

Diseño, análisis y simulación de un sistema de enfriamiento de mosto para fabricación de cerveza artesanal empleando SolidWorks

Design, analysis and simulation of a cooling system in the craft beer brewing process using Solidworks

Vicente López Ramírez ^a, José L. Rodríguez Muñoz ^b, Ventura Rodríguez Lugo ^c, Carlos E. Borja Soto ^d, Jorge Zuno Silva ^e, Jean F. Ituna Yudonago ^f

Abstract:

The cooling process of the wort is one of the fundamental stages in the production of craft beer. Determining the optimal conditions will help reduce issues with unwanted bacteria during the fermentation of the beer, maintain a pleasant flavor for the user, as well as excellent quality in the product. This is why the present work aims to design and analyze a helical cooler for the craft beer brewing process using SolidWorks software. The effect of the number of turns, the diameter of the coil, and the height of the cooler on the temperature distribution and heat transfer rate is investigated under three different mass flow rate (0.01 kg/s, 0.02 kg/s y 0.03 kg/s). The results obtained show that the geometric parameters of the chiller do not contribute significantly to the cooling rate, although flow rate is the main parameter to control to achieve optimal operating conditions. Finally, when the wort enters through the bottom of the coil, a higher cooling rate is achieved, with a difference of 7K, compared to the system cooling from the top. Increasing the number of coils and the diameter of the chiller results in faster cooling, which is greater at high mass flow rates.

Keywords:

Beer, production, cooling process, Helical coil, simulation.

Resumen:

El proceso de enfriamiento del mosto es una de las etapas fundamentales en la producción de cerveza artesanal. Determinar las condiciones óptimas, permitirá reducir los problemas de bacterias no deseadas durante la fermentación de la cerveza, mantener un sabor agradable para el usuario, así como una excelente calidad en la misma. Es por ello que el presente trabajo se realiza el diseño y análisis de un enfriador helicoidal para el proceso de elaboración de cerveza artesanal empleando el software SolidWorks. El efecto del número de vueltas, el diámetro de la bobina y la altura del enfriador sobre la distribución de temperatura y la rapidez de transferencia de calor son investigados y comparados a tres diferentes valores de flujo másico (0.01 kg/s, 0.02 kg/s y 0.03 kg/s). Los resultados obtenidos muestran que los parámetros geométricos del enfriador no contribuyen en gran medida en la velocidad de enfriamiento, aunque la cantidad de flujo másico es un principal parámetro a controlar para alcanzar las óptimas condiciones de operación. Finalmente, cuando el mosto ingresa por la parte inferior del serpentín, se logran una mayor velocidad de enfriamiento, con una diferencia de 7K, esto en comparación con el sistema enfriándose por la parte superior. El incremento del número de espiras y el diámetro del enfriador produce un enfriamiento más rápido, siendo este mayor a altos flujos másicos.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-3463-1593>, Email: lo465484@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | México, <https://orcid.org/0000-0001-8767-032X>, Email: venturar165@gmail.com

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^f Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo | Departamento de Ingeniería en Aeronáutica | Tolcayuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5766-3644>, Email: jituna@upmh.edu.mx

Palabras Clave:*Cerveza, producción, proceso de enfriamiento, enfriador helicoidal, simulación*

Introducción

En la actualidad la producción de cerveza artesanal se ha vuelto un proceso cada vez más común dentro del territorio nacional. Este proceso generalmente se realiza de forma manual, donde el éxito o fracaso depende principalmente de la persona que opere el sistema. Uno de los subprocesos más importantes durante el proceso de elaboración de cerveza es el de enfriamiento del mosto (líquido extraído del proceso de remojo de malta durante el proceso de fabricación de la cerveza), debido a que en él se determinará la calidad del producto final. Esta etapa usualmente se ve afectada por la falta de una medición exacta en sus parámetros de operación, que pueden contribuir en gran medida a generar gastos excesivos e innecesarios tanto de agua como de energía. Según Gabelman 2022, la fermentación es la transformación química de una sustancia en otra mediante la acción de enzimas producidas por microorganismos, las cuales son muy importantes para una buena calidad de la cerveza.

Para el control de calidad de la cerveza, Dazzarola et al. (2026) desarrollaron un modelo digital que integra datos de procesos industriales y un descriptor de fermentación basado en modelos que ayuda a optimizar su proceso de producción y la calidad de la cerveza. Otros trabajos como los estudiados por Ji et al. (2023) y Zamudio Lara et al. (2022) analizaron el proceso de fermentación del vino y la cerveza mostrando un profundo análisis para el procesamiento, técnicas de control y estrategias de optimización para obtener una buena calidad.

Una de las principales alternativas para garantizar una buena calidad y evitar la formación de bacterias en el producto, es llevar a cabo un adecuado control de temperatura durante el proceso de enfriamiento. En este sentido, el tipo de intercambiador de calor y la rapidez de enfriamiento juegan un papel importante durante la producción de cerveza artesanal.

Dentro la literatura se pueden encontrar varios trabajos que abordan esta problemática. Por ejemplo, Salas Martínez (2014) se enfocó en el enfriamiento de mosto en una planta de alcohol de una empresa agroindustrial con el objetivo de reducir el tiempo de enfriamiento, reducir las pérdidas de alcohol e incrementar la capacidad de producción del mosto.

Para analizar el proceso de enfriamiento del mosto, el autor utilizó un método de enfriamiento forzado empleando agua fría y desarrolló un algoritmo que

permite realizar el cálculo adecuado de las condiciones de operación del sistema. También, realizó un balance adecuado del tanque donde se almacena el mosto para determinar la adecuada temperatura durante el proceso de producción del mismo y se dimensionó el intercambiador de calor de placas, las dimensiones de las tuberías para el fluido de agua y las dimensiones del soporte del sistema de enfriamiento.

Por su parte, Castro Castillo, 2019 presentó el análisis sobre el dimensionamiento y selección de un sistema de enfriamiento por convección forzada de mosto por agua empleando balances de masa y energía para una destiladora de alcohol. Sus resultados mostraron que para 22,000 litros de mosto se requiere una carga térmica de enfriamiento de 125 kW y una superficie de intercambio de calor de 5 metros cuadrados. Por medio de un controlador PID se pudo mantener un control automático de la temperatura del mosto, concluyendo que esta opción mejora la calidad del producto y puede ser una opción viable desde el punto de vista técnico y económico.

Sheeba et al. (2019) realizaron un estudio numérico y experimental de un intercambiador de calor helicoidal con doble tubo en que evaluaron la transferencia de calor y las características de flujo y los resultados se compararon con los de un intercambiador de calor de tubo recto. Derivado de su estudio, los autores concluyeron que el intercambiador de tipo helicoidal es significativamente afectado por el Número de Dean y la torsión, concluyendo que el coeficiente global de transferencia de calor es influenciado con la torsión del intercambiador de calor y la caída de presión resultó ser mayor en el tubo helicoidal en comparación con el tubo recto. Miller y Block (2020) se centraron en el análisis de intercambiadores de calor helicoidales y de placas para el enfriamiento de cerveza después de la fermentación. Para modelar la transferencia de calor en los intercambiadores de calor y comparar su rendimiento energético emplearon CFX, encontrando que los intercambiadores helicoidales son ideales para mantener temperaturas constantes y evitar el choque térmico, lo cual es crucial para conservar las características organolépticas de la cerveza.

Regatto del Pezo (2017) presentó un sistema de control y monitoreo durante el proceso de enfriamiento de cerveza artesanal, con el objetivo de medir la cantidad de agua que se consume en el sistema, así como la cantidad de energía consumida. Al controlar las condiciones de operación del sistema de enfriamiento de cerveza, se

puede reducir el consumo de agua en un 90% y la energía suministrada en un 28%, concluyendo que su instrumentación y control puede ser una gran herramienta para monitorear y controlar en tiempo real las condiciones de operación del sistema. Quiroga Gaona (2020) implementó un sistema de control automatizado para el proceso de enfriamiento de mosto en la cerveza artesanal, mediante dispositivos electrónicos industriales, que permiten controlar la temperatura y optimizar recursos hídricos. Los autores emplearon una red industrial para la interconexión del sistema de control, con variador de frecuencia, actuadores, así como una interfaz hombre máquina (HMI) con sensor de temperatura que permiten monitorear la temperatura del enfriador de mosto, el arranque del sistema, así como estabilización y control del motor para el enfriamiento del mosto.

Derivado de su estudio, los autores concluyeron que el proceso de automatización permite controlar la temperatura del mosto, hasta lograr la temperatura adecuada para la colocación de levadura y fermentación, elevando así el nivel de eficiencia del sistema y productividad en la elaboración de cerveza artesanal. Villanueva y Abdale (2016) diseñó e implementó un prototipo de un sistema de monitoreo y control para variables fundamentales en la producción de cerveza artesanal, en el que estudió sus características y el modo de funcionamiento. Además, evaluó las alternativas de diseño de hardware y software para el sistema de monitoreo y control especificando los sensores, actuadores y microcontroladores que permitieron obtener una interfaz en la que el usuario pueda manipular durante el proceso de elaboración de cerveza.

Buscando alternativas para el monitoreo y control de temperatura en un sistema de enfriamiento, Lanchimba Ruiz, Narváez Hernández, 2021 desarrollaron un sistema de control de temperatura para mejorar el proceso de fermentación de cerveza artesanal mediante un prototipo electrónico. El sistema controla y supervisa la temperatura dentro del proceso de fermentación de cerveza artesanal y así poder llevar a cabo un registro de los datos obtenidos para el análisis y evaluación del sistema, demostrando que el funcionamiento del prototipo en el control de temperatura desarrollado es crucial para determinar las condiciones de operación que permiten obtener la mejor calidad del producto.

Mientras Vaca Valverde, 2022 diseñó e implementó un equipo de maceración escalonada, cocción y enfriamiento para la creación de cerveza artesanal. Para ello, el autor realizó un estudio de las principales características y parámetros de operación que intervienen en los procesos de maceración, cocción y enfriamiento durante la elaboración de cerveza. Así mismo, diseñó la estructura física del prototipo para la ejecución de los subprocesos de maceración escalonada,

cocción y enfriamiento en un tanque común con el cual implementó un sistema eléctrico, así como la instrumentación y control del prototipo con capacidad de mando local y remoto.

Tul Tipán (2016) diseñaron un prototipo de sistema automatizado que permite la elaboración de cerveza artesanal, en el cual permitió controlar de forma automatizada los diferentes pasos en el proceso de fabricación de la cerveza artesanal.

Con base a la literatura revisada, es necesario contar con un control de temperatura para un enfriamiento rápido del mosto que permita reducir los problemas de bacterias no deseadas durante la fermentación de la cerveza y mantener un sabor agradable para el usuario, así como mantener una excelente calidad en la misma. Por tal motivo, el presente trabajo tiene como objetivo el análisis, diseño y simulación de un sistema de enfriamiento de mosto para fabricación de cerveza artesanal a pequeña escala empleando el software SolidWorks considerando diferentes variaciones geométricas y de operación.

Metodología

El intercambiador de calor para enfriamiento del mosto está constituido por un serpentín de tipo helicoidal como el mostrado en la Figura 1. Por el interior del tubo circula agua fría que se emplea para absorber parte de la energía del mosto contenido en un contenedor de acero inoxidable hasta alcanzar las condiciones adecuadas de (aproximadamente 90°C). Es importante mencionar que, durante el proceso de producción de cerveza artesanal, dos son las formas en las que se puede enfriar el mosto: 1) enfriamiento forzado (Figura 1a) y 2) enfriamiento libre o por gravedad (Figura 1b). En el enfriamiento forzado, una bomba se emplea para hacer circular el fluido frío por el interior del tubo del intercambiador de calor y el mosto se mantiene contenido en el recipiente, mientras que el enfriamiento por gravedad, se deja fluir el agua fría a través de un recipiente contenido a una altura mayor que el contenedor de mosto. Para controlar el flujo a través del intercambiador de calor en ambos sistemas de enfriamiento, una válvula de globo se utiliza para manipular esta condición y mantener las condiciones adecuadas de temperatura.

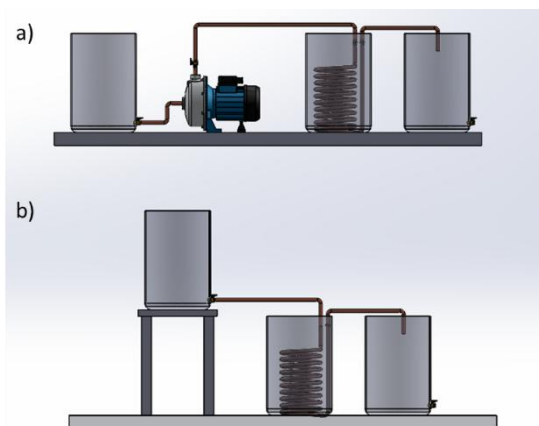


Figura 1. Tipos de formas de enfriamiento del mosto.
Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones fundamentales

Para el modelado y simulación del enfriador de mosto, es necesario aplicar las ecuaciones de continuidad, momento y energía, las cuales se describen a continuación:

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es una expresión matemática que describe la conservación de la masa en un flujo de un fluido, lo que significa que la masa total de fluido dentro de un sistema cerrado no se pierde ni se gana con el tiempo (Ecuación 1). Dicha expresión es fundamental en la dinámica de fluidos, ya que garantiza que la masa de un fluido se conserve a lo largo de su movimiento. Expresa que la masa de fluido que entra en una región de control debe ser igual a la masa que sale, en ausencia de fuentes o sumideros de masa.

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{v}$ es el vector de velocidad del fluido, ∇ es la divergencia del campo vectorial.

Ecuación de conservación de momento

La forma simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes, representa el principio de conservación del momento lineal en un fluido. La ecuación de conservación de momento se utiliza en la dinámica de fluidos y en muchos otros campos de la física e ingeniería. La ecuación 2 representa la ecuación de Navier-Stokes considerando la acción de fuerzas internas y externas.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

Es importante mencionar que la ecuación 2 se aplica principalmente en situaciones donde se necesita analizar el comportamiento del fluido bajo la acción de fuerzas internas (como la viscosidad) y externas (como la gravedad o la presión), donde ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{v}$ es el vector de velocidad del fluido, t es el tiempo, p es la presión del fluido, μ es la viscosidad del fluido y $\mathbf{f}$ representa las fuerzas externas o del cuerpo (por ejemplo, gravedad).

Ecuación de energía

La ecuación de conservación de la energía térmica describe cómo la energía térmica se distribuye y se conserva dentro de un fluido, considerando tanto la transferencia de calor como las transformaciones de energía. En dinámica de fluidos, esta ecuación es fundamental para entender y modelar el comportamiento térmico de un fluido en diversos procesos, dicha ecuación se describe a continuación:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + q \quad (3)$$

Donde, T es la temperatura del fluido, $\mathbf{v}$ es el vector de velocidad del fluido, k es la conductividad térmica, ρ es la densidad del fluido, c_p es la capacidad calorífica a presión constante, q es la tasa de generación de calor por unidad de volumen. Para evaluar el régimen de flujo que circula por el interior del tubo del enfriador del mosto, es necesario calcular el número de Reynolds, el cual se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (5)$$

Donde, u es la velocidad media del fluido en m/s, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad del fluido y D_h es el diámetro hidráulico del tubo (m).

Para el cálculo del diámetro hidráulico del tubo, la siguiente expresión es empleada:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (6)$$

Siendo A el área transversal y P el perímetro mojado.

En el presente trabajo, los valores iniciales de Re determinan si el flujo es laminar ($Re < 2300$), turbulento ($Re > 4000$) o de transición $2300 < Re < 4000$. Bajo las condiciones geométricas y de operación, se determinó que el flujo de mosto por el interior del tubo del intercambiador de calor es turbulento.

Para determinar el diámetro equivalente del enfriador, es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$D_{eq} = \frac{4V_f}{\pi D_t L} \quad (7)$$

Donde, V_f es el volumen de la carcasa (m^3), L es la longitud del enfriador (m), D_t es el diámetro del tubo del serpentín (m).

Desarrollo del modelo

El enfriador, es un componente empleado para reducir la temperatura dentro de cualquier proceso industrial. Hablando específicamente del proceso de elaboración de cerveza artesanal, este es el encargado de reducir la temperatura del mosto hasta alcanzar las condiciones que brinden buen sabor y calidad en la cerveza. En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del intercambiador de calor (enfriador) empleado para el enfriamiento del mosto.

Este consiste de un serpentín tipo helicoidal que puede ser fabricado de aluminio y/o cobre, en el cual fluye el agua a baja temperatura por el interior de los tubos, mientras el mosto está contenido en el recipiente. El proceso de transferencia de calor se lleva a cabo del fluido más caliente al fluido más frío, por lo que los medios de transferencia de calor que predominan este proceso es conducción y convección. Para llevar a cabo el enfriamiento del mosto, por la parte superior ingresa el fluido frío, el cual circula a través del serpentín del enfriador, absorbiendo energía del mosto y aumentando su temperatura hasta su salida por el sistema. Producto del proceso de intercambio de calor, la temperatura del mosto es reducida, hasta que se alcanzan las condiciones óptimas de operación ($T_m=5-20^\circ C$), para posteriormente ser enviado al proceso de fermentación, maduración, filtrado y después, realizar el envasado del producto.

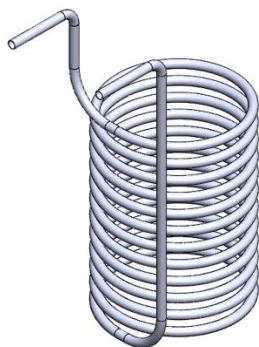


Figura 2. Intercambiador de calor helicoidal (serpentín) para enfriamiento del mosto. Fuente: Elaboración propia.

Diseño del enfriador

Para el diseño de un enfriador se debe considerar la capacidad de enfriamiento que permita enfriar el volumen de mosto en el tiempo deseado y se deben utilizar materiales que no afecten la calidad del mosto, tal es el caso del acero inoxidable, cobre, etc. Asimismo, el diseño debe minimizar el consumo de energía, considerando aspectos como el flujo del refrigerante y la superficie de intercambio de calor. En la Figura 3 se ilustra el esquema del enfriador empleado para la simulación y validación del mismo, el cual consiste de una altura de 10 in, un diámetro de 6 in, 10 vueltas de la espiral, así como un recipiente cuyas dimensiones son de 39 x 24 x 29 pulgadas. Para la simulación se consideró que el agua de enfriamiento ingresa por la parte superior del serpentín y sale por la parte inferior, mientras el fluido caliente se mantiene en el contenedor.

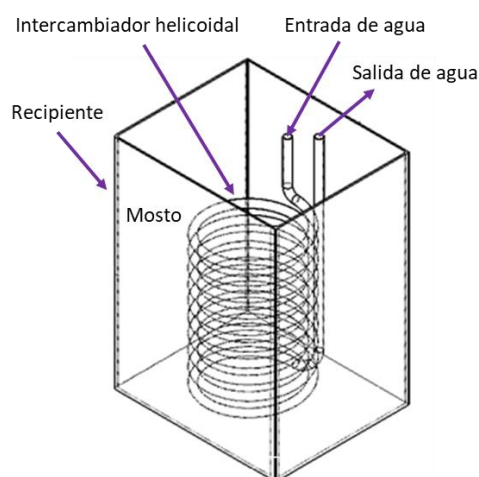


Figura 3. Enfriador helicoidal propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño del enfriador del mosto, fue necesario la utilización del software SolidWorks. Para esto, se realizaron los croquis de cada una de las piezas que conforman el sistema. Para la generación de la geometría del tubo, primeramente, se dibujó un círculo con un diámetro de 0.5 pulgadas, al cual se le dio un perfil mediante la opción de valor de torsión. Posteriormente, se elige la opción de revoluciones para determinar en la dirección uno el número de vueltas del enfriador ($N=10$).

Propiedades del fluido

Las propiedades del agua fría y caliente fueron obtenidas por medio del software Engineering Equation Solver (EES) a las condiciones de entrada y salida de $20^\circ C$ y $90^\circ C$, respectivamente. Las propiedades más relevantes de los fluidos empleados en el presente trabajo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del agua y mosto. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Fluido		
	Agua caliente	Agua fría	Mosto
ρ (kg/m ³)	998.2	965.3	967.02
C_p (J/Kg-K)	4183	4204	4212
K (W/m-K)	0.5861	0.6613	0.6751
μ (kgm/s)	0.00100	0.00314	0.000315

Las propiedades del mosto fueron obtenidas a partir de las correlaciones presentadas en el trabajo de Pérez-Colas et al. (2021), las cuales se describen a continuación:

Densidad

$$\rho = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2 \quad (7)$$

Al sustituir los valores de temperatura del mosto dentro de la ecuación 7, la densidad es calculada de la siguiente manera:

$$\rho = 997.18 + 0.0031439(90^\circ\text{C}) - 0.0037574(90^\circ\text{C})^2$$

$$\rho = 997.18 + 0.28295 - 30.43494$$

$$\rho = 967.02801 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Calor específico

$$C_p = 4.1762 - 9.08645 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2 \quad (8)$$

$$C_p = 4.1762 - 9.08645 \times 10^{-5}(90^\circ\text{C}) + 5.4731 \times 10^{-6}(90^\circ\text{C})^2$$

$$C_p = 4.1762 - 0.00817781 + 0.04430211$$

$$C_p = 42123243 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Conductividad térmica

$$k = 0.571 + 1.76 \times 10^{-3}T - 6.70 \times 10^{-6}T^2 \quad (9)$$

$$k = 0.571 + 1.76 \times 10^{-3}(90^\circ\text{C}) - 6.70 \times 10^{-6}(90^\circ\text{C})^2$$

$$k = 0.571 + 0.1584 - 0.05427$$

$$k = 0.67513 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Otra alternativa de calcular las propiedades del mosto, es empleando las correlaciones desarrolladas por Hoffman (2006).

Densidad

$$\rho = 1,569 \times 10^{-5} T^3 - 0,018774 T^2 + 6,7647 T + 233,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10)$$

$$\rho = 1,569 \times 10^{-5} (363.15 \text{ K})^3 - 0,018774 (363.15 \text{ K})^2 + 6,7647 (363.15 \text{ K}) + 233,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = 946.76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Calor específico

$$C_p = -1,5227 \times 10^{-4} (T)^3 + 0,16194 (T)^2 - 56,582 (T) + 10691 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_p = -1,5227 \times 10^{-4} (363.15)^3 + 0,16194 (363.15)^2 - 56,582 (363.15) + 10691 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_p = 4186.26 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica

$$k = -6.6628 \times 10^{-9} T^3 - 2,9149 \times 10^{-6} T^2 + 0,0051701 T - 0.49841 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (11)$$

$$= -6.6628 \times 10^{-9} (363.15 \text{ K})^3 - 2,9149 \times 10^{-6} (363.15 \text{ K})^2 + 0,0051701 (363.15 \text{ K}) - 0.49841 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$k = 0.6784 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Viscosidad dinámica

$$\mu = -2,9827 \times 10^{-9} T^3 + 3,0756 \times 10^{-6} T^2 - 0,0010615 T + 0,12302 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (12)$$

$$\mu = -2,9827 \times 10^{-9} (363.15 \text{ K})^3 + 3,0756 \times 10^{-6} (363.15 \text{ K})^2 - 0,0010615 (363.15 \text{ K}) + 0,12302 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu = 0.000315 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Para la realización del modelo, primeramente, se extruye el enfriador desde la parte inferior usando la cara plana del tubo para dibujar el recorrido que hará el tubo. Posteriormente, se dibujan dos líneas constructivas de 0.5511811in (1.4 cm) con un ángulo de 90° direccionando hacia la parte exterior del serpentín, para terminar con un círculo perimetral que se recorta en base a los dobleces del tubo. Posteriormente, se selecciona la pestaña de operaciones (Saliente/Base barrido) para extruir la pieza hasta la altura indicada (h=10 in= 25.4 cm).

El siguiente paso, es abrir la pestaña de Flow Simulation, contenida en el mismo software usando la opción Tools, después Create Lids, con la que pondrán tapones en cada uno de los externos del tubo. Asimismo, se usa la opción Wizard para ingresar las condiciones iniciales y de frontera en el modelo.

En la siguiente página se activa la opción de líquidos y se añade agua como fluido. Después se selecciona el tipo de materia del tubo, para el presente trabajo se empleará cobre. Para finalizar el modelado, es necesario definir los parámetros termodinámicos del fluido y del mosto, para el cual se estableció una temperatura de entrada del agua a 5°C y la temperatura del mosto se encuentra a 90°C. Para terminar, en la última sección llamada Mesh, se selecciona Global Mesh y se inicia el proceso de simulación usando el comando Run. Los resultados derivados de la simulación son mostrados en la Figura 4.

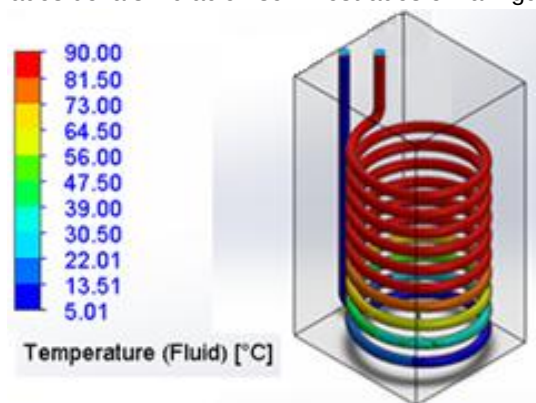


Figura 4. Resultados de la simulación en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

Validación del modelo

Para verificar que la simulación predice adecuadamente los resultados del estudio térmico del enfriador, este fue comparado con aquellos valores obtenidos por Mirgolbabaie (2010) bajo las mismas condiciones de operación. En la Figura 5 se ilustra el modelo empleado para la verificación del estudio térmico del enfriador, el cual consiste de un intercambiador tipo helicoidal, donde el fluido caliente circula por el interior de los tubos, mientras el fluido frío por la carcasa del intercambiador. Para la realización de la simulación en SolidWorks, se consideró una temperatura constante de 80°C y 20°C a la entrada del fluido a través del serpentín y de la carcasa, respectivamente, mientras el flujo másico de agua caliente (serpentín) y fría (carcasa) se consideró de 0.03 kg/s, y que ambos fluidos fluyen en contracorriente. En la Tabla 2 se ilustran las características geométricas empleadas para el análisis, diseño y simulación del enfriador, las cuales se encuentran en milímetros. Es importante mencionar que el agua fría entra al sistema por la parte inferior de la carcasa y el agua caliente por la parte superior del serpentín, mientras cobre fue empleado como material de diseño para el enfriador. Además, se consideró flujo laminar al ingreso por la carcasa, debido a

que el diámetro equivalente en esta superficie se supuso lo suficientemente pequeño.

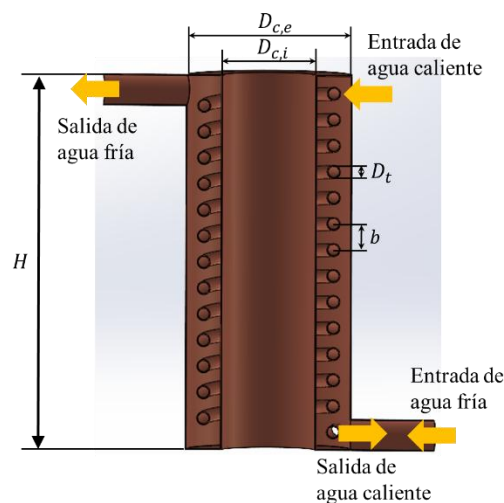


Figura 5. Diagrama esquemático del enfriador empleado para la validación. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Parámetros geométricos empleados en la validación. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$D_{c,e}$	160	b	25
$D_{c,i}$	90	H	360
D_t	12.5	L	70
N	13	D_{eq}	243.4

Los perfiles de distribución de temperatura a lo largo del enfriador, tanto para la simulación desarrollada por Mirgolbabaie (2010), así como para el presente estudio son mostrados en la Figura 6a y 6b, respectivamente. Los resultados muestran que la máxima temperatura de operación encontrada en ambas simulaciones es prácticamente muy similar, obteniendo un error relativo porcentual inferior al 1%. Así mismo, cuando los resultados se comparan a la más baja temperatura del enfriador, estos muestran una temperatura de 283 K para el estudio original, mientras que, para nuestro modelo, dicha temperatura fue de 292.62K, esto representa un error relativo porcentual del 3.93%, comprobando la exactitud de la simulación.

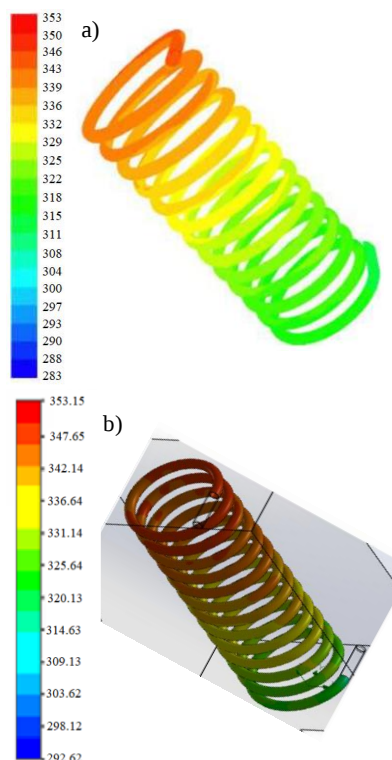


Figura 6. Comparativa de perfiles de temperatura del enfriador: a) Modelo de Mirgolbabaie (2010) y b) Presente estudio. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

En esta sección se presenta la comparativa del flujo másico, condiciones geométricas y de operación para el enfriador de mosto. En la Figura 7a se presenta la distribución de temperaturas considerando que la entrada de flujo se da por la parte superior del tubo, mientras en la Figura 7b se muestra la distribución de temperatura al ingresar el mosto por la parte inferior del intercambiador de calor. Para la simulación se consideró que el tubo del enfriador cuenta con un diámetro de 0.5 pulgadas, un espesor del tubo de 0.06 pulgadas, el diámetro de la hélice de 6.5 pulgadas, una altura de 12 pulgadas, así como un total de 10 vueltas en la bobina. También, se estableció que el fluido caliente circula por el interior del tubo, mientras el fluido frío se encuentra contenido en el recipiente a una temperatura de 90°C y 5°C, respectivamente. La simulación realizada a través de SolidWorks mostró una temperatura máxima de 363.23°K, mientras la menor temperatura fue de 293.23°K. Por su parte, el proceso de enfriamiento del mosto a través del intercambiador de calor se lleva a cabo en las primeras seis vueltas de la bobina. A partir de la séptima vuelta en la bobina del intercambiador, se puede apreciar una reducción significativa de temperatura de aproximadamente 23 K, mientras en las últimas tres

vueltas es donde mayor transferencia de calor se presenta, reduciéndose la temperatura hasta en 30 K.

De la figura se puede apreciar que, cuando el mosto circula por la parte inferior del intercambiador de calor, se puede apreciar un aumento significativo en la rapidez de transferencia de calor. Bajo las mismas condiciones de operación, se puede apreciar que la configuración con flujo invertido presenta mejores prestaciones energéticas, esto quiere decir que se requiere de un total de cinco vueltas para alcanzar condiciones similares a las del flujo de ingreso por la parte posterior. Esta propuesta puede resultar adecuada, desde que menor número de vueltas del serpentín son necesarias para alcanzar la mínima temperatura de operación (293.23 K).

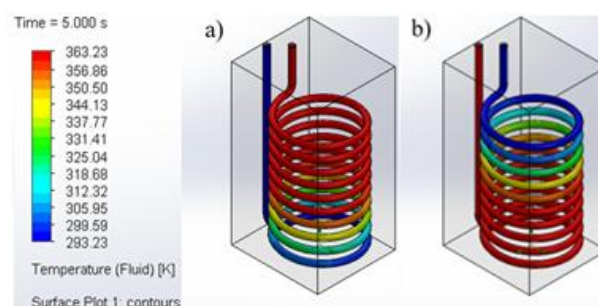


Figure 7. Comparativa de mapeo térmico del enfriador de mosto. Fuente: Elaboración propia

El efecto del flujo másico sobre la temperatura de enfriamiento del mosto, considerando un diámetro del tubo de 0.5 pulgadas, 13 vueltas en la bobina y un diámetro de la hélice en 6.5 pulgadas= 16.51 cm se muestra en la Figura 8. Para el estudio se consideró que el mosto se encuentra a una temperatura de 90°C, la temperatura del agua de enfriamiento se mantuvo constante a un valor de 5°C y se comparan tres valores de flujo másico a raves del serpentín (0.01 kg/s, 0.02 kg/s y 0.03 kg/s). Como se puede observar en los diferentes estudios, los resultados muestran una mayor rapidez de transferencia de calor cuando el sistema opera a bajos flujos másicos (Figura 8a). Esto tiene que ver con la capacidad de absorber calor por parte del fluido frío, el cual es menor conforme el flujo másico se reduce. A menor flujo másico, menor cantidad de calor es absorbida por el fluido frío y que el proceso de enfriamiento sea más rápido. Conforme se incrementa el flujo másico, mayor es la cantidad de energía que se requiere liberar en el mosto para alcanzar las condiciones adecuadas en el mosto. En la Figura 8b se muestra que el fluido ingresa a una temperatura de 90°C y su temperatura se reduce significativamente hasta alcanzar las condiciones del contenedor en un aproximado de dos vueltas. Sin embargo, al incrementar el flujo másico a 0.03 kg/s, se requiere de un total de tres vueltas para que el mosto se encuentre completamente enfriado. En la Figura 8c se

muestra que el enfriamiento es más lento que en los casos mostrados en las Figuras 8a y 8b cuando circula un flujo másico de 0.01 kg/s por el serpentín, resultando en un total de casi 8 vueltas para completar el proceso de enfriamiento del mosto. Lo anterior se traduce a que velocidades más bajas permiten una mayor permanencia del fluido caliente dentro del sistema, lo cual incrementa la eficiencia térmica. Por el contrario, a mayor velocidad, el tiempo de contacto con las paredes disminuye, afectando negativamente la disipación de calor, por lo que, el equilibrio entre velocidad y eficiencia es esencial para definir el diseño óptimo del enfriador.

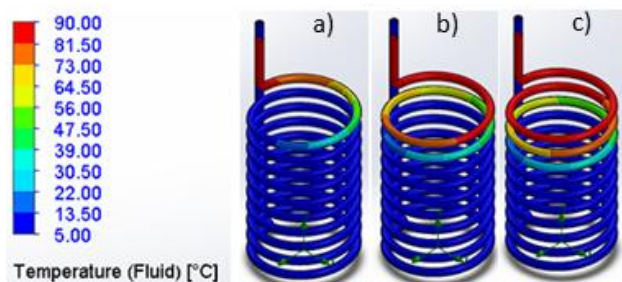


Figura 8. Distribución de temperatura en el enfriador de mosto a tres valores de flujo: a) 0.03 kg/s, b) 0.02 kg/s y c) 0.01 kg/s. Fuente: Elaboración propia.

Para los siguientes tres casos se optó por reducir el número de espiras del enfriador, usando 6 vueltas, en lugar de 10 vueltas, como se analizó anteriormente. Durante la simulación se consideraron constantes todos los demás parámetros geométricos y de temperatura, y se realizó una comparativa para los valores de flujo másico de 0.01 kg/s, 0.02 kg/s y 0.03 kg/s (ver Figura 9). Por otro lado, se consideró que el mosto circula por la parte superior del intercambiador de calor. Los resultados muestran que la reducción de temperatura está ligada directamente a la cantidad de flujo que circula por sistema y no por el número de espiras que contenta el enfriador. A mayor cantidad de flujo, el sistema requiere de un mayor número de espiras para alcanzar las condiciones adecuadas de operación, lo que representa un menor número de espiras, ayudando a reducir los costos de fabricación del sistema y el proceso de producción de cerveza pueda ser más rentable. También, se puede observar que la temperatura final fue casi 10°C menor conforme el flujo másico se incrementó de 0.01 kg/s (Figura 9c) a 0.02 kg/s (Figura 9b) y de casi 15°C en comparación con el flujo másico de 0.03 kg/s (Figura 9a). Aumentar el diámetro del tubo incrementa el volumen del fluido, pero también reduce la velocidad del mismo para un flujo másico constante, lo que puede mejorar el tiempo de residencia. Sin embargo, un diámetro excesivo puede disminuir la superficie relativa de intercambio térmico, haciendo menos eficiente la transferencia de calor. Por

ello, el diseño del enfriador debe optimizar esta relación para lograr un enfriamiento eficiente.

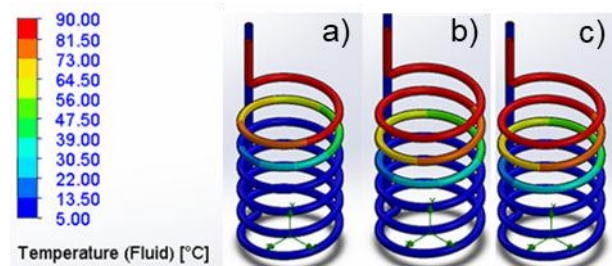


Figura 9. Efecto del número de espiras sobre la distribución de temperatura en el enfriador de mosto: a) 0.03 kg/s, b) 0.02 kg/s y c) 0.01 kg/s. Fuente: Elaboración propia.

Para los siguientes tres casos se optó por regresar al número de espiras inicial (10 vueltas), y en su lugar se modificó el diámetro del serpentín (Figura 10). Nuevamente se tomaron en cuenta valores de flujo másico de 0.01 kg/s, 0.02 kg/s y 0.03 kg/s y se consideró que el sistema opera a una temperatura del mosto de 90°C, mientras la temperatura de agua fría es de 5°C. Los resultados revelan que el proceso de enfriamiento es mayor para el flujo de 0.3 kg/s (Figura 10a) que el de 0.01 kg/s (Figura 9c). Como ya se comentó, esto tiene que ver con el aumento de la cantidad de mosto que circula por el enfriador conforme se incrementa el flujo másico, aumentando el tiempo que tarda en enfriarse y que el número de vueltas para llegar a las condiciones deseadas sea mayor en comparación con las del flujo másico de 0.02 kg/s (Figura 10b) y 0.01 kg/s (Figura 10c), las cuales requieren muy poca área para alcanzar las condiciones de enfriamiento en el sistema. Lo anterior se debe a que al aumentar el volumen y la altura del serpentín puede mejorar el rendimiento térmico si la velocidad de entrada o el caudal también se ajustan adecuadamente, de lo contrario, hay riesgo de que el sistema no alcance su capacidad óptima de disipación térmica en el tiempo previsto.

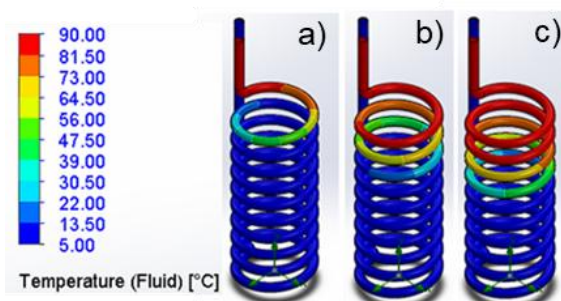


Figura 10. Efecto del número de espiras sobre la distribución de temperatura en el enfriador de mosto: a) 0.03 kg/s, b) 0.02 kg/s y c) 0.01 kg/s. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El comportamiento térmico del enfriamiento del mosto en un intercambiador de calor helicoidal fue modelado usando el software SolidWorks. El efecto de los parámetros geométricos y de operación a lo largo del intercambiador de calor fueron analizados y comparados térmicamente. Dentro de los resultados más relevantes se puede indicar que el modelado del enfriador de calor helicoidal empleado para el enfriamiento del mosto funciona adecuadamente, desde que una reducción de temperatura puede ser obtenido. Para determinar la validación del modelo, este fue comparado con resultados reportados en la literatura, encontrándose una diferencia menor al 3% en comparación con los resultados teóricos. También se pudo encontrar que, al ingresar el mosto por la parte inferior del enfriador, la rapidez de temperatura es mayor en 7K, en comparación con el enfriador ingresando el mosto por la parte superior. También se observa que el reducir el número de espiras no produce cambios significativos en el proceso de enfriamiento del mismo, aunque este se ve ligeramente influido con el aumento de la altura del mismo.

Se pudo determinar que la orientación del flujo (superior o inferior) es uno de los parámetros que influye directamente en la rapidez de enfriamiento del mosto, mientras que el incremento del flujo másico aumenta la velocidad de transferencia de calor. Por otro lado, el aumento del número de espiras ayuda a mejorar la eficiencia del sistema. Desde el punto de vista práctico, estos resultados permiten diseñar sistemas de enfriamiento más eficientes al determinar el número de espiras más adecuado y la cantidad de flujo másico requerido para obtener las adecuadas condiciones de operación, esto puede contribuir en una reducción de los costos de fabricación, el consumo energético y la calidad en procesos de producción de cerveza artesanal. Como trabajo futuro, es la realización de pruebas experimentales que sustenten los resultados obtenidos por medio de la simulación. Para ello, se deben considerar los siguientes elementos:

1. Un sistema de control automático mediante sensores de temperatura y sistemas PID para ajustar el flujo en tiempo real según la demanda de enfriamiento.
1. Un sistema flexible que permita analizar materiales alternativos de alta conductividad térmica que ayuden a mejorar la eficiencia del intercambiador.
2. Un sistema para producción de cerveza a mayor escala, considerando múltiples intercambiadores en serie y/o paralelo.

Finalmente, con el presente estudio se destaca la importancia de la geometría y condiciones operativas en la eficiencia del enfriador, con aplicaciones viables en la mejora del proceso cervecero, específicamente en la calidad del producto y la rentabilidad del proceso artesanal.

Referencias

- Castro Castillo, E. A. (2019). Diseño y dimensionamiento de las instalaciones eléctricas requeridas para la implementación de un nuevo grupo electrógeno de respaldo en las instalaciones sede Floresta de Caracol Televisión S.A. Tesis Licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/d7e44296-4e1e-41a8-bc0a-92392eb2088e/content>
- Dazzarola, C., Tighe, R., Pérez-Correa, J. R., & Saa, P. A. (2026). Toward a digital twin for beer quality control: development of a digital model integrating industrial process data and model-based fermentation descriptors. *Journal of Food Engineering*, 403, 112726.
- Gabelman, A. (2022). Fermentation and downstream processing: Part 1. In *Integration and Optimization of Unit Operations* (pp. 13-68). Elsevier.
- Hoffman, K. (2006). Beer pasteurization models. *Thesis MS*.
- Ji, H., Pu, D., Yan, W., Zhang, Q., Zuo, M., Zhang, Y. (2023). Recent advances and application of machine learning in food flavor prediction and regulation. *Trends Food*
- Lanchimba Ruiz, D. F., Narváez Hernández, D. A. (2021). Implementación de un sistema de control de temperatura para un fermentador de cerveza artesanal (Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador).
- Miller, K. V., & Block, D. E. (2020). A review of wine fermentation process modeling. *Journal of Food Engineering*, 273, 109783. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109783>
- Mirgolbabaee, H. (2010). Numerical estimation of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(7), 805-819. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/flid.2284>
- Pérez Colas, M., Nápoles García, M. F., & de la Cruz Aragonese, M. D. L. (2021). ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA CERVEZA EMBOTELLADA, BAJO CONDICIONES DE PASTEURIZACIÓN. *Centro Azúcar*, 48(1), 105-116. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n1/2223-4861-caz-48-01-105.pdf>
- Quiroga Gaona, H. F. (2020). Sistema de control automático enfocado en el proceso de enfriamiento de mosto en la cervecería artesanal. Tesis de Licenciatura, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La libertad, Ecuador).
- Regatto Del Pezo, J. L. (2017). Automatización del proceso de enfriamiento del mosto para las cervecías artesanales (Bachelor's thesis, La Libertad, Universidad Estatal Peninsula de Santa Elena, 2017.).
- Salas Martínez, A. D. (2014). Algoritmo De Cálculo Para La Selección Del Sistema De Enfriamiento Forzado De Mosto Por Agua Fría En Planta De Alcohol De Una Empresa Agroindustrial (Tesis Licenciatura, Universidad César Vallejo, Perú). https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/9030/sala_s_ma.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sheeba, A., Abhijith, C. M., & Prakash, M. J. (2019). Experimental and numerical investigations on the heat transfer and flow characteristics of a helical coil heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 99, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.002>
- Sci. Technol. 138, 738–751. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.07.012>.
- Tul Tipán, H. J. (2016). Diseño e implementación del prototipo de un Sistema automatizado para la elaboración de cerveza artesanal (Bachelor's thesis, Quito: Universidad Israel, 2016).
- Vaca Valverde, L. P. (2022). Diseño e implementación de un equipo eléctrico de maceración escalonada, cocción y enfriamiento para la elaboración de cerveza artesana (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022.).
- Villanueva, M., Abdala, Y. (2016). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control para la elaboración de cerveza artesanal (Tesis de Licenciatura, Universidad Mayor Facultad de Ciencias, Santiago de Chile, Chile).
- Zamudio Lara, J.M., Dewasme, L., Hernández Escoto, H., Vande Wouwer, A. (2022). Parameter estimation of dynamic beer fermentation models. *Foods* 11 (22), 3602. <https://doi.org/10.3390/foods11223602>