



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química

**Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en
sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la
cristalización de helado en un ICSR**

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta:

Cura Saldaña Víctor Daniel

Director de Tesis: **Dr. Mario Moscosa Santillán**

Codirector de Tesis: **Dr. Alejandro De la Cruz Martínez**



UASLP-Sistema de Bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis Digitales Restricciones de Uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en sensor virtual para la regulación de viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR © 2026 por Cura Saldaña, Víctor Daniel se distribuye bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Este proyecto se realizó en Planta piloto de ingeniería en alimentos adscrito a Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el periodo comprendido entre agosto del 2024 a julio del 2026, bajo la dirección del Dr. Mario Moscota Santillan y del Dr. Alejandro De la Cruz Martínez

El programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) del CONAHCYT, registro 000896. Número de la beca otorgada por SECIHTI: 4030006

Los datos del trabajo titulado “Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en un sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR” se encuentran bajo el resguardo del Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M13

Aprobación de Tema de Tesis

San Luis Potosí SLP a agosto/ 21 /2026

Comité Académico

La presente es para que quede asentado que el tema de Tesis de maestría: “Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en un sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR” del estudiante: Victor Daniel Cura Saldaña, que se llevará a cabo en el laboratorio de Planta piloto de ingeniería en alimentos (PPIA) de la Facultad de Ciencias Químicas, es APROBADO.

Sin más por el momento, quedo de Uds.

ATENTAMENTE

Dra. Erika Padilla Ortega,
Coordinadora del Posgrado



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química

Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta:

Cura Saldaña Victor Daniel

SINODALES:

Presidente: Dr. Erik César Herrera Hernández _____

Secretario: Dr. Mario Moscosa Santillán _____

Vocal: Dr. Alejandro de la Cruz Martínez _____

Vocal suplente: Dr. Raúl Ocampo Pérez _____

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dr. Mario Moscosa Santillán: director de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Alejandro De la Cruz Martínez: Codirector de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Erik César Herrera Hernández: Tutor de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Ciencias en Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M5

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a agosto / 21 /2026

En la ciudad de San Luis Potosí el día 21 del mes de agosto del año 2026 El que suscribe Victor Daniel Cura Saldaña Alumno(a) del programa de posgrado de Ciencias en Ingeniería Química adscrito a la Universidad Autónoma de San Luis Potosi manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dr. Mario Moscota Santillán y codirección de Dr. Alejandro De la Cruz Martínez cede los derechos del trabajo titulado Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo si el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección vdcs2001@icloud.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Victor Daniel Cura Saldaña



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Ciencias en Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a agosto/ 21 / 2026

L.B. María Zita Acosta Nava
Biblioteca de Posgrado FCQ

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada Desarrollo e implementación de una estrategia de control basada en sensor virtual para la regulación de la viscosidad durante la cristalización de helado en un ICSR presentada por el autor Victor Daniel Cura Saldaña. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 11% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Dra. Erika Padilla Ortega
Coordinadora Académica del Posgrado

Dedicatoria

A mi padre, Mario Cura Saldaña

A la memoria de mi madre, Bertha Saldaña Teran

A la memoria del amor de mi vida, Ana Araceli Medina López

A Pelusa

Agradecimientos académicos

Dr. Mario Moscosa Santillán, gracias por su paciencia, sus enseñanzas y el tiempo dedicado a mi formación, tanto académica como personal. Ha sido un camino lleno de aprendizajes, y le agradezco profundamente todo el acompañamiento brindado desde el inicio de mi carrera universitaria. Agradezco también la confianza que depositó en mí, en mi potencial y en todo aquello que podía llegar a lograr.

Maestra Rosa Elena Delgado Portales, encargada y jefa del Laboratorio de Microbiología de Alimentos, gracias por abrirme las puertas de su laboratorio y de su hogar, por sus palabras de aliento, sus regaños oportunos y, entre todo ello, por las incontables risas compartidas. Gracias por su apoyo, confianza y cariño a lo largo de este camino.

Dr. Alejandro De la Cruz Martínez, incontables son las memorias que hemos compartido desde hace ya varios años. Le agradezco profundamente el apoyo moral y académico que siempre me ha brindado, así como la valiosa amistad que hemos forjado a lo largo de este tiempo. Tanto este proyecto como el anterior difícilmente habrían sido posibles sin su apoyo, orientación y disposición constante para ayudarme.

Maestra Alejandra Loreno Becerra, gracias por tantas copias, impresiones y encargos, tanto míos como del Dr. Alejandro, pero, sobre todo, por el apoyo incondicional que me ha brindado desde que tuve la fortuna de conocerla, tanto en el ámbito académico como en el personal. Le guardo un profundo agradecimiento por todo lo que ha hecho por mí a lo largo de estos años.

Maestra Elsa Liliana Ramírez Zapata, muchas gracias por todo: por su apoyo, sus consejos y cada una de sus palabras de aliento. Desde haber formado parte de su primer grupo de Microbiología de Alimentos hasta llegar al momento en que podemos llamarnos colegas, tal como usted alguna vez me dijo, ha sido un camino que recuerdo con mucho cariño. Simplemente, gracias por todo.

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Ruiz Cabrera y a la Dra. Alicia Grajales Lagunes por la confianza depositada en mí al permitirme utilizar diversos equipos para el desarrollo de este proyecto. Asimismo, agradezco a la Mtra. Cecilia Rivera Bautista y a la Dra. Yanoula Herrera Vázquez por su disposición y todo el apoyo brindado durante la realización de mis experimentos. De igual manera, agradezco al Dr. Jaime David Pérez Martínez por abrirme las puertas de su laboratorio y facilitarme el uso de sus equipos, contribuyendo así al desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Dr. Erik César Herrera Hernández y al Dr. Raúl Ocampo Pérez por formar parte de mi comité tutorial, así como por el tiempo, la paciencia y la dedicación brindados durante la revisión de este trabajo. De igual manera, agradezco profundamente sus observaciones, recomendaciones y aportaciones, las cuales contribuyeron significativamente a enriquecerlo.

Gracias a todos los maestros que fueron parte de mi aprendizaje en esta etapa universitaria que empezó ya hace 7 años, y los nuevos que formaron parte en esta nueva etapa de maestría.

Agradecimientos personales

A mi padre, Mario Cura Saldaña, no existen palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho por mí. No sería quien soy hoy sin ti y sin mamá, que en paz descanse. Todo lo que he logrado lleva una parte de ustedes, de su esfuerzo, de su amor y de todo lo que me enseñaron. Este trabajo, con todo mi cariño y gratitud, está dedicado a ti.

En vida, quisiste que siguiera adelante, que cumpliera todo aquello que me propusiera y que, de alguna manera, supiera que siempre estarías conmigo, acompañándome mientras me comía el mundo. Hoy sé que así es. Siempre estarás en mi corazón, siempre serás el amor de mi vida y yo siempre seré tu Pelucas, cariño.

A mis amigos incondicionales, Abel y Stu, gracias por estar siempre ahí para mí, tanto en los buenos momentos como en los más difíciles. Su amistad, compañía y apoyo han significado muchísimo para mí, y por ello también forman parte de este trabajo y de todo lo que representa.

A todos mis amigos de la universidad y a las nuevas amistades que encontré en el camino; a mis compañeros de generación, de mi posgrado y de otros programas, muchas gracias por cada momento compartido, por las conversaciones, las risas, el apoyo y las experiencias que hicieron de esta etapa algo mucho más especial.

Resumen

La viscosidad aparente constituye un parámetro clave durante la cristalización dinámica del helado en intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR), pero su medición en línea resulta difícil debido a la naturaleza multifásica del producto y a las condiciones del equipo. En este trabajo se desarrolló e implementó una estrategia de control basada en un sensor virtual para regular la evolución de la viscosidad durante la cristalización discontinua de helado en un ICSR. El sistema fue rehabilitado e instrumentado con sensores de temperatura, caudal y corriente, integrados en una plataforma de adquisición y control desarrollada en Python. La viscosidad se estimó en línea mediante el modelo de De la Cruz *et al.* (2020), el cual utiliza la potencia del agitador y la temperatura del producto como variables de entrada. Se implementó un controlador en cascada que regula la pendiente de potencia mediante la manipulación del caudal de glicol. Se evaluaron tres condiciones: caudal máximo y consignas de pendiente de 5 y 3.5 W/min, obteniéndose pendientes medias de 6.81, 4.66 y 3.49 W/min, respectivamente, y viscosidades finales estimadas de 445.86, 480.34 y 552.21 Pa·s. El sensor virtual presentó un error relativo de 5.83 % frente a mediciones reológicas. La evaluación exploratoria de textura mostró diferencias en la fuerza de penetración entre condiciones durante las primeras 24 h de almacenamiento congelado. Los resultados demuestran la factibilidad de modificar la trayectoria de viscosidad mediante control de pendiente de potencia, aunque el seguimiento instantáneo se vio limitado por retardos y saturación del actuador.

Palabras clave: cristalización dinámica; viscosidad aparente; sensor virtual; control en cascada; intercambiador de calor de superficie raspada.

Abstract

Apparent viscosity is a key parameter during the dynamic crystallization of ice cream in scraped surface heat exchangers (SSHE), but its online measurement is challenging due to the multiphase nature of the product and equipment constraints. In this work, a control strategy based on a virtual sensor was developed and implemented to regulate viscosity evolution during batch ice cream crystallization in an SSHE. The system was rehabilitated and instrumented with temperature, flow, and current sensors, integrated into an acquisition and control platform developed in Python. Viscosity was estimated online using the model of De la Cruz *et al.* (2020), which uses agitator power and product temperature as input variables. A cascade controller was implemented to regulate power slope by manipulating glycol flow rate. Three conditions were evaluated: maximum flow rate and slope setpoints of 5 and 3.5 W/min, yielding mean slopes of 6.81, 4.66, and 3.49 W/min, respectively, and estimated final viscosities of 445.86, 480.34, and 552.21 Pa·s. The virtual sensor showed a relative error of 5.83 % compared to rheological measurements. Exploratory texture evaluation revealed differences in penetration force between conditions during the first 24 h of frozen storage. The results demonstrate the feasibility of modifying viscosity trajectories through power slope control, although instantaneous tracking was limited by delays and actuator saturation.

Keywords: dynamic crystallization; apparent viscosity; virtual sensor; cascade control; scraped surface heat exchanger.

INDICE GENERAL

1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
2.1 Intercambiadores de calor de superficie raspada	4
2.1.1 Fundamento y funcionamiento	5
2.1.2 Usos de los ICSR	11
2.2 Los postres congelados: helados	13
2.2.1 Parámetros reológicos del helado	16
2.2.2 Propiedades estructurales y de textura	17
2.3 La viscosidad en el helado	19
2.3.1 Viscosidad dinámica, aparente y compleja	20
2.4 Cristalización	24
2.4.1 Etapas de la cristalización	25
2.4.2 Helados y su proceso de cristalización	27
2.5 Fundamentos de medición de la viscosidad	28
2.5.1 Instrumentos reológicos	28
2.5.2 La viscosidad como un parámetro de calidad	31
2.6 Sensores virtuales	34
2.6.1 Tipos de sensores virtuales	36
2.6.2 Uso de un sensor virtual para la estimación de la viscosidad	37
2.7 Control automático de sistemas	43
2.7.1 Control por retroalimentación	44
2.7.2 Control proporcional integral derivado (PID)	44
2.7.3 Teoría de control moderna	46
2.7.4 Estrategias de control	47
2.7.5 Estado del arte del control aplicado a la cristalización y a procesos alimentarios	52
3. Justificación	56
4. Hipótesis	59
4.1 Pregunta de investigación	59
5. Objetivos	59
5.1 Objetivo general	59

5.2 Objetivos específicos.....	59
6. Bibliografía.....	60

Índice de figuras

<i>Figura 1. Intercambiador de calor de superficie raspada.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Estructura de un helado a -5°C (Romero y Mestres; 2004)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Secuencia de eventos en la fabricación de un helado.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Relación de la viscosidad con el esfuerzo de corte y cambios de velocidad y posición (Mixing, 2025)</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. Comportamiento de flujo de los fluidos (Rha et al. (2012)</i>	<i>24</i>
<i>Figura 6. Proceso de cristalización (Mullin, 2001)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7. Instrumentos reológicos comunes clasificados en tipo rotacional.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Esquema de un reómetro rotacional (Wang et al. 2019)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Esquema de un reómetro capilar (Wang et al. 2019)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. Relación entre las variables de operación, propiedades estructurales y sensoriales durante la cristalización dinámica del helado (De la Cruz et al., 2020).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11. Diagrama de un sensor virtual en un proceso</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12. Esquema de un controlador PID</i>	<i>45</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características de diferentes tipos de helado, extraída de (Goff y Hartel; 2013).....</i>	<i>15</i>
Tabla 2. Comparación entre los tipos de sensores virtuales.....	37
Tabla 3. Tipos de estrategias de control actuales.....	48

1. Introducción

La fabricación de helado comprende una serie de operaciones en las que la formulación, la transferencia de calor y el mezclado determinan la estructura y las propiedades mecánicas del producto. Una de las etapas más relevantes es la cristalización dinámica, realizada comúnmente en intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR por sus siglas en español). En estos equipos, la mezcla se enfría mientras es sometida a raspado y agitación, provocando la formación de cristales de hielo y un incremento de la resistencia al flujo.

Las condiciones bajo las que ocurre esta etapa influyen sobre la evolución térmica y estructural del producto. La temperatura del refrigerante, el caudal de circulación, la velocidad de agitación y el tiempo de procesamiento modifican la rapidez de extracción de calor y, con ello, la historia de cristalización. Sin embargo, la temperatura por sí sola no describe completamente el estado del helado, ya que dos productos que alcanzan una temperatura semejante pueden haber seguido trayectorias térmicas y mecánicas diferentes.

La viscosidad aparente proporciona información global sobre el comportamiento reológico del producto durante la cristalización. Conforme aumenta la fracción de hielo y se concentran los componentes de la fase no congelada, la mezcla presenta una mayor resistencia al movimiento del agitador. No obstante, la medición directa y continua de la viscosidad dentro de un ICSR resulta difícil debido al carácter cerrado del equipo, a la naturaleza multifásica del producto y a la rápida modificación de sus propiedades.

Una alternativa consiste en utilizar variables medibles en línea para estimar la viscosidad mediante un sensor virtual. En particular, la potencia consumida por el motor de agitación contiene información sobre la resistencia mecánica ejercida por el producto, mientras que la temperatura permite considerar la evolución térmica del proceso. De la Cruz *et al.* (2020) propusieron un modelo que combina ambas variables

para estimar la viscosidad aparente durante la cristalización de helado en un ICSR discontinuo.

La contribución del trabajo consiste en la instrumentación de un ICSR discontinuo, la integración de una plataforma de adquisición y supervisión, la implementación del sensor virtual y el desarrollo experimental de una estrategia de control de la pendiente de potencia mediante la manipulación del caudal de glicol. Asimismo, se comparan las trayectorias de viscosidad estimada obtenidas bajo diferentes condiciones de operación y se realiza una evaluación exploratoria de las respuestas texturales de las muestras producidas.

La presente tesis se estructura en ocho capítulos. En el Capítulo 1 se presenta el contexto del problema, los antecedentes que sustentan el desarrollo de la investigación y la contribución propuesta para el control de la viscosidad durante la cristalización dinámica de helado en un intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR). El Capítulo 2 aborda los fundamentos teóricos relacionados con la operación de los ICSR, la transferencia de calor, las propiedades reológicas y la cristalización del helado, así como los principios de los sensores virtuales y del control automático que sustentan la estrategia desarrollada. En el Capítulo 3 se establece la justificación del trabajo, considerando su relevancia desde las perspectivas científica, tecnológica y de proceso. El Capítulo 4 presenta la hipótesis de investigación, mientras que el Capítulo 5 establece el objetivo general y los objetivos específicos. En el Capítulo 6 se describen los materiales, la instrumentación, la metodología experimental, el desarrollo del sensor virtual, la estrategia de control en cascada y los procedimientos empleados para evaluar el desempeño del sistema y las propiedades mecánicas del producto. El Capítulo 7 presenta y discute los resultados obtenidos, incluyendo la caracterización del sistema de refrigeración, el desempeño de la estrategia de control, la estimación de la viscosidad mediante el sensor virtual y su relación con las propiedades mecánicas del helado durante el almacenamiento congelado. Finalmente, el Capítulo 8 presenta las conclusiones derivadas de los resultados, así como las principales limitaciones del estudio y las perspectivas para trabajos posteriores.

En conjunto, la estructura del trabajo permite analizar la relación entre las variables operativas del ICSR, la estimación en línea de la viscosidad y la respuesta del sistema ante diferentes trayectorias de control, con el propósito de evaluar la factibilidad de emplear un sensor virtual como herramienta para regular la evolución de la viscosidad durante la cristalización dinámica del helado.

2. Antecedentes

2.1 Intercambiadores de calor de superficie raspada

Los intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR) surgieron como respuesta a las limitaciones que presentan los intercambiadores convencionales al procesar fluidos altamente viscosos, no newtonianos o con tendencia al ensuciamiento. En este tipo de productos, la elevada viscosidad, la presencia de sólidos suspendidos y la alta adhesividad favorecen la formación de depósitos sobre las superficies de intercambio térmico, incrementando progresivamente la resistencia al flujo de calor y disminuyendo la eficiencia del proceso. Los ICSR a comparación de estos intercambiadores, fueron diseñados para mantener coeficientes de transferencia elevados incluso al procesar este tipo de fluidos. (Rosmaninho *et al.* 2007). Estas dificultades se hicieron particularmente evidentes en la industria alimentaria, especialmente en la producción de margarinas y helados. En este contexto, Vogt (1930) patentó a finales de la década de 1920 uno de los primeros equipos destinados al enfriamiento continuo de helados. Posteriormente, el trabajo Huggins (1931) demostró experimentalmente el efecto que tenía el raspado en el intercambio de calor en los ICSR. Estos desarrollos sentaron las bases para el diseño del primer ICSR comercialmente exitoso, desarrollado por Charlie Linn en la Girdler Corporation de Estados Unidos para el procesamiento continuo de margarinas. Posteriormente, con la acelerada industrialización de la producción de alimentos, los ICSR fueron rápidamente adoptados en la producción de diferentes productos como los lácteos, embutidos y salsas. Por otra parte, el enfriamiento continuo de helados fue otro notable logro de estos. A partir de la década de los 1960, su uso se amplió más allá de la industria alimentaria, llegando a la industria química, farmacéutica, petroquímica etc. Estos en la actualidad son utilizados ampliamente en la industria con diferentes propósitos, sin embargo, son particularmente empleados tanto en la industria farmacéutica como en la alimentaria (Solano *et al.* 2023).

En las últimas décadas, la investigación y el desarrollo de los ICSR se han orientado hacia el incremento de la eficiencia térmica, la reducción del consumo energético y la mejora de la confiabilidad operacional. Entre los principales avances destacan la

incorporación de materiales y recubrimientos con mayor resistencia al desgaste y a la corrosión, el desarrollo de sistemas automatizados de monitoreo y control capaces de regular variables operativas en tiempo real y la implementación de configuraciones geométricas más flexibles y adaptables a diferentes productos. Asimismo, los desarrollos comerciales recientes han incorporado sistemas de sellado sanitario y diseños que facilitan las operaciones de mantenimiento y limpieza (Kowalski *et al.*, 2025; Ye *et al.*, 2026).

2.1.1 Fundamento y funcionamiento

Los intercambiadores de calor de superficie raspada combinan transferencia de calor, mezclado mecánico y transporte de cantidad de movimiento para procesar fluidos cuya elevada viscosidad, comportamiento no newtoniano o tendencia a adherirse a las superficies limita el desempeño de los intercambiadores convencionales. Su configuración habitual consiste en un cilindro interno rodeado por una chaqueta por la que circula un fluido de servicio. En el interior se dispone un rotor provisto de aspas o cuchillas que pasan periódicamente cerca de la pared de intercambio, tal como se puede apreciar en la figura 1.

Las cuchillas cumplen dos funciones principales. En primer lugar, remueven la película de producto que se forma sobre la superficie térmica, reduciendo el espesor de la capa límite y evitando la acumulación de material. En segundo lugar, redistribuyen el producto desprendido hacia el seno del fluido, favoreciendo la mezcla y disminuyendo los gradientes internos de temperatura. Por ello, el desempeño del equipo no depende únicamente de la diferencia de temperatura entre el producto y el fluido de servicio, sino también de la velocidad de rotación, la geometría del rotor, la frecuencia de raspado y las propiedades reológicas del material procesado.

2.1.1.1 Mecanismo de transferencia de momento en intercambiadores discontinuos

En un equipo discontinuo, como el empleado en este trabajo, no existe un flujo axial neto de producto a través del intercambiador durante la cristalización. El movimiento

interno es generado principalmente por la rotación del conjunto vástago-aspas y por los flujos secundarios inducidos por la geometría del sistema. En consecuencia, el análisis hidrodinámico debe plantearse a partir de la velocidad periférica del rotor y no mediante una velocidad axial media propia de los equipos continuos. La velocidad característica del movimiento rotacional puede expresarse como:

$$u_t = \pi DN \quad (\text{Ec. 1})$$

donde u_t es la velocidad tangencial del rotor, D es su diámetro y N es la frecuencia de rotación. A partir de esta velocidad puede definirse un número de Reynolds rotacional:

$$Re_{rot} = \frac{\rho ND^2}{\mu_{app}} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde ρ es la densidad del producto y μ_{app} es su viscosidad aparente evaluada a una condición de corte representativa. En fluidos no newtonianos, esta viscosidad no es constante, por lo que el valor de Re_{rot} cambia tanto con la velocidad de rotación como con la evolución reológica del producto.

Durante la cristalización del helado, la formación de cristales de hielo concentra progresivamente la fase líquida no congelada y aumenta la resistencia del producto a la deformación. Como resultado, la viscosidad aparente se incrementa y el número de Reynolds rotacional disminuye. Esto favorece un régimen dominado progresivamente por fuerzas viscosas, lo que se traduce en un régimen predominantemente laminar. Aunque la clasificación definitiva del flujo requiere conocer las propiedades reológicas y las dimensiones reales del equipo.

2.1.1.2 Mecanismo de transferencia de calor

La transferencia de calor entre la pared y el producto puede caracterizarse mediante el número de Nusselt:

$$Nu = \frac{hD_c}{k} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, D_c es una longitud característica del espacio de proceso y k es la conductividad térmica del producto. Por otro lado, el número de Prandtl relaciona la difusión de cantidad de movimiento con la difusión térmica:

$$Pr = \frac{c_p \mu_{app}}{k} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde c_p es la capacidad calorífica específica. En el caso de fluidos altamente viscosos, el incremento de μ_{ap} eleva el número de Prandtl y modifica el desarrollo de las capas límite térmica e hidrodinámica. Las correlaciones disponibles para estimar Nu en los ICSR suelen expresarse en forma general como:

$$Nu = C \cdot Re_{rot}^a \cdot Pr^b \cdot \left(\frac{D}{D_c}\right)^c \cdot n_b^d \quad (\text{Ec. 5})$$

donde n_b representa el número de aspas y C , a , b , c y d son parámetros determinados experimentalmente. Estos parámetros no son universales: dependen de la geometría, el régimen de flujo, la condición de operación continua o discontinua y el comportamiento reológico del producto. Por ello, una correlación obtenida con agua o con un fluido newtoniano no debe extrapolarse directamente al helado durante la cristalización.

2.1.1.3 Consumo energético y su relación con la reología

La rotación del agitador requiere que el motor suministre el torque necesario para vencer la resistencia mecánica del equipo y la resistencia ejercida por el producto. La potencia mecánica transferida al eje se relaciona con el torque mediante:

$$P_m = \tau_m \omega \quad (\text{Ec. 6})$$

donde P_m es la potencia mecánica, τ_m es el torque resistente y ω es la velocidad angular. Cuando la velocidad de rotación se mantiene aproximadamente constante, un aumento del torque se refleja en un incremento de la potencia requerida.

El torque total no depende exclusivamente de la viscosidad del producto. También incluye pérdidas en rodamientos, sellos, transmisión y otros componentes mecánicos. Además, la potencia eléctrica medida incorpora la eficiencia del motor y del sistema de accionamiento. De manera general:

$$P_{total} = P_0 + P_{producto} + P_{pérdidas} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde P_0 representa el consumo basal del equipo y $P_{producto}$ la contribución asociada a la resistencia reológica del material. Por ello, la potencia eléctrica no constituye una medición directa de viscosidad, pero puede emplearse como variable inferencial cuando el equipo opera bajo condiciones reproducibles y existe un modelo previamente calibrado.

En la cristalización del helado, la formación de una fase sólida dispersa y la concentración de la fase no congelada incrementan la resistencia al movimiento del agitador. Este fenómeno produce un aumento progresivo del torque y de la potencia consumida. La relación entre potencia y viscosidad es, sin embargo, no lineal y depende de la temperatura, la velocidad de rotación, la geometría y el estado estructural del producto. Esta dependencia justifica el empleo de un sensor virtual que combine potencia y temperatura para estimar la viscosidad aparente, en lugar de asumir una correspondencia directa entre ambas variables.

En la actualidad, los ICSR presentan una amplia variedad de configuraciones, orientadas a optimizar la eficiencia térmica y las propiedades del fluido tratado. Entre estas variantes se encuentran diseños con paletas perforadas, con el propósito de reducir el peso de la estructura y modificar los patrones de flujo del producto,

promoviendo una mejor distribución de este y reduciendo la tasa de cizallamiento. Estos orificios permiten un paso parcial del fluido, lo que ayuda a disminuir la resistencia hidrodinámica, minimizando la energía requerida por el motor de agitación (Smith *et al.*, 2010; Blel *et al.*, 2013). Asimismo, existen otro tipo de configuraciones no circulares, como chaquetas de sección oval o elíptica, diseñadas con el objetivo de minimizar la canalización del fluido y evitar zonas de bajo esfuerzo cortante. Esta geometría surge debido a que en una geometría circular se pueden favorecer patrones de flujo que reducen la eficiencia de mezcla y la uniformidad térmica; esto debido a que se trabaja con fluidos de alta viscosidad. Por otro lado, la geometría de la chaqueta altera el campo de velocidades del fluido de servicio y mejora la transferencia de calor en la superficie de intercambio. En general, los ICSR presentan diferentes ventajas respecto a los intercambiadores de calor tradicionales. Sin embargo, también llevan consigo algunas desventajas, algunos ejemplos son los siguientes: (Qin *et al.*, 2002).

Ventajas

- Intercambio de calor. Gracias a las aspas unidas al rotor, el producto cercano a la superficie de intercambio es continuamente removido y mezclado con el fluido circundante, disminuyendo la formación de gradientes térmicos y favoreciendo una distribución más uniforme de la temperatura.
- Amplio rango de operación. Los ICSR pueden procesar fluidos con viscosidades considerablemente superiores a las admisibles en intercambiadores convencionales, incluyendo productos no newtonianos, emulsiones y suspensiones con sólidos dispersos.

Desventajas

- Altos costos. Como consecuencia de su compleja geometría, los ICSR requieren una mayor inversión a comparación de los intercambiadores convencionales.

- Complejidad de limpieza y mantenimiento. La presencia de elementos móviles internos, zonas de difícil acceso y productos altamente adherentes puede incrementar la frecuencia y complejidad de las operaciones de limpieza y mantenimiento, particularmente en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas. (Blel *et al.*, 2013).

En la Figura 1 se muestra un intercambiador de calor de superficie raspada continuo. El fluido a procesar circula por el cilindro interno (estator), mientras que el fluido de servicio (refrigerante en el caso de los helados) circula por la camisa externa, la cual funge como chaqueta. La temperatura del refrigerante se establece típicamente en un rango entre -10 y -35 °C, dependiendo de la temperatura y de las propiedades finales deseadas del producto. En el interior del cilindro interno se encuentra el vástago (rotor) acoplado a las aspas raspadoras, generalmente fabricadas en acero inoxidable, aunque en aplicaciones específicas pueden emplearse materiales plásticos (Smith *et al.*, 2010). Estas aspas, comúnmente dispuestas en configuraciones de dos o cuatro elementos equiespaciados, cumpliendo así una doble función: remover la película de producto adherida y promover la agitación del fluido (Qin *et al.*, 2002; Blel *et al.*, 2013).

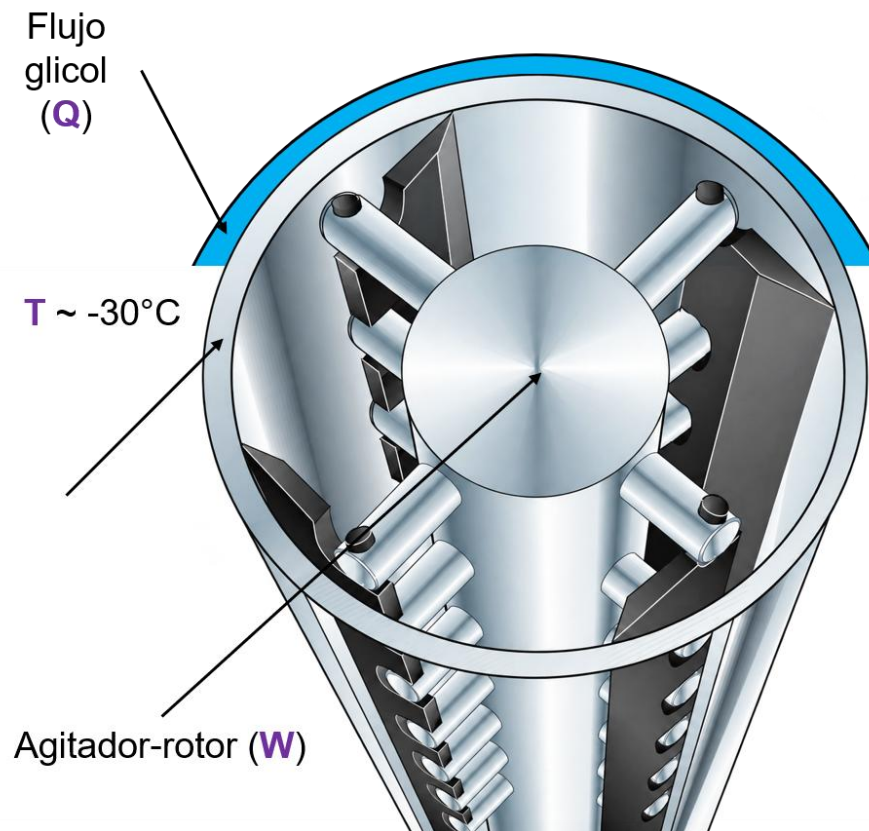


Figura 1. Intercambiador de calor de superficie raspada.

2.1.2 Usos de los ICSR

Aunque los principios de operación de los ICSR son comunes a todas las aplicaciones, la importancia relativa de la transferencia de calor, el mezclado y el esfuerzo de corte varía dependiendo del producto procesado. Por esta razón, diferentes sectores industriales han adoptado esta tecnología para resolver problemas específicos de procesamiento. Estos equipos resultan particularmente útiles en aquellos fluidos que presentan una reología no newtoniana, una alta viscosidad, tendencia a formar sedimentos o sensibles térmicamente.

Entre las principales industrias que hacen uso de ellos se encuentran las siguientes:

Sector químico y petroquímico.

- Desparafinado de aceites lubricantes: Los aceites lubricantes pesados se enfrían de forma controlada a bajas temperaturas para inducir la cristalización selectiva de la cera. Las cuchillas remueven de forma continua los cristales de cera que se adhieren a la pared fría del cilindro, arrastrándolos por la corriente hacia filtros rotativos de vacío o centrifugas donde se separan físicamente, garantizando que el aceite lubricante conserve una baja viscosidad a bajas temperaturas.
- Cristalización de p-xileno: Procesamiento continuo de mezclas de isómeros de xileno para purificar y aislar cristales de p-xileno mediante enfriamiento severo. Este funge como un intermediario químico esencial en la síntesis de poliésteres y plásticos PET.

Sector farmacéutico y cosmético

- Fabricación de Emulsiones, Cremas y Lociones: Enfriamiento controlado junto con un mezclado continuo de fases oleosas y acuosas para inducir la emulsificación de cremas de cuidado facial, lociones corporales y geles capilares.
- Preparación de pomadas: Enfriamiento de bases grasas o de vaselina que incorporan principios activos termosensibles en la suspensión. El raspado continuo evita la cristalización descontrolada de la grasa de la base, logrando una pomada suave con una distribución del principio activo.

2.1.2.1 Sector alimentario

En el sector alimentario, los ICSR tienen una amplia gama de usos, abarcando desde procesos de pasteurización de diferentes productos como ketchup, mayonesa, hummus, pures de frutas, chocolates, etc., hasta procesos de cristalización como la producción de helados. En ambas aplicaciones lo que se logra no es solo un buen intercambio de calor sino también un buen mezclado, lo cual lo vuelve muy atractivo por las características que presentan la mayoría de los productos de este sector. Una de las características que presentan estos alimentos son sus múltiples fases (sólido-líquido, sólido-gas o emulsiones), donde la distribución de temperatura y el esfuerzo

de corte influyen directamente en la microestructura y, por ende, en las propiedades sensoriales que percibirán los consumidores. Entre todas las aplicaciones alimentarias, la producción de helado constituye probablemente el ejemplo más representativo del potencial de los ICSR, para el enfriamiento hasta llegar a la cristalización.

Durante la cristalización dinámica del helado ocurren simultáneamente fenómenos de transferencia de calor, cristalización del agua, incorporación de aire y un incremento progresivo de la viscosidad aparente de la mezcla. La calidad final del producto depende directamente de la interacción entre estos fenómenos, ya que determinan el tamaño de los cristales de hielo, la estabilidad de las burbujas de aire y la microestructura final del alimento. Debido a que los ICSR son capaces de proporcionar enfriamiento intenso y elevados esfuerzos de corte de manera simultánea, estos equipos se han consolidado como la tecnología predominante para la fabricación industrial continua de helados (Rao y Hartel, 2006).

2.2 Los postres congelados: helados

El nombre postres congelados, desde un punto de vista general, es usado para referirse a todos los productos lácteos batidos que son producidos mediante un enfriamiento controlado y que son consumidos a una baja temperatura. En esta definición están incluidos los helados. Estos pueden definirse como un sistema multicomponente que consiste en una red de glóbulos de grasa (emulsión), cristales de hielo en agua (suspensión), y una espuma (aire) englobados en una fase acuosa altamente viscosa con diferentes componentes como la leche, endulzantes, estabilizantes y saborizantes. Además, en los últimos años estos pueden o no contener grasas en su formulación (Marshall *et al.*, 2003). De la mano con lo anterior, existen diferentes categorías de helado dependiendo de su contenido de grasa, desde las versiones premium (alto contenido de grasa) hasta versiones “light” (bajo contenido de grasa) o incluso versiones sin grasa (Goff y Hartel; 2013). Estos últimos surgen a partir de las últimas tendencias de consumo de la sociedad actual. En referencia a su volumen, el helado está compuesto aproximadamente por un 50% de aire, 25% de una

fracción de hielo, 5% de grasa y el 20% restante por endulzantes, proteínas y demás componentes menores (Romero y Mestres; 2004). La estructura física del helado es un sistema fisicoquímico complejo. Las burbujas de aire están dispersas en una fase líquida continua con cristales de hielo incrustados. Esta fase líquida también contiene los glóbulos de grasa, las proteínas de la leche, sales insolubles, cristales de lactosa, y en algunos casos estabilizantes (Arbuckle 1986). Es así como el producto final consiste en una fase líquida, sólida y gaseosa, constituyendo un producto tri fásico. En la figura 2 se representa la estructura microscópica de un helado a -5°C .

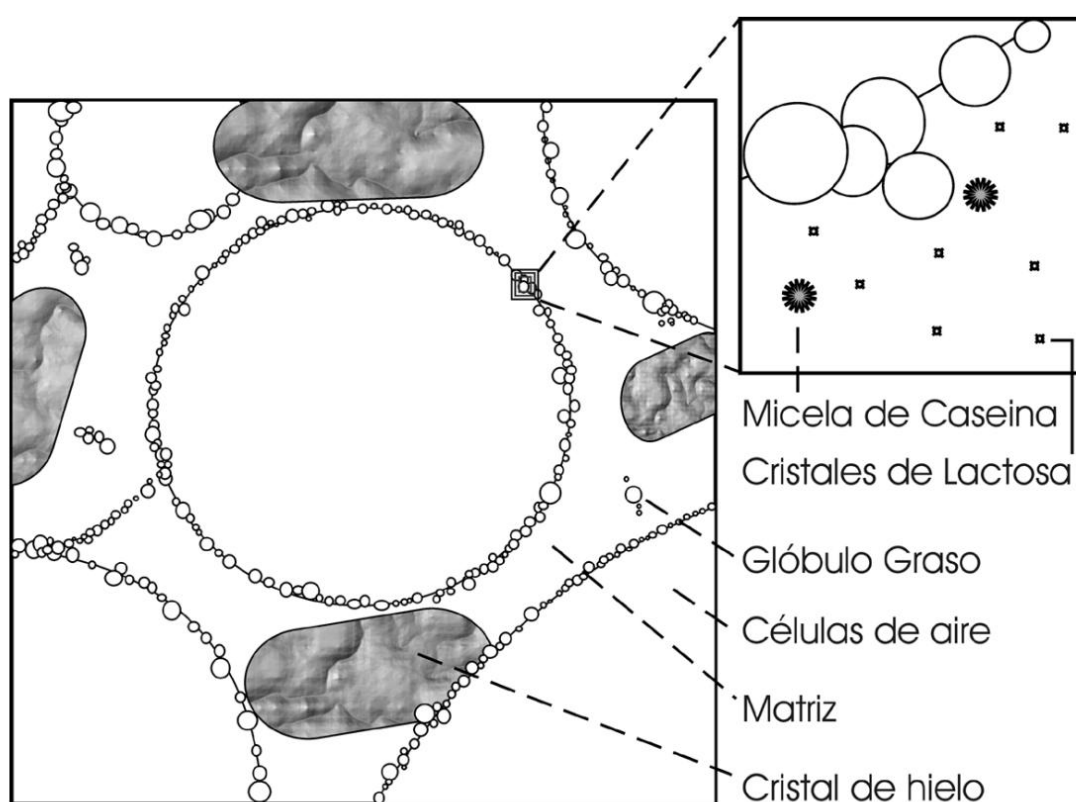


Figura 2. Estructura de un helado a -5°C (Romero y Mestres; 2004)

La composición de los helados varía dependiendo del mercado y de la localidad donde se comercialice. Está definida generalmente por su contenido de grasa, sólidos no grasos, endulzantes, estabilizantes, emulsificantes y agua. En los últimos años, ha existido una tendencia por alimentos más saludables. Esto ha causado el surgimiento

de una gran variedad de productos, donde se clasifican en diferentes calidades dependiendo la composición de sus componentes, esto con el fin de satisfacer las nuevas demandas de los consumidores. La composición de un helado promedio relativamente bueno es de 12 % de grasa, sólidos no grasos 11 %, azúcar 15 %, estabilizantes y emulsificantes 0.3 % y sólidos totales 38.3 %. En la tabla 1, se pueden apreciar los diferentes tipos de helados que existen, además de yogurts y sorbetes. Mientras que hay consumidores cuyo deseo es un helado bajo en grasa y calorías, hay otros que buscan un helado más original y con mejores sensaciones, teniendo mayor presencia de la grasa láctea y menor porcentaje de aditivos y endulzantes. Sin embargo, es importante saber que el componente con mayor presencia en el helado es el agua. Aunque los demás componentes aportan a la reología final del helado, el agua, al ser el componente con mayor presencia en el helado, es quien tiene mayor peso en las propiedades finales. Con todo lo anterior, se puede observar que las propiedades físicas del helado concebidas al momento de su formación son función de su composición inicial, además de afectar a los tiempos de derretimiento y su textura.

Tabla 1. Características de diferentes tipos de helado, extraída de (Goff y Hartel; 2013)

Grupo	Grasa láctea	Sólidos no grasos	Endulzantes	Estabilizantes y emulsificantes	Sólidos totales
Helado sin grasa	<0.5	12-14	18-22	1.0	28-32
Helado bajo en grasa	2-5	12-14	18-21	0.8	28-32
Helado light	5-7	11-12	18-20	0.5	30-35
Helado reducido en grasa	7-9	10-12	18-19	0.4	32-36
Helado económico	10	10-11	15-17	0.4	35-36
Helado estándar	10-12	9-10	14-17	0.2-0.4	36-38
Helado premium	12-14	8-10	13-16	0.2-0.4	38-40
Helado super premium	14-18	5-8	14-17	0-0.2	40-42
Yogurt regular	3-6	9-13	15-17	0.5	30-36
Yogurt sin grasa	<0.5	9-14	15-17	0.6	28-32
Sorbetes	1-2	1-3	22-28	0.4-0.5	28-34

En el proceso de elaboración del helado, el enfriamiento es llevado a cabo comúnmente en un ICSR, donde ocurre la cristalización dinámica del helado. En este se suministra el aire a la base del helado al mismo tiempo que el enfriamiento y el raspado se llevan a cabo. Es aquí donde los cristales de hielo aparecen y empiezan a generar la textura de este. Posteriormente, una vez finalizado la cristalización, el helado procede a una etapa de maduración, donde el helado es almacenado a -18°C comercialmente (Drewett y Hartel; 2007). El tamaño de los cristales de hielo al salir de los ICSR se ve afectado por varios parámetros de operación del equipo, así como de la formulación de la base.

Así, por ejemplo, variables de proceso, tales como la velocidad de enfriamiento o la velocidad de agitación afectan el tamaño y distribución final de los cristales. Estos cristales continúan evolucionando durante la maduración del helado mediante una cristalización estática. Por lo que la cristalización dinámica como la estática tienen igual importancia en la calidad final del helado, sin embargo, esta última depende de las características a la salida del ICSR (Drewett y Hartel 2007; Marshall *et al.*, 2003). Los consumidores en la actualidad demandan sabor, cuerpo, textura y un color agradable en el producto terminado. Para esto, se debe promover la nucleación, lo que promueve la formación de cristales de hielo pequeños (entre 10-20 micrómetros). Sin embargo, si el crecimiento de los cristales prevalece ante la nucleación, el tamaño de cristal puede superar los 50 micrómetros, y estos causarán una sensación áspera no deseable en el consumidor (Miller-Livney y Hartel, 1997). Es por lo que, el tamaño de los cristales de hielo tiene un alto impacto en las propiedades, así como los parámetros reológicos del helado.

2.2.1 Parámetros reológicos del helado

La reología propiamente dicha, es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales, en otras palabras, como es que se comportan, deforman y fluyen los materiales. Esta considera dos materiales ideales, sólidos elásticos y líquidos viscosos. Los alimentos a diferencia de otro tipo de materiales presentan un comportamiento intermedio entre ambos tipos, es así, que son llamados

“viscoelásticos” (Stanley *et al.*, 1996). De la reología se derivan propiedades reológicas de los materiales, como por ejemplo la viscosidad. Para el caso particular de los helados, sus propiedades nos ayudan a describir cómo éstos se comportan bajo estrés y tensión de corte externos en diferentes escenarios, como por ejemplo al momento de ser consumidos o procesados. Es por eso por lo que conocerlas y entenderlas es una parte fundamental del entendimiento de este tipo de alimentos. Estas propiedades pueden clasificarse principalmente en dos tipos, en propiedades estructurales y de textura. Mientras que las propiedades estructurales nos dicen de qué manera los componentes están organizados dentro del helado, las propiedades de textura se refieren a las sensaciones que experimentan los consumidores.

2.2.2 Propiedades estructurales y de textura

Propiedades estructurales. Las propiedades estructurales del helado están determinadas por la forma en que sus componentes interactúan entre sí. La estructura del helado puede describirse en términos de sus comportamientos de las distintas fases que presenta, más concretamente, en la manera en que los componentes están distribuidos en la mezcla (El Owni y Zeinab, 2009). Los componentes microestructurales del helado, como la grasa, los cristales y burbujas de aire, son fundamentales para la estructura y las propiedades generales del helado. Cada uno de sus componentes puede existir en distintas fases dentro del helado. El conjunto de todas las fases es lo que le otorga la estructura característica de este postre, sin embargo, hay fases con mayor impacto que otras. La grasa se encuentra dispersa en la matriz en forma de glóbulos constituyendo una emulsión. Por otro lado, el aire encapsulado dentro del helado forma la espuma, que se mantiene firme gracias a la emulsión formada por la grasa. Por último, el agua, se encuentra como agua líquida y cristalizada, formando una solución (constituida por azúcares, aditivos, proteínas y componentes menores). La distribución de los componentes, principalmente los cristales de agua afectan significativamente la estructura y estabilidad del helado, por lo que controlar su forma, distribución y cantidad resulta de suma importancia para obtener un buen helado. Por ejemplo, lo que se considera como un buen helado es

aquel en el que el tamaño de cristal es muy pequeño y tiene una buena distribución de éste, estos son considerados como helados suaves.

Propiedades de textura. Las propiedades de textura son afectadas por las ya mencionadas propiedades estructurales, principalmente los cristales (distribución, tamaño etc.). Sin embargo, también dependen de las condiciones de procesamiento, así como de almacenamiento. Una manera para cuantificar la textura del helado es mediante las propiedades relacionadas a los aspectos coloidales de éste, tales como viscosidad, dureza, y elasticidad (Aboufazli *et al.*, 2015). La dureza se refiere a la resistencia que presenta el helado a ser comprimido o deformado, por otro lado, la viscosidad se refiere a la resistencia que tiene a fluir. Por último, la elasticidad es la capacidad que tiene de sufrir deformaciones bajo estrés y regresar a su estado original una vez que se deja de aplicar (Rout y Saha, 2023). Para conocer estas propiedades se puede hacer uso de técnicas reológicas como de análisis de textura. La reología involucra la medición de flujos y deformaciones provocadas al helado bajo ciertas cantidades de estrés, mientras que el análisis de textura lo hace mediante una sonda que lo comprime o lo deforma.

Aunque las propiedades estructurales y de textura pueden describirse de manera independiente, ambas están estrechamente ligadas a las condiciones de operación durante la fabricación del helado. Variables de proceso como la velocidad de enfriamiento, que puede ser modificada mediante la modulación del flujo de refrigerante, que a su vez induce el subenfriamiento en el helado, modifica la cinética de cristalización, alterando la magnitud de nucleación y del crecimiento de los cristales de hielo. Como consecuencia, cambia el tamaño y distribución de los cristales, así como la organización de la grasa y del aire dentro del sistema, lo que termina produciendo modificaciones en la microestructura del helado. Estos cambios estructurales se reflejan posteriormente en propiedades reológicas más fáciles de cuantificar como la viscosidad aparente y, finalmente, en atributos sensoriales tales como la suavidad, la dureza y la cremosidad percibidas por el consumidor. Debido a esta relación causa-efecto, las variables de operación representan un punto de

actuación para estrategias de monitoreo y control orientadas a mejorar la calidad final del producto. Esta secuencia de sucesos se representa de manera visual en la figura 3.

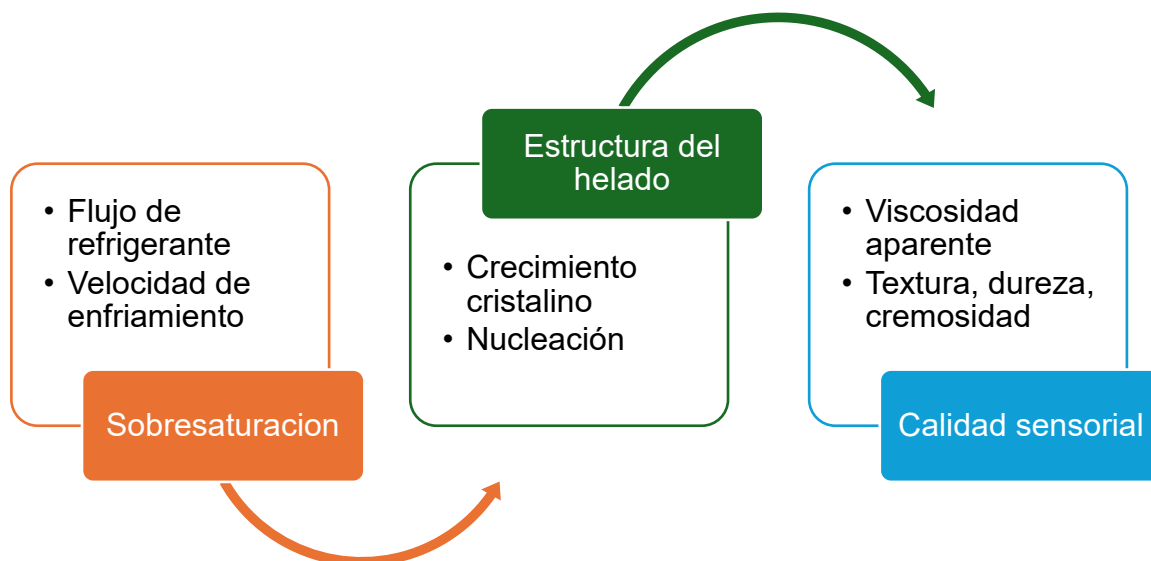


Figura 3. Secuencia de eventos en la fabricación de un helado

2.3 La viscosidad en el helado

La viscosidad es una propiedad física que cuantifica la resistencia interna de un fluido a fluir o deformarse bajo la acción de un esfuerzo cortante (Krishnan, 2010). Desde la perspectiva de los fenómenos de transporte, la viscosidad constituye un mecanismo de difusión de cantidad de movimiento, ocasionado por la transferencia de momento entre capas a diferentes velocidades. Debido a su significativa influencia sobre el comportamiento de líquidos o gases, es una de las propiedades reológicas más importantes y ha sido objeto de estudio desde la antigüedad (Blair y Williams, 1944). En la actualidad el comportamiento de la viscosidad se explica mediante distintas aproximaciones teóricas, muchas de ellas derivadas a partir de los fundamentos de la teoría cinética y de los trabajos de Maxwell sobre el transporte de movimiento en

fluidos (Rha, 2012). Entre las principales teorías para explicar la viscosidad se encuentran las siguientes:

- ❖ Teoría molecular. La teoría relaciona la viscosidad a dos factores, a la distribución de las moléculas cercanas que rodean a una molécula dada, y al potencial intermolecular entre un par de moléculas.
- ❖ Teoría de proceso de tasa. La teoría estipula que una molécula tiene que pasar a través de una barrera de potencial para fluir.
- ❖ Teoría de difusión. La teoría sugiere que, bajo una aplicación de fuerza de corte externa, la difusión de las moléculas incrementa en la dirección que se está dando el campo de corte, y el desplazamiento natural de las moléculas decrece en la dirección contraria al corte.

Debido a la viscosidad, cuando un objeto se mueve dentro de un fluido, este experimenta resistencia por las fuerzas de fricción y gradientes de presión, lo que resulta en una pérdida de energía mecánica. A esta viscosidad se le conoce como viscosidad aparente, la cual es importante en la reología de los alimentos.

2.3.1 Viscosidad dinámica, aparente y compleja

La viscosidad cuantifica la resistencia de un material al flujo cuando es sometido a una deformación. En un fluido newtoniano, el esfuerzo cortante τ es proporcional a la tasa de corte $\dot{\gamma}$:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde μ es la viscosidad dinámica. Para un fluido newtoniano, μ permanece constante a temperatura y presión definidas, independientemente de la tasa de corte aplicada. En materiales no newtonianos, la relación entre τ y $\dot{\gamma}$ no es lineal, por lo que no existe un único valor constante de viscosidad. En estos casos se define la viscosidad aparente:

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Ec. 9})$$

La viscosidad aparente representa la resistencia al flujo bajo una tasa de corte específica. Por tanto, su valor solo es comparable cuando se reportan también la temperatura, la tasa de corte, la geometría de medición y, cuando corresponda, el historial de deformación de la muestra.

Las mezclas para helado presentan generalmente un comportamiento pseudoplástico o de adelgazamiento por corte. En este tipo de comportamiento, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la tasa de corte. Una representación común es el modelo de Ostwald-de-Waele:

$$\mu_{app} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Ec. 10})$$

donde K es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento de flujo. Para un fluido pseudoplástico, $n < 1$. Este modelo permite describir el comportamiento en un intervalo limitado de tasas de corte, pero no representa necesariamente la existencia de esfuerzo de cedencia ni los efectos dependientes del tiempo.

Durante la cristalización del helado, la viscosidad aparente no depende únicamente de la formulación inicial y de la tasa de corte, también cambia con la temperatura, la fracción de hielo, la concentración de solutos en la fase no congelada, las interacciones entre glóbulos de grasa y la incorporación de aire. En consecuencia, su incremento durante el proceso constituye una respuesta global de la evolución térmica y estructural del sistema.

2.3.1.1 Comportamiento viscoelástico y viscosidad compleja

Además de fluir, algunos materiales almacenan parcialmente la energía aplicada y presentan una respuesta elástica. Esta combinación de disipación viscosa y almacenamiento elástico se denomina viscoelasticidad. Su caracterización suele realizarse mediante ensayos oscilatorios, en los que se aplica una deformación sinusoidal:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (\text{Ec. 11})$$

y se mide la respuesta del esfuerzo. El desfase entre ambas señales permite obtener el módulo complejo:

$$G^* = G' + G'' \quad (\text{Ec. 12})$$

donde:

- G' es el módulo de almacenamiento y representa la contribución elástica;
- G'' es el módulo de pérdida y representa la contribución viscosa o disipativa.

Los módulos G' y G'' no son viscosidades. Sus unidades son pascuales. La viscosidad compleja se define a partir del módulo complejo y la frecuencia angular:

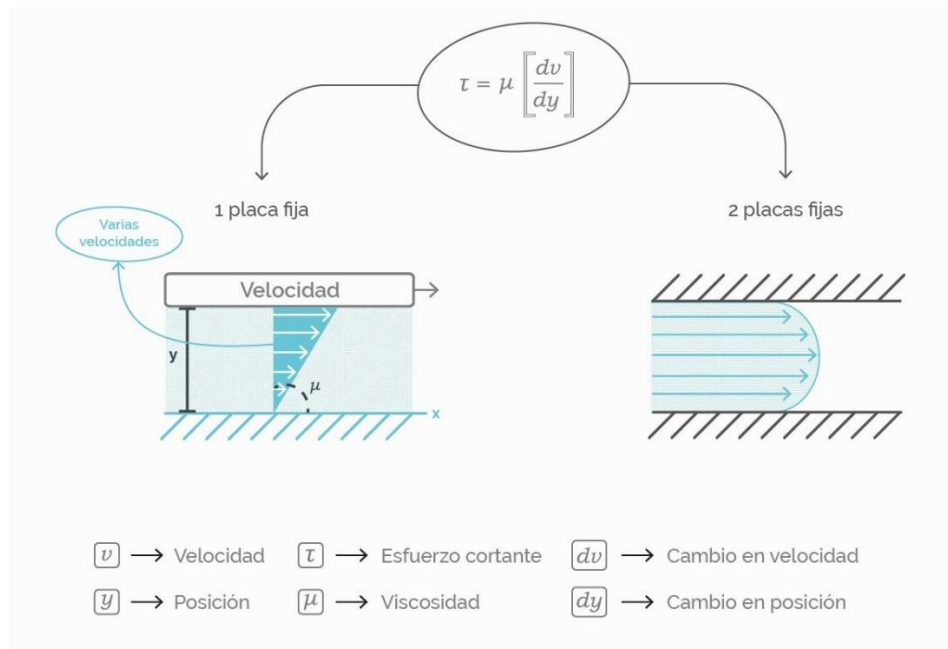
$$\eta^* = \frac{G^*}{i\omega} \quad (\text{Ec. 13})$$

y su magnitud puede expresarse como:

$$|\eta^*| = \frac{\sqrt{G'^2 + G''^2}}{\omega} \quad (\text{Ec. 14})$$

2.3.1.2 La tasa de corte y el estrés de corte

La tasa de corte describe la velocidad de deformación de un material, en este caso de un fluido. En otras palabras, mide que tan rápido una lámina de fluido se desliza sobre otra. Por otro lado, el estrés es la intensidad de las fuerzas internas en el fluido. Esta fuerza puede ser multidireccional, desde un esfuerzo perpendicular llamado “estrés positivo” o “estrés normal”, o un esfuerzo tangencial llamado “estrés de corte” o “esfuerzo cortante”. En la figura 3, se observa la relación entre estas propiedades.



*Figura 4. Relación de la viscosidad con el esfuerzo de corte y cambios de velocidad y posición
(Mixing, 2025)*

Cuando se trata de un fluido ideal, este presentará el comportamiento lineal descrito en la figura 4, teniendo una pendiente constante (viscosidad) entre el estrés de corte contra la tasa de corte. Sin embargo, existen otros tipos de fluidos que presentan un comportamiento distinto entre estas dos propiedades como se observa en la figura 4, a los cuales se les denominan fluidos no newtonianos.

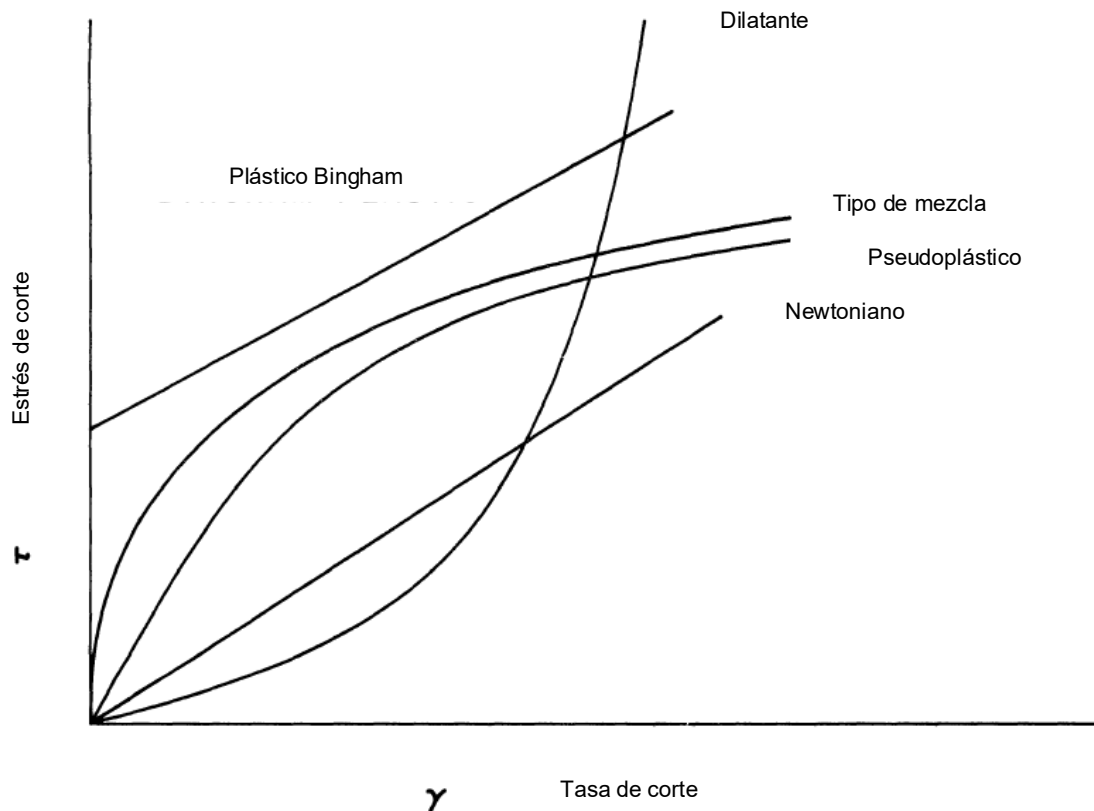


Figura 5. Comportamiento de flujo de los fluidos (Rha et al. (2012))

Para el caso de los fluidos newtonianos, tales como el agua, aceites, soluciones de azúcar etc., la viscosidad es independiente de la tasa de corte, sin embargo, para fluidos no newtonianos, esto no es así. De esta manera, los fluidos no newtonianos incluyen todos los líquidos complejos, como suspensiones, líquidos poliméricos etc., los cuales cuentan con una estructura compleja, como lo es el helado. Estos presentan una viscosidad de un pseudo plástico, la cual es inversamente proporcional a la tasa de corte. Este comportamiento que presenta la tasa de corte y la viscosidad puede ser usado para poder medir estas propiedades.

2.4 Cristalización

La cristalización es un proceso de cambio de fase mediante el cual se forma una estructura sólida ordenada a partir de una fase líquida, gaseosa o amorfa. Su

desarrollo requiere una fuerza impulsora termodinámica que haga más estable la fase cristalina que la fase inicial.

En la cristalización de un soluto desde una solución, esta fuerza impulsora suele expresarse mediante la sobresaturación. En la congelación del helado, el principal componente que cristaliza es el agua; por ello, resulta más apropiado describir la fuerza impulsora mediante el subenfriamiento, definido como la diferencia entre la temperatura de equilibrio de congelación de la mezcla y su temperatura real:

$$\Delta T_{\text{sup}} = T_f - T \quad (\text{Ec. 15})$$

donde T_f es la temperatura de congelación de equilibrio de la mezcla y T es la temperatura instantánea. Cuando $T < T_f$, el helado entra en un estado metaestable, el cual, al ser perturbado, colapsa en hacia el estado estable de la solución.

La temperatura de congelación de una mezcla de helado es inferior a la del agua pura debido a los azúcares, sales y demás solutos presentes. Conforme el agua se transforma en hielo, los solutos son excluidos de la fase cristalina y se concentran en la fase líquida restante. Esto disminuye progresivamente su temperatura de congelación y modifica la viscosidad y las propiedades térmicas de la matriz (Mullin, 2001).

2.4.1 Etapas de la cristalización

- **Subenfriamiento**

El subenfriamiento es la diferencia entre la temperatura de equilibrio de cristalización y la temperatura a la cual el sistema permanece en estado líquido antes de que se produzca la cristalización; representa una medida de la fuerza impulsora disponible para la nucleación y el crecimiento de los cristales. (Mullin, 2001).

- **Nucleación**

La nucleación de los cristales es la formación de una fase sólida ordenada desde una forma líquida o amorfa. La nucleación usualmente es inducida por varios métodos externos, como los choques mecánicos, agitación, fricción y presiones extremas en el

sistema. Esta se clasifica en dos tipos principalmente, en primaria y secundaria. En el caso de la primaria se subclasifica en dos tipos, homogénea y heterogénea, como se observa en la figura 8, la primera ocurre en el sistema de manera espontánea y en la segunda es inducida por partículas externas o extrañas en el sistema. Para la secundaria, esta es inducida por cristales ya preexistentes en el sistema.

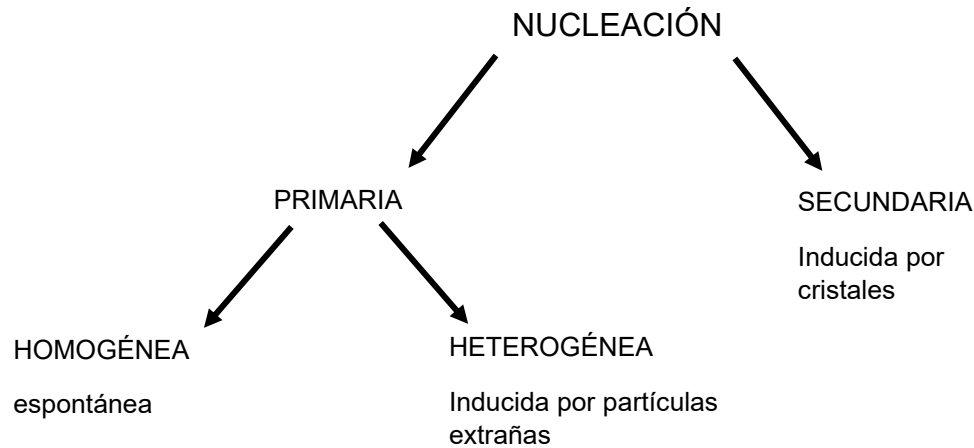


Figura 6. Proceso de cristalización (Mullin, 2001)

En el caso de que la tasa de nucleación sea relativamente mayor a la tasa de crecimiento, causará un tamaño de cristal pequeño y un número elevado de cristales.

- **Aglomeración**

La aglomeración es el proceso donde, a partir de dos o más partículas pequeñas, en este caso cristales, ocurre la coalescencia para formar una partícula de mayor tamaño. Este suceso puede o no ser deseable, dependiendo del proceso donde suceda, por ejemplo, en un proceso de separación sólido-líquido es necesario para aumentar la eficiencia. El rompimiento de cristales es un proceso indeseado la mayoría de las ocasiones, debido a que perjudica la apariencia y calidad de los cristales previamente formados (Ulrich y Jones, 2004; Cook y Hartel, 2010).

- **Recristalización**

En esta etapa, los cristales ya formados previamente, sufren cambios aumentando su tamaño y reduciendo la cantidad de ellos. Sin embargo, la fracción másica de los cristales permanece constante.

2.4.2 Helados y su proceso de cristalización

El proceso de manufactura del helado usa ampliamente los ICSR, en él, la base para helado es enfriada por debajo de su temperatura de congelación. El gradiente de temperatura causa que la base alcance su punto de congelación y desencadene la nucleación. Los cristales que se forman en las paredes del intercambiador son raspados y unificados con la base para helado en el centro del cilindro, esto con ayuda de las paletas raspadoras de los ICSR. Una vez cerca del centro del ICSR, donde cabe mencionar las temperaturas no son tan bajas, empieza la aglomeración, donde el embrión formado crece hasta formar los cristales.

Aunque en el helado existen varios componentes que pueden cristalizar, como por ejemplo la grasa, los cristales que mayor impacto tienen en las características finales del helado son los de hielo. De acuerdo con Berger *et al.*, (1972), el tamaño de cristal en un helado comercial varía desde $1\mu\text{m}$ hasta $150\mu\text{m}$ de diámetro, al igual que afirma que hay 7.8×10^6 cristales por gramo. Comúnmente, la sensación de dureza en un helado está relacionada con el tamaño de cristal que presente, al igual que la suavidad y la sensación de frío que son influenciadas en gran medida por el tamaño, número y forma de los cristales formados en la etapa de cristalización. Cristales pequeños, de $30\text{-}35\mu\text{m}$, elevan los valores de viscosidad aparente del helado de manera suave, ya que estos se distribuyen de manera uniforme en la base para helado, formando una estructura estable. Por otro lado, los cristales de mayor tamaño, no presentan una uniformidad debido a su tamaño, resultando en una estructura rígida y áspera, la cual además de proveer una sensación no agradable al consumidor, no aumenta la viscosidad debidamente. Este proceso es complejo, ya que la formación de los cristales es influenciada por muchas variables. De la mano, el poder entender cómo se forman estos ayudaría a poder mejorar los procesos actuales de fabricación de helados. El poder comprender esto de forma física, presenta varios inconvenientes

debido a que es un proceso difícil de observar y poco accesible. El desarrollo de herramientas computacionales, como lo es la dinámica de fluidos computacional ha sido de gran ayuda para poder estudiar procesos difíciles de observar. Debido a esto, resulta de gran ayuda hacer uso de estas herramientas para poder simular los fenómenos de momento y calor dentro del ICSR (Flores y Goff, 1999).

2.5 Fundamentos de medición de la viscosidad

Como se observó anteriormente, la viscosidad es una propiedad física importante en especial en los sistemas alimentarios, y está relacionada a las propiedades de flujo de los fluidos, lo que en estos sistemas resulta un parámetro de control importante. Esta propiedad es función de varios otros parámetros, como la temperatura y la presión, además de la tasa de corte. Sin embargo, usualmente estos parámetros se mantienen constantes a excepción de uno. Sin embargo, la viscosidad estrictamente resulta complicada de medir, por lo que se suele hacer uso de la viscosidad dinámica. La viscosidad dinámica η , es la relación entre el esfuerzo de corte τ y la tasa de deformación $\dot{\gamma}$.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Ec. 16})$$

La medición de tasa de corte se lleva a cabo en numerosas aplicaciones en la industria. Es posible evaluar tasa de corte en estado estacionario de un rango de valores de 10^{-1} hasta 10^3 s^{-1} (Tadros, 2013). Para estos propósitos, a lo largo de la historia se han desarrollado una variedad de instrumentos.

2.5.1 Instrumentos reológicos

Los instrumentos más comúnmente utilizados para medir propiedades reológicas de los fluidos y alimentos semi fluidos pueden clasificarse de manera general en dos tipos, de tipo rotacional y tubular (capilar), como se muestra en la figura 5.

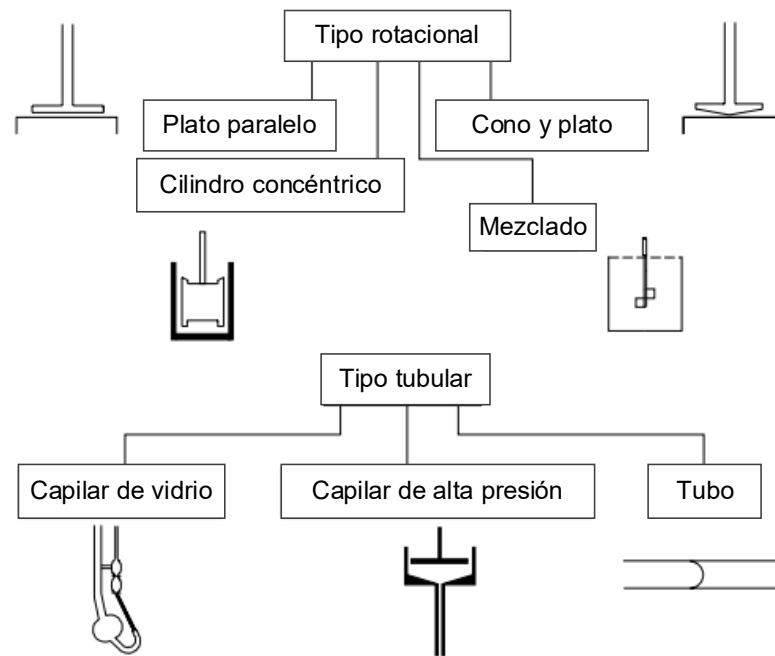


Figura 7. Instrumentos reológicos comunes clasificados en tipo rotacional y tubular (Wang et al. 2019)

La mayoría de los equipos pueden ser fácilmente adquiridos comercialmente, sin embargo, algunos son más sofisticados que otros. El costo puede variar desde la sencillez y bajo costo de un capilar de vidrio hasta un sofisticado y costoso instrumento rotacional capaz de dar lecturas precisas y medir varias propiedades. Vale la pena aclarar que, los instrumentos que miden propiedades reológicas son llamados reómetros, mientras que el termino viscosímetro solo abarca los que miden viscosidad únicamente. Los instrumentos tipo rotacional pueden ser usados tanto en estado de cizalla constante (velocidad angular constante), como en estado dinámico u oscilatorio.

2.5.1.1 Reómetro rotacional

Este tipo de reómetro, como se muestra en la figura 6, hace uso de un motor para mover los instrumentos de medición. Su configuración consta de dos platos o piezas, una fija y la otra móvil. La muestra por analizar, como lo es el helado, es colocada entre las dos piezas, la geometría de las dos partes puede variar, como los sistemas cono-

placa o sistema bob. El motor fuerza a la parte móvil a rotar aplicando una cantidad de torque. La muestra se mueve de acuerdo con un movimiento rotacional u oscilatorio.

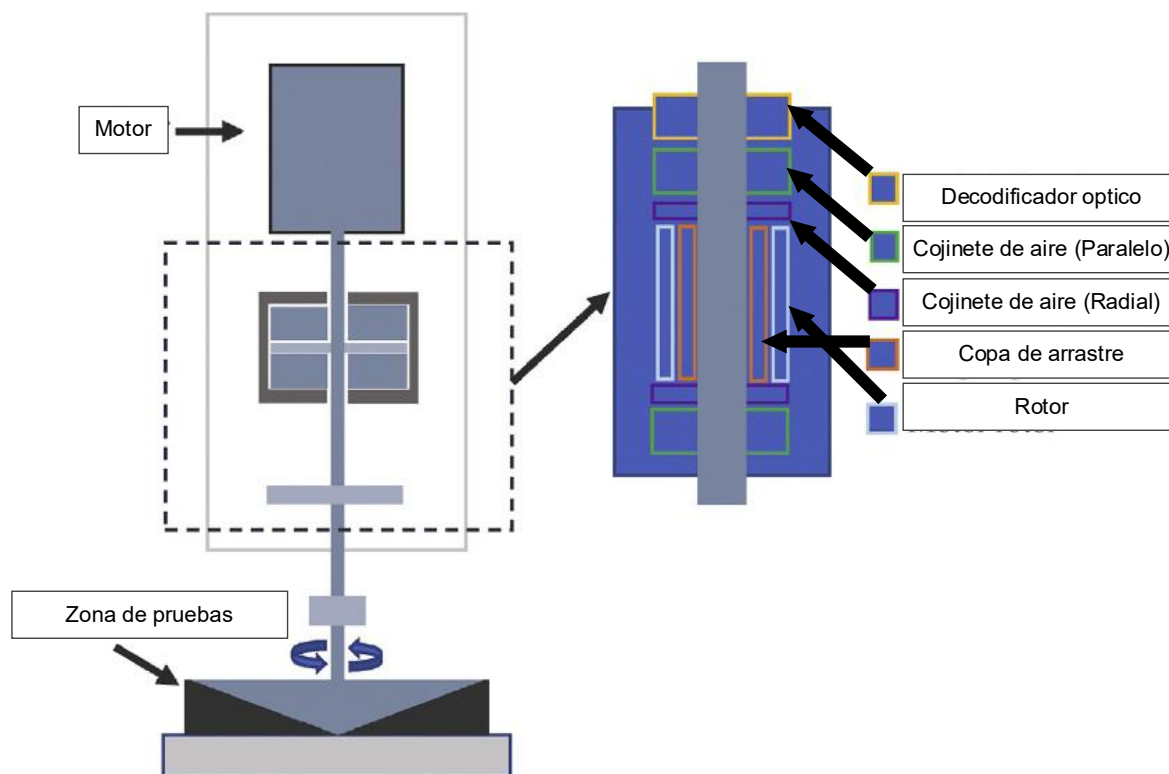


Figura 8. Esquema de un reómetro rotacional (Wang et al. 2019)

Este tipo de reómetros rotacionales es capaz de medir el torque, velocidad y el desplazamiento angular, los cuales con un tratamiento matemático son convertidos a estrés de corte, tasa de corte y viscosidad entre otras propiedades reológicas (Shi et al., 2012; Shi et al., 2012; Shi et al., 2012; Shi et al., 2013; Mezger et al., 2012).

2.5.1.2 Reómetro tubular o capilar

El material o muestra a analizar es fundido en un contenedor con un calentador eléctrico. En el fondo del tanque se colocan un capilar con un diámetro de orificio (desde 0.25 hasta 2 mm) y una longitud (desde 0.25-40 mm) específicos, como se muestra en la figura 7.

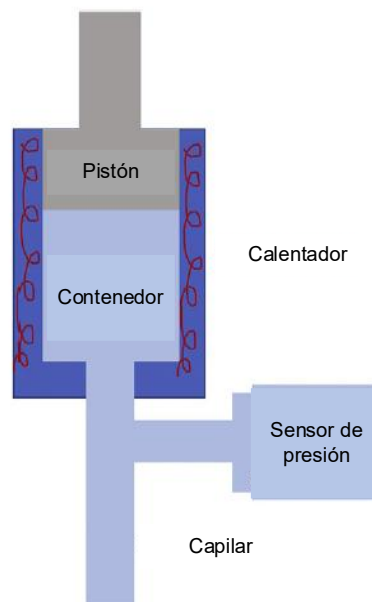


Figura 9. Esquema de un reómetro capilar (Wang et al. 2019)

Una vez alcanzada la estabilidad en el fluido, una varilla en la parte superior del tanque presiona el fluido a través del capilar en la parte inferior a una alta presión y una cierta velocidad. En este proceso de extrusión, es posible medir la caída de presión que ocurre en el capilar para estimar la presión al final del mismo, o se puede medir el capilar para obtener la tasa de flujo de presión. Estos datos recabados, junto con los datos conocidos como la velocidad, el diámetro, los parámetros del tanque y un modelo reológico, hacen posible medir la viscosidad de corte a diferentes tasas de corte.

2.5.2 La viscosidad como un parámetro de calidad

La calidad de un helado es cuantificada por medio de las propiedades sensoriales que percibe el consumidor de este. Estas propiedades son percibidas por los sentidos de los consumidores, y ellos determinan si gustan o no de este postre. La calidad sensorial de un helado está estrechamente relacionada con la viscosidad antes, durante y después de su proceso de cristalización dinámica y estática. Además, ésta también es sensible a las variables de operación de un ICSR. Es por esto por lo que la viscosidad

actúa como un parámetro intermediario que conecta las condiciones de operación con la experiencia sensorial del consumidor.

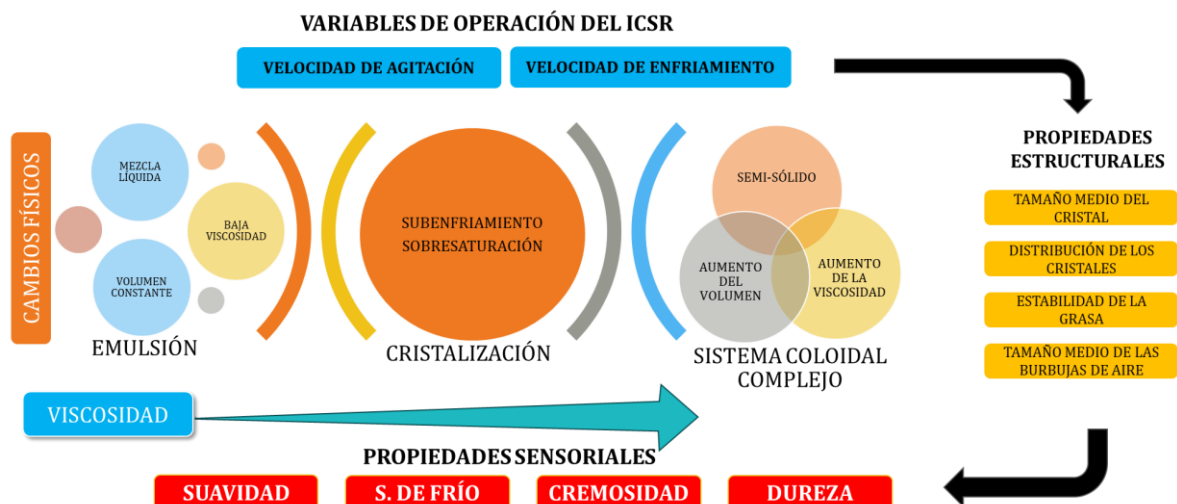


Figura 10. Relación entre las variables de operación, propiedades estructurales y sensoriales durante la cristalización dinámica del helado (De la Cruz et al., 2020).

En la figura 9, se muestra que el helado, al comienzo del proceso, se comporta como una emulsión, donde coexisten todos los componentes del helado (proteínas, grasas, agua etc.) en un volumen constante y con una baja viscosidad. Una vez que comienza su cristalización, ocurren los fenómenos de superenfriamiento y sobresaturación, donde los primeros cristales aparecen y aumentan su cantidad y tamaño a medida que el proceso avanza. Paralelamente, se comienza a formar la matriz del helado y comienza a encapsular aire en su estructura, derivando en un aumento de volumen y empezando a comportarse como un sistema coloidal complejo. Conforme continúa avanzando el proceso, el sistema pasa a comportarse como un semisólido al alcanzar una cierta fracción sólida. Al terminar el proceso de cristalización dinámica, el helado termina con una viscosidad elevada, la cual fue aumentando paulatinamente a lo largo de este (De la Cruz et al., 2020).

La velocidad de agitación como variable de proceso controla la tasa de corte aplicada a la mezcla de helado. Esta tiene implicaciones en la incorporación de aire al sistema (overrun), así como en el tamaño y distribución de los glóbulos de grasa. Altas

velocidades de agitación favorecen la formación de microestructuras más finas y homogéneas, lo cual está asociado con una mayor suavidad, una reducción en la densidad y una mayor cremosidad, lo que se traduce en una textura ligera, suave y uniforme (Goff y Hartel, 2013; Sofjan y Hartel, 2004). En paralelo, la velocidad de enfriamiento influye sobre la cinética de nucleación y crecimiento de cristales de hielo; un enfriamiento rápido (velocidades de enfriamiento elevadas) limita el tiempo de crecimiento de los cristales, favoreciendo la formación de cristales pequeños y uniformes y, además, contribuyendo al incremento de la suavidad del sistema (Fernández *et al.*, 2021). Por otro lado, si la velocidad de enfriamiento es menor, los cristales tienen mayor tiempo para crecer, provocando menor cantidad de cristales, pero con un mayor tamaño. Estos cristales causan una mayor sensación de frío y dureza, reduciendo la calidad del helado.

Estos cambios en la estructura del helado pueden no ser distinguidos por la viscosidad aparente del sistema, sin embargo, se pueden inferir indirectamente observando la velocidad con la que aumenta. Si la viscosidad aparente del sistema aumenta considerablemente, puede indicar un aumento acelerado de la fracción sólida del helado y viceversa. Esto da pauta a poder intuir el estado estructural del helado, en cuanto a tamaño y distribución de los cristales de hielo. Debido a que la viscosidad evoluciona de una forma u otra en respuesta a los cambios térmicos y mecánicos que ocurren dentro del ICSR, esta propiedad puede emplearse como un indicador del avance de la cristalización y del desarrollo estructural del helado. Por ello, la viscosidad constituye una variable de interés para fines de monitoreo, supervisión y control del proceso.

A pesar de su relevancia, la viscosidad es una de las propiedades más difíciles de medir de manera continua durante la fabricación del helado, debido a las condiciones en donde ocurre la cristalización dinámica; en un sistema cerrado y multifásico, donde coexisten simultáneamente una fase líquida concentrada, cristales de hielo, glóbulos de grasa y burbujas de aire. Además, la viscosidad cambia rápidamente conforme avanza la cristalización y depende de la historia térmica del producto. Bajo estas

condiciones, la implementación de instrumentos reológicos convencionales resulta compleja, costosa y, en muchos casos, incompatible con el monitoreo en línea del proceso.

Estas limitaciones asociadas con la medición directa de la viscosidad aparente dentro del ICSR han impulsado el desarrollo de estrategias alternativas, mediante la inferencia de variables de proceso con variables medibles del sistema. Entre estas estrategias destacan los sensores virtuales o soft sensors, los cuales emplean modelos que pueden ser matemáticos, físicos, empíricos o híbridos, para estimar variables que son difíciles o costosas de medir a partir de valores o datos disponibles en tiempo real, tales como temperatura, presión, velocidad de agitación, consumo de potencia, caudal entre otras. En procesos complejos como lo son los procesos alimentarios, los sensores virtuales representan una alternativa atractiva para el monitoreo y control de variables de interés complicadas de medir directamente. Esto, en este caso particular, permitiría disponer de estimaciones continuas de la viscosidad sin necesidad de realizar mediciones reológicas directas.

2.6 Sensores virtuales

La industria de procesos actual está equipada con una gran variedad de sensores físicos, como lo son de temperatura, de flujo, de presión entre otros. En numerosos procesos industriales también existen variables que resultan fundamentales para describir el estado del sistema, pero cuya medición directa en línea es difícil o impráctica. En otros casos, estas variables debido a su esporádica medición no justifican el costo de inversión en un sensor físico. Estas limitaciones pueden deberse diferentes razones, como condiciones operativas complicadas, restricciones físicas del equipo o a poca fiabilidad de las mediciones de los sensores físicos diseñados. A una escala industrial, realizar una serie de pruebas al producto de manera discontinua resulta completamente inviable. En pro de medir estas variables, pero en tiempo real, se puede hacer uso de los sensores virtuales.

Un sensor virtual, también denominado soft sensor por su nombre en inglés, es un término que combina la palabra “software”, que hace referencia a los algoritmos

computacionales utilizados, mientras que la palabra “sensor”, a los sensores físicos convencionales. Estos consisten en un modelo matemático que permite estimar una variable de interés a partir de otras variables que sí pueden medirse directamente mediante sensores tradicionales (Kadlec *et al.*, 2009). De forma general, un sensor virtual establece una relación entre variables medibles del proceso y una variable no medible o de difícil acceso, de acuerdo con la siguiente expresión general:

$$y_{estimada} = f(x_1, x_2, \dots x_n) \quad (\text{Ec. 17})$$

donde $y_{estimada}$ representa la variable estimada, mientras que x_1, x_2 etc. corresponden a variables medidas por sensores físicos instalados en el proceso. En la figura 10 se ilustra el funcionamiento de un soft sensor. Los autores frecuentemente utilizan “software sensor” o “virtual sensor” al igual que “soft sensor”. En la figura se muestra como un sensor físico y un estimador interactúan en un proceso, sin embargo, estos pueden ser uno o varios sensores físicos (Cheruy 1997; Zamproga *et al.*, 2004).

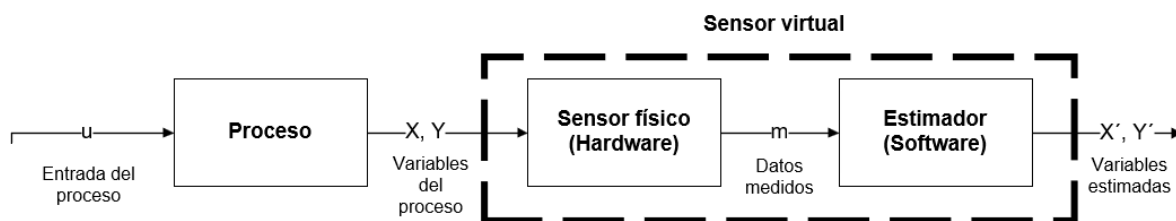


Figura 11. Diagrama de un sensor virtual en un proceso

El desarrollo de los sensores virtuales se ha beneficiado significativamente de los avances en la ciencia de datos, en la computación, en las tecnologías de comunicación, aprendizaje automático entre otras. Esto a posibilitado utilizar, por ejemplo, las salidas de estos sensores como alimentación de sistemas de control y monitoreo. Esto los ha convertido en herramientas relevantes dentro de la ingeniería de procesos debido a que permiten obtener información sobre variables clave sin requerir instrumentación adicional compleja o costosa. La idea central detrás de estos sensores es tomar información en línea relativamente sencilla de obtener para posteriormente estimar otras variables más difíciles de medir o de muestrear.

2.6.1 Tipos de sensores virtuales

A un nivel muy general, los sensores virtuales se pueden distinguir en dos clases diferentes: los basados en modelos y los basados en datos experimentales. Estos son comparados en la tabla 2.

1. Sensores basados en modelos (Model-driven):

Los sensores virtuales basados en modelos determinísticos, o también conocidos como modelos de “caja blanca”, se construyen a partir de ecuaciones que describen los fenómenos físicos, químicos o termodinámicos que gobiernan el proceso. Este tipo de modelos se fundamenta en balances de materia y energía principalmente. Su principal ventaja radica en que proveen una interpretación física clara y pueden extrapolarse a condiciones operativas distintas; sin embargo, estos requieren un conocimiento detallado del proceso.

2. Sensores basados en datos (Data-driven):

Por otro lado, los sensores virtuales basados en modelos empíricos, o también conocidos como modelos de “caja negra” se desarrollan a partir de correlaciones obtenidas mediante el análisis de datos experimentales del sistema. Estos modelos establecen relaciones matemáticas entre variables medidas o independientes y la variable de interés o dependiente, esto sin necesariamente conocer explícitamente los mecanismos físicos del sistema. Entre sus ventajas destaca su relativa simplicidad y facilidad de implementación, sobre todo en procesos donde la física es demasiado compleja para poder ser modelada matemáticamente. Aunque, por el contrario, suelen estar acotados a las condiciones en las que fueron calibrados. Aunado a esto, no son capaces de proporcionar una interpretación física del proceso, y si ocurren cambios en las condiciones, aunque sean mínimos, pueden perder fácilmente la fiabilidad de sus mediciones o datos que arrojan

3. Sensores híbridos (Hybrid sensors):

Finalmente, los sensores virtuales híbridos combinan elementos de ambos tipos de sensores. En estos casos, una estructura o modelo matemático basado en

principios físicos puede complementarse con parámetros obtenidos mediante ajuste experimental o mediante técnicas de aprendizaje de datos. Esto convierte al modelo en un modelo semi-empírico.

Tabla 2. Comparación entre los tipos de sensores virtuales

Tipo de sensor virtual	Base del modelo	Ventajas	Limitaciones	Aplicación en línea
Basado en modelos	Balances y ecuaciones constitutivas	Interpretación física; posibilidad de analizar mecanismos	Requiere parámetros y puede ser computacionalmente complejo	Posible si el modelo se simplifica
Basado en datos	Datos experimentales	Representa relaciones no lineales sin ecuaciones concretas	Requiere bases de datos amplias; no es fácil de extrapolar	Alta
Combinación	Ecuaciones físicas y ajuste experimental	Equilibrio entre ambos tipos	Dependiente de la calibración y del dominio de validez	Alta (Cuando está bien formulado)

2.6.2 Uso de un sensor virtual para la estimación de la viscosidad

En el caso particular del proceso de cristalización del helado en un ICSR, la viscosidad aparente del sistema es de gran importancia para describir la evolución de la microestructura durante el proceso, fungiendo como una variable que indica el estado de avance de la cristalización. Sin embargo, la medición directa de esta propiedad en línea resulta complicada debido a la naturaleza multifásica del helado y la naturaleza del equipo. Durante la cristalización dinámica del helado, el enfriamiento del sistema provoca la cristalización progresiva del agua presente en la mezcla, lo cual produce, en consecuencia, un aumento gradual de la fracción de hielo. Este fenómeno se ve reflejado en cambios en el comportamiento reológico del helado, particularmente en un incremento de la viscosidad aparente del producto. A medida que la viscosidad aumenta, también se incrementa el torque requerido para mantener la agitación dentro

del equipo, lo cual se traduce en un mayor consumo de potencia por parte del motor del agitador.

Skelland y Leung en el año 1971, en su artículo, postularon que la viscosidad aparente de un sistema guarda una relación con la potencia consumida por un motor durante la agitación del sistema. Con esto en mente, postularon uno de los primeros modelos que relacionaba la viscosidad dentro de un ICSR con la energía consumida por el motor de agitación. El modelo relaciona el número de potencia (P_o) con el número de Reynolds rotacional ($Re_R = \frac{\rho N_R d_t^2}{\eta}$) y el número de aspas raspadoras (F). Sin embargo, este modelo tiene la limitación de que únicamente es válido bajo un régimen laminar. Entonces, para la congelación de una solución glicerol-agua, la ecuación propuesta fue la siguiente:

$$P_o = 77,500 Re_R^{-1.27} F^{0.59} \quad (\text{Ec. 18})$$

Poco tiempo después, Trommelen y Beek ese mismo año establecieron que el número de potencia en el ICSR dependía de más factores, y no solo del número de Reynolds rotacional. Sus resultados experimentales mostraban que a un mismo número de Reynolds rotacional (Re_R), el número de potencia (P_o) se incrementaba al disminuir la viscosidad aparente del sistema. Por lo tanto, ellos propusieron su propia ecuación empírica:

$$P = \frac{251(N_R d_t)^{1.79} \eta^{0.66} F^{0.68} L_B}{(d_t - d_s)^{0.31}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde P es la potencia consumida para mantener la agitación, N_R es la tasa de rotación de las paletas raspadoras, η es la viscosidad aparente del fluido, L_B es la longitud de las paletas, mientras que d_t y d_s son los diámetros del tanque y del estator del equipo respectivamente. El modelo obtuvo una correlación adecuada con un $R^2 = 0.992$. Sin embargo, al este ser una correlación empírica, limitaba su uso a ciertos casos específicos del equipo, y hace complicado poder aplicarlo a más equipos.

En otro estudio, Trommelen y Boerema (1966), propusieron el modelo de Skelland y Leung modificado:

$$\frac{P_o}{L_B} = K Re_R^{-a} F^{0.59} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde el número de Reynolds rotacional (Re_R) es una función de la viscosidad ($Re_R = \frac{\rho N_R d_t^2}{\eta}$), K y a son constantes ajustables del modelo. Años más tarde en 2006, Qin y colaboradores retomo este modelo y propuso un modelo predictivo de viscosidad aparente durante la cristalización de una solución acuosa de sacarosa. El modelo estima la viscosidad durante la cristalización, usando el modelo de Thomas de 1965.

$$\frac{\mu_o}{\mu} = 1 + 2.5\varphi + 10.05\varphi^2 + 0.00273e^{16.6\varphi} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde μ es la viscosidad aparente, μ_o es la viscosidad inicial y φ la fracción de hielo. Adicionalmente, se calculo el torque del motor, se calculó su consumo energético y por ultimo se obtuvo el numero de potencia (P_o). Por último, con los datos obtenidos se ajustaron los parámetros del modelo de Trommelen y Boerama (1971). Aunque en el estudio los datos tuvieron una adecuada correlación con los valores experimentales, cabe mencionar que, además de llevarse a cabo en una solución de agua-sacarosa, solo trabajaron con menos de 15 % de fracción volumétrica de cristales de hielo.

Los modelos descritos anteriormente representan contribuciones importantes para la estimación indirecta de la viscosidad durante procesos de cristalización. Sin embargo, la mayoría fueron desarrollados para soluciones simples o bien para condiciones de operación específicas, por lo que su aplicación directa al proceso de fabricación de helado presenta limitaciones importantes. En particular, ninguno de ellos considera simultáneamente el comportamiento de la mezcla antes y después del inicio de la cristalización ni fue desarrollado específicamente para un ICSR operando con una mezcla para helado. Estas limitaciones motivaron el desarrollo de modelos más representativos para este tipo de sistemas, entre los cuales destaca el propuesto por De la Cruz *et al.*, (2020).

2.6.2.1 Modelo estimativo de la viscosidad de un helado

Es apreciable que la potencia consumida por el sistema de agitación contiene información indirecta acerca de la viscosidad aparente del helado durante el proceso de cristalización. Con este enfoque en mente, en el año 2020, De la Cruz *et al.*, propuso un modelo capaz de representar la evolución de la viscosidad aparente del helado en un ICSR discontinuo. El modelo desarrollado por De la Cruz *et al.* (2020) puede clasificarse como un sensor virtual híbrido, ya que combina relaciones físicas previamente establecidas para ICSR con parámetros ajustados experimentalmente para mezclas de helado. En su estudio, trabajo con un rango de temperatura del helado que abarco desde 5 hasta -5 °C, destacando que la temperatura de cristalización de la base para helado utilizada fue de -2.8°. Las variables utilizadas por el modelo fueron la temperatura del helado y la potencia consumida por el motor de agitación. El modelo abarca 2 etapas, una etapa de enfriamiento (T inicial hasta -2.8°) y una etapa de congelamiento (-2.8° hasta -5°C). En la primera etapa el modelo estima la viscosidad por medio de un modelo tipo ley de potencia. Este, una vez alcanzada la temperatura de cristalización (-2.8°) es remplazado por una función que estima la viscosidad a partir de la potencia consumida. De la cruz (2020) valido el modelo tomando mediciones de la viscosidad aparente en la primera etapa, y valores de viscosidad dinámica en función del módulo de perdida (G'') para la etapa de congelamiento.

$$\eta_{app} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Ec. 22})$$

Para la función estimativa de la viscosidad a partir de la potencia consumida, De la Cruz (2020) se basó en varios modelos previos, como los de Skelland y Leung (1962), Trommelen y Beek (1971) y Qin *et al.*, (2006). Se utilizo el modelo de Trommelen y Boerema (1966) que estimaban la potencia consumida (P) por medio de una relación entre las variables como la longitud de las paletas, numero de paletas y el número de Reynolds. Esta relación está presente en la ecuación 25, donde De la Cruz utilizo parámetros de $F=4$ y $L_B=0.126\text{m}$. El número de potencia P_o esta dado por la siguiente ecuación:

$$P_o = \frac{P}{\rho N_R^3 d_t^5} \quad (\text{Ec. 23})$$

Mientras que el número de Reynolds de la mezcla en el ICSR se obtiene por la siguiente ecuación:

$$Re_R = \frac{\rho N_R d_t^2}{\eta} \quad (\text{Ec. 24})$$

Es así, el modelo fue construido combinando el modelo de Trommelen y Boerema (1966), y la ecuación 25 que arroja valores de viscosidad aparente a partir de valores de potencia:

$$\eta' = \rho N_R d_t^2 \sqrt[2]{\frac{P_o}{K F^{0.59} L_B}} \quad (\text{Ec. 25})$$

La ecuación 25 representa la primera parte del modelo, que corresponde a la etapa de congelamiento donde existe la relación entre la viscosidad y el incremento en la potencia consumida por el agitador. Se considero una densidad máxima del helado de 650 kg/m³ que corresponde a una fracción de cristales de hielo de 0.3, esta fue determinada usando la densidad de la mezcla y el overrun experimental de producciones industriales (Goff y Hartel (2013)). El diámetro interno del equipo (d_t) fue de 0.073m mientras que las velocidades de rotación de las paletas (N_R) fueron de 3.33, 5.83 y 8.33 rps, que equivalen a 200, 350 y 500 rpm. Los parámetros de ajuste del modelo, que son K y a , se obtuvieron por regresión lineal de mínimos cuadrados, de acuerdo con la ecuación:

$$SSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\eta_{app\ medida} - \eta_{app\ estim})^2 \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde M es el número de puntos experimentales, $\eta_{app\ medida}$ es la viscosidad aparente y $\eta_{app\ estim}$ los valores predichos por el modelo. Los valores de las constantes fueron 16.73 y -1.38 para K y a respectivamente. El error relativo entre los valores experimentales y los estimados presento un error menor al 10%.

Para temperaturas por encima de la temperatura de cristalización del helado, cuando aún no hay una fracción de hielo, la viscosidad aparente del helado solo se ve afectada por la temperatura de la mezcla y es determinada con base en la tasa de corte aplicada. En esta etapa es donde actúa la ley de potencia de la ecuación 22, donde k y n son las variables que caracterizan la mezcla y como es que la afecta la temperatura. En esta etapa la viscosidad del helado no cambia considerablemente y solo cambia respecto a la temperatura. Sin embargo, estas variables del modelo también tienen un cambio de comportamiento respecto a la temperatura. Para determinar su comportamiento, se utilizó la ley de Arrhenius, donde obtuvieron las ecuaciones 27 y 28, donde A_k , E_k , A_n y E_n que son los parámetros de ajuste determinados a partir de datos experimentales y utilizando el software Scilab®6.0, con una regresión no lineal de mínimos cuadrados. Estos parámetros fueron obtenidos en un rango de temperaturas de 0,-1,-2 °C donde la mezcla aún permanece líquida. Los valores obtenidos para los parámetros fueron de 3.58×10^{-4} , 4578.4, 4.4965 y -602.16 respectivamente.

$$k(T) = -A_k e^{\left(\frac{E_k}{T(^{\circ}K)}\right)} \quad (\text{Ec. 27})$$

$$n(T) = -A_n e^{\left(\frac{E_n}{T(^{\circ}K)}\right)} \quad (\text{Ec. 28})$$

El modelo estimativo de la viscosidad se compone de estas dos partes, la etapa de enfriamiento con la ley de potencia hasta antes de su temperatura de cristalización ($T_c = -2.8^{\circ}\text{C}$) y la etapa de congelamiento, donde la función estimativa de la potencia a través de la potencia consumida empieza a actuar. Ambas ecuaciones fueron acopladas mediante una función de Heaviside que utiliza la temperatura de cristalización como parámetro de transición. Es así que queda el modelo de De la Cruz *et al.*, 2020.

$$\eta(T, P) = [H(T') \cdot -1] \rho N_R d_t^2 \sqrt[2]{\frac{P_o}{K F^{0.59} L_B}} + k(T) \cdot \dot{\gamma}^{n(T)-1} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$T' = T - T_C \quad (\text{Ec. 30})$$

La selección del modelo propuesto por De la Cruz *et al.*, (2020) obedece a un bajo error de estimación (<10 %), además de haber sido desarrollado específicamente para la cristalización del helado en un ICSR discontinuo, el cual es el mismo que el de este trabajo. A diferencia de los modelos previamente descritos, integra en una sola formulación las etapas de enfriamiento y congelación mediante el uso de la temperatura del helado y la potencia consumida por el motor de agitación, dos variables que pueden medirse en línea con relativa facilidad. Esta característica permite utilizar el modelo como un sensor virtual dentro de una estrategia de monitoreo y control en tiempo real. De esta manera, el modelo es capaz de predecir la evolución de la viscosidad del helado en tiempo real, haciéndolo un modelo útil para el seguimiento del proceso de fabricación del helado y, subsanando la complejidad de implementar un sensor físico. La estimación en línea de la viscosidad abre la posibilidad de implementar estrategias de control que utilicen la viscosidad estimada como variable controlada del sistema, y una variable como la velocidad de enfriamiento o el caudal de refrigerante como la variable manipulable.

2.7 Control automático de sistemas

El control automático de procesos busca modificar el comportamiento dinámico de un sistema mediante la manipulación de sus variables de entrada. En un esquema de realimentación, la variable controlada se mide o estima, se compara con una referencia y el error resultante se utiliza para calcular la acción de control.

En procesos de cristalización por enfriamiento, el control es particularmente complejo debido a la naturaleza no lineal y no estacionaria del sistema. Conforme se forma la fase sólida, cambian simultáneamente la viscosidad, la transferencia de calor, el

mezclado y la respuesta dinámica del equipo. Además, la calidad final no depende únicamente del estado final, sino también de la trayectoria térmica y mecánica seguida durante el proceso. En el caso de la cristalización del helado, el caudal y la temperatura del fluido refrigerante modifican la rapidez con la que se extrae energía del producto. Esta acción influye sobre la formación de hielo, la concentración de la fase no congelada y el incremento de la resistencia al movimiento del agitador. Debido a ello, el flujo de refrigerante constituye una variable manipulada con capacidad para modificar la evolución del proceso.

2.7.1 Control por retroalimentación

Un sistema de control por realimentación compara una referencia $r(t)$ con una variable controlada $y(t)$, generando un error:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (\text{Ec. 31})$$

La acción de control $u(t)$ se calcula a partir de este error y se aplica al proceso. La realimentación permite compensar parcialmente perturbaciones y desviaciones respecto a la referencia, aunque su desempeño depende de la dinámica del proceso, la calidad de la medición y las restricciones del actuador.

En un proceso con retardo térmico, la acción aplicada sobre el caudal no produce una modificación inmediata en la potencia del agitador. El refrigerante debe circular por las líneas, intercambiar energía con la pared y modificar la temperatura y la estructura del producto antes de que la respuesta mecánica sea observable. Este retardo limita la rapidez con la que el controlador puede corregir el error.

2.7.2 Control proporcional integral derivado (PID)

El PID es considerado hasta la actualidad como la estrategia de control más utilizada en la industria. En 1911 Elmer Sperry desarrolló el primer controlador PID para la marina de los Estados Unidos (Bennett 2000; Åström y Kumar 2014). Sin embargo, no fue hasta 1939 que Taylor instruments companies sacó al mercado una versión revisada de su controlador neumático previamente lanzado, este implementó una nueva acción llamada “pre-act” junto a la acción proporcional y de reinicio (Bennett

1993). De manera paralela, Foxboro instrument company introdujo el término “hyper-reset” que combinaba la acción proporcional con la acción de reinicio en su controlador neumático “Stabilog”. La acción “pre-act” y la “hyper-reset” eran una equivalencia a la acción derivativa, mientras que la acción de reinicio (o “floating”) era a la acción integral. En los años siguientes los ingenieros se toparon con la limitante de no poder calcular adecuadamente los parámetros adecuados de los controladores PID. Ziegler y Nichols en el año 1942 introdujeron reglas prácticas de sintonía que facilitaron la aplicación industrial de los controladores PID. Es así que el uso de controles automáticos PID fue comúnmente usado en la industria durante la mitad de la década de los cincuenta (Bennet 1993).

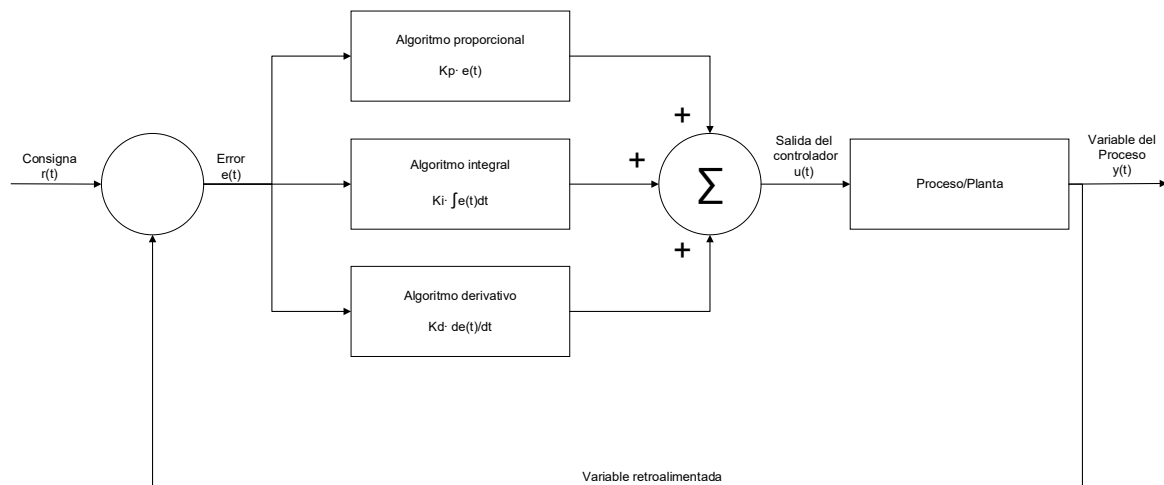


Figura 12. Esquema de un controlador PID

En la figura 12 se muestra el esquema de un controlador PID. Los controladores PID actuales hacen uso de tres modos de control; el control proporcional, integral y derivado. El termino proporcional representa el cambio proporcional al error (diferencia entre la consigna y el valor real) en la variable de proceso o variable controlada. El termino integral acumula el error a lo largo del tiempo y este actúa sobre la suma histórica de las desviaciones. La acción derivativa, por su parte, responde a la velocidad de cambio del error. Desde una perspectiva física, esta acción proporciona una capacidad de anticipación, ya que detecta tendencias en la evolución del error antes de que éste alcance magnitudes significativas. Como consecuencia, el término

derivativo contribuye a reducir el sobre impulso y mejorar el amortiguamiento del sistema. Gracias a su simplicidad, fácil implementación y mantenimiento, los controladores PID son los controladores más usados en el control de movimiento, control de procesos, electrónica, hidráulica, neumática y en la industria manufacturera entre otras (Borase *et al.*, 2021). De manera de ecuación, la ecuación matemática de un PID queda de la siguiente forma en la ecuación 32.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Ec. 32})$$

2.7.3 Teoría de control moderna

A pesar de su utilidad, la teoría clásica y los PID tiene límites claros. Su formulación se apoya fundamentalmente en modelos de entrada-salida y en aproximaciones lineales, lo cual resulta adecuado cuando el proceso puede representarse con suficiente fidelidad mediante funciones de transferencia. Sin embargo, cuando el sistema es multivariable o presenta comportamientos no lineales, el enfoque clásico puede quedarse corto (Chen 1999). Esta limitación fue atacada por Rudolf Kalman y dio lugar al desarrollo de la teoría moderna del control (Kalman 1960). Esta teoría presentada por Kalman introdujo el concepto de espacio de estados. En este enfoque, el sistema se describe mediante variables internas y ecuaciones matriciales, lo que amplía el tipo de sistemas que pueden analizarse y controlarse.

La introducción del espacio de estados permitió desarrollar conceptos fundamentales como la controlabilidad y la observabilidad. La controlabilidad se refiere a la capacidad de llevar un sistema desde cualquier condición inicial hasta un estado deseado mediante acciones de control apropiadas. Por su parte, la observabilidad determina si es posible reconstruir el estado interno del sistema a partir de las variables disponibles para medición. Estos conceptos adquirieron una enorme relevancia en aplicaciones industriales donde muchas de las variables de interés no pueden medirse directamente en tiempo real y deben estimarse a partir de información indirecta. La teoría moderna también permitió el desarrollo de observadores y estimadores de estados, como el observador de Luenberger y el filtro de Kalman, los cuales permiten inferir variables

internas difíciles medir de manera directa. Esto último resulta particularmente importante en numerosos procesos químicos y alimentarios, donde variables críticas como la concentración, la distribución de tamaños de partícula o la viscosidad suelen requerir técnicas de estimación para su monitoreo continuo (Franklin *et al.*, 2019).

2.7.4 Estrategias de control

A partir de estos fundamentos surgieron diversas estrategias avanzadas de control. Hoy en día podemos reconocer cuatro etapas en el desarrollo de estrategias de control, como se muestran en la tabla 3. Las estrategias de control convencionales (Categoría A) se han utilizado ampliamente en la industria durante varias décadas. La sintonización de estos controladores puede realizarse de forma manual o automática. Los principios de control manual se utilizan en muchos procesos industriales como una herramienta efectiva de decisión o como un control de supervisión en situaciones extraordinarias o para el ajuste manual de los parámetros del proceso y del controlador. En muchos casos de control manual del proceso, el operador del proceso ajusta los parámetros del proceso y del controlador basándose en su conocimiento empírico. La gran mayoría de lazos de control automático industriales (casi el 90%) siguen apoyándose en el comunísimo controlador PID que ha estado disponible por más de 70 años.

Las estrategias de control avanzadas en la categoría B se refieren como clásicas debido a que ya han sido usadas por más de 40 años. Aunque estas estrategias de control no sean usadas ampliamente en la industria, estas proveen soluciones con un buen costo/beneficio para varios tipos de problemas importantes en las plantas. Las estrategias de control en la categoría C han sido ampliamente usadas en la industria y son descritas en varios libros de control (Kozák 2002). Por ejemplo, el control lineal cuadrático gaussiano (LQG por sus siglas en inglés) es una estrategia de control poderosa que se ha aplicado con éxito a problemas de control de procesos durante muchos años. Sin embargo, LCG no ha tenido un particular uso en la industria por diversas razones, incluyendo una falta de modelos lineales de espacio de estados precisos y fiables. Por otro lado, las técnicas predictivas de control (MPC por sus siglas

en inglés) son, en los últimos años, significativamente usadas en la industria. La estrategia MPC es una estrategia de control multivariable con múltiples áreas de aplicación en la industria.

Tabla 3. Tipos de estrategias de control actuales

A. Control PID convencional	B. Control avanzado I	C. Control avanzado II	D. Control avanzado III
Control Manual	Control adaptativo y autoajustable	Métodos de Control Óptimo (LQ y LQG)	Control Predictivo Híbrido
Control por Retroalimentación (FB)	Método de programación de ganancias	Métodos de Control Robusto (H_2 , H_∞ , IMC)	Control Difuso (PID, MPC, FPGA)
Control en Cascada (CC)	Métodos de Control Multivariable (Espacio de Estados y Modelos de Función de Transferencia)	Control Predictivo Basado en Modelo (MPC-DMC, MPC-GPC)	Control mediante Redes Neuronales (Óptimo, MPC, FPGA)
Control por Anticipación (FFC)	Métodos de Control Multivariable (Desacoplamiento y Control Descentralizado)	Control Descentralizado (Dominio del Tiempo y Dominio de la Frecuencia)	Control de Eventos Discretos (Híbrido con Redes de Petri)
Control de Proporción (RC)	Métodos de Ubicación de Polos (SISO, MIMO)	Métodos de Control Algebraico (Síntesis Polinomial)	Control Híbrido No Lineal Basado en Computación Suave
Combinación de Estructuras (FB+FFC+CC)	Métodos de Control No Lineal (Linealización Entrada/Salida)	Métodos de Control Robusto QFT (Quantitative Feedback Theory)	Métodos de Control Experto

Las primeras técnicas de MPC fueron desarrolladas independientemente a la par por dos grandes grupos industriales en los años 1970s. Durante los próximos 40 años, estas y otras técnicas de MPC relacionadas se han convertido en el método preferido para problemas difíciles de control multivariable en refinerías de petróleo y plantas petroquímicas alrededor del mundo. Durante la última década, el interés por desarrollar técnicas de métodos computacionales suaves (SCM por sus siglas en inglés) se intensificado considerablemente para una gran variedad de aplicaciones tanto científicas como ingenieriles. Estas técnicas corresponden a la categoría D. La investigación en control de procesos en esta área se ha centrado en gran medida en tres métodos de SCM: sistemas basados en conocimiento, redes neuronales, lógica

difusa y varias combinaciones de estas técnicas. En años recientes, el control difuso y el híbrido difuso-neuronal se han usado ampliamente en productos de consumo comercial como lo son lavadoras, aspiradoras y cámaras de video, donde no se requiere un nivel alto de rendimiento del sistema de control. Mucha de la literatura del control difuso y software comercial emplean reglas de este en combinación con un control PID (Kozák 2014).

2.7.4.1 Control en cascada

El control en cascada utiliza dos lazos jerárquicos. El lazo primario regula la variable principal del proceso y genera la referencia del lazo secundario. Este último controla una variable intermedia que responde más rápidamente y está directamente relacionada con el actuador.

En el sistema desarrollado:

- ❖ el lazo primario regula la pendiente de potencia del motor;
- ❖ su salida corresponde a la referencia de caudal de glicol;
- ❖ el lazo secundario regula el caudal;
- ❖ la apertura o cierre de la válvula constituye la acción física final.

La ventaja de esta arquitectura es que el lazo secundario puede compensar perturbaciones hidráulicas antes de que se propaguen completamente hacia la variable principal. Sin embargo, para que el esquema sea efectivo, el lazo secundario debe responder más rápidamente que el primario.

2.7.4.2 Control de trayectorias y variables derivadas

En algunos procesos, el objetivo no consiste en mantener una variable en un valor constante, sino en regular la velocidad con la que evoluciona. En este trabajo se controla la pendiente temporal de la potencia:

$$s_p(t) = \frac{dP(t)}{dt} \quad (\text{Ec. 33})$$

La señal de pendiente debe estimarse a partir de mediciones discretas de potencia. Una diferenciación directa amplifica el ruido, por lo que requiere filtrado o estimación. El resultado depende del intervalo de cálculo y de los parámetros del filtro, que introducen un compromiso entre reducción de ruido y retardo.

Regular una pendiente no equivale a regular directamente la variable original. Una consigna constante de dP/dt produce idealmente un aumento aproximadamente lineal de potencia dentro del intervalo donde el controlador puede actuar, pero no garantiza una trayectoria lineal de viscosidad. Esto se debe a que la transformación entre potencia, temperatura y viscosidad es no lineal.

En consecuencia, la pendiente de potencia se utiliza como variable mecánica inferencial de la rapidez de estructuración, mientras que la viscosidad estimada se emplea para interpretar el efecto obtenido sobre el producto.

2.7.4.3 Control predictivo en modelo (MPC)

El control predictivo basado en modelo (Model Predictive Control por sus siglas en inglés) comprende una familia de estrategias de control que utilizan un modelo dinámico del proceso para predecir su comportamiento futuro y determinar las acciones de control mediante la solución de un problema de optimización. A diferencia de los controladores convencionales, cuya acción depende principalmente del error presente y pasado, el MPC incorpora explícitamente el efecto futuro de las acciones de control, las restricciones operativas y la trayectoria de referencia dentro de su formulación (García *et al.*, 1989; Schwenzer *et al.*, 2021).

El principio de funcionamiento del MPC se basa en el concepto de horizonte móvil o horizonte decreciente. En cada instante de muestreo, el controlador emplea la información disponible del proceso para calcular una secuencia de acciones de control que optimiza su comportamiento durante un intervalo futuro denominado horizonte de predicción. Sin embargo, únicamente se aplica la primera acción de la secuencia

calculada. En el siguiente instante se actualizan las mediciones o estimaciones de estado, se desplaza el horizonte y se resuelve nuevamente el problema de optimización. Esta actualización continua introduce realimentación y permite corregir las predicciones ante perturbaciones y diferencias entre el modelo y el proceso real (Mayne et al., 2000).

De manera general, un modelo dinámico discreto utilizado por el MPC puede representarse mediante:

$$x(k) = f[x(k), u(k), d(k)] \quad (\text{Ec. 34})$$

$$y(k) = h[x(k)] \quad (\text{Ec. 35})$$

donde $x(k)$ es el vector de estados del proceso; $u(k)$, el vector de variables manipuladas; $d(k)$, el vector de perturbaciones medibles o estimadas; y $y(k)$, el vector de variables controladas. Las funciones $f(k)$ y $h(k)$ describen la dinámica y la relación entre los estados y las salidas, respectivamente.

Cuando estas funciones son lineales, el modelo puede escribirse como:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) \quad (\text{Ec. 36})$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (\text{Ec. 37})$$

donde A, B, C y E son matrices que representan la dinámica del sistema, el efecto de las variables manipuladas, la relación entre estados y salidas, y el efecto de las perturbaciones, respectivamente. El modelo puede obtenerse a partir de balances fenomenológicos, técnicas de identificación experimental o una combinación de ambas.

2.7.5 Estado del arte del control aplicado a la cristalización y a procesos alimentarios

La cristalización es un proceso particularmente complejo desde el punto de vista del control debido a que la calidad final del producto depende no solo del estado final alcanzado, sino también de la trayectoria seguida durante el proceso. Variables como la temperatura, la concentración, el grado de sobresaturación y las condiciones de mezclado modifican simultáneamente los fenómenos de nucleación y crecimiento, por lo que estrategias basadas exclusivamente en mantener una temperatura o seguir un perfil térmico preestablecido pueden presentar una sensibilidad importante frente a perturbaciones y variaciones en la cinética del sistema.

Una de las tendencias más importantes en el control de cristalización ha sido, por ello, el tránsito desde el seguimiento de perfiles térmicos hacia estrategias de realimentación basadas en variables que describen de manera más directa el estado del proceso. Nagy *et al.*, (2008) compararon experimentalmente el control convencional de temperatura con una estrategia basada en el seguimiento de la concentración de la solución durante una cristalización discontinua. Mediante espectroscopía ATR-FTIR en línea, los autores regularon la trayectoria concentración-temperatura asociada con el subenfriamiento y encontraron una menor sensibilidad frente a determinadas perturbaciones que con el seguimiento exclusivo de un perfil de temperatura. Este trabajo evidenció la importancia de incorporar información del estado fisicoquímico del producto en el lazo de control.

El desarrollo de tecnologías de medición en línea permitió posteriormente extender este enfoque. Barrett *et al.*, (2010) desarrollaron un procedimiento basado en ATR-FTIR para seguir en tiempo real la concentración y, consecuentemente, el subenfriamiento durante procesos de cristalización por enfriamiento. Los autores demostraron que la información obtenida podía utilizarse no solo para caracterizar el proceso, sino también como base para su optimización y control. Este tipo de estrategias representa un cambio conceptual importante: en lugar de controlar

únicamente una variable de operación, como la temperatura, se busca regular una variable relacionada con el mecanismo que determina la formación del producto.

Sin embargo, el empleo de variables relacionadas directamente con la calidad requiere instrumentación capaz de proporcionar información confiable durante la operación. Esto ha favorecido el desarrollo de estrategias que combinan tecnologías analíticas, estimadores de estado y sensores virtuales. En aplicaciones industriales fuera del sector alimentario, Kim *et al.*, (2013) demostraron durante periodos prolongados de operación la integración de sensores virtuales adaptativos con control predictivo basado en modelos. Su trabajo mostró que las variables inferenciales pueden incorporarse a sistemas de control industriales, aunque también identificó como problemas relevantes la selección de las variables de entrada, el mantenimiento del modelo y los cambios en las características del proceso.

2.7.5.1 Control predictivo y control adaptativo en cristalización

El control predictivo basado en modelos constituye una de las estrategias avanzadas de mayor interés para los procesos de cristalización. Su principal característica es utilizar un modelo dinámico para predecir la evolución futura del sistema y determinar una secuencia de acciones que optimice un objetivo sujeto a restricciones. Esta capacidad resulta especialmente atractiva en cristalizadores, donde existen límites de temperatura, velocidad de enfriamiento y duración del proceso, al mismo tiempo que se busca obtener características específicas del producto.

No obstante, su desempeño está condicionado por la capacidad del modelo para representar la dinámica real del proceso. En cristalización, los modelos basados en balances poblacionales pueden incorporar nucleación, crecimiento, disolución, aglomeración y distribución de tamaños, pero esta descripción incrementa considerablemente la complejidad computacional. Por ello, una parte importante de la investigación se ha orientado a desarrollar modelos reducidos, estimadores de estado y mecanismos de adaptación que permitan aplicar estas estrategias en línea.

Forgione *et al.*, (2015), por ejemplo, investigaron estrategias de actualización *batch-to-batch* para mejorar progresivamente modelos empleados en el control de cristalización por enfriamiento. Los autores evaluaron tanto correcciones del modelo basadas en el error de lotes anteriores como la identificación iterativa de parámetros, incluyendo pruebas experimentales en un cristizador a escala piloto. Este enfoque resulta relevante en procesos discontinuos porque permite utilizar la información de cada lote para corregir la representación del proceso en las operaciones posteriores.

Un enfoque más avanzado fue desarrollado por Szilágyi *et al.*, (2018), quienes combinaron un balance poblacional de alta resolución, mediciones FBRM y un controlador predictivo adaptativo. Las mediciones de distribución de longitud de cuerda fueron empleadas por un estimador para reconstruir estados no medibles y actualizar parámetros cinéticos del modelo. De esta manera, el controlador pudo compensar parcialmente diferencias entre el modelo y el proceso. El trabajo demuestra la capacidad del control adaptativo para enfrentar incertidumbres cinéticas, pero también pone de manifiesto una de sus principales limitaciones: el incremento de la complejidad de modelado y del esfuerzo computacional requerido para obtener las acciones de control en tiempo real.

La integración entre sensores virtuales y MPC continúa siendo un área de investigación en desarrollo. Lima *et al.*, (2025) implementaron experimentalmente un controlador predictivo no lineal para una cristalización discontinua de paracetamol, utilizando un balance poblacional como modelo interno y un sensor virtual para inferir variables que no podían obtenerse directamente mediante la instrumentación PAT disponible. La estrategia manipuló la temperatura para controlar simultáneamente características relacionadas con el tamaño de los cristales y el rendimiento. Los experimentos mostraron la factibilidad del enfoque, aunque también revelaron que fenómenos no representados correctamente en el modelo, como la desaparición de cristales durante ciclos térmicos, pueden deteriorar las predicciones y obligar a modificar la estrategia de control. Este resultado ilustra que una mayor complejidad del controlador no elimina la dependencia respecto a la calidad del modelo empleado.

2.7.5.2 Control avanzado en procesos alimentarios

Los procesos alimentarios presentan dificultades adicionales para la aplicación de estrategias avanzadas de control debido a la naturaleza variable de las materias primas, las propiedades no lineales de los productos, los cambios de fase y la dificultad para instalar sensores que sean simultáneamente rápidos, robustos y compatibles con las condiciones sanitarias del proceso. Estas características han motivado desde hace varias décadas el uso de identificación en línea y control adaptativo.

Tan y Hofer en 1995 desarrollaron y validaron experimentalmente un controlador predictivo autoajustable para regular la temperatura durante un proceso de extrusión de alimentos. El esquema incorporó identificación en línea del proceso y predicción de las perturbaciones, mostrando que la actualización del modelo podía aumentar la robustez frente a incertidumbres en los retardos dinámicos. Este antecedente resulta relevante porque muestra que las estrategias adaptativas pueden ser apropiadas cuando la dinámica del alimento cambia durante la operación.

En este contexto, el uso de sensores virtuales resulta particularmente atractivo para la industria alimentaria. En lugar de intentar medir directamente una propiedad cuya instrumentación puede ser invasiva o difícil de mantener, se emplean variables de proceso accesibles para inferirla mediante un modelo. Sin embargo, el sensor virtual únicamente será confiable mientras las condiciones de operación se encuentren dentro del dominio para el que fue desarrollado y mientras sus señales de entrada mantengan una calidad adecuada. Esta dependencia constituye una limitación importante cuando la formulación del alimento, el estado del equipo o las condiciones de proceso cambian.

3. Justificación

La calidad y reproducibilidad de los alimentos congelados dependen de la capacidad para controlar las condiciones térmicas y mecánicas durante su procesamiento. En la producción de helado, la cristalización dinámica constituye una etapa crítica, debido a que durante esta operación se desarrolla una parte importante de la estructura del producto y se modifican progresivamente sus propiedades reológicas y mecánicas. Las condiciones de operación del intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR), particularmente la temperatura y el caudal del refrigerante, la velocidad de agitación y el tiempo de procesamiento, determinan la velocidad con la que se extrae calor y, por lo tanto, influyen sobre la trayectoria de cristalización del producto. Sin embargo, el seguimiento del proceso mediante variables como la temperatura o el tiempo no permite describir por completo la evolución del estado reológico del helado.

La viscosidad aparente constituye una variable de interés para describir la evolución de la resistencia al flujo durante la cristalización. No obstante, su medición directa y continua dentro de un ICSR presenta dificultades asociadas con la naturaleza multifásica del producto, los cambios rápidos de sus propiedades y las características del propio equipo. En este contexto, el uso de un sensor virtual representa una alternativa para estimar en línea una propiedad que resulta difícil de medir directamente, a partir de variables que pueden obtenerse mediante la instrumentación convencional del proceso. En particular, la potencia requerida por el sistema de agitación contiene información relacionada con la resistencia mecánica que presenta el producto durante su evolución, por lo que puede utilizarse como variable para estimar la viscosidad mediante un modelo previamente desarrollado.

A partir de esta posibilidad, resulta de interés no solamente utilizar el sensor virtual como una herramienta de monitoreo, sino también explorar su integración con una estrategia de control que permita modificar la evolución del proceso. En este sentido, la regulación de la pendiente de potencia mediante el caudal de refrigerante constituye una alternativa para actuar sobre la velocidad de evolución mecánica del sistema y, con ello, generar diferentes trayectorias de viscosidad durante la cristalización. Esta

aproximación permite pasar de un esquema basado únicamente en el seguimiento de las condiciones del proceso a uno en el que una variable relacionada con el estado reológico del producto puede utilizarse como referencia para la operación del sistema.

Desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo de esta estrategia requiere integrar la medición de variables de proceso, la adquisición y procesamiento de señales, la estimación de la viscosidad mediante un sensor virtual y el accionamiento del sistema de refrigeración. Por ello, el trabajo contempla la instrumentación de un ICSR discontinuo, la implementación de una plataforma para adquisición, supervisión y procesamiento de las variables del proceso, así como el desarrollo de una estrategia de control en cascada para regular la pendiente de potencia mediante la manipulación del caudal de glicol. La integración de estos elementos permite establecer una plataforma experimental en la que es posible evaluar la relación entre las condiciones de operación, la evolución de la potencia y las trayectorias de viscosidad estimada durante la cristalización.

Desde el punto de vista industrial, la posibilidad de estimar una variable reológica a partir de señales obtenidas en línea puede representar una alternativa frente a la incorporación de instrumentos reológicos directamente en el equipo. El empleo de variables como la potencia, la temperatura y el caudal permite utilizar información disponible durante la operación para supervisar el comportamiento del producto y establecer condiciones de procesamiento reproducibles. Además, una estrategia de control basada en estas variables podría reducir la dependencia de ajustes manuales y proporcionar una mayor capacidad para modificar de manera controlada la trayectoria del proceso. Sin embargo, el presente trabajo se limita a evaluar experimentalmente la factibilidad de esta aproximación y no contempla un análisis económico formal, por lo que no se pretende establecer reducciones de costos o ahorros energéticos derivados de su implementación.

Desde el punto de vista científico, el interés del trabajo radica en estudiar la factibilidad de utilizar una variable inferencial relacionada con la evolución reológica del producto como elemento de una estrategia de control en un proceso discontinuo, dinámico y

sujeto a cambios en sus propiedades durante la cristalización. En particular, se busca analizar la relación entre la regulación de la pendiente de potencia, la evolución de la viscosidad aparente estimada mediante el sensor virtual y las condiciones de operación del ICSR. De esta manera, el estudio permite evaluar experimentalmente si la modificación controlada de la trayectoria mecánica del sistema puede generar diferentes caminos de evolución de la viscosidad durante la cristalización del helado.

Finalmente, el trabajo proporciona una plataforma experimental para estudiar la integración entre sensores virtuales y estrategias de control aplicadas a procesos alimentarios en los que las propiedades de interés no pueden medirse fácilmente de manera continua. La comparación de diferentes trayectorias de operación permitirá evaluar el desempeño de la estrategia de control y su relación con la evolución de la viscosidad estimada. Las mediciones de textura se consideran una evaluación exploratoria de las muestras obtenidas y permiten identificar tendencias en las propiedades mecánicas del producto; debido a que las condiciones de procesamiento no fueron evaluadas mediante un diseño experimental con réplicas independientes, estos resultados no se utilizarán para establecer diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, sino como evidencia preliminar para orientar estudios posteriores con un diseño experimental replicado.

4. Hipótesis

La implementación de un sensor virtual integrado a una estrategia de control en cascada permitirá modificar la trayectoria de viscosidad aparente estimada durante la cristalización dinámica del helado y generar diferencias observables en las propiedades mecánicas del producto durante su almacenamiento congelado.

4.1 Pregunta de investigación

¿Es posible utilizar un sensor virtual basado en variables de operación disponibles en línea para controlar la velocidad de evolución de la viscosidad aparente durante la cristalización dinámica de helado en un ICSR discontinuo?

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Desarrollar, implementar y evaluar un sistema de control en un intercambiador de calor de superficie raspada discontinuo para el control de la viscosidad en helados mediante la velocidad de enfriamiento

5.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el equipo de cristalización disponible
- Rehabilitar el intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR).
- Instrumentar el equipo para regular la variable manipulada asociada al proceso de enfriamiento (flujo de refrigerante secundario)
- Diseñar e implementar una plataforma de adquisición y supervisión para monitoreo en tiempo real
- Implementar una estrategia de control para el seguimiento de la trayectoria de viscosidad en el ICSR
- Evaluar el desempeño del sistema de control implementado y explorar su efecto sobre las propiedades mecánicas del helado durante el almacenamiento congelado.

6. Bibliografía

- Aboulfazli, F., Baba, A. S., & Misran, M. (2015). The rheology and physical properties of fermented probiotic ice creams made with dairy alternatives. *International Journal of Food Engineering*, 11(4), 493-504. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0343>
- Arbuckle, W. S. (1986). *Ice cream* (4th ed.). AVI Publishing Company.
- Åström, K. J., & Kumar, P. R. (2014). Control: A perspective. *Automatica*, 50(1), 3-43. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.10.012>
- Barrett, M., McNamara, M., Hao, H., Barrett, P., & Glennon, B. (2010). Supersaturation tracking for the development, optimization and control of crystallization processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(8), 1108-1119. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.010>
- Ben Lakhdar, M., Cerecero, R., Alvarez, 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>
- Bennett, S. (1993). Development of the PID controller. *IEEE Control Systems Magazine*, 13(6), 58-62. <https://doi.org/10.1109/37.248006>
- Bennett, S. (2000). The past of PID controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(4), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)38214-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)38214-9)
- Berger, K. G., Bullimore, B. K., White, G. W., & Wright, W. B. (1972). The structure of ice cream: Part 1. *Dairy Industries*, 37(8), 419-425.

- Blel, W., Legentilhomme, P., Bénézech, T., & Fayolle, F. (2013). Cleanability study of a scraped surface heat exchanger. *Food and Bioprocess Processing*, 91(2), 95-102.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.10.002>
- Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, S. Y., & Pawar, S. N. (2021). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(2), 818-827. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>
- Chen, C.-T. (1999). *Linear system theory and design* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Chéruiy, A. (1997). Software sensors in bioprocess engineering. *Journal of Biotechnology*, 52(3), 193-199. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(96\)01644-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(96)01644-6)
- 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>
- da Silva, L. R., Flesch, R. C. C., & Normey-Rico, J. E. (2018). Analysis of anti-windup techniques in PID control of processes with measurement noise. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 948-953. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.100>
- De la Cruz Martínez, A., Delgado Portales, R. E., Pérez Martínez, J. D., González Ramírez, J. E., Villalobos Lara, A. D., Borrás Enríquez, A. J., & Moscosa Santillán, M. (2020). Estimation of ice cream mixture viscosity during batch crystallization in a scraped surface heat exchanger. *Processes*, 8(2), Article 167.
<https://doi.org/10.3390/pr8020167>
- Dias Lima, F. A. R., Fernandes de Moraes, M. G., Resende Secchi, A., de Souza, M. B., Jr., & Grover, M. A. (2025). Experimental nonlinear model predictive control of crystal size

- and yield in batch cooling crystallization enabled by soft sensor and symbolic-based calibration model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(49), 23582-23600. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c03894>
- Drewett, E. M., & Hartel, R. W. (2007). Ice crystallization in a scraped surface freezer. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 1060-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.018>
- El-Owni, O. A. O., & Khater, Z. K. O. (2009). Chemical composition of ice cream produced in Khartoum State, Sudan. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(2), 158-160. <https://doi.org/10.3923/pjn.2009.158.160>
- Flores, A. A., & Goff, H. D. (1999). Ice crystal size distributions in dynamically frozen model solutions and ice cream as affected by stabilizers. *Journal of Dairy Science*, 82(7), 1399-1407. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75366-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75366-X)
- Forgione, M., Birpoutsoukis, G., Bombois, X., Mesbah, A., Daudey, P. J., & Van den Hof, P. M. J. (2015). Batch-to-batch model improvement for cooling crystallization. *Control Engineering Practice*, 41, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.04.011>
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2019). *Feedback control of dynamic systems* (8th ed.). Pearson.
- García, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: Theory and practice—A survey. *Automatica*, 25(3), 335-348. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2)
- Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2013). *Ice cream* (7th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6096-1>

- Huggins, F. E. (1931). Effect of scrapers on heating, cooling, and mixing. *Industrial & Engineering Chemistry*, 23(7), 749-753. <https://doi.org/10.1021/ie50259a005>
- Kadlec, P., Gabrys, B., & Strandt, S. (2009). Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & Chemical Engineering*, 33(4), 795-814. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.12.012>
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Kim, S., Kano, M., Hasebe, S., Takinami, A., & Seki, T. (2013). Long-term industrial applications of inferential control based on just-in-time soft-sensors: Economical impact and challenges. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(35), 12346-12356. <https://doi.org/10.1021/ie303488m>
- Kowalski, K., Błasiak, P., & Pietrowicz, S. (2025). A review of scraped surface heat exchangers: Parameters describing thermal-fluid processes, influence of their internal geometric parameters and energy consumption. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 236, Article 126336. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126336>
- Kozák, Š. (2002, junio 9-12). Development of control engineering methods and their applications in industry [Invited lecture]. 5th International Scientific-Technical Conference Process Control 2002, Kouty nad Desnou, Czech Republic.
- Kozák, Š. (2014). State-of-the-art in control engineering. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2014.03.002>

Krishnan, J. M., Deshpande, A. P., & Kumar, P. B. S. (Eds.). (2010). *Rheology of complex fluids*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6>

Marshall, R. T., Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2003). *Ice cream* (6th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0163-3>

Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., & Sokaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6), 789-814. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9)

Mezger, T. G. (2011). *The rheology handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers* (3rd rev. ed.). Vincentz Network.

Miller-Livney, T., & Hartel, R. W. (1997). Ice recrystallization in ice cream: Interactions between sweeteners and stabilizers. *Journal of Dairy Science*, 80(3), 447-456. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)75956-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)75956-3)

Mullin, J. W. (2001). *Crystallization* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Nagy, Z. K., Chew, J. W., Fujiwara, M., & Braatz, R. D. (2008). Comparative performance of concentration and temperature controlled batch crystallizations. *Journal of Process Control*, 18(3-4), 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.10.006>

Qin, F. G. F., Zhao, J. C., Russell, A. B., Chen, X. D., Chen, J. J., & Robertson, L. (2003). Simulation and experiment of the unsteady heat transport in the onset time of nucleation and crystallization of ice from the subcooled solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(17), 3221-3231. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00097-8)

- Qin, F. G. F., Chen, X. D., Ramachandra, S., & Free, K. (2006). Heat transfer and power consumption in a scraped-surface heat exchanger while freezing aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, 48(2), 150-158.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.07.018>
- Rao, C. S., & Hartel, R. W. (2006). Scraped surface heat exchangers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(3), 207-219.
<https://doi.org/10.1080/10408390500315561>
- Rha, C. K. (Ed.). (1975). *Theory, determination and control of physical properties of food materials*. D. Reidel Publishing Company. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1731-2>
- Romero del Castillo Shelly, R., & Mestres Lagarriga, J. (2004). *Productos lácteos: Tecnología*. Edicions UPC.
- Rosmaninho, R., Santos, O., Nylander, T., Paulsson, M., Beuf, M., Bénézech, T., Yiantsios, S., Andritsos, N., Karabelas, A., Rizzo, G., Mueller-Steinhagen, H., & Melo, L. F. (2007). Modified stainless steel surfaces targeted to reduce fouling—Evaluation of fouling by milk components. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1176-1187.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.09.008>
- Rout, P., & Saha, S. (2023). Rheology of ice cream: From fundamentals to applications. *Innovations in Agriculture*, 6, 1-7. <https://doi.org/10.25081/ia.2023-012>
- Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: An engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 1327-1349. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>

- Scott Blair, G. W. (1944). *A survey of general and applied rheology*. Pitman Publishing Corporation.
- Shi, A. M., Li, D., Wang, L. J., & Adhikari, B. (2012). The effect of NaCl on the rheological properties of suspension containing spray dried starch nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 1530-1537. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.07.025>
- Shi, A. M., Li, D., Wang, L. J., & Adhikari, B. (2012). Rheological properties of suspensions containing cross-linked starch nanoparticles prepared by spray and vacuum freeze-drying methods. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 1732-1738. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.07.059>
- Shi, A. M., Li, D., Wang, L. J., Zhou, Y. G., & Adhikari, B. (2012). Spray drying of starch submicron particles prepared by high pressure homogenization and mini-emulsion cross-linking. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.017>
- Shi, A. M., Wang, L. J., Li, D., & Adhikari, B. (2013). Suspensions of vacuum-freeze dried starch nanoparticles: Influence of NaCl on their rheological properties. *Carbohydrate Polymers*, 94(2), 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.004>
- Skelland, A. H. P., & Leung, L. S. (1962). Power consumption in a scraped-surface heat exchanger. *British Chemical Engineering*, 7(4), 264-267.
- Smith, A. A. T., Wilson, S. K., Duffy, B. R., & Hall-Taylor, N. (2010). Heat and fluid flow in a scraped-surface heat exchanger containing a fluid with temperature-dependent viscosity. *Journal of Engineering Mathematics*, 68(3-4), 301-325. <https://doi.org/10.1007/s10665-010-9403-y>

- Sofjan, R. P., & Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, 14(3), 255-262.
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.005>
- Solano, J. P., Martínez, D. S., Vicente, P. G., & Viedma, A. (2023). Enhanced thermal-hydraulic performance in tubes of reciprocating scraped surface heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 220, Article 119667.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119667>
- Stanley, D. W., Goff, H. D., & Smith, A. K. (1996). Texture-structure relationships in foamed dairy emulsions. *Food Research International*, 29(1), 1-13.
[https://doi.org/10.1016/0963-9969\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0963-9969(95)00063-1)
- Szilágyi, B., Agachi, P. Ş., & Nagy, Z. K. (2018). Chord length distribution based modeling and adaptive model predictive control of batch crystallization processes using high fidelity full population balance models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(9), 3320-3332. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03964>
- Tadros, T. (2013). Rheology. In T. Tadros (Ed.), *Encyclopedia of colloid and interface science* (pp. 1020-1042). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20665-8_39
- Tan, J., & Hofer, J. M. (1995). Self-tuning predictive control of processing temperature for food extrusion. *Journal of Process Control*, 5(3), 183-189.
[https://doi.org/10.1016/0959-1524\(94\)00003-U](https://doi.org/10.1016/0959-1524(94)00003-U)
- Tanaka, M., Pearson, A. M., & deMan, J. M. (1972). Measurement of ice cream texture with the constant speed penetrometer. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 5(2), 105-110. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(72\)74098-5](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(72)74098-5)

- Thomas, D. G. (1965). Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 20(3), 267-277. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(65\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90016-4)
- Trommelen, A. M., & Beek, W. J. (1971). The mechanism of power consumption in a Votator-type scraped-surface heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, 26(12), 1977-1986. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(71\)80036-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(71)80036-2)
- Trommelen, A. M., & Boerema, S. (1966). Power consumption in a scraped-surface heat exchanger. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 44, T329-T334.
- Ulrich, J., & Jones, M. J. (2004). Industrial crystallization: Developments in research and technology. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(12), 1567-1570. <https://doi.org/10.1205/cerd.82.12.1567.58038>
- Vogt, C. W. (1930). *Apparatus and process for treating materials* (U.S. Patent No. 1,783,864). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US1783864A/en>
- Wang, Q., Shi, A., & Shah, F. (2019). Rheology instruments for food quality evaluation. In J. Zhong & X. Wang (Eds.), *Evaluation technologies for food quality* (pp. 465-490). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00018-4>
- Ye, Q., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2026). Innovative insights into scraped surface heat exchangers (SSHEs): Working principles, improvements, and applications in the food industry. *Food Engineering Reviews*, 18, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s12393-026-09441-0>

- Zamproga, E., Barolo, M., & Seborg, D. E. (2004). Estimating product composition profiles in batch distillation via partial least squares regression. *Control Engineering Practice*, 12(7), 917-929. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2003.11.005>
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Fluids Engineering*, 64, 759-765. <https://doi.org/10.1115/1.4019264>

Tesis_M_CuraSaldaña_Revision_Similitud.pdf

 Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:616118189

Fecha de entrega

21 ago 2026, 4:00 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 ago 2026, 4:04 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis_M_CuraSaldaña_Revision_Similitud.pdf

Tamaño del archivo

2.8 MB

101 páginas

24.546 palabras

137.880 caracteres

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

50 caracteres sospechosos en N.º de página

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

10%	 Fuentes de Internet
4%	 Publicaciones
0%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorioinstitucional.uaslp.mx	3%
2	Internet	www.coursehero.com	<1%
3	Internet	hdl.handle.net	<1%
4	Internet	dgsa.uaeh.edu.mx:8080	<1%
5	Internet	es.scribd.com	<1%
6	Internet	ninive.uaslp.mx	<1%
7	Internet	pa.bibdigital.uccor.edu.ar	<1%
8	Internet	idoc.pub	<1%
9	Internet	qdoc.tips	<1%
10	Internet	repositorioinstitucional.buap.mx	<1%
11	Publicación	"Control predictivo híbrido para flotación de minerales.", Pontificia Universidad C...	<1%