

Simulación de Sistema de Intercambio de Calor para una Máquina de Helados tipo Soft
Serve a través de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Angie Geraldine Carvajalino Illera y Diana Lucía Celis Pérez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Química

Director

Hernando Guerrero Amaya

Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mis padres Olger Carvajalino y Elena Illera por ser mi apoyo incondicional durante todo este proceso, por cada consejo, enseñanza, siempre creer en mí y formarme como la persona que soy en este momento.

A mi hermana Carolina Carvajalino porque sin ella, nada de esto estaría sucediendo. Por ser mi ejemplo para seguir y el pilar fundamental en este viaje, por tenerme paciencia, tener una solución donde no encontraba salida y lograr que pudiera salir adelante.

A mis compañeros y amigas que me dejó esta carrera, a Daniela Muñoz por ser un apoyo primordial, por su paciencia y por cada palabra de aliento en los momentos más difíciles, a Clara, Andrea, Silvia, y Paula por haber sido importantes en el desarrollo de mi formación y disfrutar tantos momentos juntas.

A mis amigos de toda la vida Omar Pantaleón y Sebastián Salcedo, que desde la distancia fueron un soporte y con sus locuras lograban alegrarme día a día.

A mi compañera Diana Celis por la paciencia que tuvo, por la dedicación y por aportar su alegría en los momentos de desesperación, infinitas gracias.

A todos mis familiares, compañeros y personas que contribuyeron a que esto pudiese ser más llevadero con sus palabras de apoyo y enseñanzas.

ANGIE CARVAJALINO ILLERA

Dedicatoria

A Dios Por estar siempre guiándome, fortaleciéndome e iluminando cada instante con su amor, visibilizándolo en tanta personas y momentos que permitieron que mi espíritu creciera.

A mi Madre Sunilda Pérez, cuyo amor incondicional, sabiduría y apoyo absoluto fueron de suma importancia para alcanzar este logro.

A mi padre José Celis, por su enseñanzas y consejos que me permitieron mantenerme fiel a mi identidad en todo momento.

A mis hermanas Cristina Celis e Isabel Celis, por ser la inspiración para superar tantos retos y permitir que nuestras experiencias sirvan de crecimiento mutuo.

A mi Nona María, porque siempre creyó en mí y cuya memoria me es fuerza y motivo para trascender.

A la Pastoral Universitaria UIS, por ser para mí ese oasis en medio del desierto, donde se celebra el SER, y donde encontré una familia que inundó de alegría, esperanza y amor cada instante en el campus y aún fuera de él.

Al Grupo Juvenil Ángelus Dominus por darme la oportunidad de crecer como amiga y líder y por ser la llama constante que animó mi espíritu de servicio.

A mis amigas Laura A, Laura P, y Heidi por ser muestra de sororidad, fuerza e impulso con su compañía y apoyo.

A mi compañera Angie Carvajalino por confiar en mí para el desarrollo de este trabajo, por su dedicación constante y gran tenacidad.

A todas las personas que, con sus palabras, gestos, consejos y oraciones, apoyaron este proceso de formación profesional y personal.

DIANA LUCÍA CELIS PÉREZ

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por ser nuestra alma mater, casa de estudio y aportarnos las herramientas para nuestro desarrollo profesional y humano.

A la empresa AC Ingeniería Virtual darnos la oportunidad de fortalecer nuestro perfil profesional, mediante el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Helver Crispiniano Álvarez Castro, por la confianza depositada y las directrices dadas en el direccionamiento de este trabajo.

Al profesor Hernando Guerrero Amaya por su apoyo a lo largo del proyecto.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química por sus enseñanzas y ayudarnos a formar como profesionales.

ANGIE CARVAJALINO ILLERA Y DIANA LUCÍA CELIS PÉREZ

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
2. Descripción de la Empresa.....	15
3. Marco Teórico.....	16
3.1. Generalidades del Helado	16
3.2. Equipos del Sistema de Intercambio de Calor, Hopper y Barrel	16
3.3. Descripción General del Modelado en CFD	17
3.4. Método de Volúmenes Finitos	18
3.5. Modelo de Viscosidad $k - \epsilon$ realizable:	19
3.6. Ecuaciones de Transporte para el Modelo $k - \epsilon$ realizable:	19
3.7. Modelo de la Viscosidad Turbulenta:	20
3.8. Ecuación de Conservación de la Masa:	20
3.9. Ecuaciones de Conservación de la Cantidad de Movimiento	21
3.10. Ecuación de Energía	21
4. Descripción Metodológica	22
4.1. Fase I – Capacitación en CFD	23
4.2. Fase II – Definición del Trabajo de Investigación de Referencia.....	23
4.2.1. Identificación del Problema	23
4.2.2. Objetivos	24
4.2.3. Estado de Simulación.....	24
4.3. Fase III - Desarrollo de la simulación	24

4.3.1. Pre-Procesamiento	24
4.3.1.1. Geometría.....	24
4.3.1.1.1. Geometría del Estator del Hopper.....	26
4.3.1.1.2. Geometría del Rotor del Hopper.....	27
4.3.1.1.3. Geometría del Estator del Barrel.....	27
4.3.1.1.4. Geometría del Rotor del Barrel.....	28
4.3.1.2. Mallado.	29
4.3.1.2.1. Mallado del Hopper.	29
4.3.1.2.2. Mallado Barrel.	30
4.3.1.3. Condiciones del Sistema.....	31
4.3.1.3.1. Propiedades del Fluido.....	32
4.3.1.3.2. Interfaz Fluido – Fluido..	33
4.3.1.3.3. Condiciones de Borde.	34
4.3.2. Solución	34
4.3.2.1. Hopper.	34
4.3.2.2. Barrel.	35
4.3.3. Post – Procesamiento	35
5. Resultados	36
5.1. Caso de Estudio Estacionario Hopper.....	36
5.2. Caso de Estudio Estacionario Barrel.....	38
6. Conclusiones	40
7. Recomendaciones	41
Bibliografía	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tareas y funciones realizadas	22
Tabla 2. Dimensiones Hopper.....	25
Tabla 3. Dimensiones Barrel.....	25
Tabla 4. Características del mallado Hopper	29
Tabla 5. Características del mallado Barrel	31
Tabla 6. Parámetros que caracterizan la simulación.....	32
Tabla 7. Propiedades del fluido	33
Tabla 8. Constantes de la viscosidad	33
Tabla 9. Comparación valores obtenidos en la simulación en ANSYS 2020 R2 y los valores obtenidos por Ballesteros & Quiroga.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso para abordar la simulación.....	18
Figura 2. Diagrama flujo para metodología.....	23
Figura 3. Geometría tanque.....	26
Figura 4. Estator Hopper con volumen rotor extraído	26
Figura 5. Rotor Hopper con volumen aspas extraído	27
Figura 6. Estator Barrel con volumen rotor extraído	28
Figura 7. Estator Barrel con volumen de rotor extraído	28
Figura 8. Mallado estándar Hopper	30
Figura 9. Mallado Hopper refinado	30
Figura 10. Mallado Barrel refinado	31
Figura 11. Residuales Hopper.....	35
Figura 12. Residuales Barrel.....	35
Figura 13. Perfil de velocidad Hopper.....	37
Figura 14. Perfil de temperatura Hopper	38
Figura 15. Perfil de velocidad Barrel.....	39
Figura 16. Perfil de temperatura Barrel	39

Resumen

Título: Simulación del sistema de intercambio de calor para una máquina de helados tipo Soft Serve a través de dinámica de fluidos computacional*

Autor: Angie Geraldine Carvajalino Illera, Diana Lucía Celis Pérez**

Palabras Clave: Helado Soft Serve, Intercambiador de calor de superficie raspada, Dinámica de fluidos computacional, ANSYS Fluent, Industria 4.0.

Descripción:

En el presente proyecto se aborda el estudio y aplicación de la transferencia de calor en la fase de refrigeración del proceso de producción de helado tipo Soft Serve, con base en el trabajo desarrollado por Ballesteros y Quiroga (2016). Esta fase consta de dos sistemas de agitado e intercambio de calor, que suceden en dos intercambiadores denominados Hopper y Barrel. Para este proceso se desarrollaron varias simulaciones en el programa ANSYS Fluent 2020 R2, ya que el trabajo de investigación base se encontraba simulado en el software STAR-CCM+ 10.04.009. Desde la generación de la geometría y el mallado se realizaron dos simulaciones, una para cada intercambiador de calor, con diferentes condiciones de borde y estados energéticos definidos por las temperaturas del proceso. Así mismo, se obtuvieron perfiles de velocidad y temperatura uniformes para cada intercambiador de calor, alcanzado la temperatura deseada en cada uno de ellos. En concordancia, se observa que no hubo mayor diferencia entre los simuladores, lo que permite ratificar la fiabilidad de ambas herramientas de simulación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya. PHD. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro. PHD

Abstract

Title: Simulation of the heat exchange system for a Soft Serve ice cream machine through computational fluid dynamics*

Author: Angie Geraldine Carvajalino Illera, Diana Lucía Celis Pérez¹

Key Words: Soft Serve ice cream, Scraped surface heat exchanger, Computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, Industry 4.0

Description:

This project addresses the study and application of heat transfer in the cooling phase of the Soft Serve ice cream production process, based on the work developed by Ballesteros and Quiroga (2016). This phase consists of two stirring and heat exchange systems, which take place in two exchangers called Hopper and Barrel. For this process, several simulations were developed in the ANSYS Fluent 2020 R2 program since the base research work was simulated in the STAR-CCM + 10.04.009 software. From the generation of the geometry and the meshing, two simulations were carried out, one for each heat exchanger, with different boundary conditions and energy states defined by the process temperatures. Likewise, uniform speed and temperature profiles were obtained for each heat exchanger, reaching the desired temperature in each one of them. In agreement, it is observed that there was no greater difference between the simulators, which allows ratifying the reliability of both simulation tools.

* Degree Work

¹ Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya. PHD. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro. PHD

Introducción

A nivel mundial las empresas se enfrentan a retos constantes debido a que los clientes cuentan con amplia variedad de proveedores que pueden satisfacer sus necesidades y exigencias (Moreno, 2015). Esto hace que ellas busquen adaptarse a los cambios de un mercado globalizado donde se exigen altos estándares de calidad, flexibilidad, y tiempos de respuesta cortos manteniendo precios atractivos para los consumidores.

Las empresas colombianas no son ajenas a esta situación, ya que el país se encuentra frente a una transición, en la que “el empresariado colombiano cada vez más, está adoptando estrategias para migrar sus negocios de un modelo tradicional a uno digital”; hasta ahora, este cambio es más fácil de realizar en las empresas de servicios (PROCOLOMBIA, 2020) (74,4%), que en las empresas industriales con un (48,4%) en 2017 (Hinestroza, 2020). De igual forma, sectores como el financiero, el textil y el cosmético (Prieto & Bedoya, 2019) han destacado en esta transición, pero en el país hay otras industrias que tienen potencial económico; sectores como la industria de alimentos, en donde las exigencias abarcan desde la gestión óptima de los procesos productivos, generación de sistemas de producción inteligentes y eficientes, hasta la creación de estrategias que brinden experiencias de compra que superen expectativas del consumidor y permitan recoger datos para su análisis (Simarro, 2016).

En este panorama surge la llamada industria 4.0, que, entendida como la transformación digital de empresas, comprende la automatización de procesos y/o funciones, esto, con el fin de desarrollar procesos más precisos, rápidos, y con menor riesgo para la mano de obra humana (Rueda Perez & Esparza Piedrahita, 2019). Una de las tecnologías base de esta industria es la simulación, la cual busca diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso

con el fin de recrear el comportamiento del mundo real (Shannon & Aldrete, 1988). Por su parte Arana, Pérez y López son enfáticos en el uso de la simulación como herramienta y no como fin, ya que la simulación per se no soluciona problemas, sin embargo, su uso acompañado de adecuadas bases estadísticas la convierten en una excelente herramienta para el análisis de los procesos y por supuesto para la toma de decisiones (Arana Pérez et al., 2001). Esto abre la oportunidad para estudiar procesos de la industria alimenticia, como los sistemas de refrigeración; al igual que ahorrar costos de ajustes de fabricación que favorezcan a empresarios de este sector.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la empresa AC Ingeniería Virtual surge la necesidad de encontrar aplicaciones en la industria mediante el software de simulación ANSYS. Los sistemas de refrigeración existentes contenidos en las máquinas de helado tipo Soft Serve han sido objeto de diferentes estudios, donde se ha descrito la transferencia de calor, obteniendo correlaciones para predecir el coeficiente de calor (Byun et al., 2012). Así mismo, se han encontrado correlaciones que permiten estimar el coeficiente de calor interno, dependiendo del tipo de intercambiador de calor, ya sea de superficie raspada o cepillada (Ben Lakhdar et al., 2005).

Además, se encontró un estudio donde se evaluó la optimización de la máquina de helado tipo Soft Serve mediante el uso del refrigerante R404A, para evitar problemas de contaminación de la capa de ozono causados por el uso del refrigerante R-502 (Kim, 2016). Por otra parte, otro estudio se enfocó en la optimización de la velocidad de agitación para obtener un tiempo de producción menor (Baek & Kim, 2017).

Para esta práctica empresarial se tomó como referencia un trabajo de investigación sobre simulación en CFD de un sistema de refrigeración de una máquina de helado tipo Soft Serve, y se busca simular un sistema de intercambio de calor para una máquina de helados tipo Soft Serve a

través de dinámica de fluidos computacional en el software ANSYS con el fin de comparar los resultados con los hallados en la literatura.

Este trabajo estará estructurado por 4 capítulos, el primero es la descripción metodológica donde se realiza la recopilación de datos, establecimiento de las condiciones iniciales de la simulación, la configuración del tamaño de mallado, el procesamiento de las condiciones de frontera y la geometría utilizada. En el segundo capítulo, se evalúan los resultados y se corrobora que el perfil de temperaturas que se desarrolla en el sistema coincide con los valores obtenidos en la literatura, así como verificar que el nivel de agitación utilizado mantiene la temperatura de la mezcla similar al encontrado en la literatura. En el tercer capítulo se establecen las recomendaciones para la empresa. Por último, en las conclusiones se indican los hallazgos más importantes de la investigación.

1. Objetivos

Objetivo General

Simular un sistema de intercambio de calor para una máquina de helados tipo Soft Serve a través de dinámica de fluidos computacional.

Objetivos Específicos

Recopilar los datos que serán introducidos al software ANSYS

Corroborar que los perfiles de temperatura que se desarrolla en el sistema coinciden con los valores obtenidos en la literatura

Comprobar que los perfiles de velocidad que se desarrolla en el sistema concuerdan con los valores obtenidos en la literatura

2. Descripción de la Empresa

AC Ingeniería Virtual es una empresa privada, de carácter comercial, de ingeniería computacional (Industria 4.0) creada en el año 2012 en la ciudad de Bucaramanga. Se constituye como empresa después de ganar la convocatoria 523 de Colciencias “Convocatoria para Conformar Banco de Proyectos Elegibles para la Creación de Empresas o Unidades de Negocios de Base Tecnológica” con el apoyo de la Corporación Bucaramanga Emprendedora (CBE) y la colaboración como aliado tecnológico del laboratorio de fluido dinámica computacional (L-CFD) UNICAMP- Brasil. Se dedica al modelamiento, simulación y virtualización de procesos industriales utilizando técnicas de última generación en simulación numérica, prototipado, automatización e inteligencia artificial. También se caracteriza por posibilitar la conexión entre el conocimiento desarrollado en las instituciones de I+D y la aplicación práctica de este en el sector industrial proporcionando las mejores soluciones computacionales en ingeniería. Ha sido merecedora de diversos premios a lo largo del tiempo donde se destacan:

- Convocatoria 523 COLCIENCIAS 2012: creación EBT
- Premio a la innovación PETROBRAS 2014. Diseño de reactor para HDT
- Convocatoria INNPULSA 2016. Software CAPITCH.
- Convocatoria SENOVA 2017. Software Ecohid.
- Desafío INNOVATE ECOPETROL 2018. Sistema de Visión Artificial. ACIV-ICP.
- Convocatoria MINCIENCIAS, 2020. Sistema de visión Artificial. ACIV-ICP
- Desafío INNOVATE ECOPETROL 2021. Sistema WEB para registro de COVID. ACIV-ICP.

3. Marco Teórico

3.1. Generalidades del Helado

El helado nace en el siglo XVI en Francia, pero fue hasta el siglo XVII que se dio su comercialización por toda Europa y llegó a América del Norte, haciéndose popular en todo el mundo (Martínez & Liendo, 2007). En el caso de Colombia, la producción anual de helados fue de 98.000 toneladas equivalente a un valor de 900.000 millones de pesos según cifras de Losdatos.com, y se estima que para 2022 las heladerías en el país tengan un crecimiento del 6.3% (Traslaviña, 2019).

Actualmente, existen diferentes tipos de helado; helados de agua o sorbetes, helados de leche y cremas heladas o helados de crema (Martínez & Liendo, 2007); dentro de los cuales se destaca el helado suave. Este tipo de helado se encuentra compuesto por un porcentaje de grasa del 4 al 7%, azúcar entre el 13 y 15%, estabilizantes entre 0.2 y 0.3%, emulsificantes entre el 0.1 y el 0.2, y cerca de un 14% de sólidos provenientes de la leche; de igual forma, se compone de un 60% de aire. A diferencia del helado regular, este tiene entre el 2 y 3% menos de azúcar (Goff & Hartel, 2013).

El helado tipo Soft Serve o suave es de fácil comercialización debido a que su producción se realiza al momento de consumirse, es de bajo costo y requiere una instalación sencilla que abarca un área de espacio pequeño. En Colombia la capacidad de producción de las máquinas de helado tipo Soft Serve ronda entre 50 y 100 helados al día, el cual se triplica los fines de semana (El Mercado de Helados En Colombia Crece En Promedio 3,1%, 2017).

3.2. Equipos del Sistema de Intercambio de Calor, Hopper y Barrel

Las máquinas de helado tipo Soft Serve están equipadas con dos sistemas de refrigeración donde se encuentran los evaporadores Hopper y Barrel (Cook & Hartel, 2010) que es donde se

lleva a cabo la mezcla del helado.

En primer lugar, el Hopper consta de un tanque de hasta 12 litros que está hecho de acero de calidad alimentaria, que contiene un agitador en el centro de este. La agitación que se lleva a cabo es importante debido a que los ingredientes sólidos deben estar muy bien disueltos para que se pueda obtener una mezcla homogénea y con ayuda del refrigerante R404a que se encuentra a -2°C se permite llevar la mezcla del helado de 15°C que es la temperatura ambiental a 4°C , siendo esta la temperatura final.

En segundo lugar, el Barrel es un intercambiador de calor de superficie raspada en forma de cilindro que es usado para procesos que requieran la congelación de mezclas acuosas. Cabe destacar que este intercambiador tiene unas cuchillas las cuales raspan la pared para retirar los cristales y poder incorporarlo con el resto de la mezcla. En este caso es usado el refrigerante R134a a -20°C para lograr llevar la mezcla desde 4°C a -8°C , que corresponde a la temperatura del producto final (Ballesteros Martínez & Quiroga Villarraga, 2016).

3.3. Descripción General del Modelado en CFD

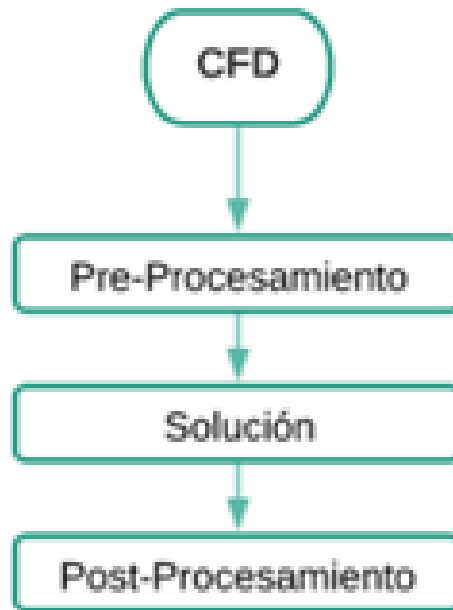
Para abordar los casos de simulación, se hace necesario interactuar con la interfaz de una herramienta de simulación, donde se ingresan los parámetros del problema y se analizan los resultados. Cada caso de aplicación de ingeniería se desarrolla como un proceso de tres pasos que se resume en la figura 1 (Huerto Bujaico, 2013):

- Pre-Procesamiento: etapa donde se desarrolla la geometría, se genera la malla y se definen las condiciones de contorno del sistema.
- Solución: etapa donde se llevan a cabo la solución de las ecuaciones que rigen el modelo, efectuada por la herramienta de simulación escogida para el caso de estudio.

- Post-Procesamiento: etapa donde se visualizan los resultados mediante gráficos, perfiles, entre otros.

Figura 1.

Proceso para abordar la simulación

**3.4. Método de Volúmenes Finitos**

El método de volúmenes finitos (FVM) es la solución a los problemas de mecánica de fluidos relacionados a flujos multifásicos, reactivos o fuertemente turbulentos. Una propiedad importante de este método es que respeta los principios de conservación (masa, momentum y energía) que son la base de la modelación matemática para la mecánica del continuo, lo cual se hace por medio de ecuaciones discretas deducidas (Osses; Juan, 2016).

El método FVM envuelve de forma general una gran variedad de problemas diferentes a los de mecánica de fluidos y comprende los siguientes pasos:

1. Descomponer el dominio en volúmenes de control
2. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control

3. Aproximar numéricamente las integrales
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales
5. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido

3.5. Modelo de Viscosidad $k - \epsilon$ realizable:

El modelo $k-\epsilon$ realizable, es un desarrollo relativamente reciente y difiere del modelo $k-\epsilon$ estándar en dos puntos clave (ANSYS Inc, 2013):

- El modelo $k-\epsilon$ realizable tiene una formulación diferente para la viscosidad turbulenta
- Una nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación ϵ , se ha derivado a partir de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de la vorticidad cuadrática media

3.6. Ecuaciones de Transporte para el Modelo $k-\epsilon$ realizable:

Las ecuaciones de transporte modeladas para el modelo $k-\epsilon$ realizable son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_3 G_b + S_\epsilon \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$$C_1 = \text{MAX} \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\text{Ec. 3})$$

En estas ecuaciones G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de velocidad medios G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad, Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación total, G_2 y $G_{1\epsilon}$ son constantes σ_k y σ_ϵ son los números de

turbulencia de Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos fuente definidos por el usuario.

Este modelo ha sido ampliamente validado para una amplia gama de flujos, incluidos flujos cortantes homogéneos rotativos, flujos libres que incluyen chorros y capas de mezcla, flujos de canal, capa límite y flujos separados. Para todos estos casos, se ha encontrado que el rendimiento del modelo es sustancialmente mejor que el del modelo k - ε estándar (ANSYS Inc, 2013).

3.7. Modelo de la Viscosidad Turbulenta:

El término viscosidad de remolinos es definida por (ANSYS Inc, 2013):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde C_μ no es constante, es definido por la expresión:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Las constantes del modelo están definidas por:

$$A_0 = 4.404, A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\xi^3} \quad (\text{Ec. 7})$$

3.8. Ecuación de Conservación de la Masa:

La ecuación para la conservación de la masa, o ecuación de continuidad, se puede escribir de la siguiente manera (ANSYS Inc, 2013)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (\text{Ec. 8})$$

3.9. Ecuaciones de Conservación de la Cantidad de Movimiento

La conservación de la cantidad de movimiento en un marco de referencia inercial (no acelerado) se describe mediante:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\tau}$ es el tensor de estrés, los términos $\rho \vec{g}$ y \vec{F} son la fuerza gravitacional del cuerpo y las fuerzas externas del cuerpo.

El tensor de estrés $\bar{\tau}$ está dado por la expresión:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde μ es la viscosidad molecular, I es el tensor unitario, y el segundo término en el lado derecho es el efecto de la dilatación del volumen (ANSYS Inc, 2013).

3.10. Ecuación de Energía

La ecuación de energía para la mezcla toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde k_{eff} es la conductividad efectiva ($\sum \alpha_k (k_k + k_t)$), donde k_t es la conductividad térmica turbulenta, definida acorde al modelo de turbulencia usado. El primer término en el lado derecho de la ecuación representa la energía transferida mediante conducción. S_E incluye otras fuentes de calor volumétricas.

El término E_k corresponde a la siguiente expresión:

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (\text{Ec. 12})$$

En la ecuación el término $E_k = h_k$ para una fase compresible, donde h_k es la entalpía sensible por fase k (ANSYS Inc, 2013).

4. Descripción Metodológica

Para empezar, en la tabla 1 se muestran las tareas y funciones realizadas durante la práctica empresarial.

Tabla 1.

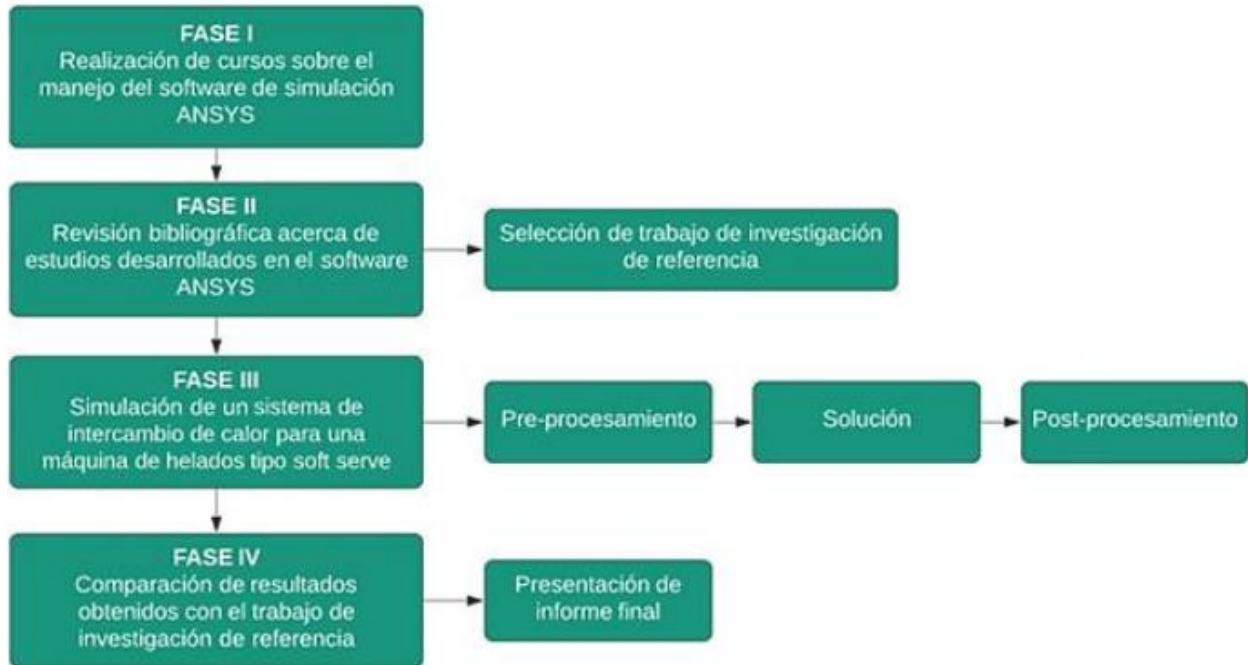
Tareas y funciones realizadas

Objetivo	Resultado	Tareas
Promoción de actividades de la empresa	Pósteres para redes sociales	Desarrollo de Publicidad
Desarrollar habilidades en la técnica CFD a través de la herramienta de simulación	Certificado de curso introductorio a CFD entregado por ACIV	Introducción a la herramienta de simulación CFD. Webinar “Contaminación aire agua” Curso virtual introducción a la herramienta de simulación CFD
Simulación de un intercambiador de calor en la máquina de helado tipo Soft Serve	Desarrollo de la simulación	Elección de trabajo de investigación de referencia Pre - procesamiento Solución Post - procesamiento
Análisis de resultados obtenidos	Informe final	Presentación del trabajo final

Para lograr una simulación adecuada según las necesidades de la empresa, fue estructurada la metodología en cuatro fases como se evidencia en la figura 2. La primera, comprende la realización de cursos para el manejo de la herramienta ANSYS, la segunda engloba la revisión bibliográfica, la tercera abarca la simulación del sistema de intercambio de calor para una máquina de helados tipo Soft Serve y, por último, contiene la comparación de resultados obtenidos respecto al trabajo de investigación de referencia.

Figura 2.

Diagrama de flujo para la metodología



4.1. Fase I – Capacitación en CFD

En la adquisición de destrezas para la realización de aplicaciones de ingeniería mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) fue de gran importancia la inmersión en los cursos formativos en el manejo del software ANSYS, ofrecidos por el instituto de Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS), que abarca desde inducción a CFD hasta la resolución de problemas reales de la industria.

4.2. Fase II – Definición del Trabajo de Investigación de Referencia

4.2.1. Identificación del Problema

El objeto de estudio es la simulación del sistema de intercambio de calor de una máquina de helados tipo Soft Serve, que consiste en dos etapas cada una consta de un intercambiador de calor, el primero denominado Hopper similar a un tanque agitado, cuya velocidad de agitación es

de 110 rpm, y el segundo denominado Barrel, que es de tipo intercambiador de superficie raspada, cuya velocidad de agitación es de 300 rpm, específicamente se seleccionó el proceso de enfriamiento, de manera que solo se usaron las condiciones de temperatura de esta etapa del proceso.

4.2.2. *Objetivos*

Obtener los perfiles de velocidad y temperatura que describan el funcionamiento del sistema de intercambio de calor de la máquina de helados Soft Serve.

4.2.3. *Estado de Simulación*

La simulación se llevó a cabo en estado estacionario donde se pudo obtener un perfil de velocidad y la dirección de las partículas en el mezclado, así como, un perfil de temperatura, donde además se obtuvo el tiempo de mezclado que permitiera alcanzar los valores de temperatura esperados.

4.3. Fase III - Desarrollo de la simulación

4.3.1. *Pre-Procesamiento*

4.3.1.1. Geometría. El volumen de control puede ser creado mediante un software CAD, en el presente estudio se realizó mediante el software Design Modeler, generador de CAD de ANSYS, para evitar defectos en el diseño al pasar de una herramienta a otra.

La configuración del volumen de control de cada intercambiador de calor consiste en dos dominios, denominados rotor y estator: el primero consta del volumen en torno al eje rotatorio, que, en el caso de Hopper, es un agitador con dos aspas y en el caso del Barrel, es un eje rodeado de una cuchilla en forma de hélice y dos cuchillas paralelas. El segundo dominio está constituido por el volumen del tanque en el caso del Hopper, y el volumen de la carcasa en el caso del Barrel.

Es necesario conocer las dimensiones de cada dominio, a continuación, en la tabla 2 y en la tabla 3 se presentan los valores usados en el desarrollo de cada geometría.

Tabla 2.*Dimensiones Hopper*

DIMENSIONES HOPPER					
Tanque	Fluido: Helado		Rotor	Fluido: Helado	
Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Volumen	L	7.2	Número de aspas	#	2
Profundidad	mm	100-84	Inclinación de aspas	°	45
Ancho	mm	300.11	Longitud de aspa	mm	64.54
Largo	mm	300.11	Ancho de aspa	mm	20
			Diámetro	mm	150

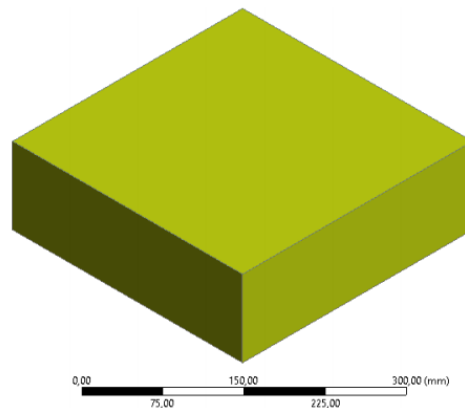
Tabla 3.*Dimensiones Barrel*

DIMENSIONES BARREL					
Carcasa	Fluido: Helado		Rotor	Fluido: Helado	
Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Volumen	L	7.2	Número de aspas	#	2
Profundidad	mm	70.73	Número de aspas en cuchilla batidora	#	45
Ancho	mm	19.05	Longitud de eje rotatorio	mm	331.21
Largo	mm	331.21	Longitud de aspas	mm	140
Diámetro carcasa	mm	102	Diámetro del rotor	mm	100

4.3.1.1.1. Geometría del Estator del Hopper. La geometría del tanque se realizó teniendo en cuenta las dimensiones del tanque para generar un volumen de 7.2 litros, y para el diseño del dominio estacionario inicialmente se creó el recipiente del tanque, como se muestra en la figura 3.

Figura 3.

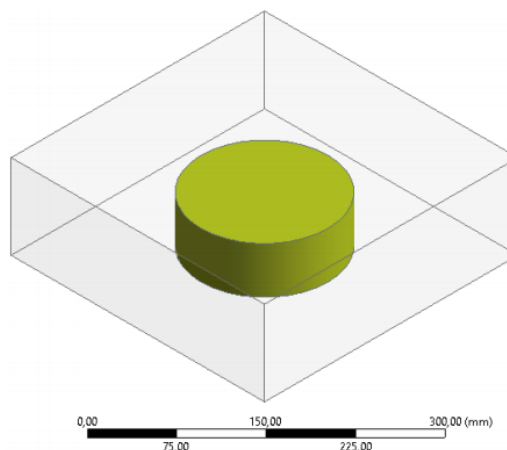
Geometría tanque



Después de crear la zona de tanque, se diseñó el volumen del rotor, el cual tiene forma cilíndrica y su ubicación permite el estudio del fluido en el seno del tanque, este volumen se sustrajo del dominio del estator, como se evidencia en la figura 4.

Figura 4.

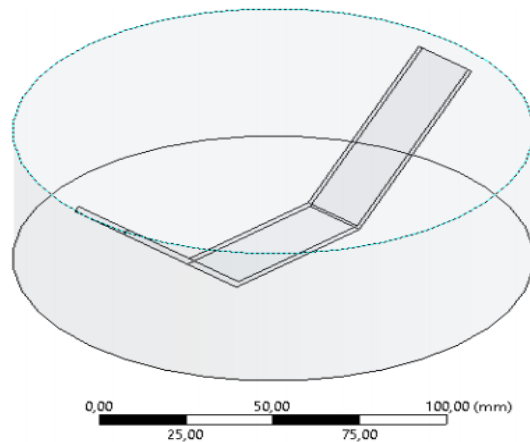
Estator Hopper con volúmen rotor extraído



4.3.1.1.2. Geometría del Rotor del Hopper. Para la geometría del dominio del rotor se diseñaron las aspas del eje rotatorio, de acuerdo con las dimensiones especificadas, alrededor de ellas se creó un volumen cilíndrico envolvente, de las mismas dimensiones del rotor sustraído en el estator, a este volumen posteriormente se le extrajo el volumen de las aspas, como se presenta en la figura 5.

Figura 5.

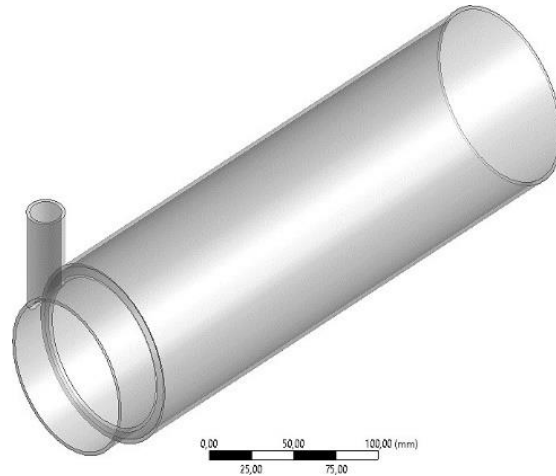
Rotor Hopper con volumen aspas extraído



4.3.1.1.3. Geometría del Estator del Barrel. Para el modelamiento del dominio estacionario del Barrel, inicialmente se realizó el volumen de la carcasa externa, a modo de cilindro con un ducto de entrada, a partir de esta se generó la geometría del volumen referente al rotor, para posteriormente extraerlo, como se visualiza en la figura 6.

Figura 6.

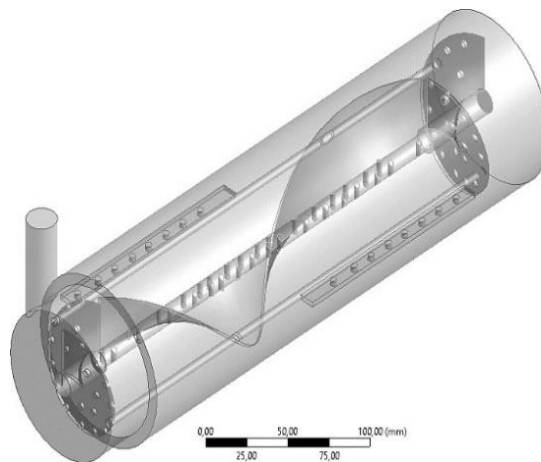
Estator Barrel con volúmen rotor extraído



4.3.1.1.4. Geometría del Rotor del Barrel. En la creación de la geometría del rotor del Barrel, inicialmente se diseñó el eje rotatorio acompañado de las cuchillas raspadoras, alrededor del cual se generó en el mismo eje de coordenadas, el volumen envolvente en forma de cilindro, al que se le extrajo el volumen del eje y las cuchillas raspadoras, creando así el dominio del rotor, que se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Estator Barrel con volúmen de rotor extraído



4.3.1.2. Mallado. En esta etapa del pre-procesamiento se generó el mallado de cada intercambiador de calor, para facilitar el desarrollo de la zona de contacto se unieron las geometrías correspondientes al rotor y al estator de cada uno, de manera que se generó el mallado con los dos dominios en la misma interfaz del editor de mallado. Para su construcción se usó el método de conformación de parches, generando una malla con elementos de tipo tetraedro, además mediante la opción Contact Sizing se definió un tamaño de elemento de 0.005 en la zona de contacto para mejorar el trabajo de los elementos en dicha zona, estos refinamientos son necesarios en regiones con gradientes de alta velocidad (Álvarez Castro, 2011).

4.3.1.2.1. Mallado del Hopper. Inicialmente se creó un mallado estándar (ver Figura 8) para las pruebas piloto en la interfaz de la herramienta Fluent. Posteriormente se realizó un mallado más fino que facilitó la interacción entre los dos dominios a estudiar, con elementos de tipo tetraedro, y un tamaño de elemento de 0.005 que se contempla en la tabla 4. Como se visualiza en la figura 9 la malla se hace más fina en la zona de contacto entre el estator y el rotor.

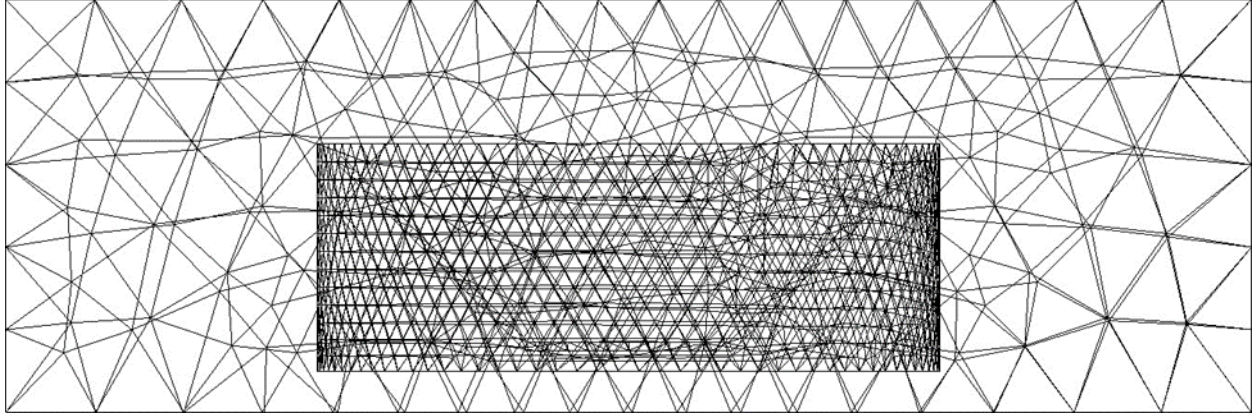
Tabla 4.

Características del mallado Hopper

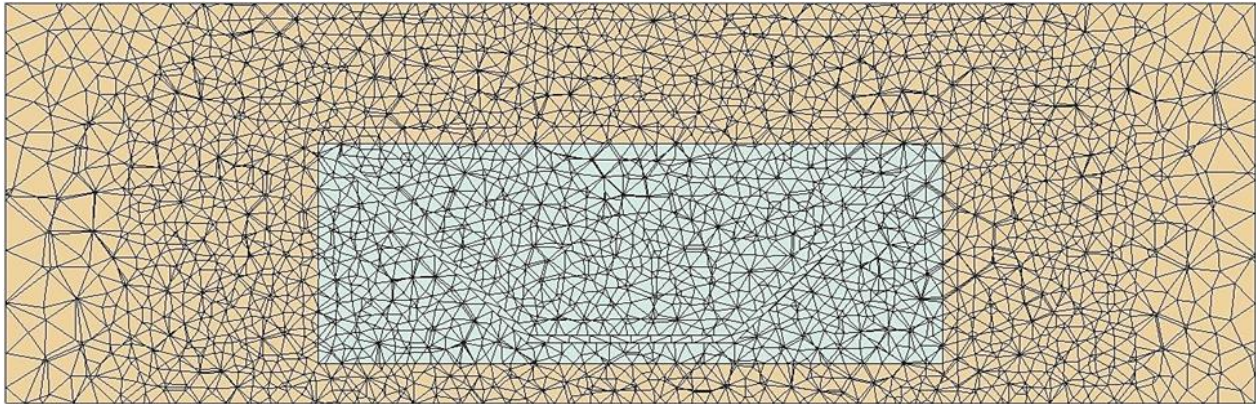
Característica de la Malla Hopper	Valor
Tamaño de elemento en zona de contacto	0.005
Nodos	13.342
Elementos	69.811

Figura 8.

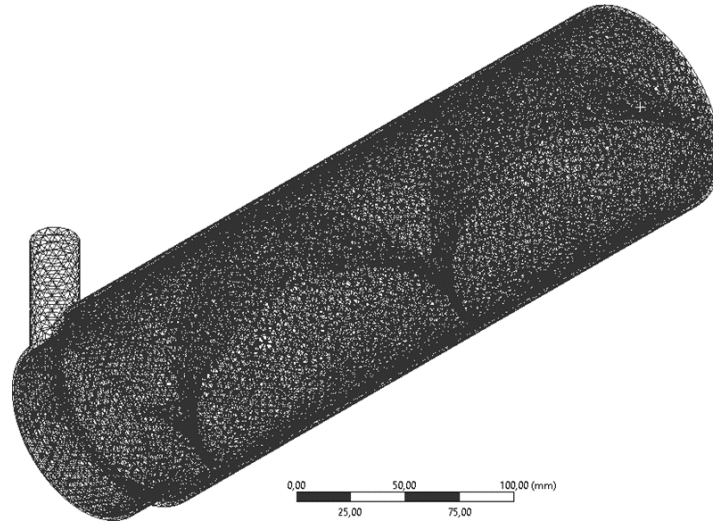
Mallado estándar Hopper

**Figura 9.**

Mallado Hopper refinado



4.3.1.2.2. *Mallado Barrel.* De manera similar al Hopper se realizó el mallado del Barrel, uniendo las geometrías de los dominios, estator y rotor y se generó la zona de contacto fluido-fluido, este mallado se muestra continuación en la figura 10.

Figura 10.*Mallado Barrel refinado*

La malla de generada para el Barrel que se observa en la tabla 5 cuenta con las siguientes características:

Tabla 5.*Características del mallado Barrel*

Característica de la Malla Barrel	Valor
Tamaño de elemento en zona de contacto	0.005
Nodos	46.928
Elementos	219.457

4.3.1.3. Condiciones del Sistema. Después de haber creado la malla de cada volumen, se usó la herramienta de dinámica de fluidos Fluent, del programa ANSYS R2, donde se definen los parámetros que caracterizan la simulación, los cuales se muestran en la tabla 6, para caracterizar el modelo y definir las condiciones que rigen la simulación.

Tabla 6.*Parámetros que caracterizan la simulación*

Característica	Descripción
Tipo de Fluido	Helado: Fluido no newtoniano
Fuerza gravitacional	Sí
Velocidad de agitación	110 rpm y 300 rpm
Presión de referencia	1 atm
Temperatura de referencia	291 K
Condición de las paredes	No deslizamiento
Tipos de elementos de malla	Tetraedro
Método de resolución de las ecuaciones	Método de volúmenes finitos

4.3.1.3.1. Propiedades del Fluido. El caso de estudio es monofásico, siendo el fluido de trabajo helado, el cual será agitado y enfriado para alcanzar las características necesarias para su venta. Las propiedades del helado se presentan en la tabla 7 y tabla 8 (Ballesteros Martínez & Quiroga Villarraga, 2016).

Tabla 7.*Propiedades del fluido*

Fluido: Helado		
Estado termodinámico	Líquido	
Densidad	1322.7	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Viscosidad	$\mu = k'_c \cdot \dot{\gamma}^{\bar{n}-1} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (x_s * 100)^\varepsilon$	$[Pa \cdot s]$
Capacidad Calorífica	$C_p = 4180 - 2299x_s - 627x_s^3, para T > -2.5^\circ C$ $C_p = 1547 - 1254x_s + \frac{x_s R(T_0 + 273.15)^2}{M_s (T_0 - T)^2}, para T < -2.5^\circ C$	$\left[\frac{J}{kg * K}\right]$
Estado de referencia		
Temperatura de referencia	291	$[K]$
Presión de referencia	1	$[atm]$

Tabla 8.*Constantes de la viscosidad*

Constantes de la viscosidad	Valores	Unidades
$k'_c * 10^9$	39.02	$[Pa \cdot s^{2-\bar{n}}]$
\bar{n}	0.600	-
$\frac{E}{R}$	2242.38	$[K]$
ε	2.56	-

4.3.1.3.2. Interfaz Fluido – Fluido. Al tener dos dominios que interactúan entre sí, es necesario definir dicha interacción entre las dos geometrías para lo cual se genera una interfaz fluido-fluido, uniendo las dos geometrías en el paso de mallado. Esta zona de contacto permite especificar las características que describen la transferencia de momento y energía del fluido cerca de la frontera de unión de los fluidos. En el caso del Hopper las velocidades de las paredes de la interfaz fueron de 110 rpm cada una, en cuanto a la temperatura de la interfaz se definió con una

temperatura de 15°C. Para el Barrel, las velocidades de las paredes de la interfaz fueron de 300 rpm cada una, y el valor de la temperatura de la interfaz se definió de 4°C.

4.3.1.3.3. Condiciones de Borde. En la interfaz de la herramienta Fluent es importante definir las condiciones de borde, debido a que las regiones definidas pertenecen a una celda previamente definida, las paredes son caracterizadas con la condición de no deslizamiento, en cuanto a las características referentes a momento solo la pared del estator permanece estática, las demás paredes son móviles, con una velocidad rotacional de 110 rpm con respecto al marco absoluto en el caso del Hopper y 300 rpm en el caso del Barrel.

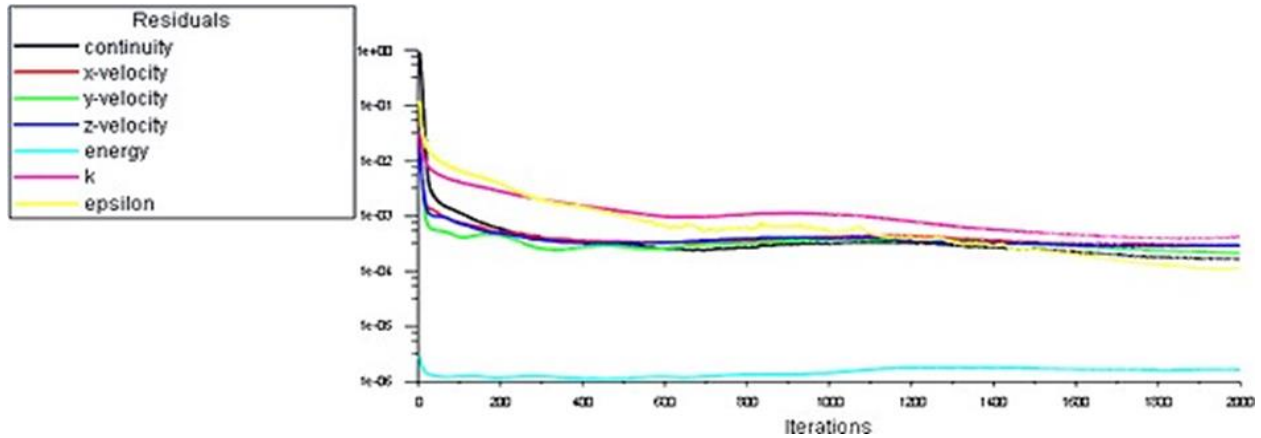
4.3.2. Solución

Se elaboraron varias simulaciones y se consideró dentro de la convergencia cuando los residuos alcanzaron el valor de 1×10^{-4} (Cabrales Navarro et al., 2011). Para lograr esta convergencia se controló la velocidad y temperatura del helado en las diferentes zonas tanto del Hopper como del Barrel.

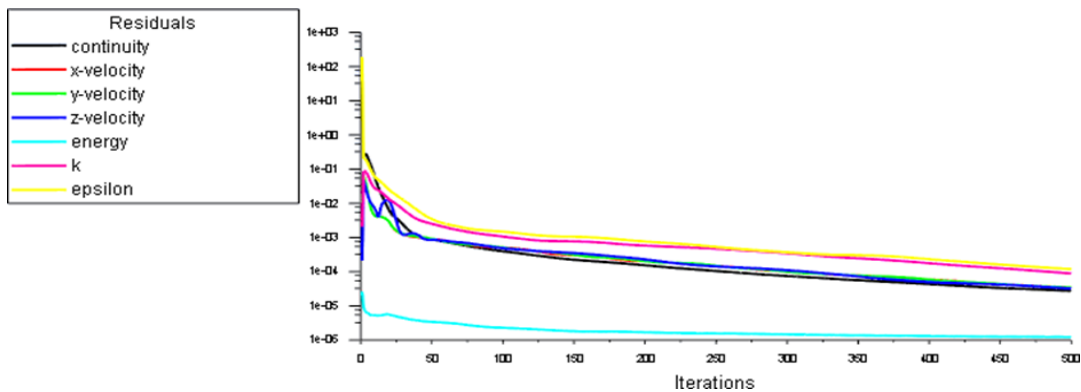
Los cálculos fueron realizados en un computador con las siguientes características:

- Procesador: Intel ® Core™ i5 1.8 GHz
- Memoria RAM: 4 Gb
- Tipo de sistema: Sistema operacional de 64 bits.

4.3.2.1. Hopper. Tras realizar 2000 iteraciones con un tiempo de simulado de 6 horas y 40 minutos, se obtuvo la convergencia, en la figura 11 se muestra la gráfica de residuales del proceso del Hopper.

Figura 11.*Residuales Hopper*

4.3.2.2. Barrel. Tras realizar 500 iteraciones con un tiempo de simulado de 1 hora y 10 minutos se obtuvo la convergencia, en la figura 12 se muestra la gráfica de residuales del proceso del Barrel.

Figura 12.*Residuales Barrel*

4.3.3. Post – Procesamiento

En esta etapa ANSYS Fluent provee herramientas que facilitan la visualización y análisis de los resultados obtenidos para el caso de estudio, brindando opciones de presentación de las

soluciones de las ecuaciones de energía y momento y demás variables de interés. En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones.

5. Resultados

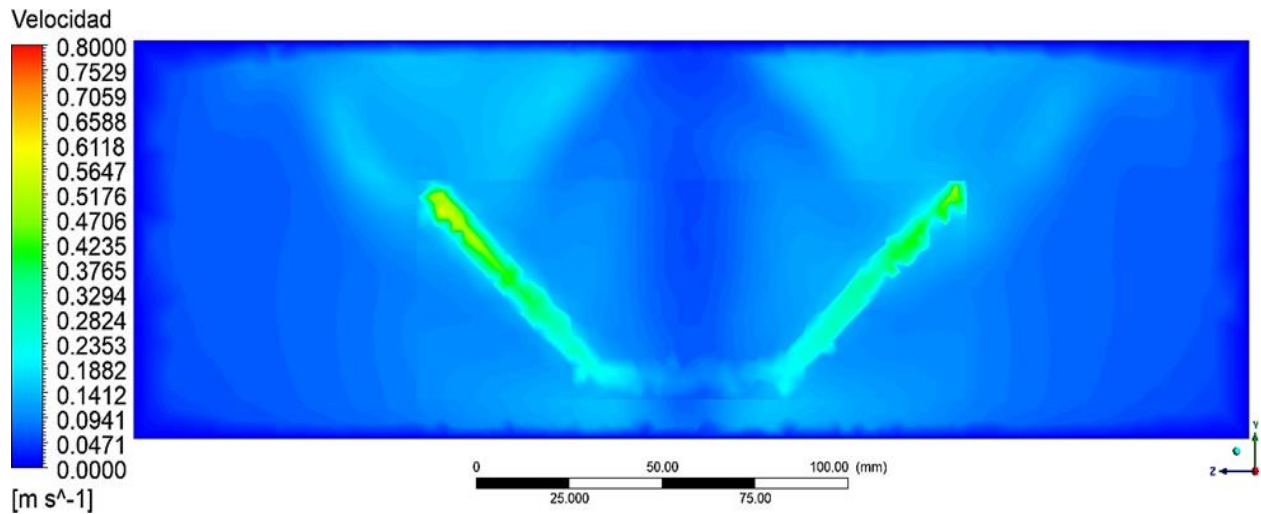
A partir de los procedimientos de simulación numérica se generaron contornos de velocidad y temperatura en el postproceso de CFD, cuyo análisis y comparación con la literatura de referencia se presenta a continuación.

5.1. Caso de Estudio Estacionario Hopper

Los resultados representan el comportamiento del flujo de helado en el Hopper y en el Barrel, como efecto de la agitación generada por el agitador. Para el caso del Hopper al tener un impulsor de tipo eje con dos aspas, se generó un movimiento envolvente alrededor de las mismas como se muestra en la figura 13, por lo que hubo mayor contacto en la región superior de las aspas, debido a que el área de contacto es mayor en esa zona, generándose zonas muertas en las paredes del recipiente donde la velocidad es de 0 m/s. El comportamiento de la velocidad del fluido se visualizó a través de un plano axial (YZ) donde se generó un contorno el cual evidencia la transmisión de momentum entre la zona de del rotor y la del estator alcanzando un valor de 0.31 m/s en las zonas cercanas al rotor.

Figura 13.

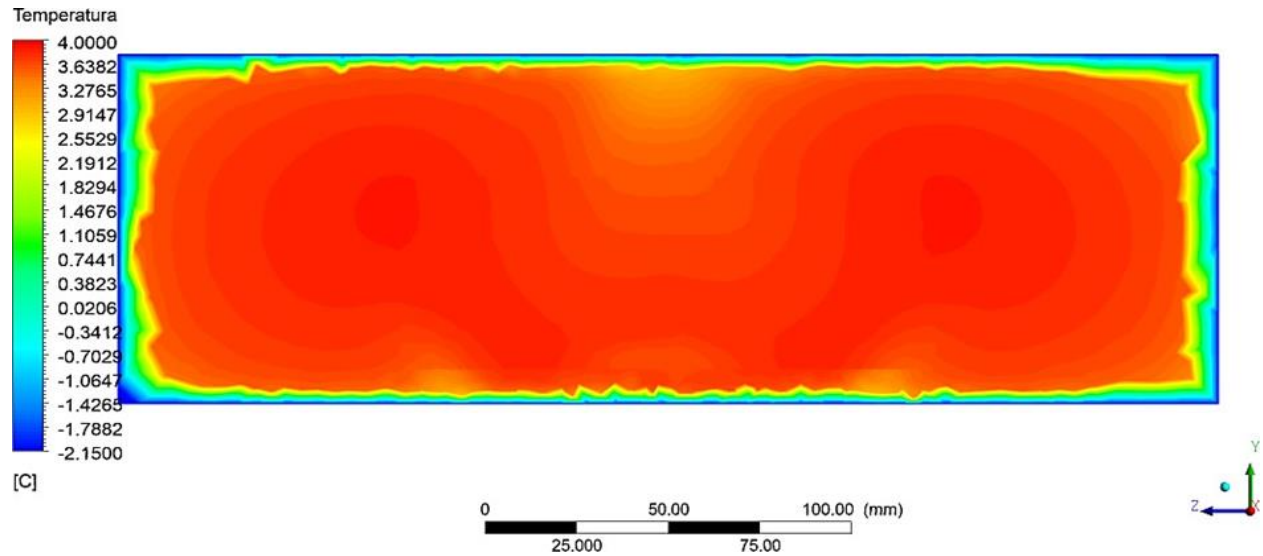
Perfil de velocidad Hopper



En la figura 14 se muestra el contorno del perfil de temperatura obtenido para la configuración del Hopper, se observa una distribución uniforme de la temperatura en el dominio del rotor con un valor de 4°C, se observa cómo se genera una transferencia de calor desde el seno del fluido hacia las paredes del recipiente, lo que asegura la conservación de las propiedades del helado tipo Soft Serve, evitando la congelación consecuencia de la formación de cristales en caso de enfriar bajo la temperatura de congelación que es de -2.5°C. Cabe mencionar que la temperatura de la pared de -2°C se debe al refrigerante usado.

Figura 14.

Perfil de temperatura Hopper

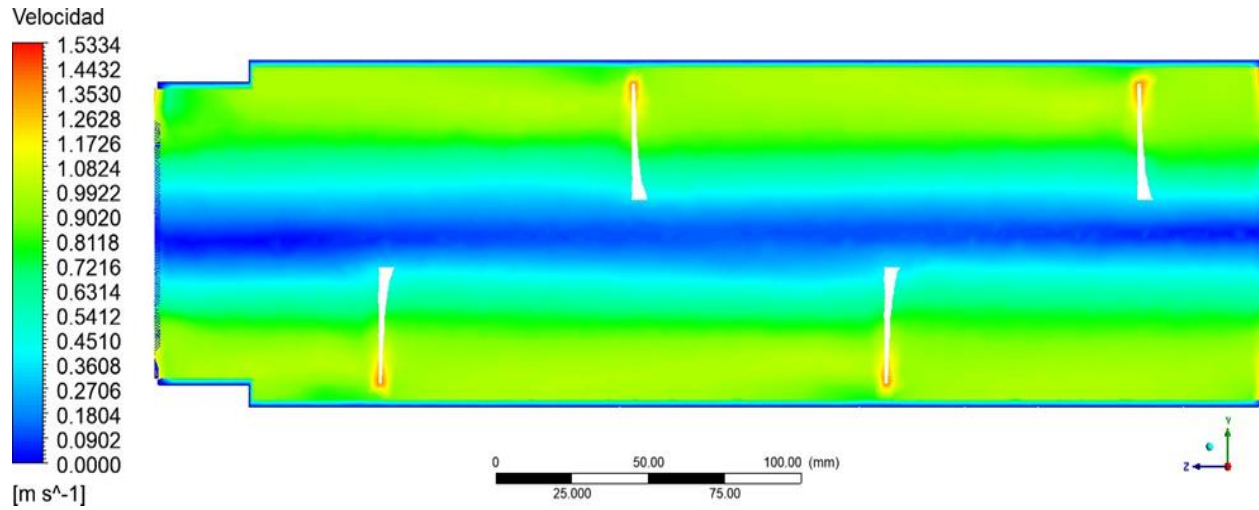


5.2. Caso de Estudio Estacionario Barrel

Para el Barrel se generó un mayor contacto entre el agitador y el fluido, consecuencia del tamaño del agitador, al ser en forma de tornillo sin fin, con dos aspas laterales, facilitó el movimiento de mayor cantidad de fluido dentro del recipiente como se puede observar en la figura 15. El perfil generado evidencia una zona con velocidad nula, ubicada cerca al eje rotatorio, y una mayor velocidad en las zonas cercas a los extremos de las aspas. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenido por Ballesteros y Quiroga (Ballesteros Martínez & Quiroga Villarraga, 2016) donde alrededor de la espiral se evidencia un valor de velocidad mayor con respecto a las paredes, lo cual favorece el corte de los núcleos de cristal que se generan cerca de las paredes del cilindro, permitiendo que esos fragmentos se dispersen entre el dominio del rotor, provocando la textura necesaria en la producción de helado tipo Soft Serve.

Figura 15.

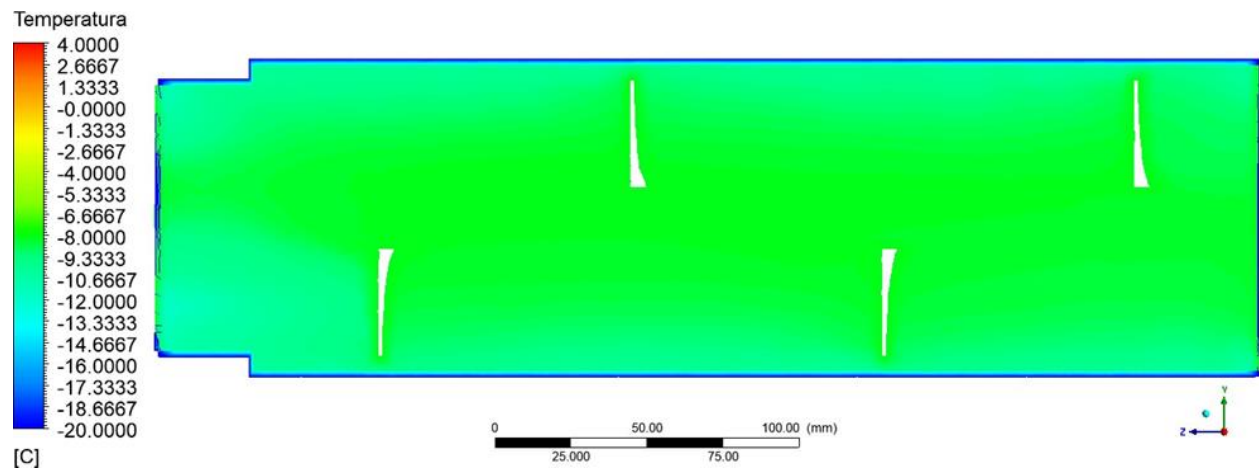
Perfil de velocidad Barrel



A continuación, en la figura 16 se muestra el perfil de temperatura generado en el Barrel, se puede observar que se pudo obtener la homogenización de la temperatura a lo largo del rotor manteniendo la mezcla en el valor buscado de -8°C , valor al que el helado mantiene sus características de Soft Serve. De la misma forma, se puede observar que la pared mantiene una temperatura de -20°C gracias al refrigerante, lo que promueve la generación de cristales.

Figura 16.

Perfil de temperatura Barrel



Los resultados obtenidos muestran una concordancia amplia con respecto a los valores de la literatura de referencia escogida, estos valores se muestran a continuación en la tabla 9.

Tabla 9.

Comparación valores obtenidos en la simulación en ANSYS 2020 R2 y los valores obtenidos por Ballesteros & Quiroga (2016)

Variable	Valores de referencia Simulación STAR-CCM+ 10.04.009	Valores obtenidos Simulación ANSYS 2020 R2
Velocidad Hopper [m/s]	0.3	0.31
Velocidad Barrel [m/s]	1.2	1.17
Temperatura de salida Hopper [°C]	4	4
Temperatura de salida Barrel [°C]	-8	-8

De la tabla 9 anteriormente mostrada se puede percibir una diferencia sobre el documento base en la velocidad del Hopper de 3,33%, en la velocidad del Barrel de 2,5% y, finalmente, en las temperaturas de salida del Hopper y del Barrel no hubo una diferencia. Cabe resaltar que estas diferencias son poco significativas, que podrían acuñarse a que se está haciendo uso de una herramienta de simulación diferente.

6. Conclusiones

Como producto de la práctica empresarial, se adquirió destreza en la resolución de problemas mediante CFD, a través del software ANSYS Fluent, por medio de formación ofrecida por el instituto ESSS y la empresa AC Ingeniería Virtual, la cual facilitó el desarrollo del estudio del sistema de intercambio de calor en la máquina de helado tipo Soft Serve.

Por otra parte, al realizar la simulación en el sistema ANSYS, se validó el perfil de velocidad con base en el trabajo desarrollado por Ballesteros y Quiroga (2016) para las dos unidades del sistema de refrigeración de una máquina de helados tipo Soft Serve, a través de la

comparación de los valores de velocidad obtenidos, corroborando que, de acuerdo a las condiciones tomadas para el sistema, se genera una velocidad de agitación igual a 0.31 m/s y 1.17 m/s para el Hopper y el Barrel respectivamente.

Finalmente, se comprobó mediante el estudio de las condiciones que describen la transferencia de energía en la máquina de helado y su aplicación en el software ANSYS Fluent, que se pueden obtener los valores de temperatura de salida esenciales para favorecer las características del helado suave, valores que son de 4°C para el Hopper y -8°C para el Barrel.

7. Recomendaciones

Se sugiere continuar el estudio del proceso de producción del helado tipo Soft Serve, analizando el proceso de pasteurización que se lleva cabo en la misma máquina donde se desarrolla el proceso de refrigeración con el objetivo que simular la máquina en su totalidad y tener un panorama completo de la operación realizada en esta.

De igual, es recomendable estudiar el efecto de otros modelos de turbulencia que puedan favorecer la descripción del comportamiento del fluido en los sistemas de intercambio de calor.

Bibliografía

- Álvarez Castro, H. C. (2011). Estudo do tempo de mistura em tanques de diesel com o uso da fluidodinâmica computacional. [Universidade Estadual de Campinas]. In Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química (Vol. 0, Issue 0).
<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266824>
- ANSYS Inc. (2013). ANSYS Fluent User' s Guide.
- Arana Pérez, M. P., Ochoa Laburu, C., & López Ruíz, F. (2001). Diseño del sistema de producción de una empresa manufacturera: de la planta virtual a la planta real, a través de la simulación. In Congreso de Ingeniería de Organización.
<http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2001//simulacion/EHU-5.pdf>
- Baek, S.-H., & Kim, N.-H. (2017). Optimization of the Scraper Speed and Improvement of the Refrigerant Path for the Evaporator of the Soft Ice Cream Machine. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 18(10), 8–14.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.8>
- Ballesteros Martínez, M. A., & Quiroga Villarraga, I. V. (2016). Modelamiento y simulación en CFD de la transferencia de momento y calor en los dos sistemas de refrigeración de una máquina de Soft Serve ice cream [Universidad de los Andes]. In Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/18838>
- Ben Lakhdar, M., Cerecero, R., Álvarez, G., Guilpart, J., Flick, D., & Lallemand, A. (2005). Heat transfer with freezing in a scraped surface heat exchanger. Applied Thermal Engineering, 25(1), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.007>

- Byun, H.-W., Lee, J.-W., & Kim, N.-H. (2012). Heat Transfer Characteristics in the Evaporator of a Soft Ice Cream Maker. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 13(4), 1466–1473. <https://doi.org/10.5762/kais.2012.13.4.1466>
- Cabrales Navarro, F., Álvarez Castro, H. C., Nunhez, J., Spogis, N., Soares, A., & Martignoni, W. (2011). COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC STUDY OF MIXING IN LARGE SCALE DIESEL STORAGE VESSELS. Disponible en: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266824>
- Cook, K. L. K., & Hartel, R. W. (2010). Mechanisms of ice crystallization in ice cream production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(2), 213– 222. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00101.x>
- El mercado de helados en Colombia crece en promedio 3,1%. (2017, February 2). <https://www.revistaialimentos.com/el-mercado-de-helados-en-colombia-crece-en-promedio-31-anual/>
- Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2013). *Ice Cream* (7th ed.). Springer, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6096-1>
- Hinestroza, A. C. (2020). Efectos en el empleo como consecuencia de la implementación de la industria 4.0 en Colombia. 2014 - 2020 (Vol. 21, Issue 1) [Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Economía, Bogotá]. Disponible en: https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/20008/6/2020-Copete-empleo_industria_4.0_.pdf
- Huerto Bujaico, H. O. (2013). Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el programa ANSYS CFX V.14.0 [Pontificia Universidad

Católica del Perú]. Disponible en:

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5059>

Kim, N.-H. (2016). Optimization of the Refrigerant Charge and the Expansion Valve Opening for the Soft Ice Cream Machine Using R-404A. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 17(8), 728–734.

<https://doi.org/10.5762/kais.2016.17.8.728>

Martínez, A., & Liendo, M. (2007). SECTOR LÁCTEO. INDUSTRIA DEL HELADO. UN ANÁLISIS DEL SECTOR. 17. <https://www.fcecon.unr.edu.ar/web>

Moreno, E. C. (2015). LA GLOBALIZACIÓN Y SUS EFECTOS EN LAS INDUSTRIAS LOCALES: LA INDUSTRIA VITIVINÍCOLA EN EL VALLE DE GUADALUPE EN ENSENADA, BAJA CALIFORNIA. *Iberoforum. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana*, 151–163.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=211042614007>

Osses; Juan. (2016, December 12). El método de volúmenes finitos.

<https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>

Prieto, Y. E. B., & Bedoya, E. Y. G. (2019). TRANSFORMACIÓN DEL MODELO 4.0 EN LOS SECTORES PRODUCTIVOS EN COLOMBIA [Universidad Cooperativa de Colombia].

https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/16016/1/2019_transformación_modelo_sectores.pdf

PROCOLOMBIA. (2020). PROCOLOMBIA. Los Servicios Colombianos de Industrias 4.0 Se Toman El Mundo. <https://procolombia.co/noticias/los-servicios-colombianos-de-industrias-40-se-toman-el-mundo-0>

Rueda Perez, J. E., & Esparza Piedrahita, V. M. (2019). Acuerdo Sobre el Comercio de Servicios (TiSA), Oportunidades para Colombia con la implementación de la industria

4.0 [Institución Universitaria Esumer].

[http://repositorio.esumer.edu.co/bitstream/esumer/1827/1/Informe de Pasantía TiSA v2.pdf](http://repositorio.esumer.edu.co/bitstream/esumer/1827/1/Informe%20de%20Pasantía%20TiSA%20v2.pdf)

Shannon, R. E., & Aldrete, F. (1988). Simulación de sistemas: diseño, desarrollo e implantación. Trillas.

Simarro, D. M. (2016). Food Industry 4.0. ¿Qué supone la digitalización de la industria

alimentaria? Food Industry 4.0. ¿Qué supone La Digitalización de La Industria

Alimentaria? [https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/food-industry-4-0-](https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/food-industry-4-0-digitalización-industria-alimentaria/)

[digitalización-industria-alimentaria/](https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/food-industry-4-0-digitalización-industria-alimentaria/)

Traslaviña, D. (2019, February 14). Colombia: Así se mueve la industria de los helados en el país

| América Retail. [https://www.america-retail.com/colombia/colombia-asi-se-mueve-la-](https://www.america-retail.com/colombia/colombia-asi-se-mueve-la-industria-de-los-helados-en-el-país/)

[industria-de-los-helados-en-el-país/](https://www.america-retail.com/colombia/colombia-asi-se-mueve-la-industria-de-los-helados-en-el-país/)