

DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA CON CANNABIDIOL A ESCALA PILOTO

DESIGN OF A BEER PRODUCTION PROCESS WITH CANNABIDIOL ON A PILOT SCALE

Daniel Cabrera Valle ^{1*}

¹ Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6685-4178>. Correo: da.cabrera@uta.edu.ec

Joseph López Benavides ²

² Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6248-0753>. Correo: jusepe-15tkd1@hotmail.com

Joao Corrales Freire ³

³ Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3988-5622>. Correo: joao.corrales@outlook.es

* Autor para correspondencia: da.cabrera@uta.edu.ec

Resumen

En la ingeniería de procesos, el estudio de la transformación de la materia a través de operaciones específicas permite la elaboración de productos de origen biotecnológico con un interés social novedoso. Por ello, el principal objetivo de esta investigación fue diseñar un proceso para la producción de cerveza con cannabidiol a escala piloto. El desarrollo metódico subsecuente se basó en la elaboración de un lote de 5 litros a escala de laboratorio, en donde se recopilaban datos mediante balances de materia y energía. Se escaló el proceso y se diseñó el diagrama de bloques y de flujo de proceso (BFD y PFD), además de una caracterización fisicoquímica y microbiológica del producto. Los resultados permitieron comprender las condiciones de operación del biorreactor, determinando el pH y temperatura óptimos. También, la caracterización fisicoquímica y microbiológica mostró valores normales según las normas INEN y AOAC de elaboración de cerveza, con excepción de la acidez total y mesófilos aerobios. Se evidenciaron las características y propiedades de la cerveza deseada al final del proceso, a la par de una correcta estructuración del proceso por medio de los datos obtenidos.

Palabras clave: Cerveza; cannabidiol; fermentación; diagrama BFD; diagrama PFD

Abstract

In process engineering, matter transformation study through specific operations allows the elaboration of novel social interest biotechnological products. Therefore, the main objective of this research was to design a pilot scale beer production process with cannabidiol. The subsequent methodical development was based on the preparation of a 5-liter laboratory scale batch, where data was collected through material and energy balances. The process was scaled, and the block and process flow diagram (BFD and PFD) was designed, as well as a physicochemical and microbiological characterization of the product. The results allowed us to understand the operating conditions of the bioreactor, determining the optimum pH and temperature. Also, the physicochemical and microbiological characterization showed normal values according to the INEN and AOAC standards for brewing, except for total acidity and aerobic mesophiles. At the end of the process, the characteristics and properties of the desired beer were evidenced, along with a correct structuring of the process through the data obtained.

Keywords: Beer; cannabidiol; fermentation; BFD diagram; PFD diagram

Fecha de recibido: 22/06/2023

Fecha de aceptado: 30/08/2023

Fecha de publicado: 04/10/2023

Introducción

El origen histórico de la cerveza se encuentra intrínsecamente ligado al desarrollo evolutivo de la actividad agrícola. Este proceso evolutivo se caracterizó por la convergencia de prácticas relacionadas con la manipulación de granos, lo que eventualmente condujo al descubrimiento de la técnica de amalgamar granos con agua y levadura de pan, dando lugar a la creación de una sustancia fermentada con propiedades alcohólicas (Steward et al., 2018). Hoy en día, el proceso de fabricación de cerveza se ha vuelto un proceso sumamente sofisticado y diversificado, involucrando una amalgama de diversas materias primas que convergen en su elaboración. Entre estas materias primas, las principales que conforman la base de su preparación son las maltas, lúpulos, levadura y agua, todas ellas desempeñando roles esenciales en la estructura y el perfil organoléptico final de esta apreciada bebida (Kok et al., 2019). Este proceso de elaboración, que ha evolucionado a lo largo del tiempo, refleja una simbiosis entre conocimientos ancestrales y avances tecnológicos contemporáneos, culminando en la diversidad y calidad de cervezas que en la actualidad enriquecen la cultura gastronómica global.

En el contexto contemporáneo, el proceso de manufactura de la cerveza se despliega en cinco etapas cardinales, donde las materias primas son sometidas a rigurosas manipulaciones, guiadas por criterios específicos, con el objetivo de obtener una cerveza de calidad excepcional. La etapa inicial, denominada molienda, se instaura mediante una acción de trituración parcial ejercida sobre el grano, propiciando su exposición a transformaciones posteriores (Shopska et al., 2022). Subsiguientemente, emerge la etapa de

maceración, en la que el almidón contenido en el grano es liberado y posteriormente sometido a un calentamiento sostenido a una temperatura constante, favoreciendo la conversión enzimática (Koller & Perkins, 2022). En una progresión secuencial, la etapa de cocción toma preeminencia, con su cometido centrado en la intensificación de los azúcares presentes en el extracto y la incorporación estratégica de lúpulos que infunden perfiles aromáticos y amargos distintivos. Consecuentemente, la etapa de fermentación se materializa, en la que las levaduras, actuando como agentes catalizadores, convierten los azúcares resultantes en etanol, liberando dióxido de carbono, proceso que da fundamento a la carbonatación deseada. En última instancia, el proceso culmina con la etapa de maduración, en la que la cerveza es sometida a una segunda fermentación, con el propósito de amplificar y afinar sus propiedades organolépticas, generando un producto final que refleja la síntesis de las decisiones y acciones previas (Mosher & Trantham, 2021). Este ciclo de etapas, delineado por una cohesión meticulosa entre procesos tradicionales y avances tecnológicos, otorga vida a la diversidad de cervezas contemporáneas, enriqueciendo el panorama gustativo y cultural a nivel global.

Por otro lado, el escalado de un proceso permite maximizar los rendimientos y conocer puntos críticos para tener una producción eficiente. Por lo tanto, es necesario obtener la mayor cantidad de información aplicando múltiples criterios que se relacionan a las distintas escalas y modelo que se pretenda alcanzar (Ruiz & Álvarez, 2011). Bajo esta premisa se utilizan principios de semejanza, los cuales son conceptos que determinan varias variables de diseño como la forma de los sistemas, flujos, concentración, temperatura, etc. Se consideran 4 principios para aplicaciones de ingeniería: Geométricos, mecánicos, térmicos, químicos (Doran, 2012). De la misma manera, las etapas que componen el proceso son útiles para describir las actividades realizadas en una línea de producción, resultando imperativo esquematizar y añadir información referente a cada operación y sus condiciones. En consecuencia, es necesario esbozar diagramas para esquematizar las actividades o acciones que se llevan a cabo dentro de un proceso en análisis, plasmando en diagramas la información recabada. Para ello, existen varios tipos de diagramas desde los más simples hasta los más complejos, su nomenclatura ya está estandarizada por normas y existen formatos que se pueden utilizar para representar un diseño. Los tipos de diagramas más comunes son los diagramas de flujo de bloques (BFD) y de procesos (PFD) (Amantayeva et al., 2021).

De acuerdo con Arroyo-Iluen (2019), la cerveza al ser un producto de origen biotecnológico representa una fuente directa de estudio y de alto consumo. Además, existe una gran diversidad de materias primas que se pueden aprovechar como es el caso de las propiedades analgésicas del cannabidiol (CBD). La cerveza potenciada por este cannabinoide no psicoactivo resulta ser un producto de alto consumo debido a las propiedades otorgadas por el CBD. Por lo antes mencionado se propone desarrollar un proceso de producción de cerveza artesanal con CBD específico para 50 litros que corresponde a una escala piloto. Para ello se propone una metodología teórico-práctica donde se extraerán datos necesarios al elaborar un lote de 5 litros de cerveza. Se utilizarán principios fisicoquímicos para establecer un proceso de escalado, se compararán con referencias y normativas para avalar la calidad del producto y se diseñará el proceso por medio de diagramas BFD y PFD.

Materiales y métodos

Brewing

Se rompió parcialmente los granos de malta pale Ale, Viking Munich light y cara Munich II; se mezclan las tres maltas (Hughes, 2019). La malta molida se trasvasó a una olla de acero inoxidable de 20 L de capacidad y se añadió agua a 72°C. Se homogeneizar y reposar la mezcla durante aproximadamente 90 minutos, mantener la temperatura cercana a 65°C (Mason et al., 2016). Filtrar la solución en tela de lino y se trasvasar a una olla. Se preparó una solución de ácido peracético al 0.3(% p/p) para sanitizar los utensilios de laboratorio (Ocampo et al., 2022).

El mosto dulce filtrado se pasó a una olla de 10 L de capacidad y se lo llevó a ebullición. Se añadió el lúpulo en dos fases. Primero se colocó 20 g de lúpulo cascade dejándolo reposar desde ebullición del mosto. Después, se añade 15 g de lúpulo residual durante el tiempo restante de la cocción (Mason et al., 2016). Se prepara un baño térmico con agua fría para bajar la temperatura del mosto hasta los 23°C. Previo a la fermentación, se esterilizó el biorreactor de 10 L y todos sus implementos en un autoclave. 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 con una solución de sulfato cúprico. Se configuró el equipo a una temperatura de 20°C y se fermento por 9 días (Spevacek et al., 2016). Se preparó una emulsión a una relación de 1:1 de aceite comercial de CBD y Tween-20. Se colocó la emulsión en un recipiente adecuado para la maduración y se trasvasó la solución resultante del biorreactor (Jelínek et al., 2022). Se dejó reposar la cerveza por 8 días a 4°C posteriores a la fermentación (Aroh, 2019)

Caracterización fisicoquímica y microbiológica

Ensayos fisicoquímicos

Los parámetros y protocolos utilizados se basaron en normativas INEN referentes a bebidas alcohólicas con mención a cerveza (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). Se determinó el grado alcohólico (% v/v), la acidez total (% p/p), el pH y los sólidos solubles (mg/dm³).

Ensayos microbiológicos

Se aplicaron protocolos basados en la normativa INEN correspondiente al recuento de microorganismos aerobios, mohos y levaduras (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013).

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

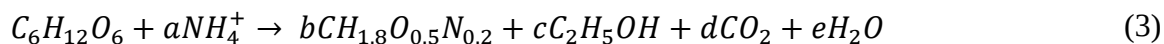
Se aplicaron balances de masa para estimar las cantidades de materia prima necesarias para una producción de 50 L de cerveza a partir de un lote de 5 L producido en el laboratorio. Se llevaron a cabo a partir de los datos obtenidos del proceso a escala de laboratorio mediante la aplicación de la ecuación 1 en estado estacionario sin reacción química (Fito et al., 2020).

$$\text{entrada} = \text{salida} \quad (1)$$

Para determinar los requerimientos energéticos del intercambiador de calor para enfriar el mosto se aplicó la Ecuación 2 (Cengel et al., 2019).

$$Q_{mosto} = m * c_p * \Delta T \quad (2)$$

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



Donde a, b, c y d corresponden a los coeficientes estequiométricos.

Las Ecuaciones 4, 5 y 6 permitieron calcular cada uno de los coeficientes estequiométricos según lo establecido por Felder et al., (2016).

$$Y_{x/s} = \frac{m_{biomasa}}{m_{glucosa}} \quad (4)$$

$$Y_{x/s} = \frac{b * PM_{biomasa}}{PM_{glucosa}} \quad (5)$$

$$b = \frac{Y_{x/s} * PM_{glucosa}}{PM_{biomasa}} \quad (6)$$

Se aplicaron balances de materia de cada una de las especies atómicas determinando los coeficientes estequiométricos restantes. Además, el calor producido por la reacción se calculó a partir de un balance de energía para sistemas reactivos (Ecuación 7) (Himmelblau & Riggs, 2022).

$$-\Delta H_{rxn} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0 \quad (7)$$

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 8.

$$\Delta \hat{H}_r^\circ = \sum_i m_i \Delta \hat{H}_{fi}^\circ = \sum_{productos} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^\circ - \sum_{reactivos} m_i * \Delta \hat{H}_{fi}^\circ \quad (8)$$

Para escalar cada una de las corrientes involucradas en el proceso se utilizó un factor de escala, Ecuación 9.

$$Factor\ de\ escalado = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Cantidad\ final}{Cantidad\ inicial} \quad (9)$$

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 utilizando las corrientes escaladas.

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. 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).

Resultados y discusión

Condiciones de operación de un biorreactor a escala de laboratorio

Tabla 1. 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 del medio		20°C
Altura		43 cm
Diámetro del tanque		20.5 cm
Altura Mojada		32.5 cm
Fondo		Plano
Tapa		Plano

Tabla 2. Datos obtenidos del proceso de producción de 5 L de cerveza.

Parámetro	Valor	Tipo
Agua para maceración	8.04 L	Experimental
Mosto dulce	10.73 kg	Experimental
pH mosto	5	Experimental
Desechos sólidos	3.34 kg	Experimental
Mosto dulce filtrado	7 L	Experimental
Mosto lúpulado	5 L	Experimental
Cp mosto	3.768 kJ/kg*°C	Bibliográfico
Agua de enfriamiento del intercambiador de calor	21 L	Experimental
Cerveza	5 L	Experimental
Cp cerveza	4.190 kJ/kg°C	Bibliográfico

Tabla 3. Productos generados en la fermentación de 5L de cerveza.

Parámetro	Cantidad
Biomasa	137.17g
CO ₂	286.14g
Etanol	399.01g
Agua	81.77g
Calor desprendido en la reacción (Q)	617.56 kJ
Agua de enfriamiento en el biorreactor	6 L/batch

Tabla 4. 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 ³	1,0035	INEN 349
Extracto seco, Gravimetría	%	8,52	Ref.: AOAC 925.09 Ed. 21.2019

Tabla 5. Parámetros microbiológicos caracterizados.

Ensayo	Unidades	Resultado	Método utilizado
Aerobios Mesófilos, Petrifilm	UFC/g	1,4x10 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	3x10 ³ (e)	PE-02-7 2-MB AOAC 997.02. Ed. 21,2019

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

Tabla 6. Caracterización del contenido de CBD en la cerveza.

Parámetros	Resultado	Método de ensayo
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

La caracterización del contenido de CBD en la cerveza de la tabla 6 solo analizó un único parámetro, en este caso el cannabidiol.

Tabla 7. Datos obtenidos del proceso de producción de 50 L de cerveza

Parámetro	Valor	Tipo
Malta	28.36 kg	Experimental
Agua para maceración	82.21 L	Experimental
Mosto Dulce	102.93 L	Experimental
Desechos sólidos	34.58 kg	Experimental
Mosto dulce filtrado	70.88 L	Experimental
Lúpulo	0.36 L	Experimental
Levadura	0.05 kg	Experimental
Mosto lupulado	50.63 kg	Experimental
Agua de enfriamiento del intercambiador de calor	217.35 kg	Experimental
Cerveza	50 L	Experimental

Tabla 8. Productos generados en la fermentación de 50 L de cerveza.

Parámetro	Cantidad
Biomasa	1.25 kg
CO ₂	2.96 kg
Etanol	4.13 kg
Agua	0.85 kg
Calor desprendido en la reacción (Q)	6390.34 kJ
Agua de enfriamiento en el biorreactor	191 L/batch

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

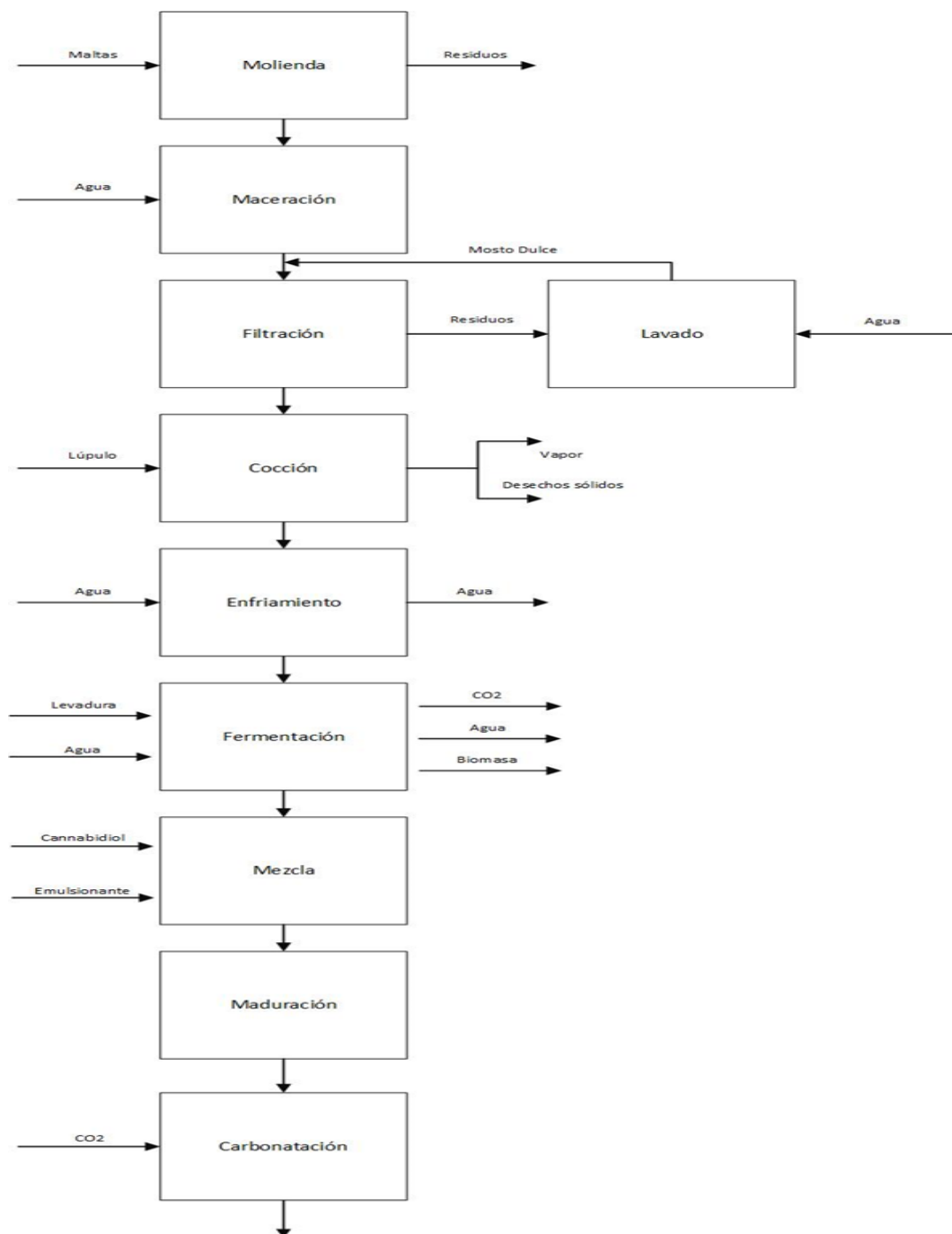


Figura 5. Diagrama BFD del proceso de producción de cerveza

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

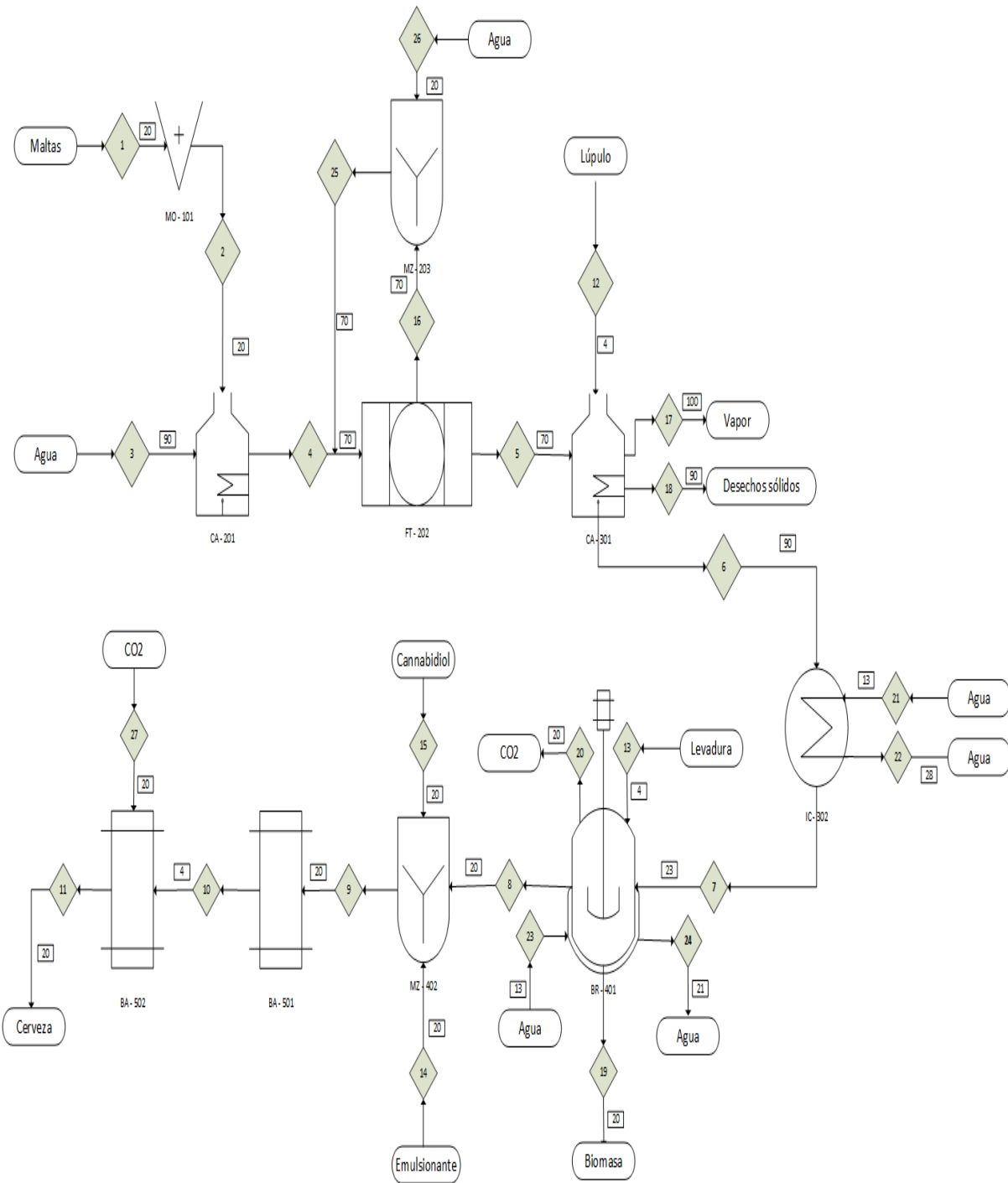


Figura 6: Diagrama PFD del proceso de producción de cerveza.

Las condiciones de operación del biorreactor, datos del proceso de producción y productos generados obtenidos fueron recopiladas en la Tabla 1, 2 y 3 de acuerdo con los parámetros definidos para el proceso de fermentación. Según Noriega et al., (2020), un reactor batch es un reactor intermitente utilizado para distintas operaciones en una escala definida. Por eso, se definió un volumen de trabajo de 5 litros para la obtención de datos en esta etapa. 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).

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 lo es su pared estacionaria (Venkateshan, 2021).

La Tabla 4 muestra los resultados correspondientes a los análisis fisicoquímicos, 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).

De acuerdo con Skogg et al., (2019), Los parámetros de sólidos solubles (°Bx) turbidimétricos 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 la alta concentración de biomasa y los productos del proceso de elaboración de la cerveza en el medio. Por otro lado, en el parámetro de extracto seco se obtuvo un resultado de 8,52% y se evidencio que corresponde al rango de cerveza liviana entre 5% a 9% establecido en la norma NTE INEN 2262. A su vez, el extracto seco constituye un criterio de calidad, porque 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 porque no se adiciono minerales en la preparación del lote de cerveza (Mendoza et al., 2022).

En la Tabla 5 se observa un resultado de $1,4 \times 10^5$ UFC/g de aerobios mesófilos corresponde a un rango alto de concentración para una fermentación, 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 de mohos se mantiene dentro del rango de especificación. Sin embargo, el valor de las 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).

En el presente proyecto se utilizó CBD como extracto diluido en aceite de oliva al 5%. Por ende, los resultados de la tabla 6 no reflejan datos para el resto de cannabinoides. 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 Food Standards Agency (2022).

Los resultados estequiométricos para el proceso a escala de laboratorio y escala piloto se muestran en las Tablas 2, 3, 7 y 8 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. 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).

Los productos estequiométricos de la fermentación de 50 L de cerveza se muestran en la Tabla 8, tomando en cuenta una eficiencia de conversión de producto en sustrato del 85%. 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, Según Hough (2017), el bagazo resultante de la fermentación contiene, de media en peso seco de 11.6% de azúcares remanentes que se pueden aprovechar, por eso se añadió una etapa de recirculado al final del proceso de filtrado para aprovechar al máximo los azúcares fermentables residuales de los desechos sólidos.

El diagrama BFD en la figura 1 se esquematizó las operaciones unitarias y las líneas de flujo del proceso, estandarizando un proceso para obtener cerveza con CBD a escala piloto, 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). Por otro lado, el diagrama PFD en la figura 2 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. Así como las corrientes de flujo principales y de subproductos, también detalla información acerca de la temperatura de las corrientes, 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. 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. 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.

Conclusiones

La caracterización fisicoquímica y microbiológica de la cerveza 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.

Referencias

- 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>
- Arroyo-Illuen, J. (2019). Diseño De Un Proceso De Producción De Cerveza Artesanal De Maracuyá. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4098/ING_630.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Balaji, C., Srinivasan, B., & Gedupudi, S. (2021). Chapter 7 - Heat exchangers. In *Heat Transfer Engineering*.
- Bouatenin, K. M. J. P., Kouamé, K. A., Gueu-Kehi, M. E., Djéni, N. T., & Djé, 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>
- Carvajal, L., & Insuati, M. (2020). Elaboración de Cerveza Artesanal Utilizando Cebada (*Hordeum vulgare*) y Yuca (*Manihot Esculenta* Crantz). http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/558/1/03_AGI_256_TESIS.pdf
- 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
- 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>
- Doran, P. (2012). *Bioprocess Engineering Principles* (2nd ed.). Elsevier.
- Ecuador. Expreso. (2023). Junio de 2023 cerró con un aumento del empleo informal en Ecuador. <https://www.expreso.ec/actualidad/economia/junio-2023-cerro-aumento-informal-ecuador-167721.html>

- 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.
- Himmelblau, D., & Riggs, J. (2022). Basic principles and calculations in chemical engineering (9th ed.). Pearson.
- Hughes, G. (2019). Home brew beer: master the art of brewing your own beer (1st ed.). Dorling Kindersley Ltd.
- INEN. (2023). Dirección Técnica de Validación y Certificación – Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. <https://www.normalizacion.gob.ec/direccion-tecnica-de-validacion-y-certificacion/>
- 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., & Šoos, 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>
- 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>
- Lv, P. J., Qiang, S., Liu, L., Hu, C. Y., & Meng, Y. H. (2020). Dissolved-oxygen feedback control fermentation for enhancing β -carotene in engineered *Yarrowia lipolytica*. Scientific Reports, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74074-0>
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- Ruiz, Á. A., & Álvarez, H. (2011). Escalamiento de procesos químicos y bioquímicos basado en un modelo fenomenológico. *Información Tecnológica*, 22(6), 33–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000600005>
- 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., 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>
- 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>

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