *S. cerevisiae* debido a que en el producto final se determinó una concentración de 3.83°Bx; indicando la presencia de azúcares fermentables remanentes en la cerveza.

**Tabla 19**

*Productos generados en la fermentación de 5 L de cerveza.*

<b>Productos</b>	<b>Cantidad</b>
CO <sub>2</sub>	286.14 g
Etanol	399.01 g
Agua	81.77 g
Calor desprendido de la reacción (Q)	617.56 kJ

### **3.1.3.2. Escalado de las corrientes de proceso**

Para una masa inicial de 4.91 kg (5 L) y una masa final de 50.75 kg (50 L) se obtuvo un factor de escalado de 10.35, el cual se multiplicó por cada una de las corrientes del proceso según lo descrito por **Felder et al., (2016)**.

### **3.1.3.3. Balances de materia y energía del proceso a escala piloto**

Los productos estequiométricos de la fermentación de 50 L de cerveza se muestran en la Tabla 20, tomando en cuenta una eficiencia de conversión de producto en sustrato del 85% y la Ecuación 41.

**Tabla 20**

*Productos generados en la fermentación de 50 L de cerveza.*

<b>Productos</b>	<b>Cantidad</b>
Biomasa	1.25 kg
CO <sub>2</sub>	2.96 kg
Etanol	4.13 kg
Agua	0.85 kg
Calor desprendido de la reacción (Q)	6390.34 kJ

**Olajire (2020)**, sugiere que al retirar el mosto resultante de la fermentación se debe esparcir agua a una temperatura de entre 70-75°C sobre los residuos de la maceración para extraer azúcares fermentables remanentes. De igual forma, **Hough (2017)**, estima que el bagazo resultante de la fermentación contiene, de media en peso seco, 11.6% de azúcares remanentes que se pueden aprovechar. Por tanto, resultó eficiente añadir una etapa de recirculado al final del proceso de filtrado para aprovechar al máximo los azúcares fermentables residuales de los desechos sólidos.

### 3.1.3.4. Diseño de un fermentador a escala piloto

La Figura 3 muestra el esquema de un fermentador de tipo batch de 50 L de capacidad diseñado a partir de un prototipo de 20 L propuesto por **Flores Hernández et al., (2013)**. El diseño constó de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable 316 de fondo cónico con un agitador de turbina simple de 6 paletas planas y un serpentín helicoidal de refrigeración. Las dimensiones del fermentador y los componentes se muestran en la Tabla 21.

**Tabla 21**

*Dimensiones del fermentador y sus componentes.*

Elemento	Componentes	Dimensión	Unidades	Material
Tanque	Altura total	60.34	cm	Acero al cromo-níquel-molibdeno 316
	Altura mojada	52.51	cm	
	Diámetro del tanque	40.32	cm	
	Altura del fondo cónico	20.02	cm	
Tapa	Diámetro	30.30	cm	
	Espesor	0.01	cm	
Agitador	Diámetro	13.44	cm	

Elemento	Componentes	Dimensión	Unidades	Material
Serpentín	Ancho de la paleta	2.7	cm	
	Distancia del agitador al fondo	13.44	cm	
	Velocidad de agitación	20	rpm	
	Potencia	$4.45 \cdot 10^{-3}$	W	
	Longitud teórica	1.3	m	
	Distancia del serpentín al fondo	6	cm	
	Altura del serpentín	39.22	cm	
	Diámetro de la hélice	30.24	cm	
	Paso	19.05	mm	
	Número teórico de vueltas	1.3	-	

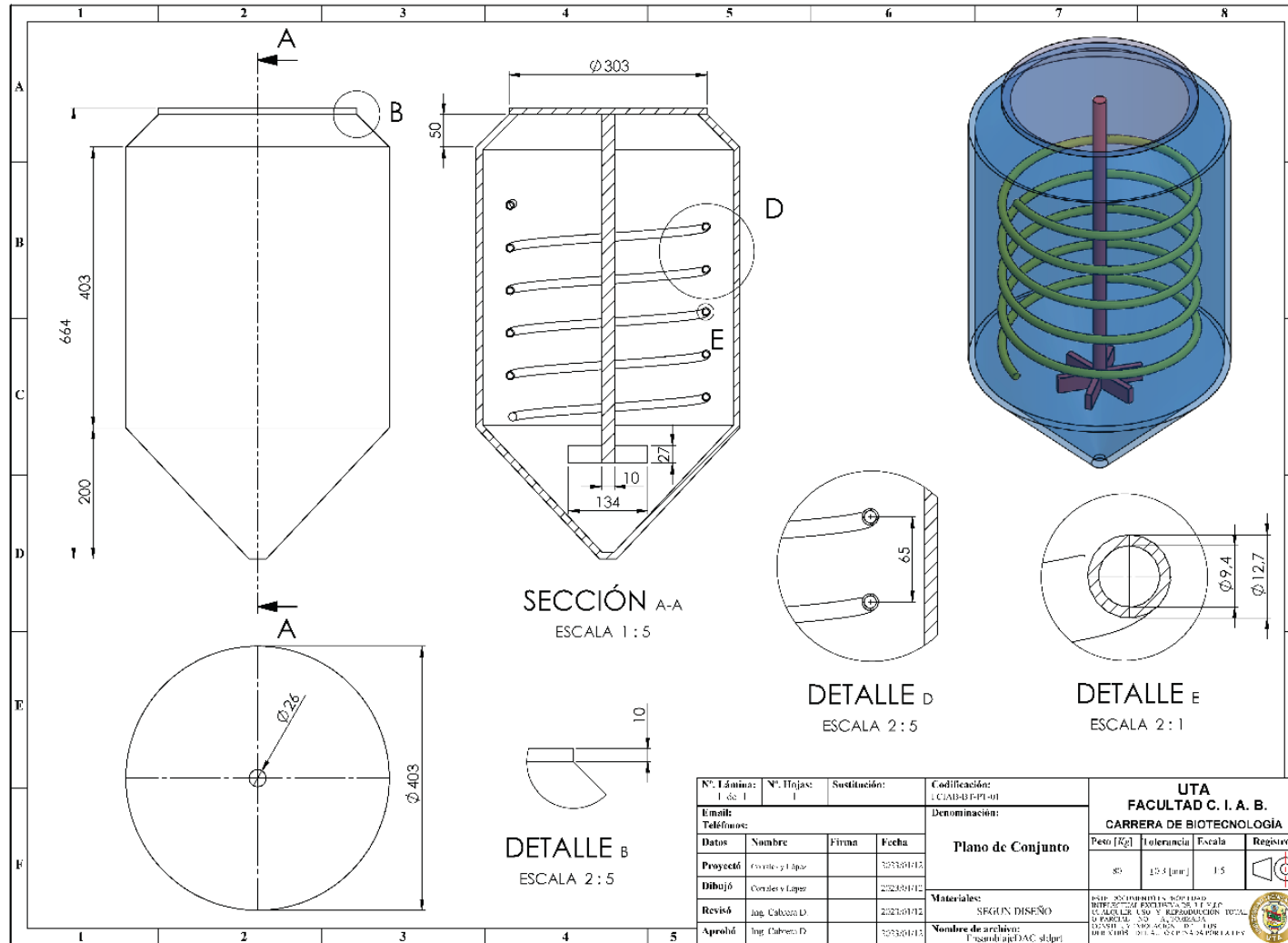
Las dimensiones del tanque se adecuaron del protocolo de dimensionamiento establecido por **Kayode (2022)**, siendo la semejanza geométrica el parámetro utilizado para dimensionar el modelo a escala piloto. **Flores Hernández et al., (2013)**, establece que el agitador de turbina simple de paletas planas es el adecuado para medios de fermentación con una velocidad de agitación comprendida entre 20 a 150 rpm. Por ende, el sistema de agitación estuvo directamente relacionado con el medio y con el microorganismo utilizado para la fermentación, ya que, cada especie soporta fuerzas de cizalla diferentes. Para *S. cerevisiae* las fuerzas de cizalla no deben sobrepasar los 5 kW de potencia por kilogramo (**Hewitt & Nienow, 2007**). Con un valor de 20 rpm utilizado para los cálculos se obtuvo un número de Reynolds igual a  $4.16 \cdot 10^3$  lo que

resultó en  $5.82 \cdot 10^{-5}$  W/kg, cantidad que se encuentra muy por debajo del límite que soporta la levadura por lo que el agitador diseñado fue el adecuado.

Sin embargo, el diseño del serpentín fue planteado acorde a la cantidad de calor que debe ser retirada del medio de fermentación a escala piloto, para 6390.34 kJ la longitud del serpentín no resultó ser muy adecuada, obteniendo 1.3 vueltas teóricas. Los resultados fueron comparables con los obtenidos por **Pérez Sánchez et al., (2019)**, quienes calcularon 53 vueltas para disipar 7530 W frente a los 53.8 W obtenidos para este trabajo; bajo dimensiones similares del fermentador. Tanto la longitud como el número de vueltas del serpentín resultaron prescindibles para el modelo a escala piloto, entonces, su fabricación sería ineficiente e innecesaria.

**Figura 3**

*Diseño conceptual del fermentador para cerveza a escala piloto.*



### 3.1.4. Diagrama BFD y PFD del proceso a escala piloto

#### 3.1.4.1. Diagrama de Gantt

La Figura 4 representa el diagrama de Gantt considerado para englobar y gestionar las múltiples facetas de las operaciones que componen el proceso. El uso de esta herramienta permitió llevar a cabo una planificación específica para ejecutar el proyecto. Lo que permitió la programación de las actividades principales como la fase experimental, elaboración de informes, entre otros (Lee & Shvetsova, 2019). La utilización del diagrama de Gantt permitió observar los puntos críticos del proceso para su posterior desarrollo y representación en los diagramas BFD y PFD.

#### 3.1.4.2. Diagrama BFD

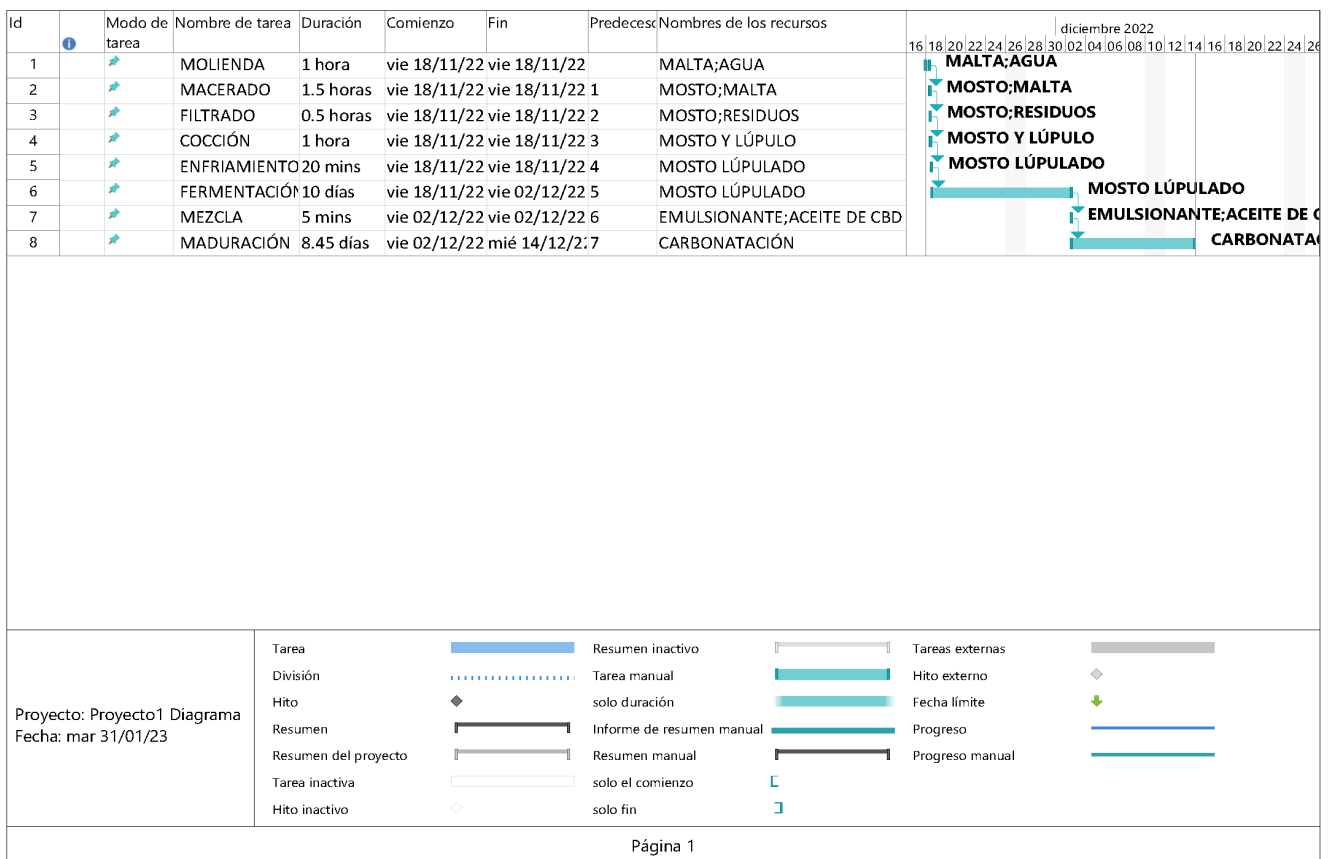
La Figura 5 muestra el diagrama de flujo de bloques del proceso de producción de cerveza a escala piloto. Consta de 10 operaciones unitarias y líneas de flujo que muestran las entradas de materia prima, salidas de desechos y salidas de productos. De acuerdo con Mosher & Trantham (2021), la cerveza al ser una bebida de trascendencia en el mundo, posee procesos normalizados para su elaboración. Por lo tanto, ciertas recetas tienen varias materias primas que son relativamente similares y a su vez diferentes dependiendo de la zona de producción y de la originalidad, además del enfoque para potenciar el proceso. En contraste, se añadió una operación unitaria de mezclado adicional después de la fermentación para incorporar el cannabidiol a la mezcla.

El diagrama general presentado por Farber & Barth (2019), referente a un proceso de elaboración de cerveza a partir de 4 recipientes se compara con la Figura 4, evidenciando una similitud en 7 procesos. Sin embargo, en el diagrama mostrado por Farber se diferencian los procesos de clarificación y centrifugación en contraste con el proceso de recirculado del mosto mediante un proceso de lavado presentado en este estudio. Por otro lado, los flujos de entrada y salida de ambos diagramas presentan generalidades en cuanto a las materias primas y adjuntos utilizados. En este diagrama no se representaron las formas de los equipos debido a que se proyectó una abstracción de las operaciones unitarias interconectadas mediante flechas.

Por otro lado, el diagrama no se esquematizó bajo ninguna norma técnica específica, aunque los bloques podrían recordar de alguna manera la forma de los equipos reales a pesar de representar una operación unitaria, denominándose diagrama de bloques esquemáticos (Walker, 2009). No obstante, la diagramación se basó en estándares mínimos manejados a nivel industrial para su comprensión. Las flechas verticales indican los subproductos de cada operación unitaria.

**Figura 4**

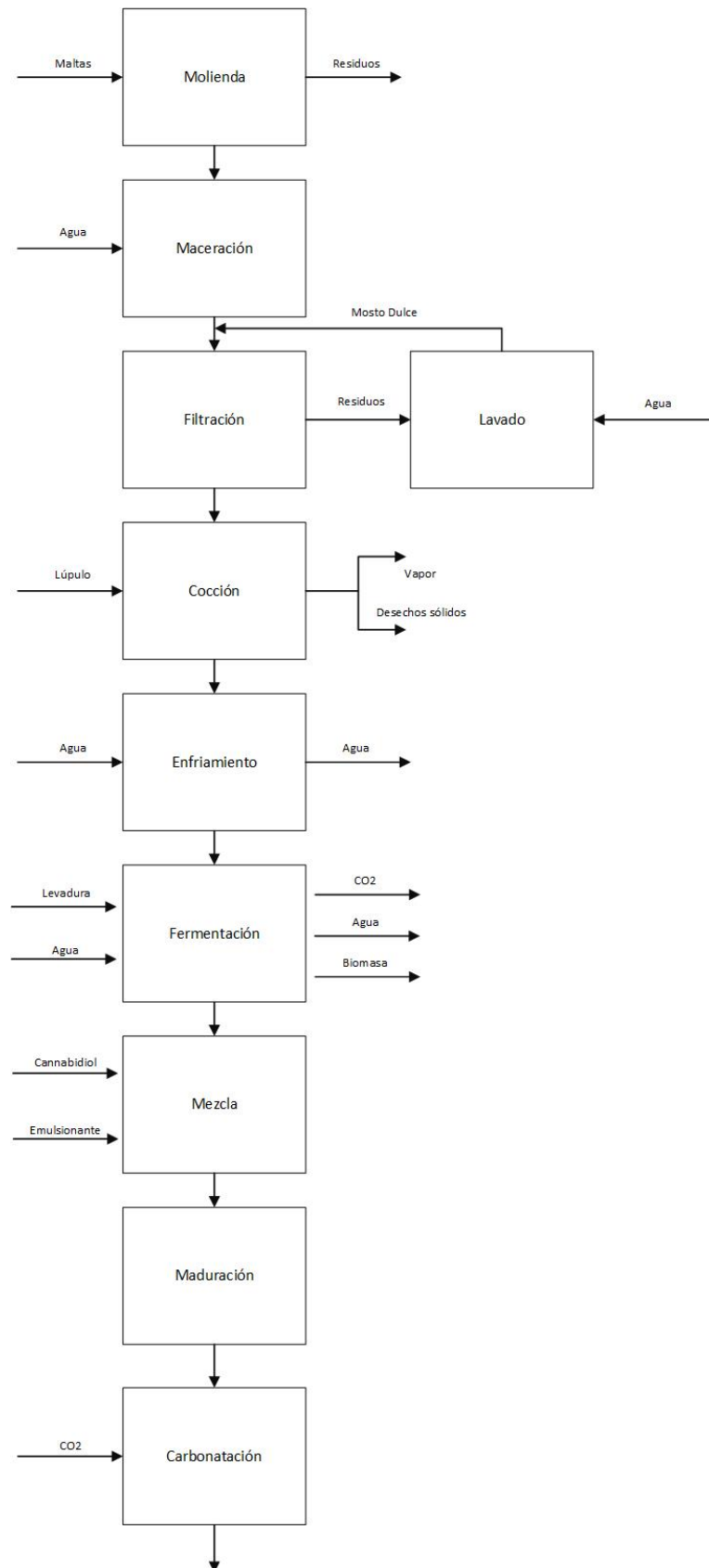
*Diagrama de Gantt del proceso de producción de cerveza.*





**Figura 5**

*Diagrama BFD del proceso de producción de cerveza.*



### 3.1.4.3. Diagrama PFD

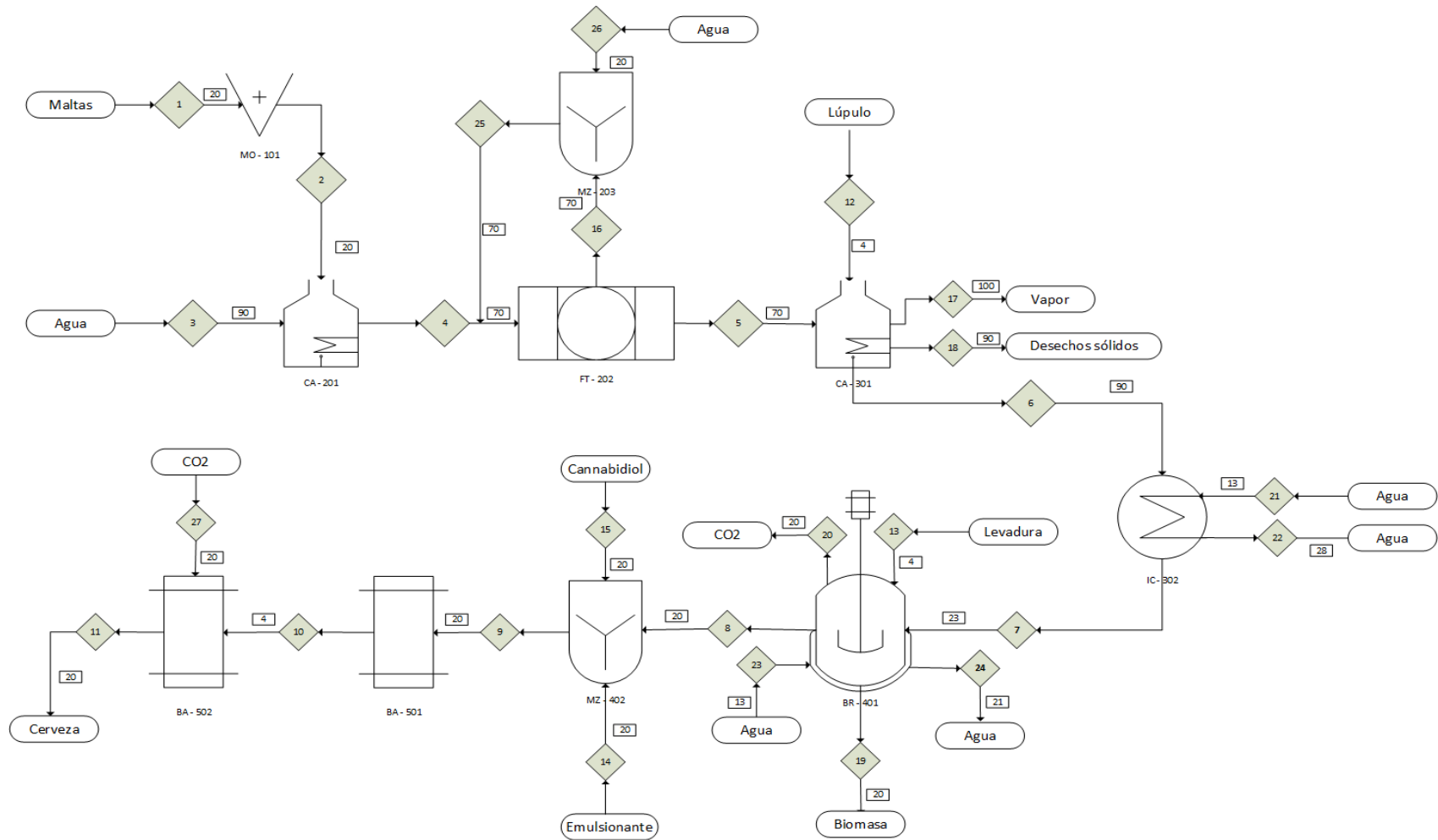
La Figura 6 presenta el diagrama de flujo de proceso a escala piloto, el cual describe detalles respecto a los equipos principales y auxiliares, así como las corrientes de flujo principales y de subproductos, también detalla información acerca de la temperatura de las corrientes. Toda la información perteneciente a las corrientes se resumió en las Tablas 22 y 23. Si bien este diagrama no se encuentra regido por ninguna norma técnica específica, en este apartado se utilizó la norma DIN 28 004:1988 para el bosquejo general del proceso, además de la norma ANSI/ISA-S5.5 para la representación de los equipos. La aplicación de estas normas permitió la creación de un esquema con estándares que se manejan a nivel industrial para su comprensión.

En la actualidad, existen procesos estandarizados para la producción de cerveza a escala industrial, sin embargo, los procesos a menores escalas están sujetos a la inventiva de los maestros cerveceros. Diagramas como el propuesto por **Tibasiima & Okullo (2017)**, describen el mismo proceso, pero con enfoques diferentes. Estos autores propusieron dos etapas de producción, una en caliente y otra en frío, en contraste con el diseño propuesto en este estudio donde se maneja una sola etapa de producción. Tibasiima plantea procesos adicionales de clarificación y cocción para arroz, lo que aumenta su diseño a 14 operaciones unitarias en comparación con las 10 operaciones unitarias descritas en este trabajo. Además, utilizan propilenglicol como refrigerante en sus sistemas debido a que realizan una fermentación baja a 14°C.

Por otra parte, **Van Donkelaar et al., (2016)**, plantearon un diagrama desde un punto de vista energético en donde utilizaron enzimas adicionales en el proceso de malteado para obtener una mayor eficiencia en el proceso. Esta aplicación de enzimas modificó la diagramación a tal punto que en su diagrama general de elaboración de cerveza se añadieron dos operaciones unitarias adicionales, la clarificación y la pasteurización; en contraste al proceso mostrado en la Figura 6 que plantea un mezclado, maduración y carbonatación en barriles. Las tablas de resumen de corrientes recopilaron la información en unidades de flujo másico establecidas en kilogramos de producto por batch debido a que se diseñó el fermentador para un proceso discontinuo de tipo batch.

**Figura 6**

*Diagrama PFD del proceso de producción de cerveza.*



**Tabla 22**

*Resúmenes corrientes del proceso.*

<b>Número de corriente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
<b>Estado</b>	Sólido	Sólido	Líquido	Suspensión	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	líquido	Líquido	Líquido	Sólido	Suspensión	Líquido
<b>Presión (atm)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Temperatura (°C)</b>	20	20	90	70	70	90	23	20	20	4	20	4	4	20
<b>Flujo masico(kg/batch)</b>	28.36	28.36	38.15	66.51	76.51	54.65	54.65	50.68	50.71	50.71	50.82	0.36	0.05	0.017
<b>Flujo másico de los componentes</b>														
<b>Malta</b>	28.36	28.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Agua</b>	-	-	38.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Vapor</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Lúpulo</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.36	-	-
<b>Levadura</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-
<b>Mosto</b>	-	-	-	66.51	76.51	54.65	54.65	-	-	-	-	-	-	-
<b>Biomasa</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Etanol</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dióxido de carbono</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cannabidiol</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Emulsionante</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.017
<b>Cerveza</b>	-	-	-	-	-	-	-	50.68	50.71	50.71	50.82	-	-	-
<b>Desechos</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 23**

*Resúmenes corrientes del proceso (continuación).*

<b>Número de corriente</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>
<b>Estado</b>	Líquido	Sólido	Gas	Líquido	Suspensión	Gas	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Suspensión	Líquido	Gas
<b>Presión (atm)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Temperatura (°C)</b>	20	70	100	90	20	20	13	28	13	21	70	20	4
<b>Flujo masico(kg/batch)</b>	0.013	34.58	21.86	0.36	1.10	2.96	219.94	219.94	191.01	191.01	44.58	10.00	0.11
<b>Flujo másico de los componentes</b>													
<b>Malta</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Agua</b>	-	-	-	-	-	-	219.94	219.94	191.01	191.01	-	10.00	-
<b>Vapor</b>	-	-	21.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Lúpulo</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Levadura</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mosto</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44.58	-	-
<b>Biomasa</b>	-	-	-	-	1.10	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Etanol</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dióxido de carbono</b>	-	-	-	-	-	2.96	-	-	-	-	-	-	0.11
<b>Cannabidiol</b>	0.013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Emulsionante</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cerveza</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Desechos</b>	-	34.58	-	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

Se determinaron las condiciones de operación del Biorreactor Winpact EVO (FS-07 Series) estableciendo el pH óptimo en un rango de 5-6, una temperatura constante de 20°C sin agitación ni oxígeno disuelto y un volumen útil de 5 litros. A su vez, se necesitaron 6 litros de agua a 13°C para mantener la temperatura del medio constante.

La caracterización fisicoquímica y microbiológica determinó valores dentro del rango permitido según las normas INEN y AOAC. No obstante, el recuento de aerobios mesófilos indicó una concentración alta a causa de contaminación cruzada. Además, la acidez total sobrepasó el límite máximo de 0.3, debido a la alta concentración de mesófilos aerobios y oxígeno disuelto. Por último, el análisis cromatográfico indicó una concentración de 7.53 mg/ml de cannabidiol, siendo un valor relativamente alto.

Los balances de materia y energía permitieron establecer la reacción de fermentación que, a su vez, determinó los requerimientos energéticos para el escalado del proceso. En consecuencia, se estableció un factor de escala de 10.35 para llegar a una producción total de 50 litros. En adición, se diseñó un fermentador de 50 L de capacidad en función de los requerimientos del proceso escalado.

El diagrama BFD esquematizó las operaciones unitarias y las líneas de flujo del proceso, estandarizando un proceso para obtener cerveza con CBD a escala piloto. Por otro lado, el diagrama PFD interpretó el conjunto de equipos vinculados a las operaciones del proceso diseñado y las condiciones de trabajo, resumiendo la información de todas las corrientes involucradas.

### **4.2 Recomendaciones**

Utilizar equipos específicos para la producción de cerveza con la finalidad de obtener datos inmediatos y otorgar condiciones óptimas de trabajo, evitando errores sistemáticos.

Conocer la legislación ecuatoriana del reglamento referente a la importación, siembra, cultivo, cosecha, post cosecha, almacenamiento, transporte, procesamiento,

comercialización y exportación de cannabis no psicoactivo o cáñamo y cáñamo para uso industrial.

Utilizar programas de simulación antes de la puesta en marcha del proceso para determinar la viabilidad de este.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albanese, L., Ciriminna, R., Meneguzzo, F., & Pagliaro, M. (2017). Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1457–1470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.162>
- Allen, F. (2018). *GOSE. Brewing a classic german beer for the modern era* (1st ed., Vol. 1). Brewers Association. <http://wilder-wald.com>
- Amantayeva, A., Alkuatova, A., Kanafin, I., Tokbolat, S., & Shehab, E. (2021). A systems engineering study of integration reverse vending machines into the waste management system of Kazakhstan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(3). <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01161-9>
- Aroh, K. (2019). Review: Beer Production. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.3458983>
- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72290-0>
- Balaji, C., Srinivasan, B., & Gedupudi, S. (2021). Chapter 7 - Heat exchangers. In *Heat Transfer Engineering*.
- Bamforth, C. W. (2016). *Brewing materials and processes: A Practical Approach to Beer Excellence*. Elsevier.
- Bamforth, C. W. (2017). Progress in Brewing Science and Beer Production. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 8(1), 161–176. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng>
- Block, D. E., & Miller, K. v. (2021). *Unit Operations in Winery, Brewery, and Distillery Design* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003097495>
- Bouatenin, K. M. J. P., Kouamé, K. A., Gueu-Kehi, M. E., Djéni, N. T., & Djè, K. M. (2021). Organic production of vinegar from mango and papaya. *Food Science and Nutrition*, 9(1), 190–196. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1981>



- Cabras, I., & Higgins, D. M. (2016). Beer, brewing, and business history. *Business History*, 58(5), 609–624. <https://doi.org/10.1080/00076791.2015.1122713>
- Castañeda, M. (2019). *Estequiometría y cinética del crecimiento microbiano*. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/89651/Apunte\\_de\\_c%C3%A1tedra.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/89651/Apunte_de_c%C3%A1tedra.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cengel, Y., Boles, M., & Kanoglu, M. (2019). *Termodinámica* (9th ed.). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2018). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones* (4th ed., Vol. 1). McGraw-Hill interamericana editores, s.a. de c.v.
- Center for the Advancement of Process Technology. (2011). *Process Operations* (Vol. 1). Pearson Education Inc.
- da Silva Santos, M. A., Ribeiro, P. V. L., Andrade, C. P., Machado, A. R. G., de Souza, P. G., & de Souza Kirsch, L. (2021). Physicochemical and sensory analysis of craft beer made with soursop (*Annona muricata* L.). *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 20(1). <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2021.0845>
- DeSalle, R., & Tattersall, I. (2019). *A Natural History of Beer* (1st ed.). Yale University.
- DiSorbo, D. (2022). *The book of hops* (1st ed.). Ten speed press.
- Doran, P. (2012). *Bioprocess Engineering Principles* (2nd ed.). Elsevier.
- dos Santos Bernardi, G., Magro, J. D., Mazutti, M. A., Oliveira, J. V., di Luccio, M., Zobot, G. L., & Tres, M. v. (2019). Microfiltration for Filtration and Pasteurization of Beers. In *Engineering Tools in the Beverage Industry: Volume 3: The Science of Beverages* (pp. 405–434). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815258-4.00013-5>
- Durdán, M., Terpák, J., Kačur, J., Laciak, M., & Flegner, P. (2020). Modeling of material balance from the experimental UCG. *Acta Polytechnica*, 60(5). <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0391>

- Farber, M., & Barth, R. (2019). *Mastering Brewing Science* (1st ed., Vol. 1). John Wiley & Sons, Inc.
- Felder, R., Rousseau, R., & Bullard, L. (2016). *Elementary Principles of Chemical Processes* (4th ed., Vol. 1). John Wiley & Sons, Inc.
- Fito, P., Castello, M. L., Tarrazó, J., & Castro, M. (2020). *Balances de materia y energía en ingeniería de Bioprocesos*. Universitat Politècnica de València.
- Flores Hernández, A., Flores Montien, M., Reyes, J., & Astorga, C. (2013). Diseño y modelado de un bioreactor tipo batch y continuo para aplicaciones de control automático. *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico-CENIDET*, 88–89. <https://www.researchgate.net/publication/277312156>
- Food Standards Agency. (2022, March 31). *Cannabidiol (CBD) | Food Standards Agency*. Consumer Advice on Cannabidiol (CBD) Extracts. <https://www.food.gov.uk/safety-hygiene/cannabidiol-cbd>
- Georgieva, R., Nedyalkov, P., Shopska, V. N., & Kaneva, M. (2021). Effect of blueberries addition during beer maturation on yeast metabolism. *Food Science and Applied Biotechnology*, 4(2), 105. <https://doi.org/10.30721/fsab2021.v4.i2.134>
- Gill, N. K., Appleton, M., Baganz, F., & Lye, G. J. (2008). Quantification of power consumption and oxygen transfer characteristics of a stirred miniature bioreactor for predictive fermentation scale-up. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(6), 1144–1155. <https://doi.org/10.1002/bit.21852>
- Godbey, W. T. (2022). Fermentation, beer, and biofuels. In *Biotechnology and its Applications*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817726-6.00016-2>
- González, Roberto. (2000). *Principios básicos de escalado*. (1st ed.). Editorial Universitaria.
- Guido, L. (2019). *Brewing and Craft Beer* (MDPI). beverages. [https://www.mdpi.com/journal/beverages/special issues/Craft Beer](https://www.mdpi.com/journal/beverages/special%20issues/Craft%20Beer)

- Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2022). Beer Quality Evaluation—A Sensory Aspect. In *Beverages* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/beverages8010015>
- Harmsen, J. (2019). *Industrial Process Scale-up* (2nd ed., Vol. 1). Elsevier.
- Helmenstine, A. M. (2020). Heat of Formation Table for Common Compounds. *ThoughtCo*. <https://www.thoughtco.com/common-compound-heat-of-formation-table-609253>
- Hewitt, C. J., & Nienow, A. W. (2007). The Scale-Up of Microbial Batch and Fed-Batch Fermentation Processes. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 62, pp. 115–117). [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(07\)62005-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(07)62005-X)
- Himmelblau, D., & Riggs, J. (2022). *Basic principles and calculations in chemical engineering* (9th ed.). Pearson.
- Hornsey, I. (2003). *A history of beer and brewing*. RSC Paperbacks.
- Hough, J. (2017). *Biología de la cerveza y de la malta*. (Vol. 1). Editorial Acirbia, S.A.
- Hughes, G. (2019). *Home brew beer: master the art of brewing your own beer* (1st ed.). Dorling Kindersley Ltd.
- Ibarz, A., & Barbosa, G. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Iglesias, A., Mitton, G., Szawarski, N., Cooley, H., Ramos, F., Meroi Arcerito, F., Brasco, C., Ramirez, C., Gende, L., Eguaras, M., Fanovich, A., & Maggi, M. (2020). Essential oils from *Humulus lupulus* as novel control agents against *Varroa destructor*. *Industrial Crops and Products*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113043>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana. Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos*.
- Jelínek, P., Roušarová, J., Ryšánek, P., Ježková, M., Havlůjová, T., Pozniak, J., Kozlík, P., Křížek, T., Kučera, T., Šíma, M., Slanař, O., & Šoóš, M. (2022). Application of Oil-in-Water Cannabidiol Emulsion for the Treatment of

Rheumatoid Arthritis. <https://Home.Liebertpub.Com/CAN.https://doi.org/10.1089/CAN.2022.0176>

- Kanwar, B., Balakirsky, S., & Mazumdar, A. (2022). Modeling and Controller Design for Enhanced Hollow-Fiber Bioreactor Performance. *IEEE Control Systems Letters*, 6. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3050724>
- Kayode, A. (2022). *Chemical Process Engineering* (1st ed., Vol. 1). Scrivener Publishing LLC.
- Kok, Y. J., Ye, L., Muller, J., Ow, D. S. W., & Bi, X. (2019). Brewing with malted barley or raw barley: what makes the difference in the processes? In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 103, Issue 3, pp. 1059–1067). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9537-9>
- Koller, H., & Perkins, L. B. (2022). Brewing and the Chemical Composition of Amine-Containing Compounds in Beer: A Review. In *Foods* (Vol. 11, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods11030257>
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2012). *Principios de Transferencia de Calor* (7th ed.). Cengage.
- Kumar, N. (2023). Fundamentals of conveyors. In *Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories* (pp. 221–251). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00003-9>
- Lee, S., & Shvetsova, O. A. (2019). Optimization of the technology transfer process using Gantt charts and critical path analysis flow diagrams: Case study of the korean automobile industry. *Processes*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/PR7120917>
- Lv, P. J., Qiang, S., Liu, L., Hu, C. Y., & Meng, Y. H. (2020). Dissolved-oxygen feedback control fermentation for enhancing  $\beta$ -carotene in engineered *Yarrowia lipolytica*. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74074-0>
- Mandenius, C.-F. (2016). *Bioreactors design, operation and novel applications*.

- Martínez, E., & Jiménez, V. (2022). *Cereales técnicas de análisis* (F. de E. S. C. UNAM, Ed.).
- Mason, M., Longo, E., & Scampicchio, M. (2016). Monitoring of glucose in beer brewing by a carbon nanotubes based nylon nanofibrous biosensor. *Journal of Nanomaterials*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5217023>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7th ed., Vol. 1). McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V.
- Medina, T., Arroyo, G., Herrera, C., Gantes, M., Mexicano, L., & Mexicana, A. (2018). Análisis químico proximal en residuos sólidos de cerveza artesanal y su aceptación en cerdas. *Abanico Veterinario*, 8(3), 86–93. <https://doi.org/10.21929/abavet2018.83.6>
- Mendoza, J., Pihuave, L., & Velásquez, M. (2022). Análisis comparativo del valor nutricional de la cerveza artesanal y la cerveza industrial. *Revista Ciencia UNEMI*, 15, 61–72.
- Merle, P., & Craig, S. (2020). *Schaum's Outline Of Thermodynamics For Engineers* (4th ed.). McGraw Hill.
- Moreno, T., Dyer, P., & Tallon, S. (2020). Cannabinoid Decarboxylation: A Comparative Kinetic Study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(46), 20307–20315. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03791>
- Mosher, M., & Trantham, K. (2021). *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach* (2nd ed., Vol. 1). Springer Nature. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-73419-0>
- Murphy, R. (2007). *Introducción a los procesos químicos* (1st ed., Vol. 1). McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. DE C.V.
- Noriega, A. K., Tirado, A., Méndez, C., Marroquín, G., & Ancheyta, J. (2020). Hydrodeoxygenation of vegetable oil in batch reactor: Experimental considerations. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(6). <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.12.022>

- Ocampo, D., Vázquez, G., Martínez, S., Iturbe, U., & Coronel, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería Del Agua*, 26(3), 185–204. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17651>
- Ogu, C. T., Umeh, S. O., Nwiyi, I. U., Ikele, M. O., Okonkwo, I. F., & Agwuna, L. (2022). Application of Palm Wine Yeast Species in Beer Brewing. *Journal of Advances in Microbiology*, 67–75. <https://doi.org/10.9734/jamb/2022/v22i130432>
- Olajire, A. A. (2020). The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>
- Páez, M. A. (2011). *Escalado de la producción industrial de levadura de panificación usando dos reactores modelo y un biorreactor prototipo* [Pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5539>
- Peng, J., Fan, M., An, C., Ni, F., Huang, W., & Luo, J. (2022). A narrative review of molecular mechanism and therapeutic effect of cannabidiol (CBD). In *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology* (Vol. 130, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/bcpt.13710>
- Pérez Sánchez, A., Pérez Sánchez, E. J., Heredia Sánchez, A., & Pazos Amayuela, L. (2019). Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. *Nexo Revista Científica*, 32(01), 61–74. <https://doi.org/10.5377/nexo.v32i01.7988>
- Qiu, N., Wang, P., Si, Q., Pettang, W. E. K., & Yuan, S. (2021). Scale process effect on the power consumption characteristics of a novel curved Rushton turbine within a reactor vessel. *Chemical Engineering Research and Design*, 166, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.11.029>
- Ramírez, A., & Viveros, J. M. (2021). Brewing with Cannabis sativa vs. Humulus lupulus: a review. In *Journal of the Institute of Brewing* (Vol. 127, Issue 3, pp. 201–209). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/jib.654>
- Ritter, S., Dölle, K., Barga, M., & Piatkowski, J. (2016). Fruits in Craft Beer: A Study to Evaluate the Impact of Fruits on the pH in the Brewing Process and the

- Breweries Waste Water. *Advances in Research*, 8(4), 1–8.  
<https://doi.org/10.9734/air/2016/30228>
- Ruiz, Á. A., & Álvarez, H. (2011). Escalamiento de procesos químicos y bioquímicos basado en un modelo fenomenológico. *Informacion Tecnologica*, 22(6), 33–52.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000600005>
- Saada, O. A., Tsouris, A., Large, C., Friedrich, A., Dunham, M. J., & Schacherer, J. (2022). Phased polyploid genomes provide deeper insight into the multiple origins of domesticated *Saccharomyces cerevisiae* beer yeasts. *Current Biology*, 32(6), 1350-1361.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.068>
- Shaeiwitz, J. A., & Turton, R. (2017). *Chemical process equipment design*. Prentice Hall.
- Shopska, V., Denkova-Kostova, R., & Kostov, G. (2022). Modeling in Brewing—A Review. *Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/pr10020267>
- Skogg, D., Holler, J., & Crouch, S. (2019). *Principios de análisis instrumental* (7th ed.). Cengage.
- Spevacek, A. R., Benson, K. H., Bamforth, C. W., & Slupsky, C. M. (2016). Beer metabolomics: Molecular details of the brewing process and the differential effects of late and dry hopping on yeast purine metabolism. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(1). <https://doi.org/10.1002/jib.291>
- Steward, G. (2017). *Brewing and Distilling Yeasts* (Springer). Springer Nature.  
<https://doi.org/10.1007>
- Steward, G., Rusell, I., & Anstruther, A. (2018). *Handbook of Brewing* (3rd ed.). CRC Press.
- Tibasiima, N., & Okullo, A. (2017). Energy Targeting for a Brewing Process Using Pinch Analysis. *Energy and Power Engineering*, 09(01), 11–21.  
<https://doi.org/10.4236/epe.2017.91002>
- Turton, R., Shaeiwitz, J., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes*. (5th ed.). Pearson.

- van Donkelaar, L. H. G., Mostert, J., Zisopoulos, F. K., Boom, R. M., & van der Goot, A.-J. (2016). The use of enzymes for beer brewing: Thermodynamic comparison on resource use. *Energy*, *115*, 519–527. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.011>
- Venkateshan, S. P. (2021). *Heat Transfer*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58338-5>
- Villacreces, S., Blanco, C. A., & Caballero, I. (2022). Developments and characteristics of craft beer production processes. *Food Bioscience*, *45*, 101495. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101495>
- Walker, G., & Stewart, G. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. *Beverages*, *2*(4). <https://doi.org/10.3390/beverages2040030>
- Walker, V. (2009, May). Designing a Process Flowsheet. *American Institute of Chemical Engineers*, 15–18. [www.aiche.org/cep](http://www.aiche.org/cep)



## ANEXOS

### Anexo 1

*Tabla de volúmenes de CO<sub>2</sub> para carbonatar los estilos de cerveza más comunes.*

<b>American Amber Ale</b>	2,2-2,8	<b>Belgian Tripel</b>	1,9-2,4	<b>Eisbock</b>	2,4	<b>Kolsch</b>	2,4-2,7
<b>American Brown</b>	1,5-2,5	<b>Belgian White</b>	2,1-2,6	<b>English Bitter</b>	0,8-1,3	<b>Marzen Oktoberfest</b>	2,6-2,7
<b>American Lager</b>	2,5-2,7	<b>Beliner Weisse</b>	3,5	<b>English Brown</b>	1,5-2,3	<b>Helles</b>	2,3-2,7
<b>American Pilsener</b>	2,6-2,7	<b>Bock</b>	2,2-2,7	<b>English Mild</b>	1,3-2,0	<b>Dunkel</b>	2,2-2,7
<b>American Wheat</b>	2,3-2,6	<b>Bohemian Pilsener</b>	2,3-2,5	<b>English Strong Ale</b>	1,5-2,3	<b>Porter</b>	1,7-2,5
<b>American Pale Ale</b>	2,2-2,8	<b>Barley Wine</b>	1,3-2,3	<b>English Ale</b>	1,5-2,3	<b>Scottish Ale</b>	0,8-1,3
<b>Belgian Dubbel</b>	1,9-2,4	<b>Crean Ale</b>	2,6-2,7	<b>German Pilsener</b>	2,5	<b>Strong Scotch Ale</b>	1,5-2,3
<b>Belgian Lambic Fruit</b>	2,6-4,5	<b>Doppelbock</b>	2,3-2,6	<b>Imperia Stout</b>	1,5-2,3	<b>Weizen / Weissbier</b>	2,7-4,5
<b>Belgian Lambic</b>	3,0-4,5	<b>Dunkelweizen</b>	2,7-4,5	<b>IPA</b>	1,5-2,3	<b>Weizenbock</b>	2,7-4,7
<b>Belgian Ale</b>	1,9-2,5	<b>Dusseldorf Altbier</b>	2,2-3,1	<b>Irish Dry Stout</b>	1,6-2,0	<b>California Common</b>	2,4-2,8

*Nota:* Adaptado de *Volúmenes de CO<sub>2</sub> para carbonatar los estilos de cerveza más comunes* por Carbonatar la cerveza en barril cornelius, 2017, La Maltería del Cerveceros (<https://www.lamalteriadelcervecero.es/carbonatar-la-cerveza-en-barril-cornelius/>).

## Anexo 2

Tabla de correspondencia de las diferentes escalas de medida de la concentración de azúcares en mosto.

°Bx	Densidad	°Oe	°B	Azúcares (g/L)	Grado Alcohólico Potencial según el rendimiento en alcohol (azúcares por 1% vol.alcohol)		
					16,83 g/L	17 g/L	18 g/L
32,0	1,1389	138,9	17,596	334,5	19,88	19,68	18,58
31,8	1,1379	137,9	17,488	332,1	19,73	19,54	18,45
31,6	1,1369	136,9	17,380	329,6	19,58	19,39	18,31
31,4	1,1359	135,9	17,271	327,2	19,44	19,25	18,18
31,2	1,1350	135,0	17,163	324,7	19,29	19,10	18,04
31,0	1,1340	134,0	17,054	322,3	19,15	18,96	17,91
30,8	1,1330	133,0	16,946	319,8	19,00	18,81	17,77
30,6	1,1321	132,1	16,837	317,4	18,86	18,67	17,63
30,4	1,1311	131,1	16,729	315,0	18,72	18,53	17,50
30,2	1,1302	130,2	16,620	312,6	18,57	18,39	17,37
30,0	1,1292	129,2	16,512	310,1	18,43	18,24	17,23
29,8	1,1282	128,2	16,403	307,1	18,25	18,06	17,06
29,6	1,1273	127,3	16,295	304,7	18,10	17,92	16,93
29,4	1,1263	126,3	16,186	302,3	17,96	17,78	16,79
29,2	1,1254	125,4	16,077	299,9	17,82	17,64	16,66
29,0	1,1244	124,4	15,969	297,5	17,68	17,50	16,53
28,8	1,1235	123,5	15,860	295,7	17,57	17,39	16,43
28,6	1,1225	122,5	15,751	293,5	17,44	17,26	16,31
28,4	1,1216	121,6	15,643	292,7	17,39	17,22	16,26
28,2	1,1206	120,6	15,534	289,7	17,21	17,04	16,09
28,0	1,1197	119,7	15,425	287,3	17,07	16,90	15,96
27,8	1,1187	118,7	15,316	284,9	16,93	16,76	15,83
27,6	1,1178	117,8	15,208	282,5	16,79	16,62	15,69
27,4	1,1168	116,8	15,099	280,1	16,64	16,48	15,56
27,2	1,1159	115,9	14,990	277,8	16,51	16,34	15,43
27,0	1,1150	115,0	14,881	274,8	16,33	16,16	15,27
26,8	1,1140	114,0	14,772	272,4	16,19	16,02	15,13
26,6	1,1131	113,1	14,663	271,2	16,11	15,95	15,07
26,4	1,1122	112,2	14,554	267,7	15,91	15,75	14,87
26,2	1,1112	111,2	14,445	265,3	15,76	15,61	14,74
26,0	1,1103	110,3	14,337	263,0	15,63	15,47	14,61
25,8	1,1094	109,4	14,228	260,0	15,45	15,29	14,44
25,6	1,1084	108,4	14,119	258,8	15,38	15,22	14,38
25,4	1,1075	107,5	14,010	256,5	15,24	15,09	14,25
25,2	1,1066	106,6	13,901	255,3	15,17	15,02	14,18
25,0	1,1057	105,7	13,791	253,0	15,03	14,88	14,06
24,8	1,1047	104,7	13,682	250,1	14,86	14,71	13,89
24,6	1,1038	103,8	13,573	247,7	14,72	14,57	13,76
24,4	1,1029	102,9	13,464	244,8	14,55	14,40	13,60
24,2	1,1020	102,0	13,355	242,5	14,41	14,26	13,47

\*concentraciones aproximadas según la composición de los mostos. Valores medidos a 20°C.

°Bx		°Oe	°B		Grado Alcohólico Potencial según el rendimiento en alcohol (azúcares por 1% vol.alcohol)		
					Grado Brix	Densidad	Grado Oechsle
24,0	1,1011	101,1	13,246	240,1	14,27	14,12	13,34
23,8	1,1001	100,1	13,137	237,8	14,13	13,99	13,21
23,6	1,0992	99,2	13,028	235,5	13,99	13,85	13,08
23,4	1,0983	98,3	12,918	232,6	13,82	13,68	12,92
23,2	1,0974	97,4	12,809	230,3	13,68	13,54	12,79
23,0	1,0965	96,5	12,700	228,5	13,58	13,44	12,69
22,8	1,0956	95,6	12,591	226,2	13,44	13,31	12,57
22,6	1,0947	94,7	12,481	225,1	13,37	13,24	12,51
22,4	1,0938	93,8	12,372	222,8	13,24	13,11	12,38
22,2	1,0929	92,9	12,263	220,5	13,10	12,97	12,25
22,0	1,0920	92,0	12,153	217,6	12,93	12,80	12,09
21,8	1,0911	91,1	12,044	215,3	12,79	12,66	11,96
21,6	1,0901	90,1	11,935	212,4	12,62	12,49	11,80
21,4	1,0892	89,2	11,825	210,1	12,48	12,36	11,67
21,2	1,0884	88,4	11,716	207,8	12,35	12,22	11,54
21,0	1,0875	87,5	11,606	206,7	12,28	12,16	11,48
20,8	1,0866	86,6	11,497	202,7	12,04	11,92	11,26
20,6	1,0857	85,7	11,387	202,1	12,01	11,89	11,23
20,4	1,0848	84,8	11,278	199,8	11,87	11,75	11,10
20,2	1,0839	83,9	11,168	197,6	11,74	11,62	10,98
20,0	1,0830	83,0	11,059	195,3	11,60	11,49	10,85
19,8	1,0821	82,1	10,949	191,9	11,40	11,29	10,66
19,6	1,0812	81,2	10,839	190,2	11,30	11,19	10,57
19,4	1,0803	80,3	10,730	187,4	11,13	11,02	10,41
19,2	1,0794	79,4	10,620	186,2	11,06	10,95	10,34
19,0	1,0785	78,5	10,511	183,5	10,90	10,79	10,19
18,8	1,0777	77,7	10,401	182,3	10,83	10,72	10,13
18,6	1,0768	76,8	10,291	180,1	10,70	10,59	10,00
18,4	1,0759	75,9	10,181	177,2	10,53	10,42	9,84
18,2	1,0750	75,0	10,072	175,0	10,40	10,29	9,72
18,0	1,0741	74,1	9,962	172,2	10,23	10,13	9,56
17,8	1,0733	73,3	9,852	169,4	10,07	9,96	9,41
17,6	1,0724	72,4	9,742	168,3	10,00	9,90	9,35
17,4	1,0715	71,5	9,633	166,0	9,86	9,76	9,22
17,2	1,0706	70,6	9,523	164,9	9,80	9,70	9,16
17,0	1,0698	69,8	9,413	162,2	9,63	9,54	9,01
16,8	1,0689	68,9	9,303	159,3	9,47	9,37	8,85
16,6	1,0680	68,0	9,193	157,1	9,33	9,24	8,73
16,4	1,0672	67,2	9,083	154,4	9,17	9,08	8,58
16,2	1,0663	66,3	8,973	151,6	9,01	8,92	8,42
16,0	1,0654	65,4	8,863	150,5	8,94	8,85	8,36

\*concentraciones aproximadas según la composición de los mostos. Valores medidos a 20°C.

15,8	1,0646	64,6	8,753	148,2	8,81	8,72	8,23
°Bx		°Oe	°B		Grado Alcohólico Potencial según el rendimiento en alcohol (azúcares por 1% vol.alcohol)		
Grado Brix	Densidad	Grado Oechsle	Grado Baumé	Azúcares (g/L)	16,83 g/L	17 g/L	18 g/L
15,6	1,0637	63,7	8,643	147,1	8,74	8,65	8,17
15,4	1,0628	62,8	8,533	144,4	8,58	8,49	8,02
15,2	1,0620	62,0	8,423	141,6	8,41	8,33	7,87
15,0	1,0611	61,1	8,313	138,9	8,25	8,17	7,71
14,8	1,0603	60,3	8,203	137,2	8,15	8,07	7,62
14,6	1,0594	59,4	8,093	135,0	8,02	7,94	7,50
14,4	1,0586	58,6	7,983	132,8	7,89	7,81	7,38
14,2	1,0577	57,7	7,873	131,2	7,79	7,71	7,29
14,0	1,0568	56,8	7,763	129,0	7,66	7,59	7,17
13,8	1,0560	56,0	7,652	126,3	7,50	7,43	7,02
13,6	1,0551	55,1	7,542	123,6	7,34	7,27	6,86
13,4	1,0543	54,3	7,432	121,9	7,24	7,17	6,77
13,2	1,0534	53,4	7,322	119,2	7,08	7,01	6,62
13,0	1,0526	52,6	7,211	117,6	6,99	6,92	6,53
12,8	1,0518	51,8	7,101	116,0	6,89	6,82	6,44
12,6	1,0509	50,9	6,991	113,2	6,73	6,66	6,29
12,4	1,0501	50,1	6,880	111,0	6,60	6,53	6,17
12,2	1,0492	49,2	6,770	108,4	6,44	6,38	6,02
12,0	1,0484	48,4	6,660	106,8	6,35	6,28	5,93
11,8	1,0475	47,5	6,549	104,1	6,18	6,12	5,78
11,6	1,0467	46,7	6,439	103,3	6,14	6,08	5,74
11,4	1,0459	45,9	6,329	100,3	5,96	5,90	5,57
11,2	1,0450	45,0	6,218	98,1	5,83	5,77	5,45
11,0	1,0442	44,2	6,108	95,0	5,64	5,59	5,28
10,8	1,0434	43,4	5,997	93,4	5,55	5,49	5,19
10,6	1,0425	42,5	5,887	91,3	5,42	5,37	5,07
10,4	1,0417	41,7	5,776	89,6	5,32	5,27	4,98
10,2	1,0409	40,9	5,666	87,8	5,22	5,16	4,88
10,0	1,0400	40,0	5,555	84,9	5,04	4,99	4,71
9,8	1,0392	39,2	5,444	82,2	4,88	4,84	4,57
9,6	1,0384	38,4	5,334				
9,4	1,0376	37,6	5,223				
9,2	1,0367	36,7	5,112				
9,0	1,0359	35,9	5,002				
8,8	1,0351	35,1	4,891				
8,6	1,0343	34,3	4,780				
8,4	1,0334	33,4	4,670				
8,2	1,0326	32,6	4,559				
8,0	1,0318	31,8	4,448				
7,8	1,0310	31,0	4,337				

\* concentraciones aproximadas según la composición de los mostos. Valores medidos a 20°C.



7,6	1,0302	30,2	4,226				
7,4	1,0294	29,4	4,116				
°Bx		°Oe	°B		Grado Alcohólico Potencial según el rendimiento en alcohol (azúcares por 1% vol.alcohol)		
Grado Brix	Densidad	Grado Oechsle	Grado Baumé	Azúcares (g/L)	16,83 g/L	17 g/L	18 g/L
7,2	1,0285	28,5	4,005				
7,0	1,0277	27,7	3,894				
6,8	1,0269	26,9	3,783				
6,6	1,0261	26,1	3,672				
6,4	1,0253	25,3	3,561				
6,2	1,0245	24,5	3,450				
6,0	1,0237	23,7	3,339				
5,8	1,0229	22,9	3,228				
5,6	1,0221	22,1	3,117				
5,4	1,0213	21,3	3,006				
5,2	1,0205	20,5	2,895				
5,0	1,0197	19,7	2,784				
4,8	1,0189	18,9	2,673				
4,6	1,0181	18,1	2,562				
4,4	1,0173	17,3	2,451				
4,2	1,0165	16,5	2,339				
4,0	1,0157	15,7	2,228				
3,8	1,0149	14,9	2,117				
3,6	1,0141	14,1	2,006				
3,4	1,0133	13,3	1,894				
3,2	1,0125	12,5	1,783				
3,0	1,0117	11,7	1,672				
2,8	1,0109	10,9	1,561				
2,6	1,0101	10,1	1,449				
2,4	1,0094	9,4	1,338				
2,2	1,0086	8,6	1,227				
2,0	1,0078	7,8	1,115				
1,8	1,0070	7,0	1,004				
1,6	1,0062	6,2	0,892				
1,4	1,0054	5,4	0,781				
1,2	1,0047	4,7	0,669				
1,0	1,0039	3,9	0,558				
0,8	1,0031	3,1	0,446				
0,6	1,0023	2,3	0,335				

concentraciones aproximadas según la composición de los mostos. Valores medidos a 20°C.



Fuentes:  
 Grado Brix *Traité d'œnologie Tome 1, Ed 7, p374.* Densidad OIV *Recueil des méth. Internationales d'analyse des vins et des moûts Ed. 2018.* Grado Oechsle *Traité d'œnologie Tome 1, Ed 7, p374.* Grado Baumé *Traité d'œnologie Tome 1, Ed 7, p374.* Azúcares (g/L) OIV *Recueil des méth. Internationales d'analyse des vins et des moûts Ed. 2018.*

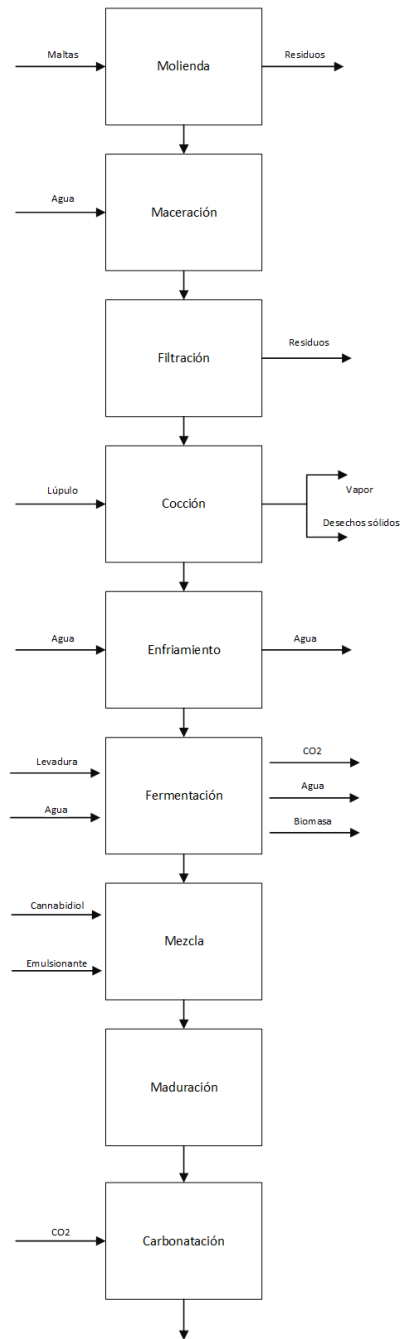
**Nota:** Adaptado de *Traité d'œnologie Tome 1 Ed 7*(p. 374), por A.Pignocchi, 2017, Steinkis.

### Anexo 3

Proceso de producción a escala de laboratorio.

#### Figura 7

Diagrama BFD del proceso de producción de cerveza escala laboratorio.



**Nota:** La imagen representa BFD de proceso a escala de laboratorio.

**Figura 8**

*Certificado de análisis de laboratorio propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.*



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA**  
**LABORATORIO DE CONTROL Y ANÁLISIS DE ALIMENTOS**

---

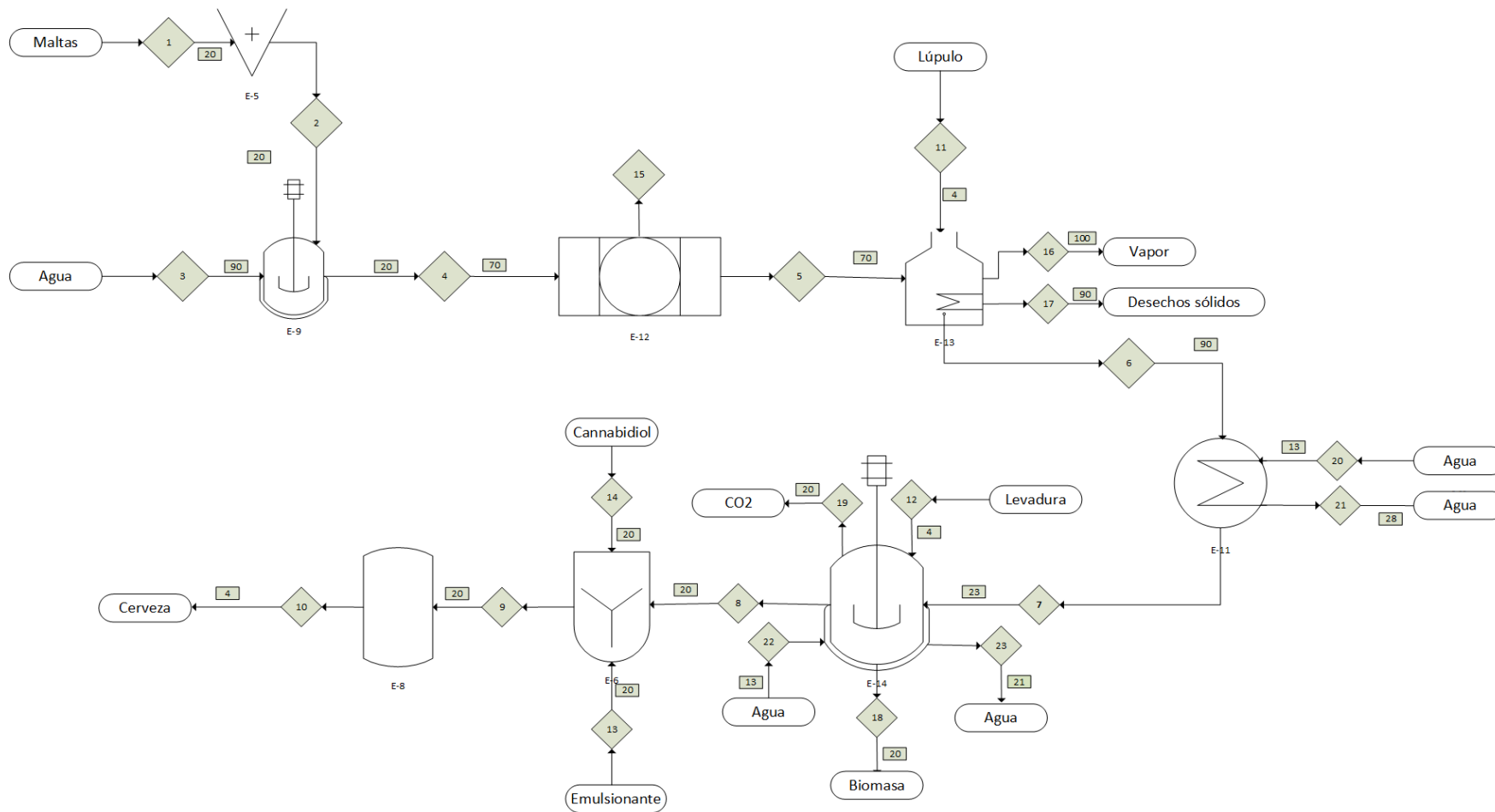
**CERTIFICADO DE ANALISIS DE LABORATORIO**

Certificado No: 22-176		0000874				
Solicitud N°: 22-176		Pag.: 1 de 1				
Fecha recepción: 12 de diciembre de 2022		Fecha de ejecución de ensayos: 13 al 19 de diciembre de 2022				
<b>Información del cliente:</b>						
Empresa:		C.I.RUC: 0504070608				
Representante: Joao Corrales		TIF: 0962922493				
Dirección: Ambato		E mail: jcorrales0608@uta.edu.ec				
Ciudad: Ambato						
<b>Descripción de las muestras:</b>						
Producto: Cerveza		Vol.: 330 ml				
Marca comercial: n/a		Tipo de envase: Envase de vidrio				
Lote: n/a		No de muestras: una				
F. Elb.: 06 de diciembre de 2022		F. Exp.: n/a				
Conservación: Ambiente: X Refrigeración: Congelación:		Almac. en Lab: 30 días				
Cierres seguridad: Ninguno: X Intactos: Rotos:		Muestreo por el cliente: 06 de diciembre de 2022				
RESULTADOS OBTENIDOS						
Muestras	Código del laboratorio	Código cliente	Ensayos solicitados/Técnica	Métodos utilizados	Unidades	Resultados
Cerveza	17622376	Ninguno	*Cenizas, Gravimetría	INEN 348	%	0,325
			*pH, Potenciometría	AOAC 981.12. Ed. 21, 2019	Unidades de pH	4,32
			*Acidez Total, Potenciometría	INEN 341	%(ácido láctico)	0,472
			*Densidad, Volumetría	INEN 349	g/cm <sup>3</sup>	1,0035
			*Sólidos solubles, Refractometría	AOAC 932.12 Ed. 21, 2019 / INEN 380	°Bx	12,3
			*Extracto Seco, Gravimetría	Ref.: AOAC 925.09 Ed. 21, 2019	%	8,52
			*Grado alcohólico, Volumetría	INEN 340	% (v/v)	6,96
			Aerobios Mesófilos, Petrifilm	PE03-7.2-MB AOAC 990.12. Ed. 21, 2019	UFC/g	1,4x10 <sup>5</sup>
			Mohos, Petrifilm	PE-02-7.2-MB AOAC 997.02. Ed. 21, 2019	UPM/g	<10
			Levaduras, Petrifilm	PE-02-7.2-MB AOAC 997.02. Ed. 21, 2019	UPL/g	3x10 <sup>3</sup> (e)

**Nota:** La imagen representa los resultados obtenidos de los ensayos efectuados en la cerveza. Tomado de Laconal-UTA, 2022, Laconal certificado no:22-176.

**Figura 9**

*Diagrama PFD del proceso a escala de laboratorio.*



**Nota:** La imagen representa el diagrama PFD del proceso a escala de Laboratorio.



## Anexo 4

Cálculos demostrativos.

### Balances de materia y energía complementarios a las corrientes del proceso a escala de laboratorio.

Cálculo de la cantidad de mosto filtrado:

$$V_5 = 7 L * \frac{1000 mL * 1.056 g * 1 kg}{1 L * 1 mL * 1000 g} = 7.392 kg = m_5$$

Balance de materia en el filtro:

$$entrada = salida$$

$$m_4 = m_5 + m_{15}$$

$$m_4 = 7.392 kg + 3.341 kg$$

$$m_4 = 10.733 kg$$

Balance de materia en el macerador:

$$entrada = salida$$

$$m_3 + m_2 = m_4$$

$$m_3 = 10.733 kg - 2.693 kg$$

$$m_3 = 8.04 kg \text{ de agua}$$

Balance de materia en la cocción:

$$m_5 + m_{11} = m_{16} + m_{17} + m_6$$

$$m_{16} = m_5 + m_{11} - m_{17} - m_6$$

$$m_{16} = 7.392 kg + 0.035 kg - 0.035 kg - 5.28 kg$$

$$m_{16} = 2.112 kg \text{ de vapor}$$

Calor cedido por el mosto al agua de enfriamiento:

$$Q_M = m_M * c_{p,M} * \Delta T$$

$$Q_M = (5.28 \text{ kg}) (3768 \text{ J/kg} * ^\circ\text{C}) (23^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})$$

$$Q_M = -1332967.68 \text{ J}$$

Cálculo de la temperatura final del agua de enfriamiento para el mosto:

$$Q_{in} = m_{agua} * c_{p,agua} * \Delta T$$

$$Q_{in} = m_{agua} * c_{p,agua} * (T_f - T_o)$$

$$T_f = \frac{Q_{in} + m_{agua} * c_{p,agua} * T_f}{m_{agua} * c_{p,agua}}$$

$$T_f = \frac{1.33 \times 10^6 \text{ J} + (21 \text{ kg})(4182 \text{ J/kg} * ^\circ\text{C})(13^\circ\text{C})}{(21 \text{ kg})(4182 \text{ J/kg} * ^\circ\text{C})}$$

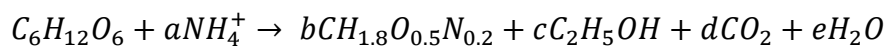
$$T_f = 28.14^\circ\text{C}$$

Estimación de la cantidad de azúcares fermentables:

$$^{\circ}\text{Bx} = 19.2^\circ * \frac{25 \text{ g} / 100 \text{ g, sol}}{25^\circ} = 0.192 \frac{\text{g, sacarosa}}{\text{g, sol}}$$

$$5280 \text{ g, mosto} = \frac{0.192 \text{ g, sacarosa}}{1 \text{ g, sol}} = 1013.76 \text{ g de sacarosa}$$

Determinación de la reacción de fermentación:



Rendimiento de biomasa:

$$Y_{x/s} = \frac{m_{biomasa}}{m_{glucosa}}$$

$$Y_{x/s} = \frac{137.17 \text{ g}}{1013.760 \text{ g}}$$

$$Y_{x/s} = 0.14$$

Rendimiento de biomasa en función de la reacción estequiométrica:

$$Y_{x/s} = \frac{b * PM_{biomasa}}{PM_{glucosa}}$$

$$b = \frac{Y_{x/s} * PM_{glucosa}}{PM_{biomasa}} = \frac{(0.14)(180.2 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{24.6 \text{ g/mol}}$$

$$b = 1.03$$

Balance de especies moleculares:

Balance de C:  $6 = b + 2c + d$

Balance de H:  $12 + 4a = 1.8b + 5c + 2e$

Balance de O:  $6 = 0.5b + c + 2d + e$

Balance de N:  $a = 0.2b$

Resolviendo el sistema:

$$a = 0.21$$

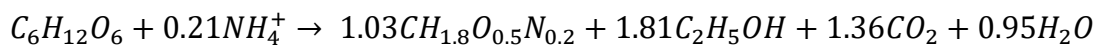
$$b = 1.03$$

$$c = 1.81$$

$$d = 1.36$$

$$e = 0.95$$

Reacción estequiométrica:



Cálculo de los productos estequiométricos de la reacción.

Rendimiento de la reacción:

Grados Brix iniciales: 19.2°Bx → 1013.76 g sacarosa

Grados Brix finales: 3.83°Bx → 155.50 g sacarosa

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Teórico} - \text{Real}}{\text{Teórico}} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{1013.76 \text{ g} - 155.50 \text{ g}}{1013.76 \text{ g}} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 84.66\%$$

Cantidad de etanol generado:

$$1013.76 \text{ g}_{\text{glucosa}} * \frac{1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1.81 \text{ mol}_{\text{etanol}} * 46.1 \text{ g}_{\text{etanol}}}{180 \text{ g}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{etanol}}} = 469.42 \text{ g}_{\text{etanol}} * 0.85$$
$$= 399.01 \text{ g}_{\text{etanol}}$$

Cantidad de CO<sub>2</sub> generado:

$$1013.76 \text{ g}_{\text{glucosa}} * \frac{1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1.36 \text{ mol } \text{CO}_2 * 44 \text{ g}_{\text{CO}_2}}{180 \text{ g}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1.36 \text{ mol } \text{CO}_2} = 336.64 \text{ g}_{\text{CO}_2} * 0.85$$
$$= 286.14 \text{ g}_{\text{CO}_2}$$

Cantidad de agua generada:

$$1013.76 \text{ g}_{\text{glucosa}} * \frac{1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 0.95 \text{ mol}_{\text{agua}} * 18 \text{ g}_{\text{agua}}}{180 \text{ g}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{agua}}} = 96.20 \text{ g}_{\text{agua}} * 0.85$$
$$= 81.77 \text{ g}_{\text{agua}}$$

Cantidad de amonio necesario:

$$1013.76 \text{ g}_{\text{glucosa}} * \frac{1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 0.21 \text{ mol}_{\text{amonio}} * 18 \text{ g}_{\text{amonio}}}{180 \text{ g}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{glucosa}} * 1 \text{ mol}_{\text{amonio}}} = 21.31 \text{ g}_{\text{amonio}} * 0.85$$
$$= 18.11 \text{ g}_{\text{amonio}}$$

Calor desprendido por la reacción de fermentación:

$$Q = -\Delta H_{rxn}$$

$$Q = \sum_{\text{productos}} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ} - \sum_{\text{reactivos}} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ}$$

$$Q = [(142.55 \text{ g})(-21.2 \text{ kJ/g}) + (469.42 \text{ g})(-29.7 \text{ kJ/g})] \\ - [(1013.76 \text{ g})(-15.57 \text{ kJ/g}) + (21.31 \text{ g})(-21.26 \text{ kJ/g})]$$

$$Q = -726.54 \text{ kJ} * 0.85 = \mathbf{617.56 \text{ kJ}}$$

### Balances de materia y energía en el escalado del proceso

Factor de escalado para cada una de las corrientes:

$$\text{Factor de escalado} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\text{Cantidad final}}{\text{Cantidad inicial}}$$

$$\text{Factor de escalado} = \frac{50.75 \text{ kg}}{4.91 \text{ kg}} = \mathbf{10.35}$$

### Balance de materia en el mezclador de CBD

$$m_9 = m_{15} + m_{14} + m_8$$

$$m_9 = 50.68 \text{ kg} + 0.017 \text{ kg} + 0.013 \text{ kg}$$

$$m_9 = 50.71 \text{ kg}$$

### Balance de materia en el filtro

$$m_4 + m_{25} = m_5 + m_{16}$$

$$m_4 = m_5 + m_{16} - m_{25}$$

$$m_4 = 76.51 \text{ kg} + 34.58 \text{ kg} - 44.58 \text{ kg}$$

$$m_4 = 66.51 \text{ kg}$$

### Balance de materia en la cocción

$$m_5 + m_{12} = m_6 + m_{17} + m_{18}$$

$$m_{12} = m_{18}$$

$$m_5 = m_6 + m_{17}$$

$$m_5 = 54.65 \text{ kg} + 21.86 \text{ kg}$$

$$m_5 = 76.51 \text{ kg}$$

### **Balance de materia en el macerador**

$$m_2 + m_3 = m_4$$

$$m_3 = m_2 - m_2$$

$$m_3 = 66.51 \text{ kg} - 28.36 \text{ kg}$$

$$m_3 = 38.15 \text{ kg}$$

### **Balance de materia en el lavado**

$$m_{16} + m_{26} = m_{25}$$

$$m_{25} = 34.58 \text{ kg} + 10 \text{ kg}$$

$$m_{25} = 44.58 \text{ kg}$$

### **Balance de energía en el intercambiador**

$$Q = m * C_{p_{mosto}} * \Delta T$$

$$Q = (54.65 \text{ kg}) * (3748 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}) * (23 - 90)^\circ\text{C}$$

$$Q = -13.7967 \times 10^6 \text{ J}$$

Cantidad de agua de enfriamiento

$$Q = m_{H_2O} * C_{p_{mosto}} * \Delta T$$

$$m_{H_2O} = \frac{Q}{C_{p_{mosto}} * \Delta T}$$

$$m_{H_2O} = \frac{13.7967 \times 10^6 J}{4192 \frac{J}{kg^\circ C} * (25 - 13)^\circ C}$$

$$m_{H_2O} = 219.94 \text{ kg} = m_{21} = m_{22}$$

### **Balance de masa en la carbonatación**

Tipo de cerveza Pale Ale

Rango de volúmenes utilizado 2.2 – 2.7 (**Anexo 1**)

Valor Utilizado = 2.5 volúmenes

Temperatura 4°C = 1,5 Volumen de CO2

**Valor de trabajo** = Valor de tabla – valor normal

$$V_{trabajo} = 2.5 \text{ vol} - 1.5 \text{ vol}$$

$$V_{trabajo} = 1 \text{ vol}$$

Utilizando Datos de **anexo1** volúmenes de carbonatación.

$$V_f \text{ Carbonatar} = \frac{V_o \text{ Carbonatar} * V_f}{V_o}$$

$$V_f \text{ Carbonatar} = \frac{1.5 * 5L}{1L}$$

$$V_f \text{ Carbonatar} = 7.5 \text{ Vol}$$

### **Ecuación de los gases ideales**

$$PV = \frac{m}{PM} RT$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m = \frac{1 \text{ atm} * 7.5 \text{ L} * 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{(0.08206 \frac{\text{L} * \text{atm}}{\text{mol} * \text{K}}) * 277 \text{ K}}$$

$$m = 14.517 \text{ g CO}_2$$

$$m_{10} + m_{27} = m_{11}$$

$$m_{11} = 50.71 \text{ kg} + 0.13 \text{ kg}$$

$$m_{11} = 50.95 \text{ kg}$$

### Diseño del agitador para un biorreactor de 60L

Datos Biorreactor de 24740.3 cm<sup>3</sup> de capacidad:

$$V_1 = 21206 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 3534,3 \text{ cm}^3$$

$$V_T = V_1 + V_2 = 24.7 \text{ L}$$

Factores de conversión:

$$F_c = \frac{n_1}{n_2} * 100\%$$

$$F_c = \frac{21.2}{24.7} * 100\%$$

$$F_c = 85.8\%$$

$$F_c = \frac{3.5}{24.7} * 100\%$$

$$F_c = 14.2\%$$

$$V_1 = 60 \text{ L} (0.858)$$

$$V_1 = 51.48 \text{ L} = 51.480 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 60 \text{ L} (0.142)$$



$$V_2 = 8.52 L = 8520cm^3$$

Para cilindros con base y altura iguales:

Volumen del cilindro:

$$A_1 = \frac{\pi * (D_2)^3}{4}$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4A_1}{\pi}}$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4(51.480)}{\pi}}$$

$$A_2 = D_2 = 40.32cm$$

### Diseño del agitador para un biorreactor de 60L

Volumen del cono:

$$V_2 = \frac{\pi * (D_2)^2}{12} * B_2$$

$$B_2 = \frac{12 * A_2}{\pi * (D_2)^2}$$

$$B_2 = \frac{12 * (8520cm^3)}{\pi * (40.32cm)^2}$$

$$B_2 = 20.02cm$$

$$V_T = V_1 + V_2$$

$$V_T = \frac{\pi(40.32)^2}{4} + \frac{\pi(40.32)^2}{12} * 20.02cm$$

$$V_T = 60002.2cm^3$$

Diseño del agitador para un biorreactor de 60L:

$$\frac{d}{D} = \frac{1}{3} \qquad \varepsilon = \left(\frac{1}{5}\right)13.44\text{cm}$$

$$d = 40.32\left(\frac{1}{3}\right) \qquad \varepsilon = 2.7\text{cm}$$

$$d = 13.44\text{cm} \qquad \frac{H}{D} = 1$$

$$\frac{Z}{D} = \frac{1}{3} \qquad H = D = 40.32$$

$$Z = \left(\frac{1}{3}\right)40.32 \qquad \frac{L}{D} = \frac{1}{4}$$

$$Z = 13.44\text{cm} \qquad L = \frac{1}{4}(13.44)$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{1}{5} \qquad L = 3.36$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * n * d^2}{\mu}$$

$$Re = \frac{(1015 \frac{kg}{m^3}) * 25s^{-1} * (0.1344m)^2}{0.0013 \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 35258.29$$

Cálculo del número de Potencia:

$$N = K_n * \rho * n^3 * d^5$$

$$N = (4.25) * (1015 \frac{kg}{m^3}) * (25s^{-1})^3 * (0.1344m)^5$$

$$N = 2.96w$$

**Diseño del serpentín de enfriamiento para un biorreactor de 60L**

Ecuación para la transferencia de calor:

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T_a$$

Ecuación para el coeficiente universal de transferencia de calor:

$$h_h = Nu = 0.87 Re_i^{0.62} * Pr^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

- Se Desprecia los cambios de viscosidad en las paredes del serpentín

$$Pr = \frac{c_p * \mu_b}{k_{fb}}$$

$$Pr = \frac{(4086 \frac{J}{kg^{\circ}C}) * (0.0013 \frac{kg}{ms})}{0.58 \frac{W}{m^{\circ}C}}$$

$$Pr = 9.1583$$

$$c_{p,cerveza}@20^{\circ}C = 4086 [\frac{J}{kg^{\circ}C}]$$

$$K_{fb,cerveza}@20^{\circ}C = 0.58 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$Nu = 0.87(3.5 \times 10^4)^{0.62} * (9.15)^{0.33}$$

$$Nu = 1186.07$$

$$h_h = \frac{Nu * K_{fb}}{D}$$

$$h_h = \frac{1186.07 * 0.58 \frac{W}{m^{\circ}C}}{0.4m}$$

$$h_h = 1719.8 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Coeficiente global para la transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{hf}} + \frac{1}{h_h} + \frac{B}{k} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_{cf}}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1719.8 \frac{W}{m^2 \cdot C}} + \frac{0.0017}{15 \frac{W}{m^2 \cdot C}} + \frac{1}{14000 \frac{W}{m^2 \cdot C}} + \frac{1}{8500 \frac{W}{m^2 \cdot C}}$$

$$\frac{1}{U} = 8.8387 \times 10^{-4} \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$U = 1131.39 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Área de transferencia de calor:

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T_a$$

$$A = \frac{Q}{U * \left[ \frac{2T_f - (T_1 - T_2)}{2} \right]}$$

$$A = \frac{177.5 \text{ W}}{11 * \left[ \frac{2T_f - (T_1 - T_2)}{2} \right]}$$

$$A = \frac{177.5 \text{ W}}{1131.39 \frac{W}{m^2 \cdot C} * \left[ \frac{2(20^\circ C) - (13 + 21)^\circ C}{2} \right]}$$

$$A = 0.0523 m^2$$

Longitud teórica del serpentín helicoidal de enfriamiento:

$$A = \pi * \phi_{out} * L$$

$$L = \frac{0.0523 m^2}{\pi(0.013 m)}$$

$$L = 1.28 m$$

Distancia del serpentín al fondo del tanque:

$$h_z = 0.15 * D$$

$$h_z = 0.15 * (40.32 \text{ cm})$$

$$\mathbf{h_z = 6.048 \text{ cm}}$$

Altura del serpentín:

$$h_s = 0.65 * H$$

$$h_s = 0.65 * (60.34 \text{ cm})$$

$$\mathbf{h_s = 39.22 \text{ cm}}$$

Diámetro de la hélice:

$$d_H = 0.75 * D$$

$$d_H = 0.75 * (40.32 \text{ cm})$$

$$\mathbf{d_H = 30.24 \text{ cm}}$$

Paso:

$$P = 1.5 * \phi_{out}$$

$$P = 1.5 * 1.27 \text{ cm}$$

$$\mathbf{P = 1.9 \text{ cm}}$$

Número teórico de vueltas:

$$\#N = \frac{L}{\sqrt{\left(2\pi * \frac{d_H}{2}\right)^2 + P^2}}$$

$$\#N = \frac{1.27 \text{ m}}{\sqrt{\left(2\pi * \frac{0.3 \text{ m}}{2}\right)^2 + (0.019 \text{ m})^2}}$$

$$\mathbf{\#N = 1.3 \text{ vueltas}}$$

## Anexo 5

### Figura 10

*Producto terminado cerveza 330ml*



*Nota:* Se muestra el producto correctamente envasado en una botella de color ámbar con un volumen de 330ml.

### Figura 11

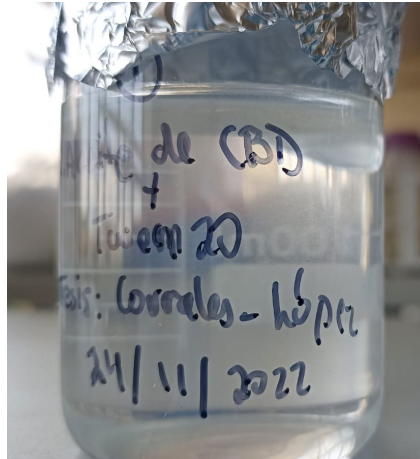
*Control de temperatura del agua.*



*Nota:* Se muestra el control de temperatura en el proceso utilizando un multímetro o tester.

**Figura 12**

*Prueba de la mezcla del emulsificante y aceite de CBD*



*Nota:* Se muestra una prueba del proceso de emulsificación del Aceite de CBD con el agente emulsionante.

**Figura 13**

*Maceración de la malta*



*Nota:* Se muestra la ejecución del proceso de macerado.

### **Figura 14**

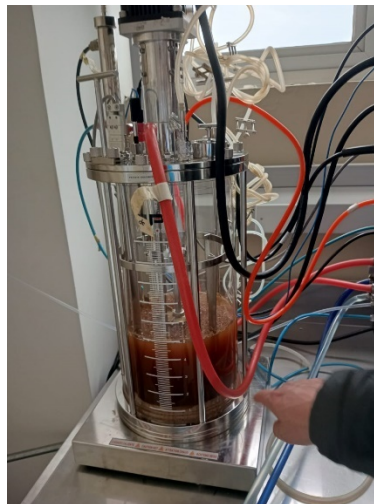
*Activación de la levadura*



*Nota:* Se muestra el desarrollo de la activación de la levadura y su homogeneización en un matraz Erlenmeyer.

### **Figura 15**

*Fermentación en el Biorreactor*



*Nota:* Se muestra el proceso de fermentación alcohólica en el biorreactor.