



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**Aprovechamiento térmico del hielo fluido en el  
preenfriamiento de zanahorias**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:**

**JOSÉ EDUARDO MALAGÓN LÓPEZ**

**ASESORES: I. A. ALFREDO ÁLVAREZ  
CÁRDENAS**

**DRA. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO  
ZARAGOZA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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 la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DEPARTAMENTO DE  
EXÁMENES PROFESIONALES

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Aprovechamiento térmico del hielo fluido en el preenfriamiento de zanahorias.

Que presenta el pasante: José Eduardo Malagón López  
Con número de cuenta: 308125128 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 02 de Junio de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas	
VOCAL	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
SECRETARIO	I.A. Manuel Alarcón López	
1er. SUPLENTE	I.A. Francisco Javier López Martínez	
2do. SUPLENTE	M.N.H. Juana Gutiérrez Bautista	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga\*

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

- El proyecto PAPIIME: PE103915 “Diseño y Construcción de Equipo Didáctico para Mejorar la Enseñanza de los Procesos y Sistemas Frigoríficos”. de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM).
  
- El PAPIIT IT201617, “Efecto de recubrimientos nanopartículados y tratamiento con luz UV-C sobre la actividad antioxidante, enzimática e integridad de frutas y hortalizas cortadas. de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM).
  
- A su vez, José Eduardo Malagón López agradece el apoyo técnico de la Dra. María de los Ángeles Cornejo Villegas, en el Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos de la UIM.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

A dios por permitirme llegar hasta aquí, por darme salud, inteligencia, fuerza, perseverancia y disciplina para lograr concluir mis estudios profesionales. Agradezco a dios por cruzar en mi camino a personas que han influido en mí y me han ayudado para lograr llegar hasta este momento.

A la UNAM y a mi escuela la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, mi casa y la institución donde me forme y adquirí los conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional.

A mis asesores, El Ing. Alfredo Álvarez Cárdenas y a la Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza, gracias por todo su apoyo y por creer en mí, por cada consejo y observación para lograr desarrollar este trabajo, permitiéndome culminar la carrera. Gracias por ser profesores y seres humanos ejemplares y transmitirme un poco del gran conocimiento que poseen.

A mis padres gracias por todo el amor que me han dado desde que nací, gracias por educarme de la mejor manera y hacerme una persona de bien, gracias por todo su apoyo y que gracias a ustedes jamás me ha faltado nada, gracias por estar a mi lado siempre en todos mis triunfos y momentos no tan buenos, por impulsarme a lograr esta meta que es de ustedes también, pero sobre todo porque son los mejores papas que dios me pudo dar, gracias por cada consejo, regaño, platica, por escucharme siempre, por impulsarme y alentarme a lograr cualquier cosa que me propongo y por estar a mi lado siempre. Esto es por ustedes los amo mucho gracias.

A mi hermano Oscar (*chino*), por ser mi primer y mejor amigo y estar siempre conmigo, desde que naciste supe que tenía la responsabilidad de ser un buen ejemplo para ti y que de alguna manera ayudar a mis padres a educarte y creo que ahí la llevamos, gracias por jugar conmigo desde pequeños esos partidos interminables en el patio de la casa, que a pesar de jugar en muchos campos de futbol esos serán siempre los más épicos y que más disfrute. Gracias por aguantar mi hiperactividad y cuando no dejo de hablar. Gracias por ser mi hermano.

A mis tías, Catalina López y Josefina López mis segundas madres, gracias por siempre estar pendiente de mí, por todos sus consejos y apoyo que me han dado desde pequeño las amo y tienen un lugar muy especial en mi vida y corazón gracias por todo.

---

---

---

---

A Rebeca Cruz Jiménez, gracias por cambiar mi vida, por compartir momentos muy especiales y por crecer a mi lado tanto en lo profesional como en lo personal, gracias por ser mi compañera al redactar este trabajo y hacerlo más divertido, gracias por apoyarme y hacerme ver las cosas buenas, por escucharme y darme consejos, enseñarme que cualquier meta se puede lograr, solo hay que echarle galleta como tú dices y hacerme mejor persona te amo mucho mi vida. Gracias por estar a mi lado. TUYO ♥.

A mis amigos y la segunda familia que la vida me dio, gracias por estar en mi vida y por todos los momentos que pasamos durante la universidad gracias por su amistad los quiero mucho y por el apoyo que siempre me han brindado tienen un lugar muy especial en mi corazón. Moni (mami), Mis manitas: Fer, Vale, Liz, Clau, Jime, y mis manitos: Dieguito, Chore, Puga, Roger, Luis. Gracias por su amistad los quiero mucho.

A mis amigos que desde CCH me han brindado su amistad y apoyo en todo momento y son los hermanos que la vida me dio Juan y Ernesto gracias por su amistad y todo lo que han hecho por mí siempre contarán conmigo. Y recuerden siempre fuertes.

---

---

---

---

## ÍNDICE

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

#### I. ANTECEDENTES

1.1	Refrigerantes secundarios	1
1.2	Hielo fluido	3
1.2.1	Características del hielo fluido	4
1.2.2	Formación de cristales	5
1.2.3	Aditivos para abatir el punto inicial de congelación	8
1.2.4	Proceso de generación de hielo fluido	10
1.2.5	Aplicación del hielo fluido	17
1.3	Parámetros térmicos	21
1.4	Características de la zanahoria	30
1.4.1	Técnicas de preenfriamiento	32

#### II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1	Problema y justificación	36
2.2	Objetivos	37
2.3	Desarrollo experimental	37
2.4	Generación de hielo fluido	39
2.5	Procedimiento para el cálculo de parámetros térmicos	44

#### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1	Propiedades físicas del hielo fluido	46
3.2	Porcentaje de hielo formado	47
3.3	Tamaño y geometría de cristal	51
3.4	Proceso de formación del hielo fluido	55
3.5	Comportamiento gráfico durante el enfriamiento	61
3.6	Parámetros térmicos	64

<b>CONCLUSIONES</b>	71
---------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	73
---------------------	----

---

---

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Número de Figura	Título	Página
1	Sistemas de enfriamiento de refrigerante secundario	2
2	Congelación de agua pura. Congelación de solución binaria	5
3	Diferencias estructurales de cristales de hielo globulares y dendríticos	7
4	Diagrama de fases	8
5	Generador de hielo fluido tipo superficie raspada	11
6	Generado de hielo fluido rotatorio cilíndrico	11
7	Generación de hielo por intercambiador de superficie raspada	12
8	Generación de hielo por subenfriamiento. Agitación con superficie sólida (a), líquida (b), perturbación con agitación (c)	13
9	Intercambiador de barra orbital	14
10	Generación de hielo fluido por lecho fluidizado. Método estacionario(a). Método por circulación (b)	15
11	Generación de hielo fluido por vacío	16
12	Sistema de aire acondicionado por hielo fluido	18
13	Sistema de aire acondicionado en minas	19
14	Factor de retardo y coeficiente de enfriamiento	25
15	Preenfriamiento por inmersión	33
16	Preenfriamiento por aire forzado	34

---

---



---

---

17	Generación de hielo fluido	40
18	Diagrama de generación de hielo fluido	40
19	Microscopio digital	42
20	Estructura química de los polialcoholes empleados	48
21	Porcentaje de hielo formado	49
22	Gráfico radial de porcentaje de hielo formado	50
23	Microscopía hielo fluido formado con propilenglicol	52
24	Microscopía hielo fluido formado con etilenglicol	53
25	Microscopía. Geometría de cristal	54
26	Proceso de formación de hielo fluido con propilenglicol	56
27	Proceso de formación de hielo fluido generado con Etilenglicol	57
28	Generación de hielo fluido	60
29	Tiempos de generación de hielo fluido	61
30	Comportamiento gráfico durante el enfriamiento de la zanahoria con hielo fluido a partir de propilenglicol	62
31	Comportamiento gráfico durante el enfriamiento de la zanahoria con hielo fluido a partir de etilenglicol.	63
32	Gráfico “LogY-tiempo” hielo fluido propilenglicol	67
33	Gráfico “LogY-tiempo” hielo fluido etilenglicol	68

---

---

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Número de Tabla	Título	Página
1	VARIABLES DE TRABAJO	38
2	Porcentaje de hielo formado	47
3	Punto inicial de congelación del hielo fluido según el tratamiento	58
4	Temperatura constante del hielo fluido por tratamiento	59
5	Tiempo de formación de hielo fluido por tratamiento	60
6	Tiempos de proceso de enfriamiento	64
7	Parámetros térmicos durante el enfriamiento	66
8	Aprovechamiento térmico	70

---

---

---

---

## RESUMEN

En este trabajo se estudió el efecto del empleo de diferentes depresores aceptados como sustancias seguras para consumo humano (propilenglicol y etilenglicol), como alternativa para la formación de hielo fluido a ser empleado en el preenfriamiento de productos alimenticios en particular frutas y hortalizas. El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo el estudio del aprovechamiento térmico y velocidad de enfriamiento de hielo fluido producido con propilenglicol y etilenglicol y su comportamiento durante el preenfriamiento de zanahoria *baby*. Se llevó a cabo la caracterización de hielo fluido al finalizar su generación determinando propiedades físicas y su efecto al abatir el punto inicial de congelación por la adición de aditivos, encontrando que las propiedades del hielo fluido dependen en gran medida de la concentración del aditivo. Se realizó el enfriamiento por medio de la inmersión de las zanahorias en el hielo fluido y se determinaron parámetros inherentes a la transferencia de calor durante el enfriamiento para determinar el aprovechamiento energético de cada una de las concentraciones de aditivos propuestas encontrando que las concentraciones altas de 20% de propilenglicol y etilenglicol son las más adecuadas para la aplicación de hielo fluido en el proceso de enfriamiento de alimentos.

---

---

## INTRODUCCIÓN

El hielo fluido se usa desde hace miles de años, por ejemplo, los antiguos romanos aplicaron la refrigeración con hielo o nieve, ya que eran conscientes de este método de enfriamiento natural. Para este propósito el hielo de ríos y lagos congelados y el hielo de glaciares era transportados largas distancias a regiones pobladas, para aplicaciones domésticas, especialmente refrigeración de alimentos, algunas veces para mantener las bajas temperaturas se agregaba sal al hielo o nieve. Sin embargo, la tecnología para la producción de hielo fluido se inventó en Rusia hace aproximadamente 80 años. Aunque, su principal desarrollo se ubica en Canadá y Alemania donde se comenzaron a desarrollar generadores de hielo fluido para aplicaciones comerciales (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

El hielo fluido se define como una mezcla homogénea de pequeñas partículas de hielo suspendidas en un líquido portador (*Egolf y Kauffeld, 2005*), el líquido puede ser agua pura o una solución binaria, que consiste en agua y un aditivo que permite abatir el punto inicial de congelación. El cloruro de sodio, etanol, etilenglicol y propilenglicol son los cuatro aditivos más comúnmente utilizados para abatir el punto inicial de congelación en la industria (*Sánchez et al., 2002; Kauffeld et al., 2010*). Los aditivos depresores son de gran importancia en la generación de hielo fluido ya que permiten disminuir la temperatura por debajo de su punto inicial de congelación, esta disminución es directamente proporcional a la concentración de aditivo (*Melinder, 2005; Guilpart et al., 2006*).

---

---

Una de las principales ventajas del hielo fluido comparado con el almacenamiento y uso de hielo común es su facilidad en el transporte, siendo posible su bombeo. Pero sin duda la gran ventaja que ofrece, es su empleo como refrigerante, debido a su alta capacidad de almacenamiento térmico y una temperatura de enfriamiento constante (*Martínez et al., 2014*).

El hielo fluido puede emplearse como refrigerante secundario, lo cual disminuye riesgos en la instalación frigorífica (*Wang et al., 2010*), ya que permite emplear un volumen más pequeño de refrigerante primario y los equipos en la instalación son de menor capacidad, reduciendo costos de operación; además, que la generación de hielo fluido se puede realizar durante la noche cuando la demanda de energía es menor y el precio también, para ser almacenado y utilizado durante las horas pico de consumo de energía (*Bellas y Tassou, 2005; Sicard et al., 2007*). Otro aspecto importante es que el hielo fluido se considera un refrigerante que no genera riesgos por contaminación en alimentos y por su gran capacidad de enfriamiento, pero no se ha estudiado la relación que existe al abatir el punto inicial de congelación por la adición de un aditivo y la capacidad térmica para ser aplicado en el enfriamiento de alimentos.

La aplicación de hielo fluido en procesos de refrigeración y congelación por inmersión es ventajosa respecto a una inmersión en medios monofásicos convencionales, ya que genera mayores coeficientes de transferencia de calor. Los coeficientes de transferencia de calor, dependen de varios factores, como lo son las condiciones térmicas del producto y las del medio de enfriamiento.

El hielo fluido tiene una alta energía de almacenamiento debido al calor latente de fusión de sus cristales de hielo y una alta capacidad de enfriamiento por la gran superficie de transferencia de calor generada por sus numerosas partículas. El hielo

---

---

fluido mantiene una temperatura baja constante durante el proceso de enfriamiento y proporciona un coeficiente de transferencia de calor más alto que el del agua u otro líquido monofásico (*Kauffeld et al., 2010; Martínez et al., 2014*).

El hielo fluido ha llamado mucho la atención en la industria de alimentos al emplearlo en la conservación de alimentos, uno de los primeros en utilizarlo fue la industria pesquera, donde se generaba a partir del agua de mar, y se aplicaba mediante una técnica de enfriamiento por inmersión a bordo de los barcos lo cual permitía enfriar y conservar el pescado. El hielo fluido también se utiliza en la preservación de frutas, verduras recién cosechadas y carne, permitiendo conservar parámetros de calidad.

El hielo fluido es un medio efectivo post-cosecha para el enfriamiento de diversos productos, siendo mayormente empleado en hortalizas, una de las principales es la zanahoria. El pretratamiento con hielo fluido se aplica antes del envasado o como medio de almacenamiento, conservando parámetros de calidad, reduciendo desperdicios o pérdida de producto y retardando la pérdida de frescura.

El hielo fluido se generó a partir de soluciones de agua y un aditivo depresor, propilenglicol y etilenglicol aditivos comúnmente empleados en la industria para disminuir el punto inicial de congelación, razón por la cual es importante este trabajo, para conocer la capacidad de aprovechamiento térmico, del hielo fluido a partir de los polialcoholes mencionados, determinando parámetros de transferencia de calor inherentes en el preenfriamiento de zanahorias, lo que permite verificar su efectividad de enfriamiento.

---

---

## CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

### 1.1 Refrigerantes secundarios

El refrigerante se puede dividir en refrigerante primario y refrigerante secundario. El refrigerante primario se utiliza en un sistema para bajar la temperatura de un refrigerante secundario, como la salmuera. El refrigerante secundario circula por un sistema y se enfría en un intercambiador de calor. Los refrigerantes secundarios no suelen ser tóxicos en pequeñas cantidades, aunque en mayores cantidades deben ser eliminados de la forma apropiada. Los sistemas secundarios se utilizan con frecuencia en refrigeración industrial y comercial, también son conocidos como “Liquid-refrigeración Systems” (*Wang et al., 2010*).

El evaporador convencional se sustituye por un intercambiador de calor que se utiliza para intercambiar calor entre el proceso primario y el proceso secundario. Un proceso con refrigerante secundario incorpora dos enfriamientos separados para proporcionar refrigeración como se muestra en la figura 1. El proceso primario es un diseño tradicional de expansión directa donde el refrigerante experimenta cambios de fase y un compresor hace circular el refrigerante. El circuito primario enfría el fluido secundario a través de un intercambiador de calor por contacto indirecto, que se bombea a un segundo intercambiador de calor que proporcionara el enfriamiento al proceso que se desee aplicar (*Wang et al., 2010*).

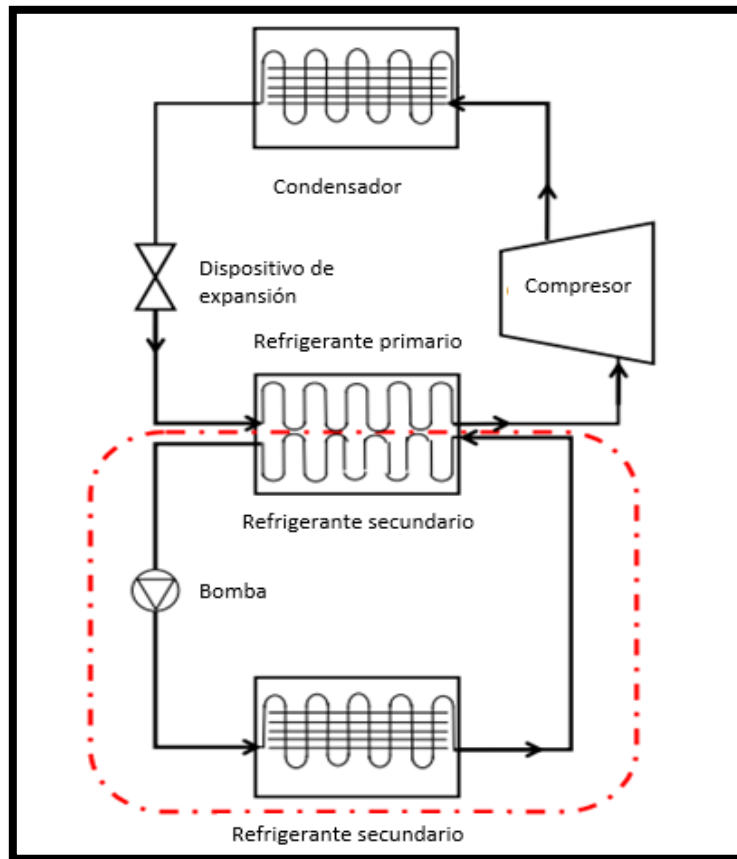


Figura 1. Sistema de enfriamiento de refrigerante secundario (*Wang et al., 2010*).

Las principales características de los refrigerantes secundarios se pueden resumir de la siguiente forma (*Wang et al., 2010*).

- ❖ Baja viscosidad.
- ❖ Calor específico alto.
- ❖ Buena conductividad térmica.
- ❖ Químicamente estable, reducir riesgos.
- ❖ No tóxico.
- ❖ No es inflamable.
- ❖ De grado alimenticio para la refrigeración de alimentos.
- ❖ Reduce el volumen de refrigerante primario con lo que se reducen costos.



---

---

## 1.2 Hielo fluido

La tecnología de hielo fluido se desarrolló en Rusia hace aproximadamente 80 años. Sin embargo, el principal desarrollo se ubica cuando las empresas en Canadá y Alemania comenzaron a fabricar generadores de hielo fluido para aplicaciones comerciales de enfriamiento en tiendas y supermercados (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

El hielo fluido se define como una mezcla homogénea de pequeñas partículas de hielo suspendidas en un líquido portador, el líquido portador puede ser agua pura o una solución binaria, que consiste en agua y un aditivo que permite abatir el punto inicial de congelación. El cloruro de sodio, etanol, etilenglicol y propilenglicol son los cuatro aditivos más comúnmente utilizados para abatir el punto inicial de congelación en la industria (*Kauffeld et al., 2010*). Los aditivos permiten disminuir el punto inicial de congelación, disminuir su viscosidad, aumentar la conductividad térmica de la fase fluida, disminuir la corrosión provocada por hielo fluido al ser transportado en tuberías y prevenir aglomeraciones (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

El hielo fluido se utiliza en sistemas de refrigeración indirecta, se puede almacenar en tanques y disminuir la capacidad de los equipos de la instalación frigorífica además de disminuir el consumo de energía durante su fabricación, sumado mayor energía de enfriamiento en comparación a los sistemas de agua refrigerada (*Sicard et al., 2007*).

---

---

### 1.2.1 Características del hielo fluido

El hielo fluido tiene la propiedad de ser transportado por medio de una tubería al igual que el agua helada pero con una mayor capacidad de enfriamiento ya que aprovecha el calor latente de fusión de sus cristales de hielo, y no solo el calor sensible siendo más eficiente que otros refrigerantes secundarios (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

La concentración de cristales en el hielo fluido determina el comportamiento reológico que tendrá, para concentraciones de hielo bajas de hasta 15% se comportará como un fluido newtoniano, para concentraciones mayores de hielo su comportamiento será no newtoniano. Las discusiones sobre el mejor enfoque de modelo han llevado a que su comportamiento se adapta a un plástico de bingham y este se caracteriza por tener un comportamiento similar al fluido newtoniano una vez que se le aplica un esfuerzo inicial para su desplazamiento (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

La concentración de cristales para considerarse hielo fluido es de 5 a 40% en relación peso, pero dependiendo del tamaño de cristales el sistema puede seguir comportándose como fluido a concentraciones de hasta 65 a 75% en relación peso, incluso con una ausencia total de fase líquida, siempre y cuando el sistema pueda transportarse, haciendo las modificaciones mecánicas pertinentes, se considera hielo fluido (*Piñeiro et al., 2004*).

---

---

El hielo fluido tiene una gran cantidad de energía de enfriamiento y puede ser transportado con un pequeño sistema de bombeo, también posee una gran área de transferencia de calor y la energía de enfriamiento se puede utilizar rápidamente cuando se requiere (Okada et al., 2002).

### 1.2.2 Formación de cristales

El proceso de formación de cristales en una solución binaria, como lo es el hielo fluido es muy similar a la congelación de agua pura, diferenciado por algunos aspectos. La formación de cristales consta de los siguientes fenómenos: subenfriamiento de la solución, nucleación o formación de cristal y crecimiento de los cristales generados.

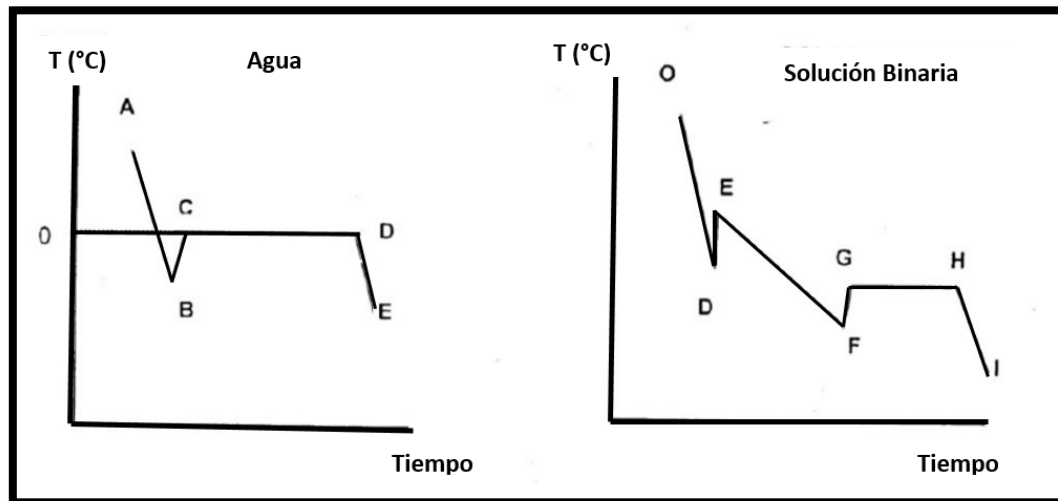


Figura 2. Congelación de agua pura. Congelación de solución binaria (Cortez, et al., 2015).

---

---

La figura 2, muestra un análisis de la temperatura y tiempo en la cinética de congelación de agua pura y una solución binaria. La congelación de agua pura consiste de cuatro puntos, en el punto A-B se observa el subenfriamiento de la solución acuosa donde se retira calor sensible y disminuye la temperatura, en el punto B-C se da el fenómeno de nucleación en el cual se generan los núcleos formadores de los cristales de hielo, en el punto C-D se forman los cristales de hielo donde, la consecuente liberación de calor latente, mantiene la temperatura constante, una vez congelada toda el agua se retira el calor sensible lo que provoca una disminución de la temperatura punto D-E.

El proceso de congelación de la solución acuosa con respecto a la del agua pura varía en algunos aspectos, en el punto O-D existe una extracción de calor sensible que producirá un descenso uniforme de temperatura, el punto D representa el subenfriamiento necesario para la nucleación, el calentamiento producido por la liberación de calor latente D-E, lo cual contribuye al crecimiento de cristales E-F donde existe un cambio de estado de líquido a sólido, no se realiza a temperatura constante debido a que conforme se va cristalizando el agua, la concentración de la solución va incrementándose, con la disminución del punto inicial de congelación, la fase líquida se satura con el soluto y comienza la nucleación de la solución sobresaturada, representado en el punto F. El punto F-G representa la eliminación de calor latente generado por el cambio de fase, la eliminación de calor latente continua hasta llegar al equilibrio termodinámico donde la solución se satura, la cristalización de agua y soluto es proporcional por lo que la concentración no varía y la temperatura es constante G-H, el sistema puede continuar enfriándose dependiendo el proceso donde se aplicará y se muestra en el punto I (*Cortez, et al., 2015*).

---

---

Al generar hielo fluido se espera formar cristales globulares pequeños, los cuales facilitan el transporte, disminuyen las aglomeraciones, aumentan el intercambio térmico, además que en la industria de alimentos disminuyen los daño mecánicos en los productos. Por otro lado al generar partículas dendríticas las cuales son rugosas y alargadas se generan grandes y enredados racimos de partículas que causan obstrucción y aglomeraciones facilitando fenómenos de inestabilidad, en la figura 3 se muestra un ejemplo de las estructuras de cristales de hielo (*Kauffeld et al., 2010*).

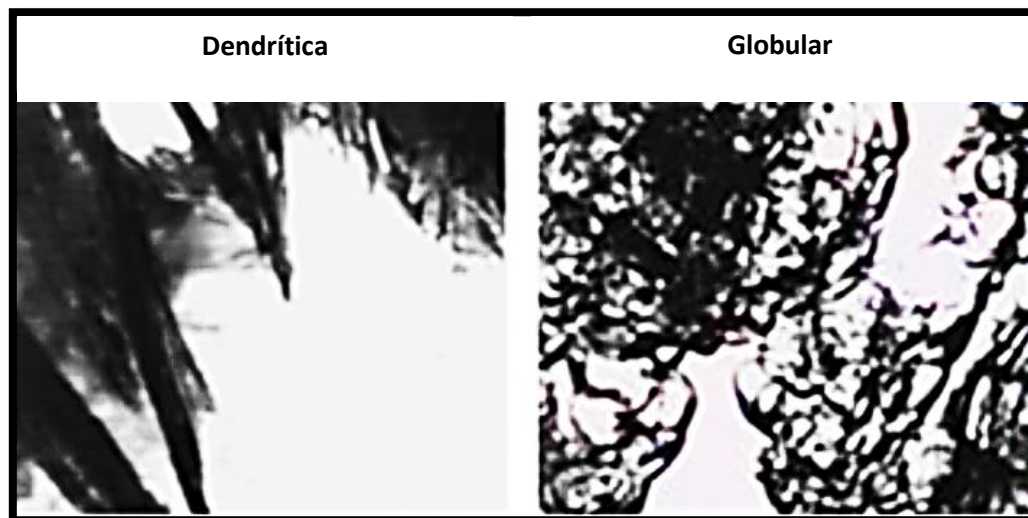


Figura 3. Diferencias estructurales de cristales de hielo globulares y dendríticos (*Kauffeld et al., 2010*).

Para generar cristales globulares se utilizan métodos que implican la adición de un aditivo que permite abatir el punto inicial de congelación de la solución lo cual logra disminuir la rugosidad superficial de las partículas de hielo generando la geometría deseada (*Kauffeld et al., 2010*).

---

---

### 1.2.3 Aditivos para abatir el punto inicial de congelación

El hielo fluido se refiere a una mezcla homogénea de pequeñas partículas de hielo en un líquido portador. El líquido puede ser solo agua dulce o una solución binaria que consiste en agua y un depresor del punto inicial de congelación.

El punto inicial de congelación va depender de la concentración de la solución acuosa, con el aumento de la concentración del aditivo depresor disminuye el punto inicial de congelación, este fenómeno ocurre hasta llegar a una concentración donde el aditivo y la solución acuosa alcanzan su punto eutéctico logrando un equilibrio termodinámico (Melinder et al., 2005).

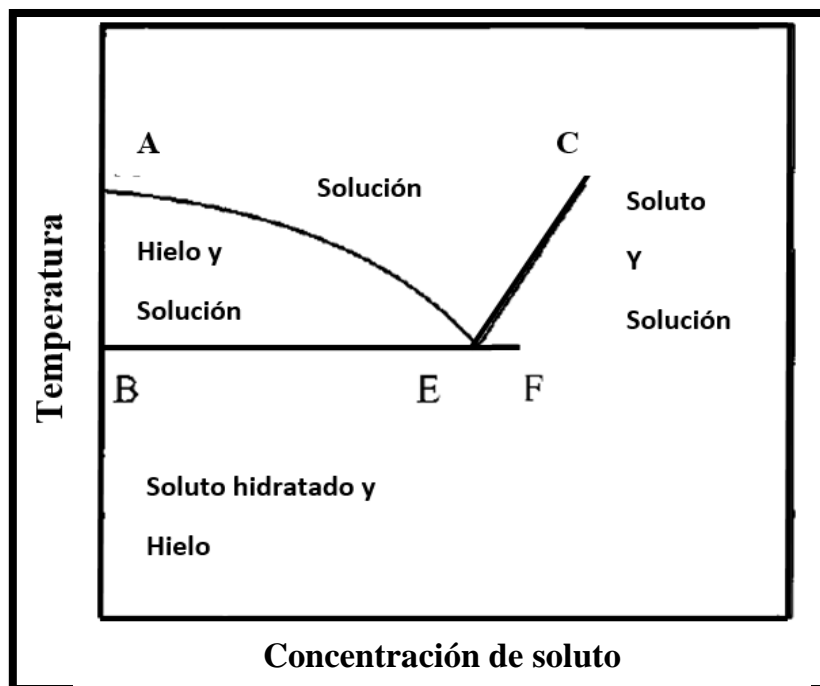


Figura 4. Diagrama de fases (Orrego, 2008).

---

---

La formación de hielo, ocurre por debajo de la temperatura inicial de congelación; este tipo de congelación es típico de soluciones que contienen solutos eutécticos, el proceso se representa en un diagrama de fases como el de la figura 4, en donde la curva A-E, representa el equilibrio entre la solución y el hielo, se le llama curva de congelación y cada punto de ella relaciona la temperatura y la concentración del soluto (S), la curva (E-C) muestra el equilibrio entre la solución y el soluto hidratado: la solución en todo punto de (E-C) está saturada; se le denomina curva de solubilidad, las curvas de congelación y solubilidad se intersectan en el punto eutéctico (E), en donde el hielo y el soluto cristalizan simultáneamente, la línea eutéctica (B-E-F) es la temperatura eutéctica ( $T_e$ ) más alta en la que se alcanza la solidificación máxima del sistema (Orrego, 2008).

Las sustancias más utilizadas como aditivos para deprimir el punto inicial de congelación en la industria son:

- Propilenglicol
- Etilenglicol
- Alcohol etílico
- Alcohol metílico
- Cloruro de calcio
- Cloruro de sodio
- Formato de potasio
- Glicerol.

En general, cualquier tipo de soluto orgánico o inorgánico puede ser utilizado para abatir el punto inicial de congelación y generar una mezcla de hielo fluido; sin embargo, los aditivos más empleados en aplicaciones industriales y comerciales, son los glicoles mientras que en pruebas de laboratorio se utiliza alcohol etílico.

---

---

Para elegir el aditivo más apropiado para la generación de hielo fluido se debe tomar en cuenta algunos parámetros tales como la capacidad de calor volumétrica, la viscosidad de la mezcla, también se considera el nivel de toxicidad, su nivel de corrosión y el costo del aditivo (*Gulipart et al., 2006*).

#### **1.2.4 Proceso de generación de hielo fluido**

Los equipos generadores de hielo fluido han evolucionado en gran medida al estudio como refrigerante secundario. Para la fabricación de hielo fluido se deben conocer tres aspectos fundamentales: el subenfriamiento, la saturación de la solución acuosa y la nucleación o crecimiento de cristales. Este último consta de tres pasos: la transferencia de masa de agua desde el seno de la solución hasta el núcleo, la incorporación de moléculas en la superficie y la eliminación de calor generado en cambio de fase.

Numerosos estudios se concentran en los sistemas de generación de hielo fluido por ejemplo:

- a. Generadores de hielo fluido por intercambiador de superficie raspada con cuchillas giratorias.
- b. Generadores de hielo fluido por subenfriamiento.
- c. Generadores de hielo fluido por barra orbital generadora.
- d. Generadores de hielo fluido por lecho fluidizado.
- e. Generadores de hielo fluido por vacío.

La generación de hielo fluido por superficie raspada típica se muestra en la figura 5, consta de un cilindro de doble pared donde el refrigerante se evapora, en la parte interior del cilindro fluye el agua o la solución acuosa, y los cristales de hielo se



---

---

forman en la pared del cilindro y por rotación de raspadores o cuchillas los cristales caen en la suspensión y se acumulan. El generador de hielo fluido rotatorio cilíndrico que se muestra en la figura 6, posee una superficie para la creación de cristales de hielo por volumen de solución empleada, y se utiliza cuando se requiere una producción alta.

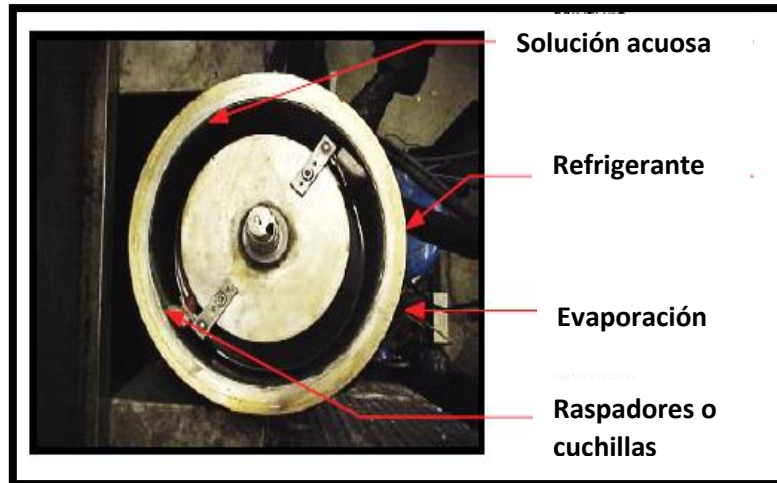


Figura 5. Generador de hielo fluido tipo superficie raspada (Egolf y Kauffeld, 2005).

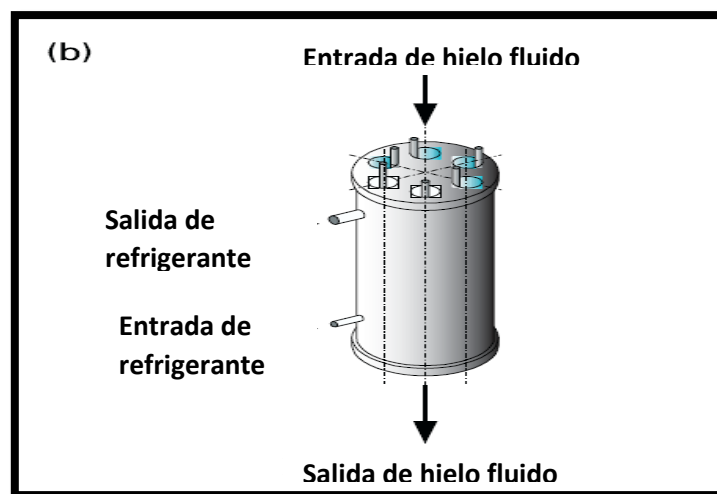


Figura 6. Generado de hielo fluido rotatorio cilíndrico (Egolf y Kauffeld, 2005).

---

---

**a) Generación de hielo fluido por intercambiador de superficie raspada**

El generador consiste en un intercambiador de calor de casco y tubo enfriado en la parte externa por evaporación de un refrigerante primario, mientras que en la parte interna tiene unas cuchillas que previenen la acumulación y formación de cristales sobre las paredes internas, evitando la formación de una resistencia térmica entre el fluido y el refrigerante. Este sistema tiene una gran área de contacto formando una generación alta de cristales por volumen de hielo fluido (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

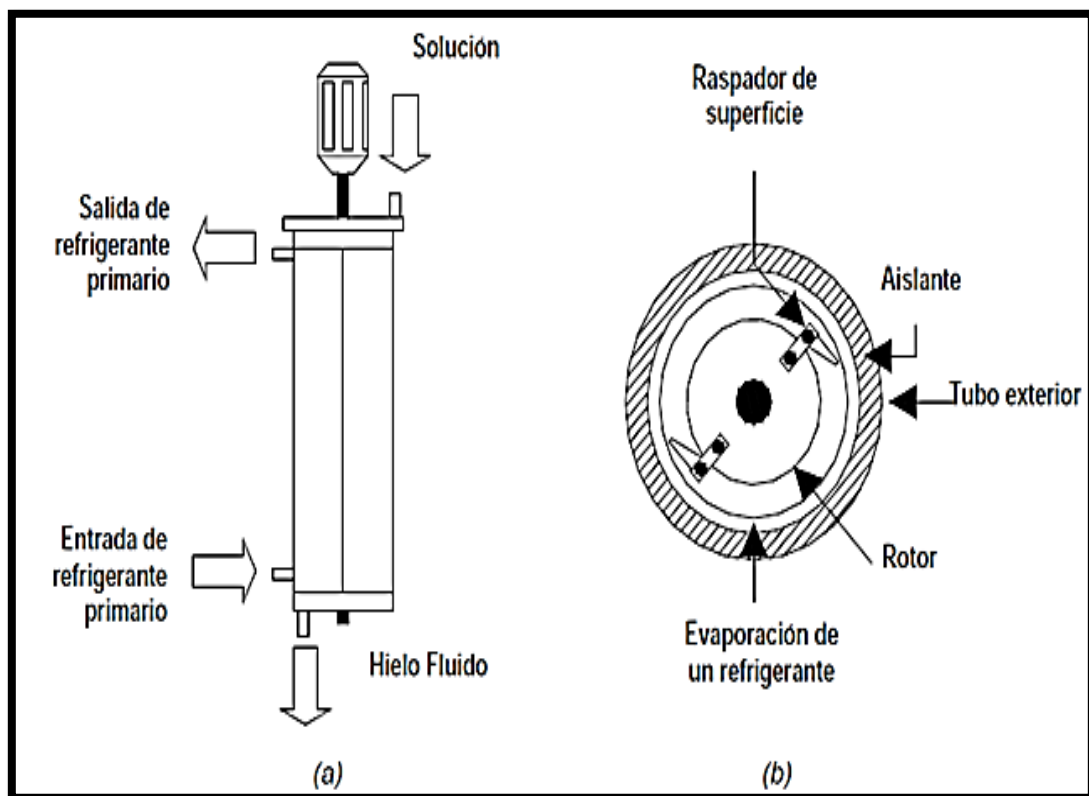


Figura 7. Generación de hielo por intercambiador de superficie raspada (*Navarro, 2008*).

## b) Hielo fluido por subenfriamiento

En este método se produce un subenfriamiento al agua o a la solución acuosa por medio de un intercambiador multi-tubular, disminuyendo su temperatura varios grados centígrados por debajo de su punto inicial de congelación, sin existir un cambio de fase, ni formación de hielo. Antes de que el agua o solución abandone el evaporador por completo se perturba el flujo con el fin de producir los cristales de hielo. La fracción de hielo depende del subenfriamiento del líquido dejado por el evaporador (*Zhang et al., 2012*). Existen diferentes métodos de perturbación para la generación de hielo: colisión del líquido subenfriado con una superficie sólida, con una superficie líquida o consigo misma, perturbación con agitación.

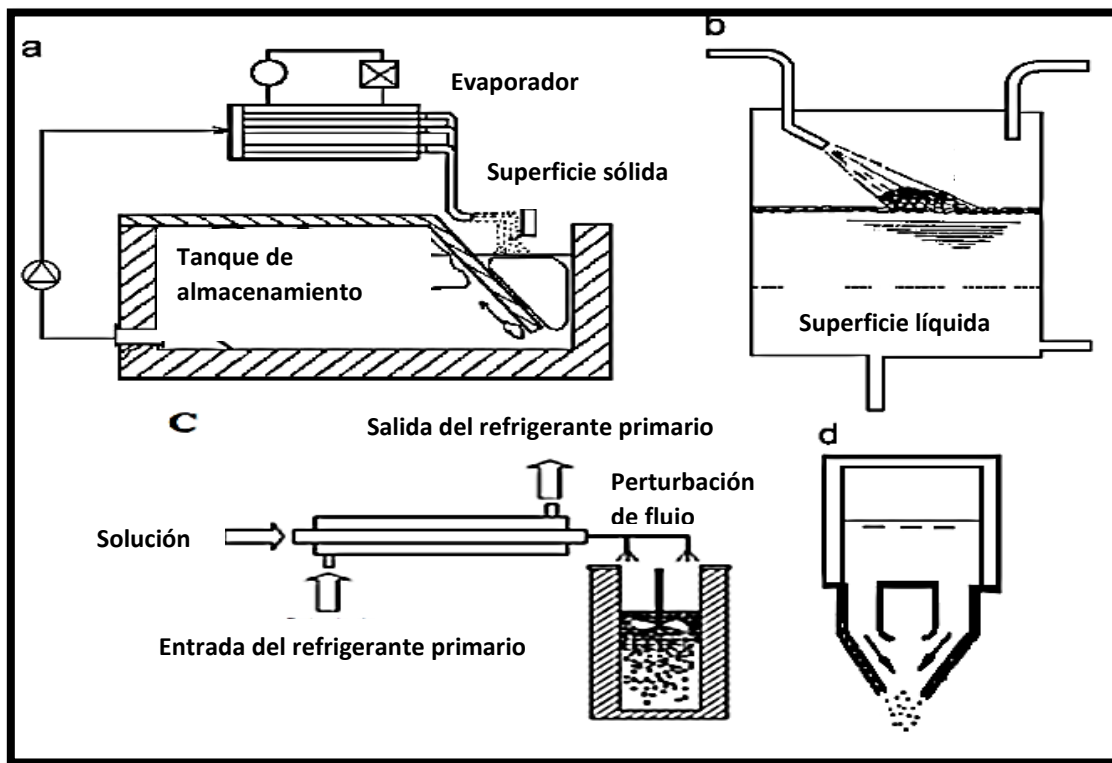


Figura 8. Generación de hielo por subenfriamiento. Agitación con superficie sólida (a), líquida (b), consigo misma (d), perturbación con agitación (c) (*Zhang et al., 2012*).

### c) Hielo fluido por barra orbital generadora

Este método utiliza un intercambiador de coraza y tubos verticales, en el cual el refrigerante fluye en el fondo de la parte superior de la coraza, donde se encuentra un arreglo de tubos de diámetro más pequeño, cada tubo cuenta con una barra giratoria interna, esta gira entorno a la circunferencia del tubo exterior, formando una película descendente de solución, alrededor de la circunferencia, aumentando la transferencia de calor y previniendo la adhesión de cristales formados en la superficie de transferencia (Zhang et al., 2012).

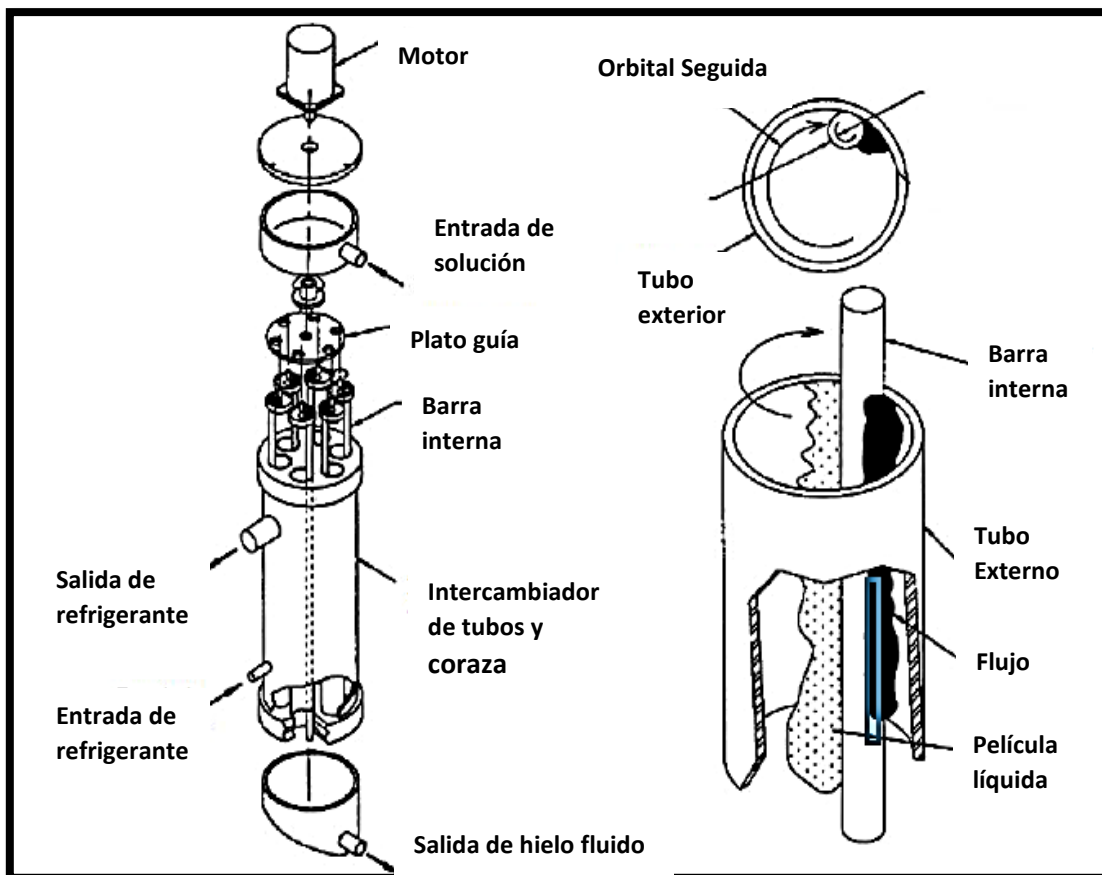


Figura 9. Intercambiador de barra orbital (Zhang et al., 2012).

#### d) Hielo fluido por lecho fluidizado

Este método emplea un intercambiador de tubos y coraza, donde se insertan partículas usualmente cilíndricas o esféricas de vidrio o metal, para disminuir la adherencia de los cristales de hielo a la pared. La solución fluye a través del tubo, las partículas tienen un comportamiento similar a un fluido colisionando con la superficie de transferencia de calor.

Puede ser por estado estacionario donde las partículas permanezcan dentro del tubo durante la operación, o por circulación donde las partículas viajan en conjunto con el hielo fluido, generado fuera de los tubos donde se da el intercambio de calor, separados, y regresados al fondo del recipiente (*Zhang et al., 2012*).

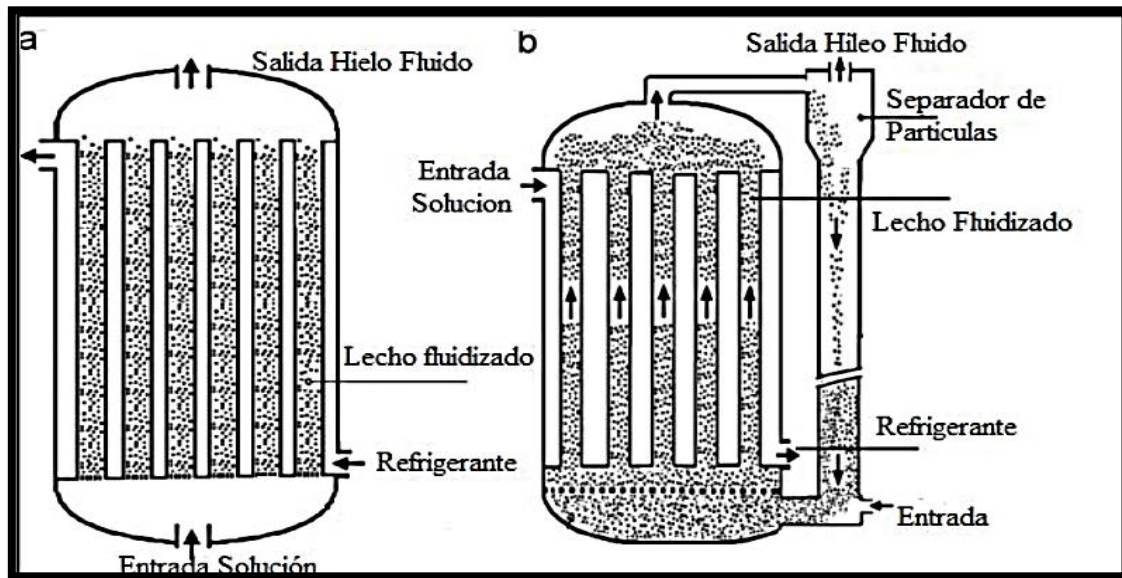


Figura 10. Generación de hielo fluido por lecho fluidizado. Método estacionario(a).  
Método por circulación (b) (*Zhang et al., 2012*).

### e) Generación de hielo fluido por vacío

En este método los cristales de hielo se generan en la condición de punto triple de agua (0.0061 bar y 0.01°C). En este estado, el calor latente se libera en forma de vapor de agua, que es removido mediante un compresor que, a su vez, reduce la presión del recipiente frío donde se encuentra el agua, manteniendo la presión baja. El vapor de agua es condensado, debido que este generador opera a una presión menor a la atmosférica, se requiere de una remoción de gases incondensables con una bomba de vacío.

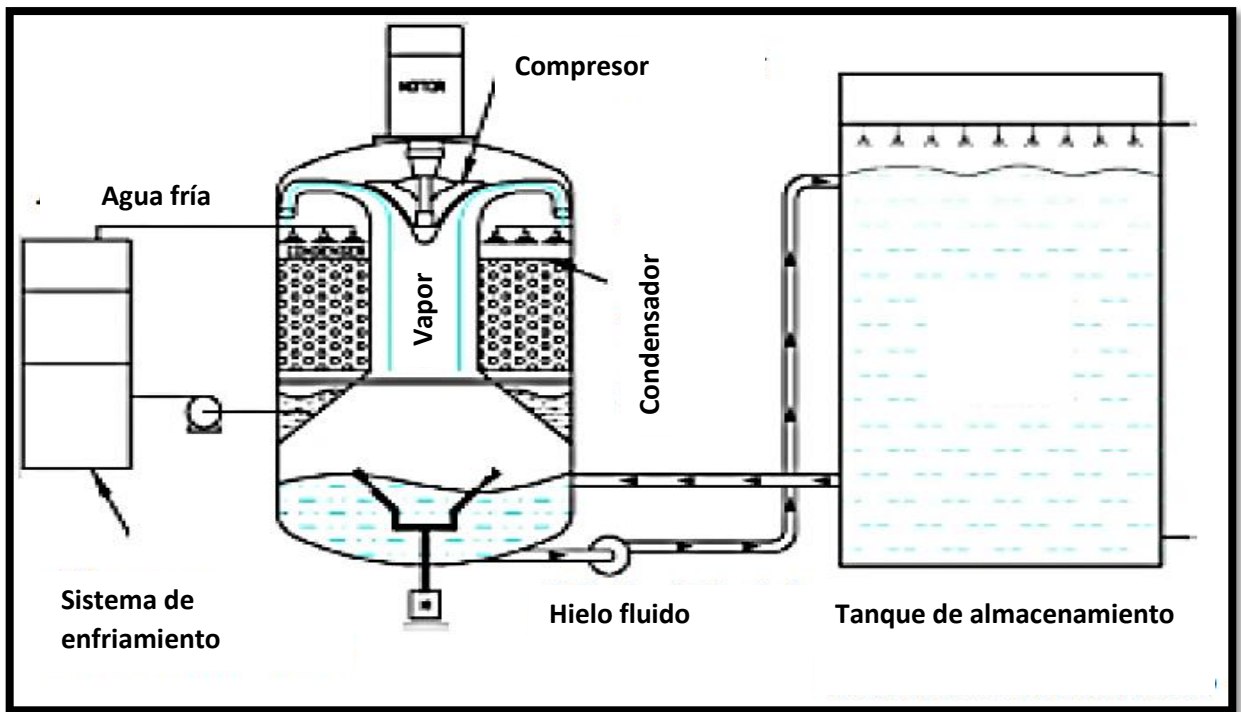


Figura 11. Generación de hielo fluido por vacío (Zhang et al., 2012).

---

---

### 1.2.5 Aplicaciones de hielo fluido

El uso de hielo fluido data de hace muchos miles de años; por ejemplo, los antiguos romanos aplicaron el enfriamiento de mezclas de nieve y agua helada. Hace aproximadamente dos décadas un avance de la nueva tecnología de producción de hielo fluido permite construir sistemas que funcionan de manera óptima permitiendo su aplicación en la refrigeración de tiendas y supermercados.

Sin embargo, todavía hay un gran potencial para reducir el consumo de energía y los costos de producción. El sentido de las acciones es el diseño de nuevos generadores de hielo fluido y desarrollo de nuevos conceptos de almacenamiento.

El hielo fluido tiene un campo amplio de aplicación resultado de su fácil manejo y de su gran capacidad de transferencia de calor en comparación de otros líquidos refrigerantes. Se emplea como medio de almacenamiento de energía, refrigerante he incluso como medio de congelación. La aplicación de hielo fluido puede ser por contacto directo como es el caso de productos pesqueros, o por aplicación indirecta donde solo es utilizado como medio de almacenamiento térmico, transfiriendo su energía de enfriamiento a otro refrigerante (*Egolf y Kauffeld, 2005*). Los usos más comunes se muestran a continuación.

#### **a) Aplicación de hielo fluido como aire acondicionado**

El hielo fluido como sistema de refrigeración se ha instalado en muchos edificios en todo el mundo para fines de aire acondicionado. En la mayoría casos, el sistema de producción de hielo fluido se ha combinado con un sistema de almacenamiento para

---

---

almacenar energía durante la noche y utilizarlo durante el día para satisfacer la carga máxima. El resultado es que los sistemas de refrigeración más pequeños tienen un ahorro de capacidad del 20 al 50%, además de ahorros de energía ya que se puede utilizar el hielo almacenado en horas pico donde la tarifa por energía es mayor (Bellas y Tassou., 2005).

En edificios se suministra el hielo fluido a enfriadores de aire o difusores donde se retira la carga térmica del recinto, se dispone de un sistema convencional de producción de frío, para el sistema primario de enfriamiento y de un sistema generador de hielo fluido y tanques de almacenamiento donde el hielo es suministrado como se muestra en la figura 12. El hielo fluido resultante es regresado nuevamente hacia los tanques de almacenamiento para después ser enviado a los generadores de hielo fluido para su recirculación.

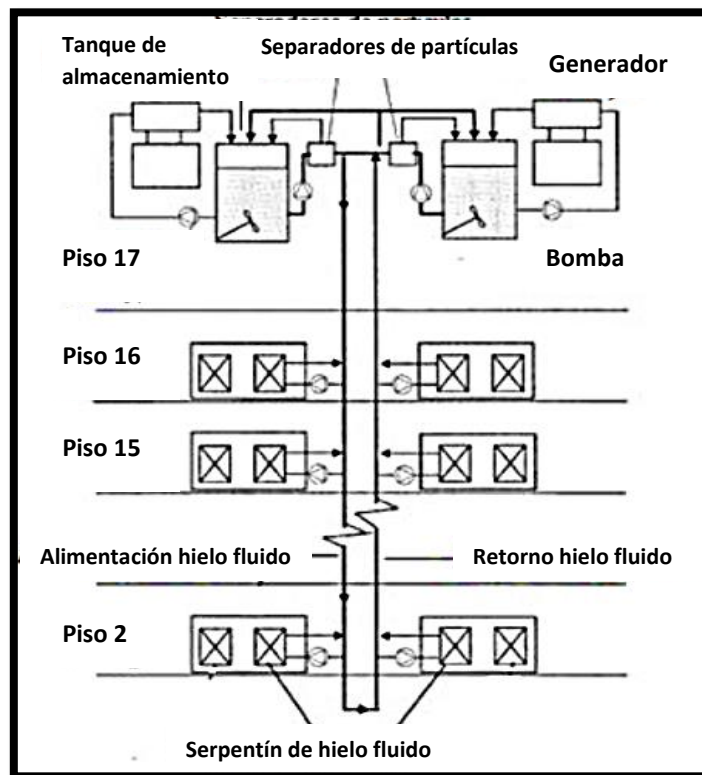


Figura 12. Sistema de aire acondicionado por hielo fluido (Bellas y Tassou., 2005).



---

---

## b) Enfriamiento de minas

Fue la primera aplicación industrial de hielo fluido como medio refrigerante en el enfriamiento de aire, debido a las altas temperaturas alcanzadas en la profundidad de los túneles que exceden los  $50^{\circ}\text{C}$  y el gran tamaño de maquinaria utilizada, resulta en altos costos de bombeo de agua helada para el enfriamiento del aire. Para solucionar el problema se propuso el uso de hielo fluido como medio de enfriamiento ya que posee una mayor capacidad energética que la del agua, al utilizar el calor latente de fusión de los cristales de hielo. Con ello retirar la misma cantidad de calor con un volumen menor de refrigerante, obteniendo equipos de almacenamiento y bombeo más pequeños (Bellas y Tassou., 2005).

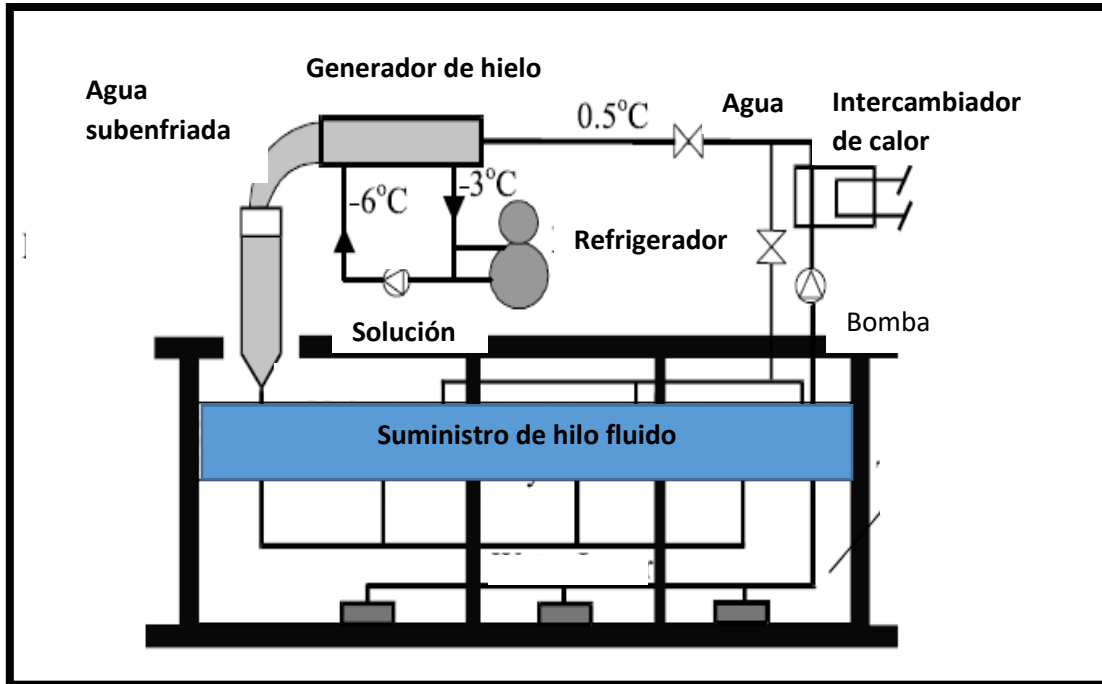


Figura 13. Sistema de aire acondicionado en minas (Bellas y Tassou., 2005).

---

---

### **c) Aplicación de hielo fluido en la industria alimentaria**

El hielo fluido se puede aplicar en el procesamiento de alimentos, para la conservación de productos alimenticios durante transporte y venta al por menor. Estos incluyen el enfriamiento rápido de verduras y pescado a través de la inmersión en hielo fluido o hidrofuidización, el procesamiento de la carne y los productos lácteos, almacenamiento de alimentos, exhibición y distribución (*Bellas y Tassou., 2005*).

### **d) Refrigeración de alimentos**

Los sistemas de refrigeración centralizados tradicionales en grandes tiendas minoristas de alimentos requieren cantidades considerables de refrigerante. Estos sistemas son propensos a fugas debido al gran número de articulaciones y la larga tubería de distribución del trabajo. Los usos de hielo fluido como refrigerante secundario en la refrigeración de alimentos, en tiendas puede reducir considerablemente la carga de refrigerante en el sistema primario sin aumentar significativamente, el consumo de energía general, debido a la cantidad mucho menor de hielo fluido que tiene que ser bombeada en el circuito secundario en comparación con los sistemas secundarios de una sola fase tradicionales (*Bellas y Tassou., 2005*).

### **e) Refrigeración de pescado**

En un sistema de refrigeración de pescado con hielo fluido, el pescado es totalmente cubierto por el hielo fluido, sin dejar bolsas de aire entre el producto y el hielo como

---

---

es el caso de hielo en escamas. Como resultado, el enfriamiento del pescado es más rápido y el crecimiento de bacterias es más lento, lo que resulta en una mayor vida útil del producto.

Aunque la velocidad de enfriamiento es una función de la forma y el tamaño de los peces, así como su conductividad térmica, se ha encontrado que el hielo fluido produce un enfriamiento más rápido (*Bellas y Tassou., 2005*).

#### **f) Enfriamiento de frutas y verduras**

El hielo fluido es un medio efectivo post cosecha para el preenfriamiento de diversos productos, siendo mayormente empleado en hortalizas como coliflor, espárragos, brócoli, hojas verdes y zanahorias. Un pretratamiento con hielo fluido antes del envasado o como medio de almacenamiento previene la marchitez temprana; además de disminuir la degradación enzimática, la actividad respiratoria y con ello reducir la producción de etileno (*Kauffeld et al., 2010*).

### **1.3 Parámetros térmicos en el preenfriamiento de alimentos**

Las propiedades térmicas de alimentos y bebidas se deben de conocer para desarrollar los cálculos de transferencia de calor involucrados en el diseño del almacén y equipos de refrigeración; también son necesarios para estimar procesos de congelación, refrigeración, calentamiento o secado de alimentos y bebidas.

---

---

Las propiedades térmicas de alimentos y bebidas dependen fuertemente de la composición química y la temperatura, las propiedades termo físicas a menudo se requieren para cálculos de transferencia de calor (incluyen densidad, calor específico, entalpía, conductividad térmica y difusividad térmica). Adicionalmente, si el alimento es un organismo vivo como fruta fresca o vegetales (hortalizas), estos generan calor a través de la respiración y pierden humedad por la transpiración. Ambos procesos se deben de incluir en los cálculos de transferencia de calor y se deben usar como referencia tablas de propiedades termo físicas medidas para alimentos (*Umaña, 2010*).

#### **a) Calor**

El calor es una forma de energía, termodinámicamente se define calor como energía en tránsito de un cuerpo a otro como resultado de una diferencia de energía entre dos cuerpos (*Dossat, 1980*)

#### **b) Transferencia térmica**

La transferencia térmica es el intercambio de energía de un cuerpo a otro debido a la diferencia de temperaturas; pasando de un cuerpo con mayor temperatura a otro con menor temperatura hasta alcanzar un equilibrio termodinámico. Cuando un cuerpo está en equilibrio térmico (es decir con la misma temperatura) no habrá transferencia de calor entre el cuerpo y sus alrededores. La transferencia de calor siempre ocurre de una región de temperatura alta a una región de temperatura baja y nunca en dirección opuesta (*Incropera, 1999*).

---

---

### **c) Conducción**

La transferencia de calor por conducción, ocurre cuando la energía es transmitida por contacto directo entre las moléculas de un cuerpo simple o entre las moléculas de dos o más cuerpos con buen contacto térmico entre ambos. Para cualquiera de ambos casos, las moléculas comunican su energía a las moléculas inmediatas adyacentes (*Dossat, 1980*).

La relación básica de flujo de calor por conducción es la proporcionalidad existente entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura, esto se conoce como la ley de Fourier.

### **d) Convección**

La transferencia de calor por convección ocurre cuando el calor se desplaza de un lugar a otro por medio de corrientes establecidas mediante un medio que fluye. (*Dossat, 1980*).

### **e) Calor específico**

El calor específico de cualquier sustancia es la cantidad de calor necesaria para producir un cambio de temperatura de 1 °C o 1 °K a una determinada masa expresada en J(Kg°C), (*Sánchez et al., 2002*). Por lo tanto, el calor específico de alimentos o de bebidas se puede utilizar para calcular la carga de calor impuesta ante el equipo de refrigeración, al refrigerar o congelar alimentos y bebidas.

---

---

**f) Factor de retardo**

El factor de retardo (factor Lag) es un número adimensional el cual representa la magnitud de la resistencia interna de un producto a la transferencia de calor (Dincer., 2000).

**g) Coeficiente de enfriamiento**

El coeficiente de enfriamiento denota el cambio en la temperatura del producto por unidad de tiempo de enfriamiento, para cada grado de diferencia de temperatura entre el producto y su entorno (Dincer., 1995).

Estos parámetros son fundamentales en los procesos de enfriamiento de alimentos, el factor Lag o de retardo, representa la resistencia del alimento a la transferencia de calor y el coeficiente de enfriamiento muestra la variación de la temperatura con respecto al tiempo por lo cual determinarlos es muy importante. Estos parámetros se pueden determinar, por medio de la metodología propuesta por Dincer en 1996, para geometrías cilíndricas sólidas infinitas, a través de datos de temperatura-tiempo que se miden durante el proceso de enfriamiento de alimentos, los datos temperatura-tiempo se linealizan por medio de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{LogY = \frac{T-T_m}{T_0-T_m} \quad (1)}$$

Dónde: T= temperatura del producto, T<sub>m</sub>=temperatura del medio de enfriamiento y t<sub>0</sub>= temperatura inicial del producto, LogY=Correlación de las temperaturas.

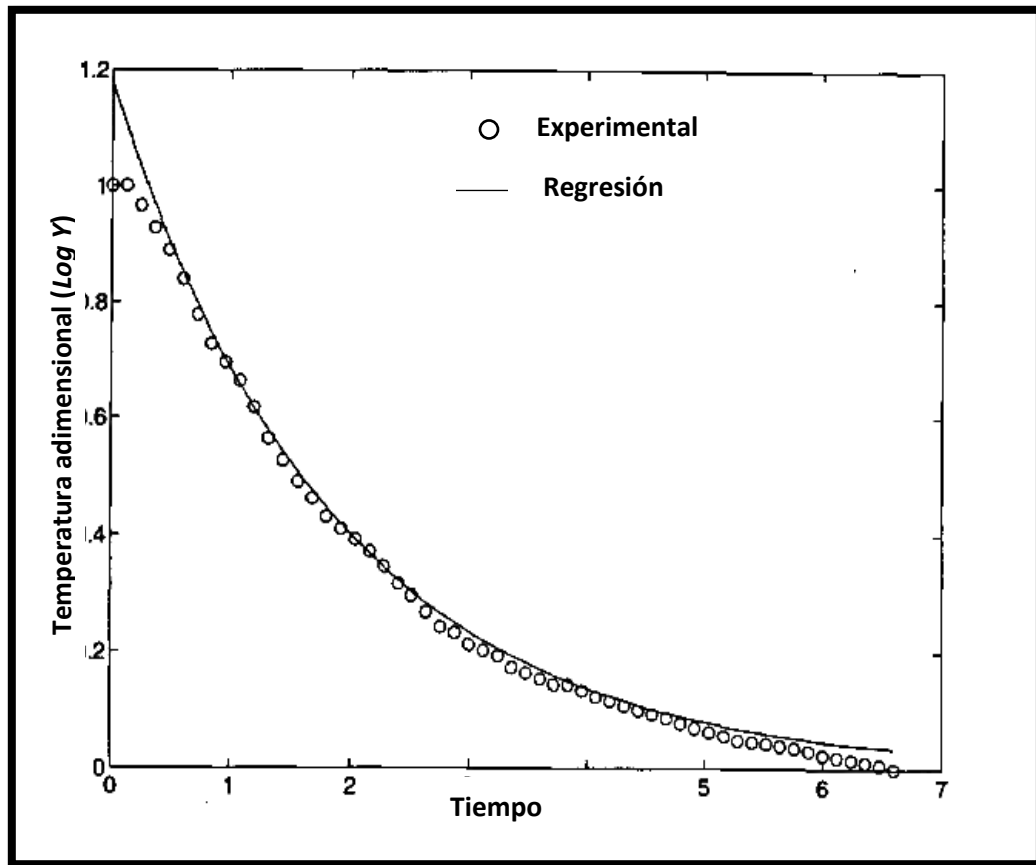


Figura 14. Factor de retardo y coeficiente de enfriamiento (*Dincer., 2000*).

Se aplica una regresión exponencial para obtener la ecuación de la función y obtener la siguiente expresión que representa el factor de retardo y coeficiente de enfriamiento:

$$\mathbf{LogY = Jexp(-Ct)} \quad \mathbf{(2)}$$

Dónde: J= factor de retardo, Ct= coeficiente de enfriamiento.

---

---

## h) Coeficiente convectivo

El coeficiente convectivo no es una propiedad termodinámica. Es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo, por lo cual generalmente se la conoce como una propiedad de flujo, tiene las unidades de  $W/m^2$ .

El mecanismo de transferencia de calor por convección surge por el movimiento de un fluido sobre una superficie, ambos a una temperatura diferente. Contrario a los mecanismos de conducción y radiación, no solo debe existir un gradiente de temperatura sino el movimiento de un fluido, ya sea por convección natural o por convección forzada. El mecanismo de la convección de calor fue originalmente estudiado por el físico y matemático inglés Isaac Newton y representado matemáticamente mediante la ley de enfriamiento de Newton, la cual relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura entre la superficie y el fluido mediante el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente pelicular (Vasco, 2015).

El coeficiente convectivo se puede obtener en función de datos de factor de retardo o factor lag calculado a partir de datos de temperatura-tiempo, obtenidos durante el enfriamiento de alimentos mediante la siguiente ecuación propuesta por Dincer en el año 2000 considerando una geometría sólida cilíndrica infinita.

$$h = \frac{(k/R)(1.7 \ln J)}{(0.5066 - \ln J)} \quad (3)$$

Dónde:  $k$ = conductividad térmica,  $R$ = radio del producto,  $J$ = Factor de retardo.



---

---

## i) Número de Biot

El número o módulo de Biot (NBi) es un grupo adimensional que se obtiene del cociente entre la resistencia al flujo interno de calor por conducción dentro de un cuerpo y la resistencia al flujo externo de calor por convección superficial (Rojas, 2009).

El número Biot en el enfriamiento convectivo de alimentos y bebidas está influenciado por el cociente de la resistencia externa al intercambio térmico y a la resistencia interna al intercambio térmico.

En cálculos del tiempo de enfriamiento, la dimensión característica L se toma como la distancia más corta del centro térmico del alimento a su superficie. Así, en cálculos del tiempo de enfriamiento, L es mitad del grueso de la capa o coraza externa o el radio de un cilindro o de una esfera. Cuando el número Biot se aproxima a cero ( $Bi < 0.1$ ), la resistencia interna al intercambio térmico es mucho menor que la resistencia externa y se puede utilizar un parámetro de aproximación para determinar el tiempo de refrigeración de un alimento. Cuando el número de Biot es muy grande ( $Bi > 40$ ), la resistencia interna al intercambio térmico es mucho mayor que la resistencia externa y la temperatura superficial del alimento se puede asumir igual a la temperatura del medio de refrigeración. Para esta situación, las soluciones de la serie de la ecuación de la conducción del calor de Fourier están disponibles para las formas geométricas simples (Umaña, 2010).

Cuando el número Biot está entre  $0.1 < Bi < 40$ , la resistencia interna al intercambio térmico y el coeficiente de la transferencia del calor de convección deben ser considerados. En este caso, las soluciones de la serie, que incorporan funciones

---

---

transcendentales para explicar la influencia del número de Biot, se pueden encontrar disponibles para formas geométricas simples (Umaña, 2010).

El número de Biot se puede determinar, con la siguiente expresión propuesta por Dincer en 1996 para geometrías cilíndricas infinitas.

$$NBi = \frac{hR}{k} \quad (4)$$

Dónde:  $h$ =Coeficiente convectivo,  $R$ = Radio del producto,  $K$ = Conductividad térmica del producto.

#### **j) Difusividad térmica**

La difusividad térmica de un material es la capacidad de transferir energía térmica en relación con su capacidad de almacenar energía térmica, se mide en  $m^2/s$  (Incropera, 1999). Un valor alto de difusividad térmica significará una mayor facilidad por parte de un material o sistema para llevar a cabo un intercambio térmico. La difusividad térmica en el presente trabajo, durante el enfriamiento por inmersión en hielo fluido se obtuvo con la siguiente ecuación propuesta por Dincer en 1996 para geometrías cilíndricas infinitas.

$$a = CtR^2/M_1 \quad (5)$$

Dónde:  $Ct$ = Coeficiente de enfriamiento,  $R$ = Radio del producto

Nota:  $M_1$  es un número adimensional, en función del número de Biot, con el cual se puede determinar la difusividad térmica de cuerpos con geometría cilíndrica infinita propuesto por Dincer en 1996.

$$M_1 = (6NBi)(2.85 + NBi) \quad (6)$$

---

---

### **k) Calor sensible y calor latente**

La energía térmica transferida o proveniente de una sustancia puede provocar un cambio en la fase de la sustancia, así como también un cambio en su temperatura. Por lo cual la energía térmica se divide en dos tipos o categorías, dependiendo de si la sustancia absorbe o cede energía térmica. A la energía térmica que cause o produzca un cambio en la temperatura de la sustancia se le llama calor sensible, mientras que a la energía, térmica que cause o produzca un cambio en la fase de la sustancia se le llama calor latente.

Al producirse un aumento en la temperatura casi todos los materiales experimentan dos cambios en su estado de agregación. Primero estos pasan de la fase sólida a la líquida y después al seguir aumentando la temperatura al líquido, el líquido pasa a ser vapor (*Dossat, 1980*). El calor sensible se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = mC_p\Delta T \quad (7)$$

Dónde:  $m$ = masa de la solución,  $C_p$ = calor específico de la solución,  $\Delta T$ = Diferencial de temperatura del medio de enfriamiento.

### **l) Calor latente de fusión**

Cuando ocurre un cambio entre las fases sólida y líquida en cualquier dirección, el calor involucrado se le conoce como calor latente de fusión. Después de llegar a la temperatura de fusión las moléculas del sólido tienen su movimiento máximo posible

---

---

dentro de los límites de la estructura molecular rígida de la fase sólida. En este punto cualquier suministro extra de energía al sólido causará que alguna parte del sólido empiece a fundirse para pasar de a la fase líquida. Es importante enfatizar que el cambio de fase ocurre en cualquier dirección a la temperatura de fusión; que es la temperatura a la cual el sólido pasa a líquido y que es la misma a la cual el líquido estando congelado pasa a ser sólido.

El calor latente de fusión se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{latente\ de\ fusion} = M\lambda_f \quad (8)$$

Dónde:  $M$ = Masa de hielo en el medio de enfriamiento,  $\lambda_f$ = Calor latente de fusión del hielo.

## 1.4 Características de la zanahoria

La zanahoria (*Daucus carota L.*) es una de las hortalizas de mayor importancia y difusión en el mundo. Los consumidores la valorizan nutricionalmente por ser una excelente fuente de vitaminas y minerales, poseer grandes cantidades de hidratos de carbono y beta-caroteno o pro-vitamina A, también vitaminas del grupo B (B3), fosfatos y vitamina E. Puede ser consumida cruda (tanto rallada, como en trozos), exprimida para jugo o cocinada entera o en trozos, acompañando a cualquier otro vegetal también suele utilizarse en sopas, guisados, ensaladas incrementando el valor nutritivo. En el presente trabajo se seleccionó la zanahoria como un producto para modelar el enfriamiento y conocer la capacidad de enfriamiento de cada una de las formulaciones de hielo fluido, ya que es un producto ideal para enfriar por medio de una inmersión en contacto directo y no es necesario aplicar ningún tratamiento previo al preenfriamiento.

---

---

- **Enfriamiento de zanahorias**

El preenfriamiento rápido después de la cosecha, antes o después de procesar, almacenar o transportar, reduce significativamente el deterioro de los vegetales más perecederos. Si el calor de campo se remueve rápidamente, el producto se puede mantener en buenas condiciones comerciales por mucho más tiempo. El enfriamiento retarda el deterioro natural, incluyendo el envejecimiento y la maduración; retarda el crecimiento de organismos, reduce la marchites, porque las pérdidas de agua ocurren mucho más lentamente en bajas temperaturas que en altas temperaturas. Después de enfriarse, el producto se debe refrigerar a temperaturas recomendadas. Si se permite el calentamiento del producto, muchas de las ventajas del preenfriamiento se pueden perder. La opción de la selección del método de enfriamiento depende de factores tales como fuentes y de los costes del proceso de refrigeración, volumen del producto enviado y compatibilidad con el producto (*Umaña, 2010*).

El preenfriamiento requiere mayor capacidad de potencia frigorífica y medios de movimiento del aire de enfriamiento en cuartos de almacenaje, ya que mantienen productos a una temperatura constante. Así, el preenfriamiento es típicamente una operación separada del almacenaje refrigerado y requiere el equipo especialmente diseñado (*Umaña, 2010*).

Durante manejo y el almacenaje pos cosecha, las frutas y vegetales frescos pierden la humedad a través de su cáscara mediante la transpiración. El deterioro de la materia, puede darse si la pérdida de humedad es muy alta. Para reducir al mínimo pérdidas a través de la transpiración y para aumentar calidad en el mercado y la vida útil, las materias se deben almacenar en un ambiente de baja temperatura y de alta humedad. Las varias capas de la piel y las películas a prueba de humedad se

---

---

pueden también utilizar durante el envasado para reducir perceptiblemente la transpiración y para ampliar vida de almacenaje. La actividad metabólica en frutas y vegetales frescos continúa por un período corto después de la cosecha. La energía requerida para sostener esta actividad viene de la respiración, que implica la oxidación de azúcares para producir bióxido de carbono, agua y calor. La vida de almacenaje es influenciada por su actividad respiratoria (*Umaña, 2010*).

Almacenando a baja temperatura, la respiración disminuye y se retrasa la madurez, y el tiempo de vida útil se extiende. El control apropiado de las concentraciones del bióxido de carbono y de oxígeno en una cámara es también eficaz en la reducción de la tasa de respiración. La fisiología del producto, referente a madurez de cosecha y a temperatura de cosecha, determina en gran parte los requisitos y métodos del preenfriamiento. Algunos productos son altamente perecederos y deben comenzar a enfriarse cuanto antes posible después de la cosecha; como ejemplos se incluyen: espárrago, habas, el brócoli, la coliflor, el maíz dulce o elotes, melones, calabaza o ayote, tomates madurados, los vegetales frondosos, alcachofas, coles de Bruselas, col, apio, zanahorias y rábanos (*Umaña, 2010*).

#### **1.4.1 Técnicas de preenfriamiento**

El preenfriamiento es el retiro rápido del calor de campo de frutas y vegetales recientemente cosechados antes de enviar al envasado o a procesar. El pronto preenfriamiento, inhibe o retarda el crecimiento de los microorganismos que causan deterioro, reduce actividad enzimática y respiratoria y reduce la pérdida de humedad. Así, el preenfriamiento apropiado reduce desperdicios, retarda pérdida de frescura y de calidad pre cosecha. El preenfriamiento se puede hacer por varios métodos, incluyendo enfriamiento húmedo (aspersión o inmersión), enfriamiento al vacío, enfriamiento por aire y por contacto con hielo. Estos métodos transfieren

---

---

rápidamente el calor del producto a un medio que lo enfría como agua, aire o hielo. Los tiempos de enfriamiento pueden variar de varios minutos a 24 horas (*Umaña, 2010*).

**a) Preenfriamiento por aspersión o inmersión**

En este método de preenfriamiento los productos se rocían o se sumergen en un baño agitado con agua enfriada o algún líquido refrigerante. Es un método eficaz y económico. El proceso de preenfriamiento por inmersión o aspersión es rápido porque el líquido refrigerante fluye alrededor de los productos bajando rápidamente la temperatura de la superficie. Así, la resistencia al intercambio térmico en la superficie del producto es insignificante (*Umaña, 2010*).



Figura 15. Preenfriamiento por inmersión (*Stepac, 2012*).

---

---

## b) Preenfriamiento por aire forzado

Teóricamente, las tasas de enfriamiento por aire pueden ser comparables a las del enfriamiento húmedo bajo ciertas condiciones de exposición del producto y temperatura del aire. En el enfriamiento por aire, el valor óptimo del coeficiente superficial de transferencia térmica es considerablemente más pequeño que en enfriamiento húmedo.

El producto puede ser satisfactoriamente enfriado por los siguientes métodos: aire circulado en los cuartos refrigerados adaptados para ese propósito, en coches del carril usando el equipo de enfriamiento especial portátil que enfría la carga antes de que se transporte, con aire frío forzado los productos a granel se pasan en bandas continuas a través de un túnel , en transportadores continuos en túneles de viento, por el método de pasar aire forzado a través de los envases o contenedores por diferencial de presión. Cada uno de estos métodos se utiliza comercialmente y cada uno es conveniente para ciertas materias cuando está aplicado correctamente (Umaña, 2010).

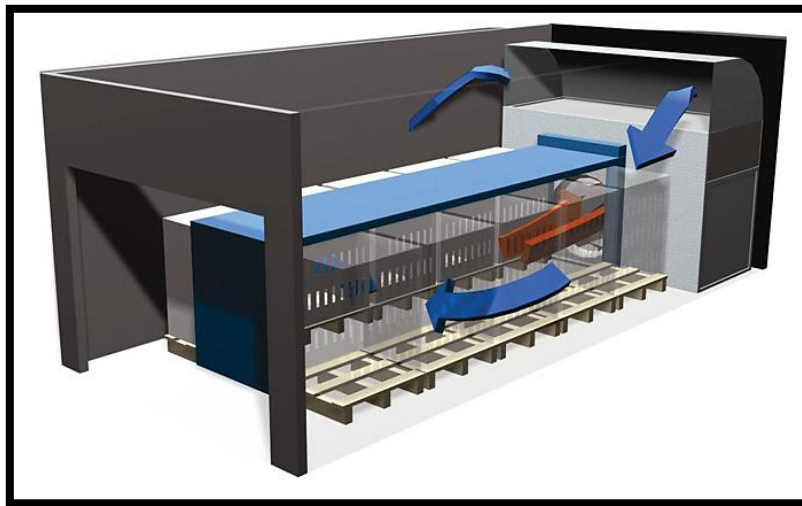


Figura 16. Preenfriamiento por aire forzado (Ballesteros, 2013).



---

---

### c) Preenfriamiento por paquetes de hielo

El hielo colocado en envases puede enfriar con eficacia productos que no son dañados por el contacto con hielo. La espinaca, col rizada, coles de Bruselas, brócoli, los rábanos, las zanahorias y las cebollas verdes se empaquetan comúnmente con hielo. Enfriar un producto a partir de 35 °C a 1 o 2 °C requiere hielo que se derrite hasta un 38% de la masa del producto. Hielo adicional debe derretirse para eliminar el calor que liberan los paquetes y quitar el calor del contenedor. Además para remover el calor de campo, el hielo debe de mantener el producto fresco durante transporte. Productos sobre hielo o hielo sobre productos, es utilizado suplementariamente al proceso de enfriamiento o refrigeración. El uso de cajas con cartón acanalado facilita el proceso de enfriamiento y conservación. Este tipo de envases de cartón encerado acanalado permite en cierta medida el enfriamiento de productos después de empacarlos. El hielo en escamas o picado puede ser manufacturado en el sitio y almacenarlo para luego usarlo; para cuando se necesita enfriamiento a base de hielo por estación corta no en grandes volúmenes, se puede comprar (algunas toneladas al día), puede ser más económico comprar hielo de bloque y trocearlo en el sitio. Otra opción es alquilar el equipo para la producción de hielo en el sitio empleado (*Umaña, 2010*).

---

---

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

### **2.1 Problema y justificación**

Los cambios en el tamaño de partícula y características funcionales del hielo fluido dependen de la adición de diversos aditivos, los cuales permiten aumentar los núcleos formadores de cristales dependiendo la concentración del mismo; el hielo fluido se considera un sistema binario, la formación de hielo estará directamente relacionada con la concentración del aditivo que permite disminuir el punto inicial de congelación de la solución, logrando que se formen de manera exponencial los cristales de hielo, hasta alcanzar un equilibrio termodinámico.

Con la adición de un polialcohol se logra abatir el punto inicial de congelación generando dos fases una líquida y otra sólida, razón que es de vital importancia para el aprovechamiento térmico, generándose un intercambio de calor alto, aprovechando el calor latente de fusión de los cristales de hielo y su calor sensible de la fase líquida con lo que se mejoran sus propiedades de transferencia de calor en el proceso de preenfriamiento de alimentos.

---

---

## 2.2 Objetivos

**Objetivo general:** Evaluar la capacidad de aprovechamiento térmico del hielo fluido determinando los parámetros de transferencia de calor inherentes en el preenfriamiento de zanahorias.

**Objetivo particular 1:** Comparar las propiedades físicas del hielo fluido por efecto de la adición de aditivos en el punto inicial de congelación.

**Objetivo particular 2:** Determinar parámetros de transferencia de calor inherentes al proceso de enfriamiento de zanahorias con hielo fluido.

**Objetivo particular 3:** Analizar la capacidad de aprovechamiento térmico en relación con los parámetros térmicos y propiedades físicas del hielo fluido aplicado en el preenfriamiento de zanahorias.

## 2.3 Desarrollo experimental

En la tabla 1 se presentan los factores y niveles de variación empleados para determinar el efecto en las propiedades físicas y térmicas del hielo fluido, así como, los métodos e instrumentos de medición durante la caracterización y determinación de propiedades térmicas del hielo fluido.

Tabla 1. Variables de trabajo.

Tabla de variables					
Factor de variación	Nivel de variación	Repeticiones	Variable Dependiente	Variable de Respuesta	Instrumento de medición.
<b>Propilenglicol</b>	6% 15% 20%	2	Punto inicial de congelación	Conductividad térmica	Termopares tipo J y K Data Logger Lasar EL-USB-TC
			Tiempo de proceso de formación de hielo fluido	Difusividad térmica	
			Tiempo de proceso de enfriamiento	Factor de retardo	
				Coefficiente de enfriamiento	
<b>Etilenglicol</b>	6% 15% 20%	2		Coefficiente convectivo	Microscopia
			Fración masa de hielo	Tiempo de proceso de enfriamiento	
			Tamaño y geometría del cristal	Calor latente de fusión del hielo fluido	
				Relación Masa drenada – Tiempo	

Los aditivos depresores del punto inicial de congelación, seleccionados fueron propilenglicol y etilenglicol, aditivos que de acuerdo con la FDA (Food and Drug Administración) son considerados como seguros, GRAS por sus siglas en inglés (Generally Reconoced As Safe) a las concentraciones empleadas.

---

---

Lo cual significa que estos aditivos, son aptos para su aplicación en contacto directo con alimentos, sin causar daños o riesgos para el consumidor, ni afectar las propiedades o calidad del producto. Por lo que ambos representan dos componentes que dadas sus propiedades pueden influir de manera positiva en la formación de hielo fluido. Las concentraciones de aditivos utilizadas se encuentran en el rango establecido en la bibliografía, que va de 5% a 35%, se trabajó con tres distintas concentraciones (6, 15 y 20%), para determinar la variación en las propiedades físicas y térmicas del hielo fluido (*Mellinder et al., 2005*).

## **2.4 Generación de hielo fluido**

La generación de hielo fluido se realizó por subenfriamiento de las soluciones propilenglicol-agua y etilenglicol-agua basado en el método propuesto por *Okada et al., 2002*. Durante el proceso de formación se tuvo un agitación constante, empleando un agitador RZR-1, en un recipiente térmicamente aislado como se muestra en las figuras 17 y 18.

El medio de enfriamiento estuvo compuesto de 65.8% de hielo triturado, 21% de vinagre, 13.2% de sal de grano, retomando el estudio realizado por Ojeda en 2014, la temperatura del medio de enfriamiento se mantuvo constante en un intervalo de -9 °C a -11 °C. Cada tratamiento inicio cuando la temperatura del medio de enfriamiento llegó a -9 °C y termino 5 minutos después de que la solución alcanzara su punto inicial de congelación, se obtuvo una historia térmica para cada tratamiento con ayuda de un termopar tipo “J” Data Logger Lasar EL-USB-TC.

Para la caracterización de los sistemas de hielo fluido se realizaron 5 repeticiones, con cada aditivo seleccionado, (propilenglicol y etilenglicol) y a cada concentración propuesta (6, 15 y 20%), midiendo y comparando, las propiedades físicas de los sistemas de hielo fluido generados.



Figura 17. Generación de hielo fluido.

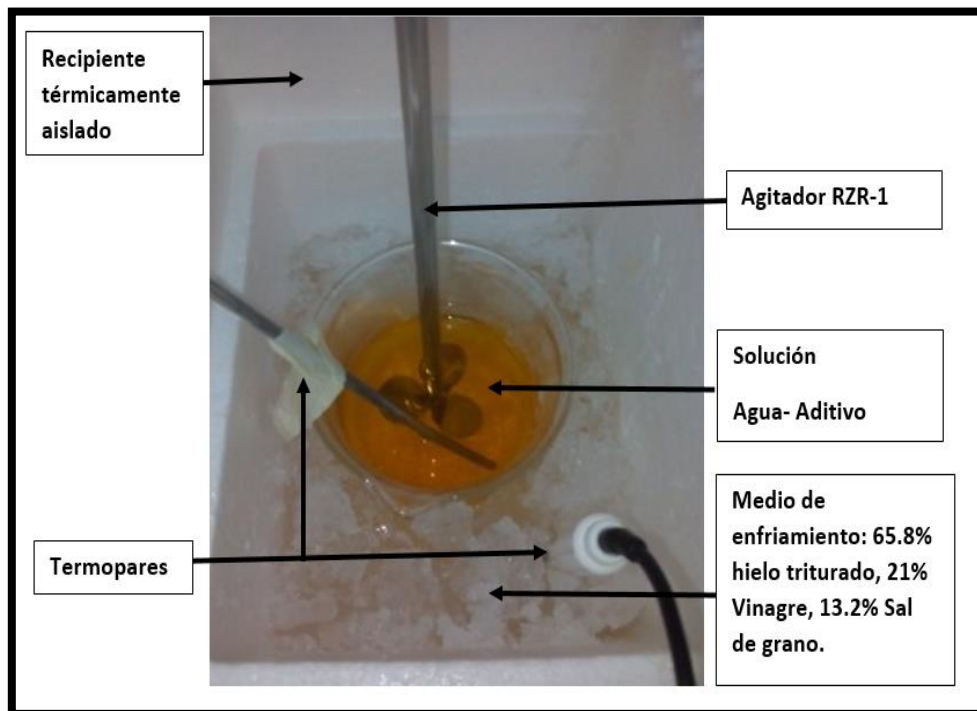


Figura 18. Diagrama de generación de hielo fluido.

---

---

### ❖ **Porcentaje de hielo formado**

El porcentaje de hielo formado se midió al finalizar la generación de hielo fluido por medio de la separación de fases (cristales de hielo y solución acuosa) a una temperatura ambiente de 25 °C, mediante una filtración con un tamaño de malla aproximado de 2-3 μm, registrándose el peso de cada fase, y obteniendo la relación masa-masa, calculando el porcentaje de hielo formado (*Sánchez et al., 2002.*).

$$\% \text{ Hielo Formado} = \frac{\text{masa de hielo} \times 100}{\text{masa total solución}} \quad (9)$$

### ❖ **Tamaño y geometría de cristal**

El tamaño y la geometría de los cristales de hielo pueden variar en función del aditivo y de su concentración. Para llevar a cabo la caracterización de los cristales de hielo formado se empleó un microscopio digital, analizándose de acuerdo con la metodología propuesta por *Kumano et al., 2014*. La microscopía consintió en tomar fotos de los cristales de hielo como se muestra en la figura 19, las cuales se editaron a escala de grises lo que permite observar la cantidad de cristales formados y la geometría de los mismos, los cristales de hielo se definen como las partículas luminosas en la fotografía, mientras que la fase oscura representa la fase líquida presente en la solución.



Figura 19. Microscopio digital.

#### ❖ Proceso de formación de hielo fluido

La velocidad de formación se determinó registrando el tiempo en el que la generación de hielo fluido se llevó a cabo, considerando desde el contacto de la dispersión de agua-polialcohol con el medio de enfriamiento y finalizando cinco minutos después de llegar al punto inicial de congelación.

#### ❖ Tiempo de enfriamiento

El tiempo de enfriamiento se registró al inicio de la inmersión de la zanahoria en el hielo fluido. La zanahoria tiene una geometría cilíndrica misma que se estandarizó



---

---

para presentar dimensiones promedio (+/- 2 mm) de 2 cm de diámetro, 4 cm de altura y una temperatura ambiente promedio de 23 °C, el proceso de enfriamiento finalizó cuando la zanahoria llegó a una temperatura en el centro termino de 4 °C, esta temperatura se registró por medio de termopares tipo “K” Data Logger Lasar EL-USB-TC, el proceso de enfriamiento se efectuó por duplicado realizando dos repeticiones por cada tratamiento propuesto.

#### ❖ **Factor de retardo y coeficiente de enfriamiento**

El factor de retardo y coeficiente de enfriamiento se obtuvo por medio de una historia térmica para medir los cambios de temperatura en función al tiempo, se emplearon termopares tipo “K” Data Logger Lasar EL-USB-TC que se colocaron en el centro térmico de las zanahorias, registrando el tiempo y la temperatura durante el proceso de enfriamiento.

Los datos obtenidos fueron tratados de acuerdo con la ecuación (1), mencionada en el capítulo I, para obtener la gráfica del  $\text{Log}Y$  y la temperatura del hielo fluido durante el proceso de enfriamiento, y por medio de una regresión exponencial se obtuvo la ecuación (2), mencionada en el capítulo I, para obtener el factor de retardo y el coeficiente de enfriamiento (*Dincer et al., 1996*).

#### ❖ **Coeficiente convectivo**

El coeficiente convectivo se determinó mediante un modelo de geometría cilíndrica propuesta por Dincer en el 2000, para un número de  $0.1 \leq \text{Biot} \leq 100$  en relación con la conductividad térmica de la zanahoria y el factor de retardo.

---

---

## 2.5 Procedimiento para el cálculo de parámetros térmicos

- 1) Se elaboró un gráfico de la historia térmica (datos temperatura-tiempo) del enfriamiento de la zanahoria para cada tratamiento, la cual se linealiza por medio de la ecuación 1.
- 2) Al gráfico de la historia térmica se le aplica una regresión exponencial para obtener la ecuación de la función de la cual se obtiene el factor de retardo y el coeficiente de enfriamiento como indica la ecuación 2.
- 3) A partir del factor de retardo se obtuvo el coeficiente convectivo aplicando la ecuación 3, donde se sustituye el valor teórico de la conductividad térmica de la zanahoria ( $0.571 \text{ w/m}^\circ\text{K}$ ), el radio de la zanahoria empleada en este trabajo (0.01 m).
- 4) A partir del coeficiente convectivo se calculó el número de Biot, sustituyendo, el coeficiente convectivo, la conductividad térmica y el radio de la zanahoria, en la ecuación 4.
- 5) Al sustituir el número de Biot en la ecuación 6, se obtiene M1, número adimensional descrito en el capítulo I, que permite conocer la difusividad térmica por medio de la ecuación 5, donde se sustituye el valor promedio del coeficiente de enfriamiento, obtenido de la linealización de los datos temperatura-tiempo del proceso de enfriamiento, el radio de la zanahoria y el número adimensional M1.

- 
- 
- 6) El calor sensible se obtuvo por medio de la ecuación 7, donde se sustituye, la masa promedio de la fase líquida del hielo fundido, la capacidad calorífica del solución y el diferencial de temperatura del sistema de hielo fundido.
- 7) Se obtuvo el calor latente de fusión del hielo fundido por medio de la ecuación 8 donde se sustituye la masa promedio de hielo que fundió durante el proceso de preenfriamiento de la zanahoria, y el valor bibliográfico del calor latente de fusión del agua.
- 8) El calor que cede el producto se obtuvo a partir de la siguiente ecuación :

$$q = Q\lambda_f + Q_s \quad (9)$$

Dónde:  $Q\lambda_f$  = calor latente de fusión y  $Q_s$  = *Calor sensible*.

---

---

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Propiedades físicas de hielo fluido

El hielo fluido se puede definir como una mezcla de partículas de hielo y una solución acuosa. Esta solución se compone de agua con uno o más aditivos que provoquen la depresión del punto inicial de congelación, para permitir el descenso de temperatura a rangos negativos y por consiguiente la coexistencia de una fase sólida y otra líquida. Debido a estas características, el fluido se puede transportar por una tubería, bombear, y almacenar en tanques (*Sánchez et al., 2002*). Siendo estas características las principales ventajas del hielo fluido, comparado con el almacenamiento y el uso del hielo común. Cuanto más pequeñas sean las partículas de hielo suspendidas en la solución mejores son sus propiedades de transporte (*Egolf y Kauffeld, 2005*).

Pero sin duda la gran ventaja que ofrece, es su empleo como refrigerante, debido a su alta capacidad de almacenamiento térmico y una temperatura de enfriamiento constante (*Martínez et al., 2013*). Durante el enfriamiento, las partículas de hielo se funden generando una alta capacidad de enfriamiento debido calor latente de fusión, lo que es una ventaja sobre un fluido monofásico convencional (*Kauffeld et al., 2010*).

Durante la experimentación se realizó la caracterización de hielo fluido donde se evaluaron propiedades físicas después de su generación como lo son el porcentaje de hielo formado, tamaño y geometría de los cristales de hielo y la velocidad de

---

---

formación, para comparar dichas propiedades al abatir su punto inicial de congelación con la adición de aditivos y su efecto al aplicarlo en el preenfriamiento de zanahorias.

### 3.2 Porcentaje de hielo formado

En la tabla 2 se muestran los porcentajes de hielo fluido obtenido en cada uno de los tratamientos propuestos, encontrándose que los porcentajes caen en el rango citado por diversos autores que reportan valores de 5% a 40% o hasta 75% en relación con el peso de la fase líquida (*Piñeiro et al., 2004*).

Sin embargo, es importante resaltar que el mayor porcentaje de hielo formado se obtuvo con concentraciones de 6% de propilenglicol y etilenglicol, siendo mayor la formación de hielo en las muestras con 6% de propilenglicol, resaltándose además, que el incremento de concentración de aditivo depresor, disminuye el punto inicial de congelación del sistema, reduciendo considerablemente el porcentaje de hielo formado.

Tabla 2. Porcentaje de hielo formado.

Propilenglicol	Porcentaje de hielo	Desviación estándar (+-)	Coficiente de variación
Hielo fluido 6%	55.11%	1.01	1.76
Hielo fluido 15%	38.24%	2.95	7.5
Hielo fluido 20%	27.11%	1.87	6.9
Etilenglicol			
Hielo fluido 6%	48.7%	1.83	3.76
Hielo fluido 15%	28.38%	2.4	7.6
Hielo fluido 20%	No determinado	No determinado	No determinado

---

---

El porcentaje de hielo formado para el hielo fluido generado a partir de la solución de etilenglicol al 20% no se midió porque no se logró determinar el punto inicial de congelación, ya que se llegó a un equilibrio de temperatura entre el medio de enfriamiento y la solución del hielo fluido. Sin embargo se asume que se formó al menos 5% de hielo, pero no fue posible comprobar la presencia de cristales de hielo por la precisión de los equipos utilizados.

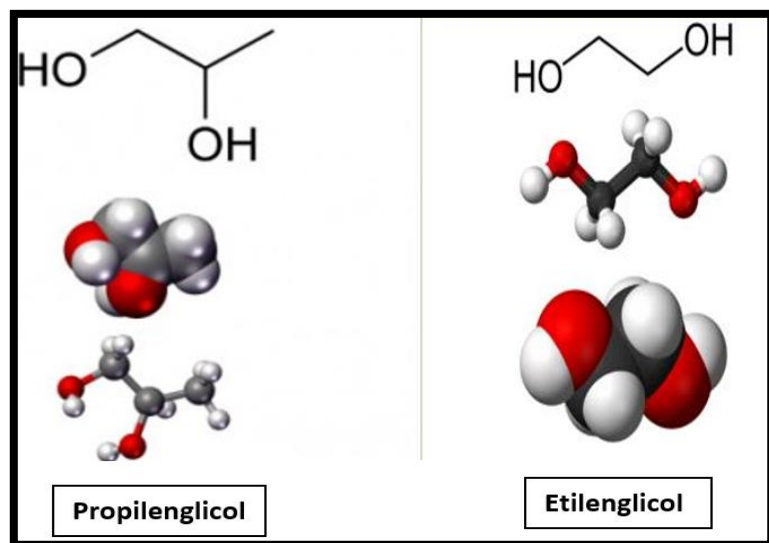


Figura 20. Estructura química de los polialcoholes empleados (Atkins, 2003).

En la figura 20 se muestra la estructura del propilenglicol y el etilenglicol, estos cuentan con dos grupos OH con posibilidad de formar interacciones formando puentes de hidrógeno con el agua, pero el etilenglicol posee ángulos en sus moléculas -OH con mejores características para la formación de puentes de hidrógeno lo que compromete el agua presente en la solución, generando menores porcentajes de hielo formando en los tratamientos con etilenglicol (Aldabe, 1999).

---

---

El hielo fluido generado con mayor proporción de aditivo depresor del punto inicial de congelación posee una viscosidad más baja, al generar una menor cantidad de hielo, teniendo una mayor capacidad de fluidez, por lo cual tiene menores pérdidas de energía durante su transporte, reduciéndose las pérdidas en la capacidad para disminuir la temperatura de un producto, ya que no existe un incremento en la temperatura del sistema (Egolf y Kauffeld, 2005).

La figura 21 muestra el porcentaje de hielo formado para cada aditivo, propilenglicol y etilenglicol, en el cual se puede ver que el propilenglicol genera mayores porcentajes de hielo durante la generación de hielo fluido a las mismas concentraciones. Al igual que se puede observar que el porcentaje de hielo formado tiene una relación inversamente proporcional ya que al aumentar la concentración del polialcohol depresor la cantidad de hielo formado será menor, lográndose una mayor cantidad de hielo formado en los sistemas generados a partir de concentraciones bajas.

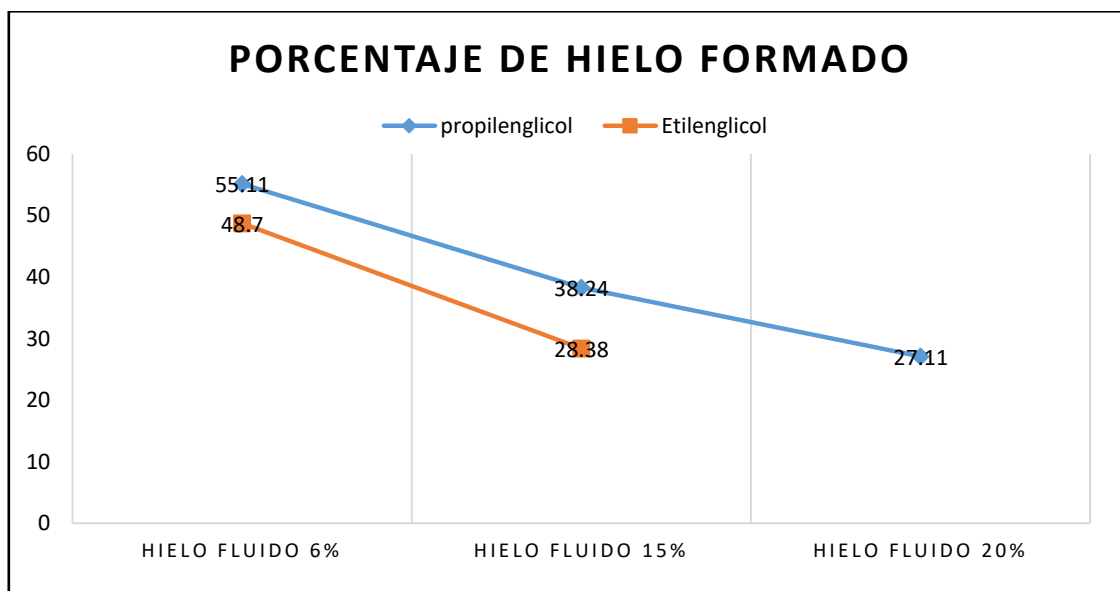


Figura 21. Porcentaje de hielo formado.

---

---

Los resultados obtenidos muestran en la figura 21 que el porcentaje de hielo formado es dependiente del polialcohol, presentando un comportamiento inversamente proporcional a la concentración, de tal forma que a menor concentración de polialcohol, mayor es la cantidad de hielo formado y por ende menor capacidad de fluidez del mismo.

Una concentración de aditivo alta permite abatir el punto inicial de congelación de la solución a una temperatura más baja que genera que la concentración de hielo en la solución sea menor ya que la cantidad de agua disponible para formar hielo será menor, ya que parte del agua disponible se encuentra comprometida formando puentes de hidrógeno con el polialcohol razón por la cual se ve modificado el hielo formado (Melinder et al., 2005).

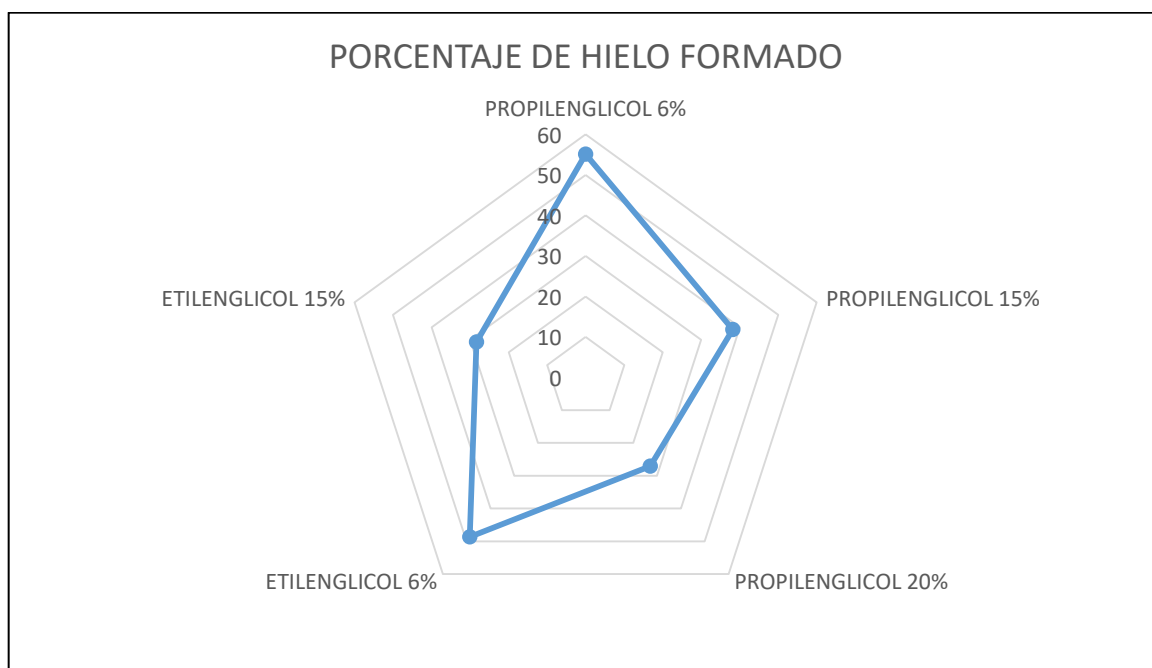


Figura 22. Grafico radial de porcentaje de hielo formado



---

---

En la figura 22, se muestran los porcentajes de hielo formado durante cada tratamiento, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha=0.05$ ) al aumentar la concentración del propilenglicol, y de etilenglicol, encontrándose que con el aumento de la misma, la cantidad de hielo formado es menor. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha=0.05$ ) en la formación de hielo en los tratamientos de propilenglicol y etilenglicol de (6%), ni en las de propilenglicol (20%) y etilenglicol (15%).

### **3.3 Tamaño y geometría de cristal**

Para llevar a cabo una comparación entre el tamaño y la geometría de cristales de hielo generados en cada uno de los sistemas se realizó una microscopia a partir de fotografías obtenidas a las mismas condiciones.

En la figura 23 se muestra la comparación entre las fotografías obtenidas para cada uno de los sistemas generados a partir de propilenglicol donde se observa que respecto a la geometría y el tamaño de los cristales de hielo no existe diferencia. También se observa que para las concentraciones de aditivos bajas la concentración de cristales es mayor ya que se tiene un mayor número de cristales de hielo en relación con las de mayor concentración donde la cantidad de cristales de hielo es menor (*Melinder et al., 2005*).

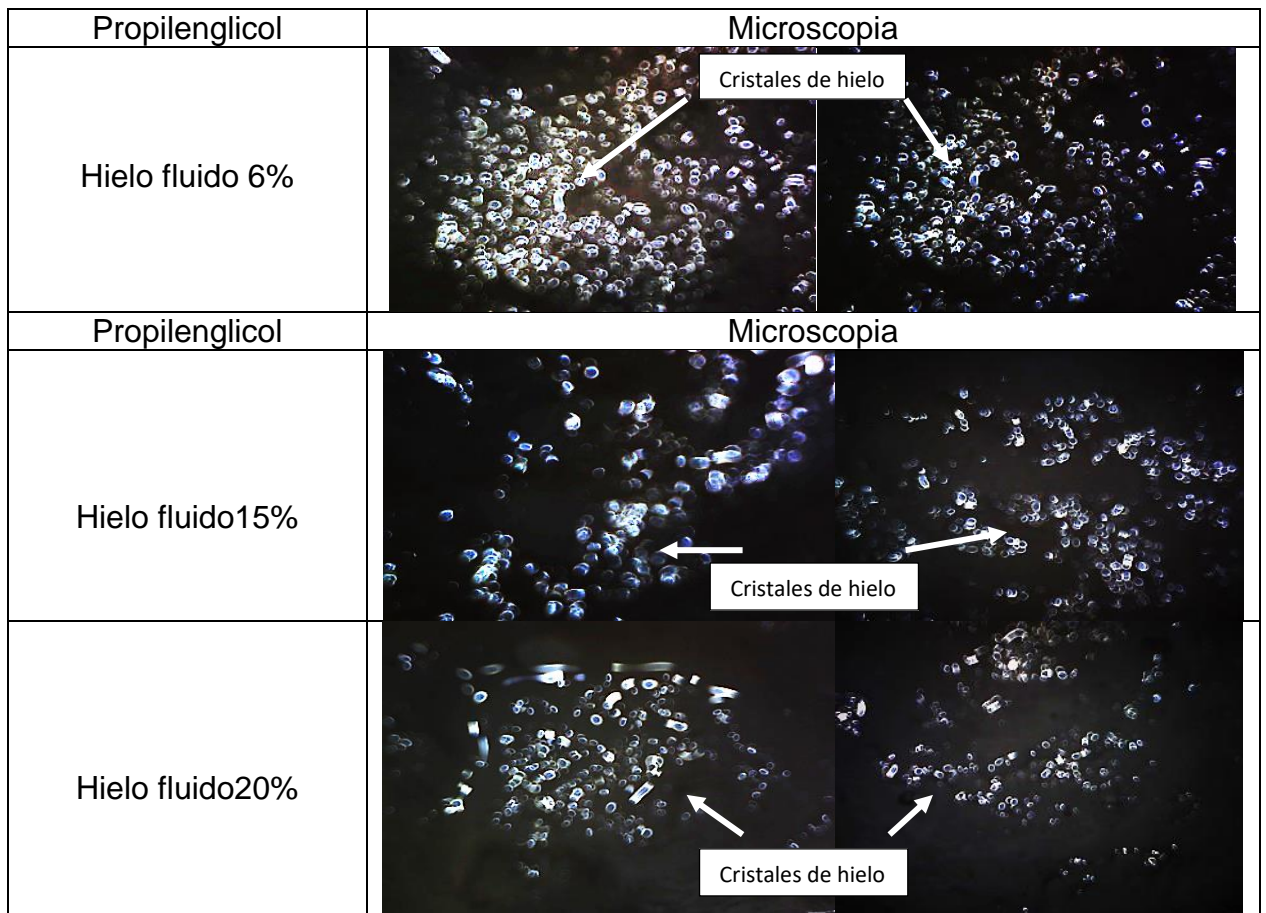


Figura 23. Microscopia hielo fluido formado con propilenglicol

En la figura 24 se muestra la comparación entre las fotografías obtenidas para los sistemas generados con etilenglicol donde, al igual que en los sistemas generados con propilenglicol, no se encuentran diferencias entre el tamaño y la geometría. También existe una relación inversamente proporcional entre la concentración de aditivo y la cantidad de cristales, al aumentar la concentración de aditivo la cantidad de cristales será menor (*Melinder et al., 2005*).

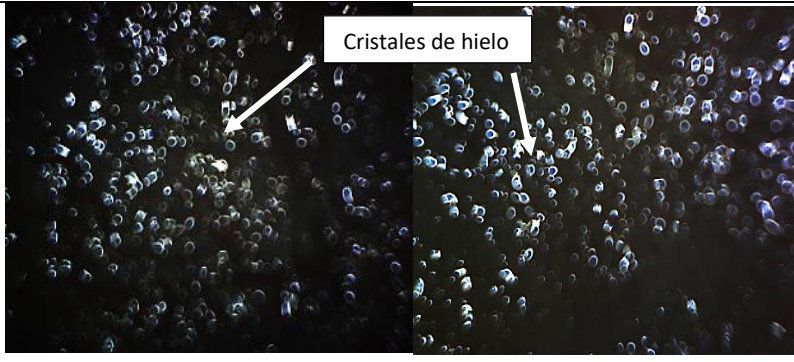
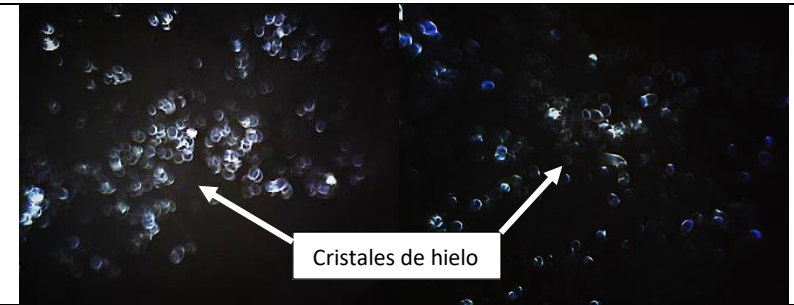
Etilenglicol	Microscopia
Hielo fluido 6%	
Etilenglicol	Microscopia
Hielo fluido 15%	
Hielo fluido 20%	No determinado

Figura 24 .Microscopia hielo fluido formado con etilenglicol.

En la figura 25 se muestra la generación de hielo fluido a las diferentes concentraciones propuestas, generando cristales con una geometría globular la cual permite una mejor capacidad de transporte ya que se disminuyen las aglomeraciones de hielo, y se facilita el intercambio térmico, suavizando y disminuyendo la superficie de la partícula de hielo. Además la geometría globular es la óptima al aplicarse en contacto directo, en el preenfriamiento de alimentos generando un menor daño mecánico en los productos enfriados (Kauffeld et al., 2010).

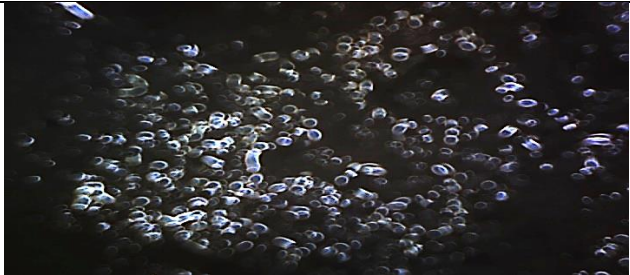


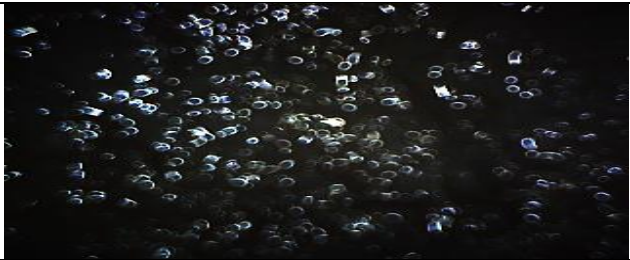

Concentración	Cristales de hielo	Geometría
Hielo fluido 6% Propilenglicol		Globular
Hielo fluido 15% Propilenglicol		Globular
Hielo fluido 20% Propilenglicol		Globular
Concentración	Cristales de hielo	Geometría
Hielo fluido 6% Etilenglicol		Globular
Hielo fluido 15% Etilenglicol		Globular
Hielo fluido 20% Etilenglicol	No determinado	No determinado

Figura 25. Microscopía. Geometría de cristal.

---

---

El empleo de propilenglicol y etilenglicol dan como resultado la formación de hielo fluido, generando cristales con una geometría globular, lo que permite reducir la energía requerida para el bombeo, durante su aplicación como refrigerante y en comparación con la requerida para el transporte de agua fría, ya que se requiere un menor flujo para reducir la temperatura de un sistema por su mayor capacidad de enfriamiento (*Inada et al., 2005*).

Se observa que el número de cristales está relacionado con la concentración de aditivo ya que a menores concentraciones el número de cristales es mayor y mayores concentraciones el número de cristales es menor.

#### **3.4. Proceso de formación de hielo fluido**

Para conocer el proceso de formación de hielo fluido se determinó, el efecto de la adición de aditivos y la concentración de los mismos en el punto inicial de congelación.

En la figura 26 y 27 se muestran las historias térmicas de la generación de hielo fluido a partir de propilenglicol y etilenglicol, donde se muestra que la velocidad de formación y el punto inicial de congelación están relacionados con la concentración del aditivo, al aumentar la concentración del aditivo el punto inicial de congelación es menor y como consecuencia mayor el tiempo para alcanzarlo (*Guilpart et al., 2006*).

---

---

Los dos polialcoholes utilizados como depresores del punto inicial de congelación presentan el mismo comportamiento gráfico, durante el proceso de formación del hielo fluido, encontrándose diferencias solo en el punto inicial de congelación dependiendo la concentración de polialcohol. El etilenglicol presenta mayor disminución del punto inicial de congelación a las mismas concentraciones empleadas en comparación con el propilenglicol.

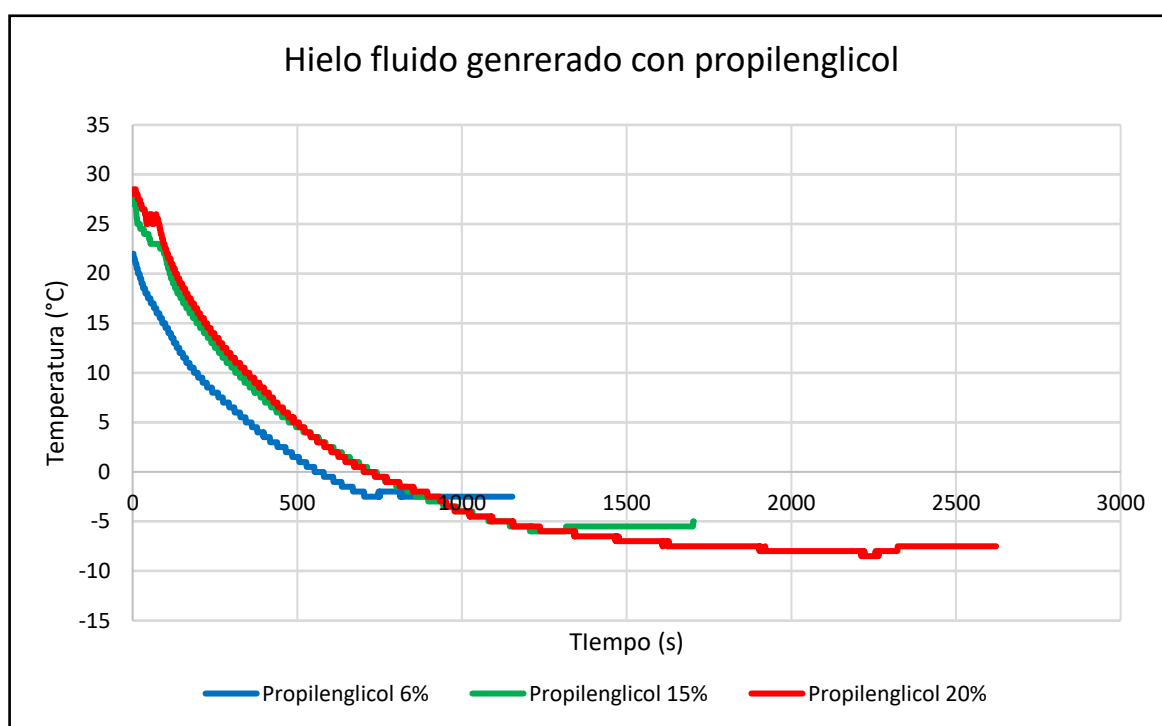


Figura 26. Proceso de formación de hielo fluido con propilenglicol

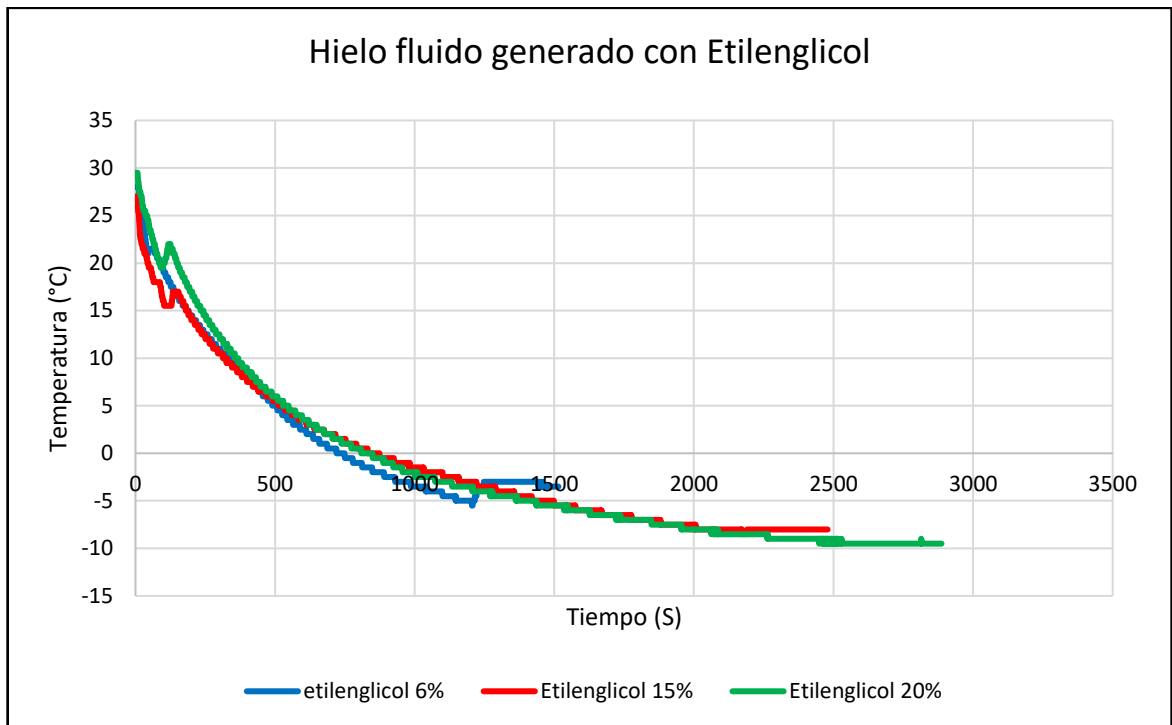


Figura 27. Proceso de formación de hielo fluido generado con Etilenglicol

En la tabla 3 se muestran las temperaturas donde se alcanzó el punto inicial de congelación. El empleo de polialcoholes (propilenglicol y etilenglicol) en el proceso de formación de hielo fluido, permite disminuir el punto inicial de congelación en función de su concentración, permitiendo alcanzar temperaturas menores a 0 °C, evitando que se forme una masa sólida de hielo y logrando formar una suspensión de hielo con la capacidad de ser transportada para su aplicación (*Melinder et al., 2005*).

El etilenglicol presenta mayores cualidades para abatir el punto inicial de congelación en comparación con el propilenglicol, generando temperaturas más bajas en el hielo fluido. El punto inicial de congelación en el tratamiento a partir de etilenglicol al 20% no se determinó ya que se alcanzó un equilibrio térmico entre el medio de enfriamiento y la temperatura de congelación, lo que impidió que se alcanzará el punto inicial de congelación en el sistema.

Tabla 3. Punto inicial de congelación del hielo fluido según el tratamiento.

Propilenglicol	Punto inicial de congelación	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	-2.8 °C	0.25	9.09
Hielo fluido 15%	-6.6 °C	0.42	6.34
Hielo fluido 20%	-8.1 °C	0.22	2.76
Etilenglicol	Punto inicial de congelación	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	-3.8 °C	0.30	7.89
Hielo fluido 15%	-8.4 °C	0.22	2.66
Hielo fluido 20%	No se determino	No se determino	No se determino

La tabla 4 muestra la temperatura donde el sistema se mantuvo constante, después de alcanzar el punto inicial de congelación y se observa que se tuvo un calentamiento producido por la liberación de calor latente debido a la formación de cristales en el sistema (Cortez, et al., 2015).



Tabla 4. Temperatura constante del hielo fluido por tratamiento

Propilenglicol	Temperatura constante	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	-2.5 °C	0	0
Hielo fluido 15%	-6 °C	0.42	6.34
Hielo fluido 20%	-8 °C	0.35	5.89
Etilenglicol	Temperatura constante	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	-3.4 °C	0.22	6.58
Hielo fluido 15%	-8 °C	0	0
Hielo fluido 20%	No se determino	No se determino	No se determino

Como se observa en la figura 28 la variación de la temperatura con respecto al tiempo, la concentración del aditivo utilizada en la generación de hielo fluido está relacionada con la disminución de punto inicial de congelación a mayor concentración la temperatura del punto inicial de congelación es más baja y genera un mayor tiempo de formación de hielo fluido como se muestra en la tabla 5. Al formarse los cristales de hielo aumenta la concentración de aditivo en la solución (etilenglicol-agua y propilenglicol-agua) y se produce un cambio de fase en el sistema presentando una temperatura mínima de fusión para el sistema, a esta temperatura se le conoce como punto eutéctico donde la solución llega a un equilibrio termodinámico (*Melinder et al., 2005*).

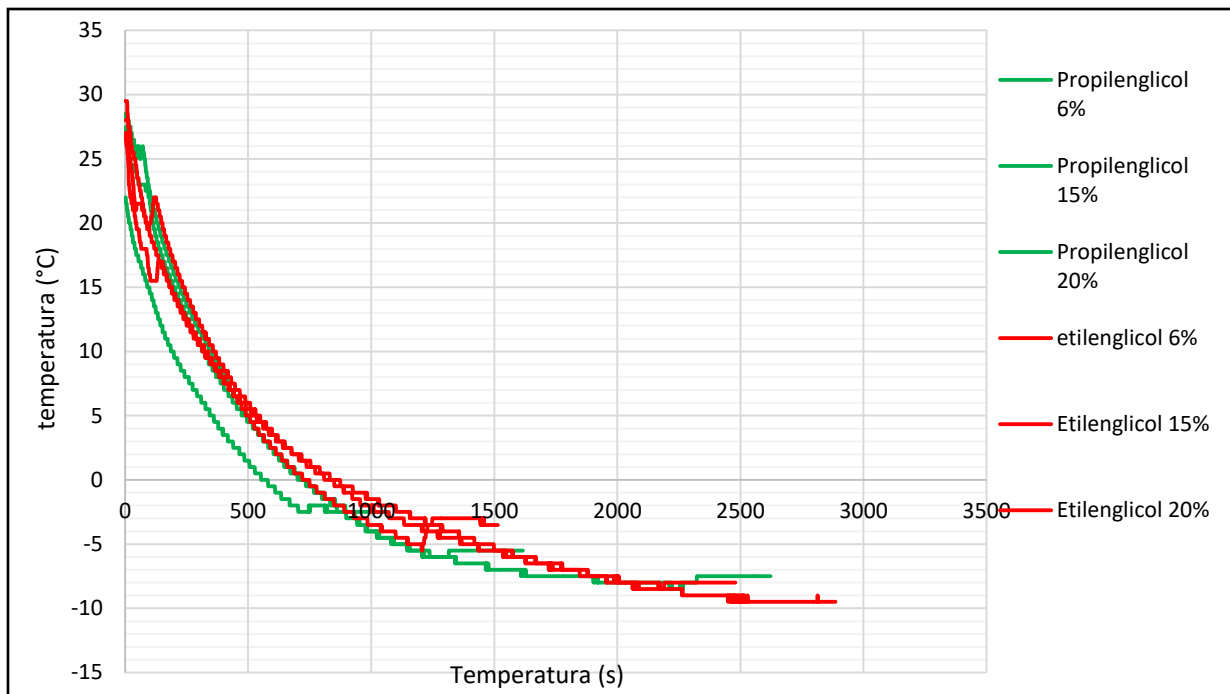


Figura 28. Generación de hielo fluido

Tabla 5. Tiempo de formación de hielo fluido por tratamiento.

Propilenglicol	Tiempo de formación (minutos)	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	16.79	0.60	3.55
Hielo fluido 15%	29.92	2.57	8.59
Hielo fluido 20%	42.58	2.27	5.61
Etilenglicol	Tiempo de formación (minutos)	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	24.41	2.04	8.02
Hielo fluido 15%	36.61	2.57	6.63
Hielo fluido 20%	No se determino	No se determino	No se determino

---

---

En la figura 29 se muestran los tiempos de generación de hielo fluido, mostrándose que al aumentar la concentración del polialcohol aumenta el tiempo de proceso de formación del hielo fluido, disminuyendo el punto inicial de congelación en el sistema.

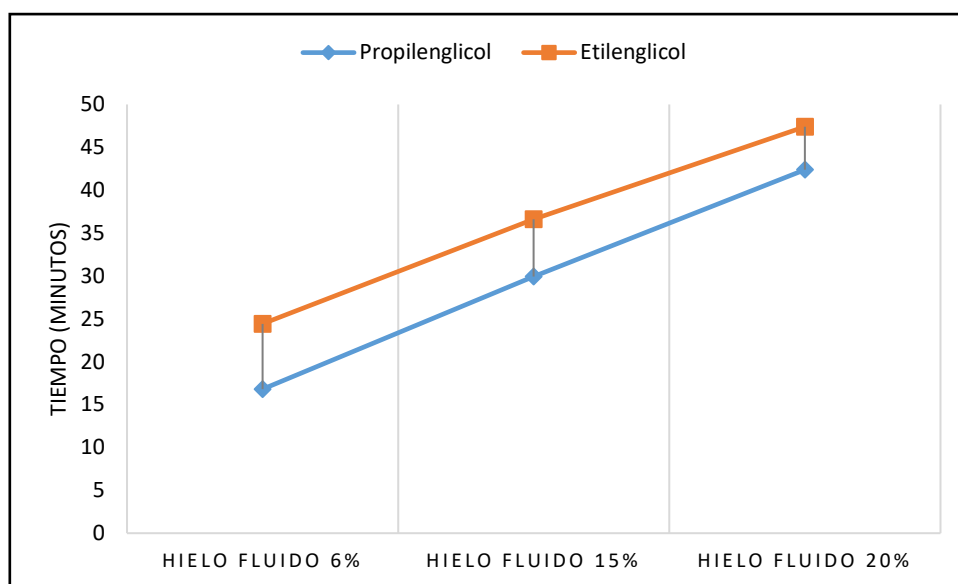


Figura 29. Tiempos de generación de hielo fluido

### 3.5 Comportamiento gráfico durante el enfriamiento

En la figura 30 se muestra la velocidad de cambio de la temperatura con respecto al tiempo, cuando se emplearon como medio de enfriamiento las diferentes formulaciones de hielo fluido, como modelo alimenticio a preenfriar, se utilizaron zanahorias con las características mencionadas en la metodología.

---

---

Se observa la variación en la temperatura del hielo fluido al llevarse a cabo la transferencia de calor, lo cual permitió el enfriamiento de las zanahorias desde una temperatura ambiente hasta una temperatura de refrigeración (4 °C).

De acuerdo con la figura 30 durante el preenfriamiento de zanahoria, la mayor velocidad de enfriamiento la presentaron aquellas que se trataron por inmersión con hielo fluido al 20% de propilenglicol (6.65 °C/min), las muestras preenfriadas con 6 y 15% de propilenglicol mostraron diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ) en relación a la velocidad de enfriamiento con 3.92 y 4.18 °C/min respectivamente. Lo que implica que al incrementar la concentración de propilenglicol existió mayor capacidad para retirar calor a las muestras evaluadas.

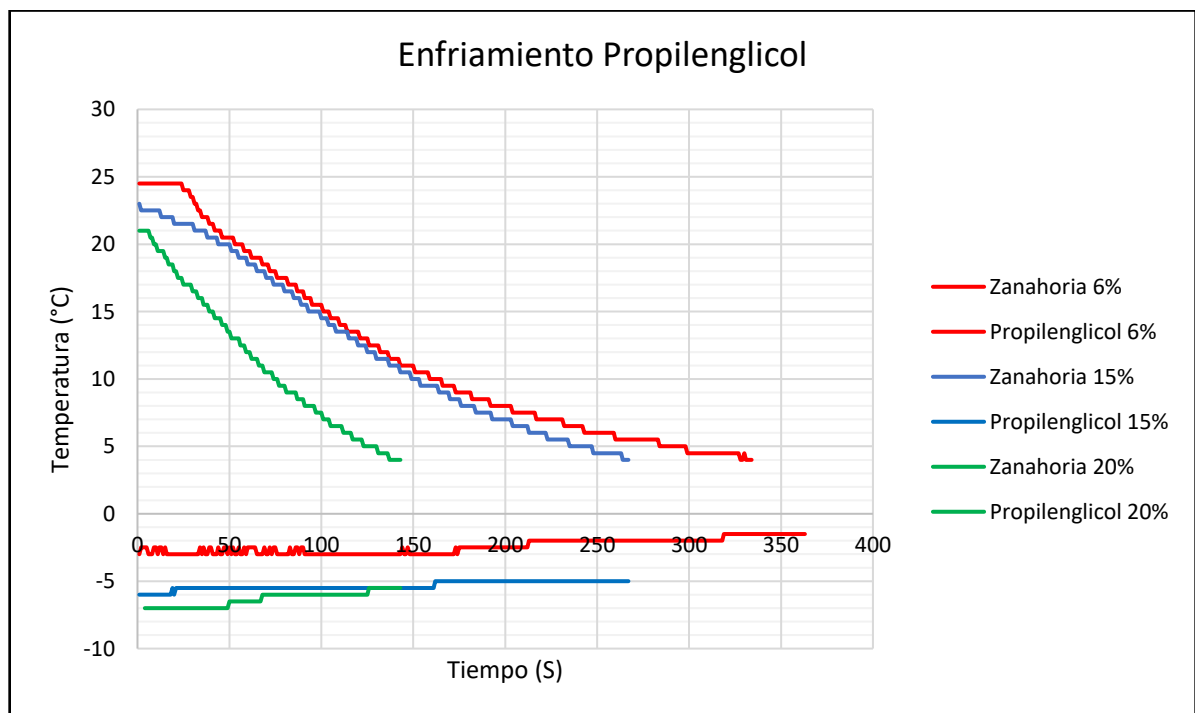


Figura 30. Comportamiento gráfico durante el enfriamiento de la zanahoria con hielo fluido a partir de propilenglicol.

---

---

En la figura 31, se muestran los cambios en las cinéticas de enfriamiento cuando se empleó etilenglicol para formar el hielo fluido y la posterior inmersión de zanahoria, observándose que, la menor velocidad de enfriamiento la presentaron las muestras preenfriadas con hielo fluido conteniendo etilenglicol al 6% con una velocidad de 3.36 °C/min, mientras que los tratamientos con 15 y 20% de etilenglicol 4.44 y 5.92 °C/min mostrando diferencia estadísticamente significativa ( $\alpha = 0.05$ ) en relación a la velocidad de enfriamiento en todos los tratamientos, la concentración de 15 % en ambos polialcoholes no muestran diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ).

Las velocidades de enfriamiento en los procesos inmersos con etilenglicol son menores en relación a las obtenidas con el propilenglicol lo que implica que este polialcohol es menos efectivo para retirar calor durante el preenfriamiento, lo que se asocia directamente a la estructura del mismo.

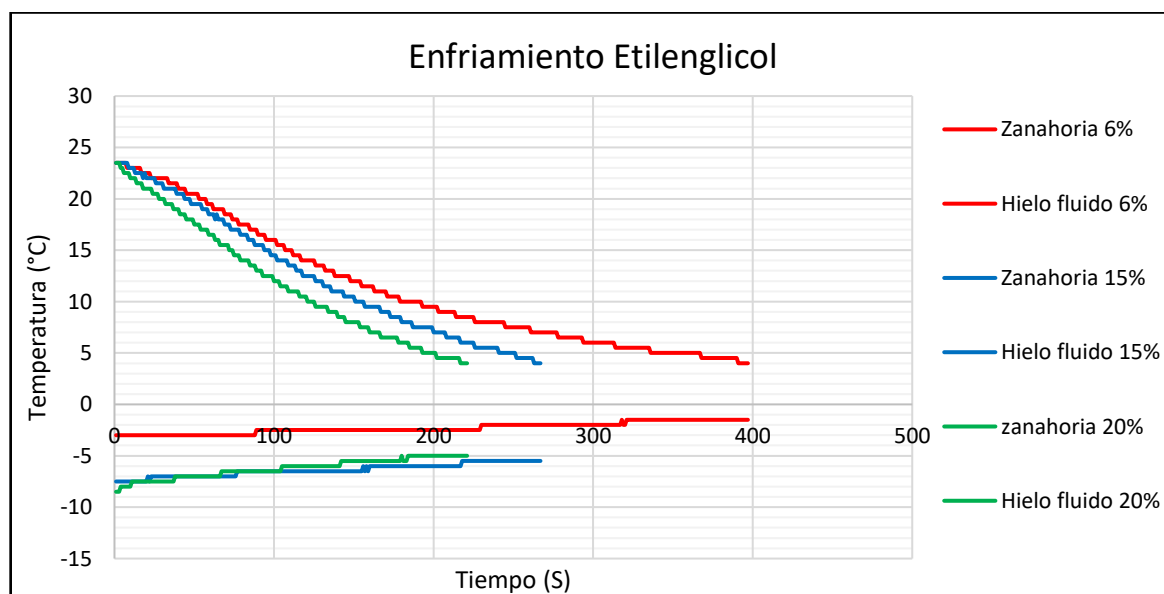


Figura 31. Comportamiento gráfico durante el enfriamiento de la zanahoria con hielo fluido a partir de etilenglicol.

En la tabla 6, se resumen los tiempos de proceso empleados para el enfriamiento de zanahoria, siendo las concentraciones de 20% de polialcoholes las que generan tiempos más cortos de proceso, observándose que el menor tiempo fue para la zanahoria preenfriada con propilenglicol, lo que se correlaciona con las velocidades de enfriamiento señaladas en los párrafos anteriores, el mayor tiempo de enfriamiento fue para las muestras inmersas en hielo fluido formado con etilenglicol. Por lo que la capacidad para retirar calor depende tanto de la concentración como de la estructura y peso molecular del polialcohol empleado.

Tabla 6. Tiempos de proceso de enfriamiento

Propilenglicol	Tiempo (minutos)	Desviación estándar (+-)	Coefficiente de variación
Hielo fluido 6%	5.41	0.25	4.32
Hielo fluido 15%	4.44	0.26	5.77
Hielo fluido 20%	2.57	0.22	8.79
<b>Etilenglicol</b>			
Hielo fluido 6%	5.92	0.74	12.84
Hielo fluido 15%	4.25	0.08	1.82
Hielo fluido 20%	3.27	0.32	9.87

### 3.6 Parámetros térmicos

En la tabla 7, se muestran los parámetros térmicos correspondientes al preenfriamiento de zanahorias donde se incluyen los coeficientes de enfriamiento, factores de retardo, coeficientes convectivos, números de biot y difusividad térmica. Evaluando con estos el aprovechamiento térmico del hielo fluido y su relación con la adición de polialcoholes al abatir el punto inicial de congelación. Se observó que la mayor difusividad térmica la presentó la zanahoria inmersa en hielo fluido con 20 % de propilenglicol.

---

---

En tabla 7 se muestran los factores de retardo para cada tratamiento, los valores obtenidos son mayores a 1 lo cual indica que existe una resistencia interna a la transferencia de calor dentro del producto que dependen de las propiedades físicas y térmicas del mismo (*Dincer., 2000*).

La tabla 7 muestra los valores de los coeficientes de enfriamiento obtenidos, donde se observa que los valores más altos de coeficientes de enfriamiento se encontraron en los tratamientos con concentraciones de propilenglicol y etilenglicol al 20%, esto se atribuye a que en estos tratamientos se alcanzaron temperatura más bajas, lo cual facilitó la transferencia de calor, ya que el coeficiente de enfriamiento representa la capacidad de retirar calor del sistema en compatibilidad con el producto enfriado (*Dincer., 2000*).

Los valores del coeficiente convectivo se muestran en la tabla 7. Se obtuvieron valores pequeños ya que el proceso de enfriamiento se realizó sin agitación alguna. Los valores del coeficiente convectivo están en el rango citado en la bibliografía para agua 0-100 ( $W/m^2 \text{ } ^\circ k$ ) para el proceso de enfriamiento por convección natural o libre (*Orrego, 2003*).

El número de Biot y al igual que el coeficiente convectivo son dependientes de la velocidad de agitación del medio de enfriamiento, el proceso de enfriamiento en este trabajo se realizó sin agitación, por lo cual los valores obtenidos son bajos como se muestran en la tabla 7 (*Dincer et al., 1995*). Además que al obtener valores de número de biot en los tratamientos entre  $0.1 \leq \text{biot} \leq 40$ , indica que existe una resistencia interna al intercambio térmico entre el producto y el sistema (*Umaña, 2010*).

Se muestran los valores obtenidos de difusividad térmica en la tabla 7. La difusividad térmica depende en gran medida del factor de retardo y del coeficiente de enfriamiento, ya que es la propiedad que relaciona la velocidad en que se propaga calor de un sólido a un medio de enfriamiento, debido a un diferencial de temperatura, el enfriamiento es beneficiado al tener un factor de retardo pequeño y un coeficiente de enfriamiento alto, lo que se obtuvo en los tratamientos con concentraciones altas de polialcoholes (20%), en los cuales se obtuvieron los más altos coeficientes de enfriamiento y los factores de retardo más pequeños, permitiendo la transferencia de calor de la zanahoria al hielo fluido con una mayor velocidad, generando tiempos de enfriamiento más cortos (*Dincer., 2000*).

Tabla 7. Parámetros térmicos durante el enfriamiento

Propilenglicol	Factor Lag	Coeficiente de enfriamiento (1/s)	Coeficiente convectivo (w/m <sup>2</sup> °C)	Numero de Biot	Difusividad Térmica (m/s <sup>2</sup> )
<b>Hielo fluido 6%</b>	1.1255	0.005	29.54	0.5175	4.78E-08
<b>Hielo fluido 15%</b>	1.0761	0.0045	16.4323	0.2877	8.31E-08
<b>Hielo fluido 20%</b>	1.0452	0.007	9.2806	0.1625	2.38E-07
Etilenglicol	Factor Lag	Coeficiente de enfriamiento (1/s)	Coeficiente convectivo (w/m <sup>2</sup> °C)	Numero de Biot	Difusividad Térmica (m/s <sup>2</sup> )
<b>Hielo fluido 6%</b>	1.08475	0.0045	18.5693	0.3253	7.26E-08
<b>Hielo fluido 15%</b>	1.0719	0.0045	15.4171	0.2700	8.90E-08
<b>Hielo fluido 20%</b>	1.0578	0.0625	12.1101	0.2120	1.60E-07



---

---

Las figuras 32 y 33 muestran los gráficos LogY vs tiempo para cada tratamiento y proceso de enfriamiento de las zanahorias. Obteniendo un comportamiento similar en los tratamientos con propilenglicol y etilenglicol, ya que el factor de retardo es inversamente proporcional a la concentración del polialcohol, se encontró que el factor de retado es menor a temperaturas de enfriamiento más bajas mismas que se logran con concentraciones altas. Lo cual indica que los sistemas de hielo fluido tanto de propilenglicol como etilenglicol al 20%, con temperaturas más bajas logran disminuir la resistencia interna del producto a la transferencia de calor, logrando llevar acabo un tiempo de proceso de enfriamiento más corto, (Dincer., 1996).

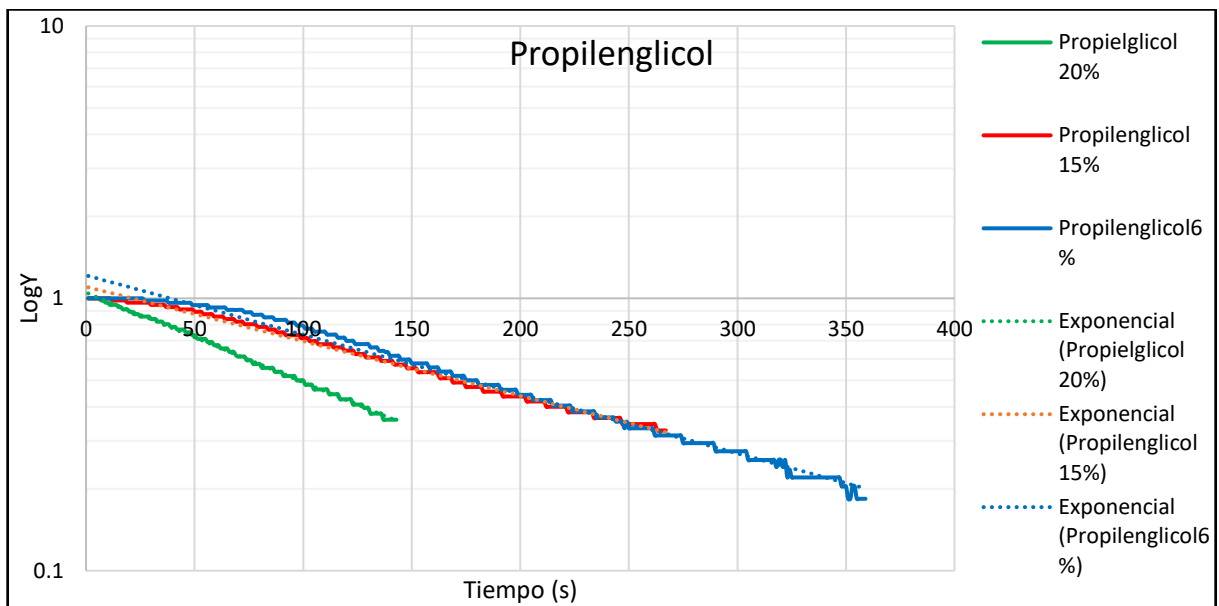


Figura 32. Gráfico "LogY-tiempo" hielo fluido propilenglicol.

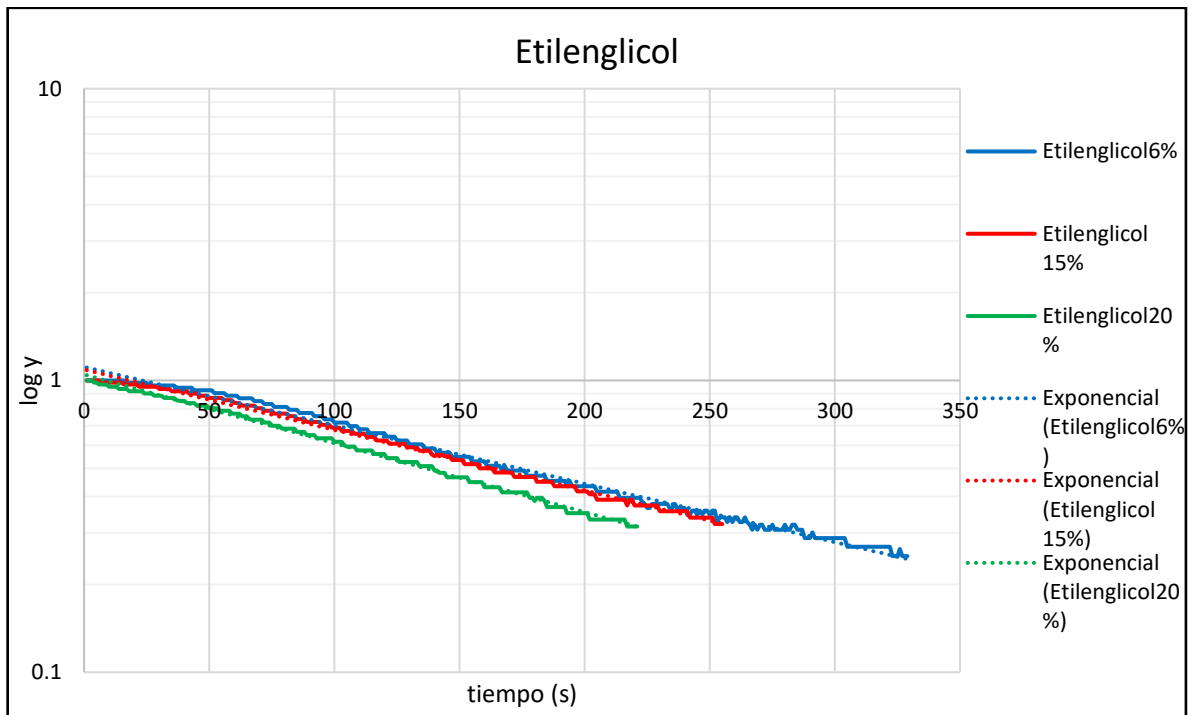


Figura 33. Gráfico “LogY-tiempo” hielo fluido etilenglicol

En la tabla 8 se muestran los valores de cada uno de los tratamientos propuestos durante el proceso de enfriamiento de las zanahorias. Los resultados obtenidos muestran que el calor latente en cada uno de los tratamientos es mayor al calor sensible, esto se atribuye a los cristales de hielo presentes en los sistemas utilizados en el enfriamiento, mismos que funden al llevarse a cabo el intercambio térmico (Kauffeld et al., 2010).

Se obtuvo una reacción inversamente proporcional entre el calor latente de los sistemas de hielo fluido y la concentración de polialcoholes debido a que al aumentar la concentración de polialcohol, el porcentaje de hielo formado disminuye por lo que el calor latente de fusión será menor.

---

---

El calor cedido por el medio es la capacidad total del sistema de hielo fluido para retirar calor durante el proceso de enfriamiento, y como se muestra es mayor al cedido por el producto, esto se atribuye a que el proceso de enfriamiento no se llevó a cabo de una manera aislada y existe una difusión hacia el entorno además de que la carga de producto a enfriar fue muy pequeña.

La masa de agua de enfriamiento se calculó de manera teórica como muestra la tabla 8, para tener una referencia en la cual se puede llevar a cabo una comparación a la masa de enfriamiento de hielo fluido la cual fue de 300 g, con lo que se muestra la mayor capacidad de los sistemas de hielo fluido para retirar calor en un alimento.

La tabla 8 muestra los calores obtenidos, cuando se usaron como medio de enfriamiento de zanahorias, las diferentes formulaciones de hielo fluido, donde se muestra que el sistema generado con propilenglicol al 20% presentan un gasto térmico menor y como se señaló en párrafos anteriores, también se obtuvo el tiempo de enfriamiento más corto, lo que indica un mayor aprovechamiento térmico al emplearse como medio de enfriamiento, generando un tiempo de proceso más corto, con un gasto térmico más pequeño en relación a las otras formulaciones empleadas en este trabajo.

Los calores del hielo fluido generado con etilenglicol al 20% no se calcularon ya que en este proceso no se formó hielo ya que se llegó a un equilibrio térmico entre el medio de enfriamiento y la solución de etilenglicol.

Tabla 8. Aprovechamiento térmico

Propilenglicol	Calor latente (J)	Calor sensible (J)	Calor cedido por el medio (J)	Calor cedido por el producto (teórico)	Masa de enfriamiento (agua) (g)
<b>6%</b>	32508	1728	34236	956	130
<b>15%</b>	32180	1039	33219	884	120
<b>20%</b>	25697	1471	27168	794	108
Etilenglicol	Calor latente (J)	Calor sensible (J)	Calor cedido por el medio (J)	Calor cedido por el producto (teórico)	Masa de enfriamiento (agua) (g)
<b>6%</b>	30938	1131	32069	950	129
<b>15%</b>	27401	1622	29023	908	123

---

---

## CONCLUSIONES

El propilenglicol y etilenglicol presentan ventajas para su empleo, como aditivos para la generación de hielo fluido ya que generan cristales pequeños y con una geometría globular que es la óptima para aplicarse en el enfriamiento de productos alimenticios ya que no generan daño mecánico al producto enfriado y aumenta el intercambio térmico durante el proceso, así mismo previene aglomeraciones durante su transporte, logrando mejores cualidades de flujo disminuyendo costos energéticos en su transportación.

Se encontró que las propiedades del hielo fluido van a depender directamente del aditivo utilizado y de su concentración la cual permitirá abatir el punto inicial de congelación, modificando las características del mismo.

Al aumentar la concentración de polialcoholes en la formación de hielo fluido obtiene mayor velocidad de enfriamiento, lográndose tiempos de proceso más cortos, y además, al aumentar la concentración se encontró que el gasto térmico será menor con lo que se obtiene un mayor aprovechamiento térmico.

El aumento en la concentración del aditivo permite disminuir el punto inicial de congelación, lo cual puede ampliar el rango de aplicación del hielo fluido dependiendo las necesidades requeridas ya que se encontró en este trabajo que la concentración está directamente relacionada con la disminución de la temperatura del punto inicial de congelación.

---

---

En el aspecto económico entre el propilenglicol y etilenglicol no se encontraron diferencias significativas en cuanto al precio comercial y a una escala de laboratorio, lo cual no es una limitante para su empleo en la generación de hielo fluido.

En este trabajo se revisaron aspectos referentes a la disminución del punto inicial de congelación y las características físicas del hielo fluido por la adición de aditivos y la transferencia de calor entre el hielo fluido y el alimento preenfriado en este caso la zanahoria, mas no en la energía requerida para la formación del hielo fluido, lo cual se podría estudiar en investigaciones futuras, ya que en este caso se trabajó en un medio abierto.

Para posteriores trabajos se recomienda emplear otro método de enfriamiento que genere una temperatura más baja, lo cual podrá generar un aumento de las concentraciones de los aditivos empleados, incluso estudiar otro tipo de aditivo depresor del punto inicial de congelación.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Aldabe, S., Aramedia, P., Lacreu, L., *Química I*. (1999). (1ed). Buenos Aires, Argentina. Ediciones, Colihue S.R.L.
- Atkins, P. (2007). *Las moléculas de Atkins*. (1ed). Madrid, España. Ediciones Akal. S.A.
- Baïri, A., Laraqi, N., Garcia de Maria, J. (2007). Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*. 78, 669–675.
- Bellas, & Tassou. (2005). Present and future applications of ice slurries. *International Journal of Refrigeration*. 28 (1), 115-121.
- Ballesteros, L. (2013). *Enfriamiento por aire forzado*. Mundo HVAC&R. México. Recuperado 20 de agosto de 2017, de <https://www.mundohvacr.com.mx>.
- Castaing-Lasvigottes, J., El Abbassi, I., Bedecarrats, J., Dumas, J., Mimet, A. (2010). Energetic performances of a refrigerating loop using ice slurry. *Applied Thermal Engineering*. 30, 962–969.
- Chen, X, McLellan, D., Shafiur, M., Thermal diffusivity of kiwifruit skin, flesh and core measured by a modified fitch method. *International journal of food properties*. 1(2), 113-119.
- Cortez, C.C., Muños, R.A.G., Vega, J.A. (2015). *Curvas de congelación de agua y soluciones binarias*. Universidad Nacional de Santa. Perú. Recuperado 22 de abril de 2017, de <https://es.slideshare.net>.
- Davies, T. W. (2005). Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains. . *International Journal of Refrigeration*. 28, 108-114.

- 
- 
- Dincer, I. (1995). Cooling parameters and film conductances of spherical products cooled in an air flow. *Elsevier Science Limited*. 50, 269-280
- Dincer, I. (1995). Development of Fourier-Reynolds Correlations for Cooling Parameters. *Elsevier Science Limited*. 125-138.
- Dincer, I. (1996). Determination of thermal diffusivities of cylindrical bodies being cooled. *int. comnt heatmass transfer*. 713-720.
- Dincer, I. (2000). Heat transfer parameter models and correlations for cooling applications. *Springer Verlag*. 57-61.
- Dossat, R. J., (1980). *Principios de refrigeración*. México: Cecsa, 1980.
- Egolf, P., & Kauffeld, M. (2005). From physical Properties of ice slurries to industrial ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration*. 28 (1), 4-12.
- Erdogdu, F. (2008). A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*. 86, 453-459.
- Falco, J., Franceschelli, I., Mavo, M. (2001). Ley de enfriamiento de un termómetro. Análisis gráfico de resultados experimentales, *Universidad de San Andrés*.
- Fernández- Seara, J., Diz, R. (2014). Thermo-hydraulic behavior of ice slurry in an offset strip-fin plate heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. 41, 171-180.
- Guilpart, J., Stamation, E., & Delahaye, A. (2006). Comparison of the performance of different ice slurry types. *International Journal of Refrigeration*. 29 (5), 781-788.
- Haruki, N y Horibe, A. (2013). Flow and heat transfer characteristics of ice slurries in a helically-coiled pipe. *International Journal of Refrigeration*. 36, 1285-1293.



- 
- 
- Incropera, F., De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de calor* (4ed). Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Kauffeld, M., Wang, M. J, Goldstein, V., Kasca,, K, E. (2010). Ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration*. 33, 1491-1505.
- Kousksou, T., Jamil, A., Arid, A., Jegadheeswaran, S., Zeraouli, Y. (2012). Crystallisation kinetics with nucleation phenomenon: Ice slurry system. *International Journal of Refrigeration*. 35, 1921-1930.
- Kumano, H., Asaoka, T., Sawada, S. (2014). Effect of initial aqueous solution concentration and heating conditions on heat transfer characteristics of ice slurry. *International Journal of Refrigeration*. 41, 72-81.
- Kumano, H., Tamura, F., Sawada, S., Asaoka, T. (2013). Study on flow and heat transfer characteristics of ice slurry in the transition región. *International Journal of Refrigeration*. 36, 801-808.
- Losada, V., Barros-Velazquez, J., Gallardo, J., Aubourg, S. (2006). Effect of previous slurry ice treatment on the quality of cooked sardine (*Sardina pilchardus*). *Eur Food Res Technol*. 224, 193–198.
- Mariani, V. C., Barbosa de Lima, A. G., Coelho, L. (2008). Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. *Journal of Food Engineering*. 85, 569–579.
- Martínez, D, S., Solano, J, P. Illan, F., Viedma, A. (2014). Analysis of heat transfer phenomena during ice slurry production in scraped surface plate heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*. 48, 221-232.
- Melinder A. (2005). Using Property Values of aqueous solutions and ice to estimate ice concentrations and enthalpies of ice slurries. *International Journal of Refrigeration*. 28, 1-7.

- 
- 
- Melinder, A., Ignatowicz, M. (2015). Properties of seawater with ice slurry use in focus. *International Journal of Refrigeration*. 52, 51-58.
- Navarro González, P. L. (2008). Determinación de las propiedades energéticas del hielo fluido mediante un análisis de los procesos de formación y fusión de soluciones de biopolímeros por calorimetría diferencial de barrido con modulación de temperatura. Tesis de licenciatura de Ingeniería en Alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Izcalli, México.
- Niezgoda- Zelasko, B., Zelasko, J. (2007). Generalized non-Newtonian flow of ice-slurry. *Chemical Engineering and Processing*. 46, 895–904.
- Ojeda Piedra, S. A. (2014). Caracterización térmica y física de la formación de hielo fluido con emulsiones para su empleo en el preenfriamiento de alimentos. Tesis de licenciatura de Ingeniería en Alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Izcalli, México.
- Okada, M., Tsuchida, D., Kang, C., Matsumoto, K., Kawagoe, T. (2002). Ice formation process by cooling water-oil emulsion with stirring in a vessel. *International Journal of Refrigeration*. 25, 259-258.
- Orrego, A. C. E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. (1ed). Colombia. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Orrego, A.E.C. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. Recuperado 13 de abril de 2017, <http://www.bdigital.unal.edu.co>.
- Pereira da silva, W., Cleide, M. (2014). Calculation of the convective heat transfer coefficient and thermal diffusivity of cucumbers using numerical simulation and the inverse method. *J Food Sci Technol*. 51 (9), 1750–1761.

- 
- 
- Piñeiro, C., Barros Velázquez, J., & Aubourg, S. (2004). Effects of newer slurry ice systems on the quality of aquatic food products: a comparative review versus flake ice chilling methods. *Trends in Food science & Technology*, 15 (12), 575-582.
- Rojas, J. J. (2009). Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor convectivo en la superficie de una esfera de cobre. *Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar*. 11
- Sanchez Recarte, I., Torres de Maria, G., Abril Requena, J. Caps Vanaclocha, A. (2002). Determinación de las propiedades de un hielo líquido formado a partir de agua y NaCl. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos*. Pamplona.
- Sicard, F., Rached. Lafargue, A., Thorel, D. (2007). Ice slurry: Pressure drop and deposition velocity. *International Journal of Refrigeration*. 30, 1393-1400.
- Stepac. (2012). *Importancia del control de la temperatura en frutas con hueso*. Fresh Plaza. Recuperado 20 de agosto de 2017, de <http://www.freshplaza.es>.
- Suzuki, H., Inada, T., Inaba, H., Horibe, A., Usui, H. (2005). Preventing agglomeration and growth of ice particles in water with suitable additives. *International Journal of Refrigeration*. 28, 20–26.
- Umaña, E. (2010). Conservación de alimentos por frío. Friago y Fusades Proinnova. El Salvador. Recuperado 4 de mayo de 2017, <http://fusades.org>
- Vasco, D. C., (2015). *Transferencia de calor por convección*. Universidad de Santiago de Chile. República de Chile. Recuperado 23 de febrero de 2017, de [www.dimecusach.cl/index](http://www.dimecusach.cl/index).
- Wang, K., Eisele, M., & Hwang, Y (2010). Review of secondary loop refrigerant systems. *International Journal of Refrigeration*, 33 (2), 212-234.

---

---

Zhang, P., Shi, X.J. (2015). Thermo-fluidic characteristics of ice slurry in horizontal circular pipes. *International Journal of Refrigeration*. 89, 950-963.

Zhang, P., y Ma, Z. (2012). An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems. *Renewable and Sustentable Energy Reviews*, 16, 5021-5058.