



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**APLICACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO DE  
NANOCÁPSULAS EN FRUTA FRESCA CORTADA  
EMPLEANDO UN PREENFRIADOR POR  
HIDROFLUIDIZACIÓN**

**T E S I S**

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

**P R E S E N T A N :**

**JESÚS HERNÁNDEZ VIVEROS  
TANIA LINA VÁZQUEZ AVILA**

**ASESORES:**

**I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS  
M.C. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA**



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.



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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
 Jefa del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la **Tesis**:

Aplicación de un recubrimiento de nanocápsulas en fruta fresca cortada empleando un preenfriador por hidrofluidización.

Que presenta la pasante: **Jesús Hernández Viveros**  
 Con número de cuenta: 407045859 para obtener el Título de: Ingeniero 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 HABLARA EL ESPÍRITU"**  
 Cuautitlán Izcallí, Méx. a 13 de octubre de 2011.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.A. Alfredo Alvarez Cárdenas	
<b>VOCAL</b>	Dr. David Quintanar Guerrero	
<b>SECRETARIO</b>	I.A. Francisco Javier López Martínez	
<b>1er SUPLENTE</b>	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	
<b>2do SUPLENTE</b>	I.A. María Guadalupe Morales Cabral	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
 11:11A/pm



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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
 Jefa del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la **Tesis**:  
Aplicación de un recubrimiento de nanocápsulas en fruta fresca cortada empleando un preenfriador por hidrofuidización.

Que presenta la pasante: **Tania Lina Vázquez Avila**  
 Con número de cuenta: 304808601 para obtener el Título de: Ingeniera 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 HABLARA EL ESPÍRITU”**  
 Cuautitlán Izcallí, Méx. a 13 de octubre de 2011.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	I.A. Alfredo Alvarez Cárdenas	
<b>VOCAL</b>	Dr. David Quintanar Guerrero	
<b>SECRETARIO</b>	I.A. Francisco Javier López Martínez	
<b>1er SUPLENTE</b>	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	
<b>2do SUPLENTE</b>	I.A. María Guadalupe Morales Cabral	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
 HHA/pm

*“El amor por la fuerza nada vale, la fuerza sin amor es energía gastada en vano.”*

**Albert Einstein**

## *A Dios, por darnos la dicha de vivir.*

*A mi papá el Sr. Lázaro Hernández y a mi mamá la Sra. Francisca Viveros, por haberme dado las mejores lecciones de vida con sus ejemplos de humildad, esfuerzo y perseverancia, ¡Los amo!*

*A mi hermano Iván, por tu fuerza, lealtad y nobleza que siempre te caracterizaran, ¡Paz, amor y libertad!*

*A mi hermanita Vanessa, por enseñarme que en lo más sencillo se encuentra la felicidad, ¡Te amo!*

*A Lina, por ser mi mejor amiga, cómplice, compañera, colega e inspiración; pero sobre todo, por ser la mujer a la que amo.*

*A la Sra. Irene, por todo el apoyo y motivación que siempre nos ha dado, ¡La quiero mucho!*

*A mis tíos Guadalupe Hernández, José Hernández, Feliciano Viveros, Isabel Viveros, Candelaria Viveros y Sofía Viveros, por el apoyo incondicional nos dieron en los momentos difíciles.*

*... "libre si construyo, libre si destruyo, más libre cuando sabes que este mundo es tuyo y jamás me prostituyo ni por menos ni por más"...*

*A la cómplice de mis sueños y éxitos, la mente maestra de mis más bellos sentimientos: Irene, ¡Te amo mamá!*

*A la persona que le debo el amor a la ingeniería, la responsabilidad y el compromiso con la vida: Ing. Justino Vázquez, ¡gracias papá!*

*A Karla próxima BQD, por alentarme siempre a ser una guerrera. ¡Te amo hermanita! ¡Orgullosamente hechas en FES-C Campo 1!*

*A Pavel, gracias por enseñarme que la nobleza se lleva siempre en el alma, nunca dejes de soñar. ¡Te amo hermanito!*

*A Jesús, porque el amor se transforma para convertirnos en mejores personas, gracias por todo tu cariño y paciencia. ¡Te amo!*

*A mi abue la Sra. Lina Vargas, mi tío Felipe Vázquez y a la familia Hernández Viveros por su cariño y apoyo incondicional. ¡Los quiero mucho!*

*A los ingenieros Oscar Gómez, Juan Carlos Soto, Juanita Bautista, Karla González, Nancy Bautista y Juan Manuel Quintanar por ser un gran ejemplo profesional.*

*Al coach Rulo Suárez y mi ¡máquina del mal!, lo campeón se lleva en el corazón así como en todas las acciones de la vida.*

*A los Ingenieros Alfredo Álvarez y María de la Luz Zambrano, por ser parte fundamental de este proyecto en el cual concluimos una de las etapas más importantes de nuestras vidas.*

*Al Ing. Francisco Martínez por sus valiosas contribuciones a este trabajo; pero sobre todo por ser el amigo, profesor, consejero y pilar importante en nuestra formación como ingenieros en alimentos.*

*Al Ing. Javier Cruz Maranto que además de profesor y ejemplo profesional, es un amigo invaluable.*

*A las profesoras María Eugenia Ramírez y Norma Casas Alencáster por sus valiosas contribuciones a nuestra formación académica.*

*A nuestros amigos y compañeros de batalla: Arturo Sicard, Gabriela López, Elba Barbosa, Cynthia Hurtado, Miriam Valtierra, Marayani Luna, César Reyes, Monserrat Morlán, Gustavo Márquez, Jorge Garduño, Antonio Acosta, Aldo Estevez, Cristián López, Eliot Flores, Enrique Piña, Julio Macossay, Mayra Pineda, Flor Ortíz, Atzelbi Medina, Heriberto Godoy, Ricardo Mendoza, Ingrid Fuentes y Rodrigo Cristóbal.*

*Al Ing. Manuel Alarcón por el apoyo incondicional a nuestro desarrollo profesional.*

*Al Dr. David Quintanar y los Ingenieros Guadalupe Morales, Víctor Avalos y Arturo Jácome por sus valiosas contribuciones a este trabajo profesional.*

*El presente trabajo fue financiado por el proyecto PAPIIME PE203711 "Fortalecer el área de procesos y sistemas frigoríficos con atmósferas modificadas" de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM*

*Y por el proyecto PAPIIT: IT231511-3 "Nanopartículas en recubrimientos comestibles para la conservación de frutas frescas cortadas" de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM.*

*A mí Universidad Nacional Autónoma de México*

Por el orgullo de ser INGENIERO EN ALIMENTOS

*"Por mi raza hablará el espíritu"*

Ingeniería en Alimentos

GENERACION 31



---

## RESUMEN

La nanotecnología aplicada a la conservación de alimentos tiene actualmente grandes expectativas enfocadas al desarrollo de recubrimientos nutraceuticos, encapsulación de activos, entre otras aplicaciones. Además, la hidrofuidización es una operación para aplicaciones de preenfriamiento y congelación de alimentos con la ventaja de generar una turbulencia superficial e incrementar el coeficiente superficial de transferencia de calor. Se evaluó el comportamiento físico de un sistema modelo de nanocápsulas (0.1% xantana-0.5% propilenglicol) a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , durante la hidrofuidización de fruta fresca cortada para emplearse como un nuevo método en el recubrimiento de alimentos; debido a que las técnicas existentes por inmersión y pulverización presentan inconvenientes en cuanto a la homogeneidad del recubrimiento. De acuerdo con la caracterización reológica del fluido a la temperatura mencionada, este presenta un comportamiento fluidificante ajustado al modelo de la potencia con un índice de consistencia de  $0.227 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  al comienzo de la operación; sin embargo, después de 30 segundos se comporta como un fluido newtoniano con una viscosidad de  $0.008 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , lo cual determinó que la bomba del dispositivo hidrofuidizador para recirculación de agua no tuvo ningún inconveniente de funcionamiento al recircular la dispersión modelo. En el estudio de transferencia de calor durante la hidrofuidización, se obtuvieron valores de Biot entre 8 y 13.5 en esferas de pera *d'Anjou* y uva *Red Globe* sin hollejo, lo cual indica que la resistencia a la transferencia de calor fue de tipo conductiva. Se obtuvieron valores menores de coeficiente convectivo empleando el plato hidrofuidizador con orificios de 4 mm, respecto al de 2 mm de diámetro. Entre los frutos, la uva *Red Globe* sin hollejo mostró los valores más altos en los tiempos de enfriamiento. La hidrofuidización es una tecnología aplicable para recubrir esferas de fruta mínimamente procesada en tiempos cortos, según los datos obtenidos de ángulo de tono y microscopía, además permite emplear otros medios de enfriamiento distintos al agua, siempre y cuando se consideren los criterios y principios de fluidización.





---

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	i
<b>NOMENCLATURA</b>	viii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	xi
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.</b>	
1.1 Fundamentos de fluidización	1
1.2 Hidrofluidización	4
1.3 Componentes de un sistema de preenfriamiento por hidrofluidización	6
1.4 Fenómenos de transporte presentes durante la hidrofluidización	11
1.5 Transferencia de calor aplicada a sistemas de preenfriamiento por hidrofluidización	16
1.6 Recubrimientos comestibles	24
1.7 Nanotecnología	27
1.8 Propiedades termofísicas y fisicoquímicas de la uva <i>Red Globe</i> y de la pera <i>d'Anjou</i>	31
1.9 Preenfriamiento	32
1.10 Hidroenfriamiento	35
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.</b>	
2.1 Objetivos	38
2.2 Selección y justificación de variables	39
2.3 Diseño experimental	40
2.4 Selección y control de la materia prima	41
2.5 Determinación de sólidos solubles	41



---

2.6	Determinación de la densidad	41
2.7	Preparación del fluido modelo	41
2.8	Caracterización reológica del fluido modelo	43
2.9	Determinación de los parámetros de enfriamiento	43
2.10	Evaluación del recubrimiento	45
2.10.1	Color	45
2.10.2	Microscopia	47

### **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

3.1	Adaptación y modificación del equipo experimental de enfriamiento	48
3.2	Caracterización de hidrofuidizador	53
3.3	Determinación de la velocidad mínima de fluidización	54
3.4	Caracterización reológica de sistema modelo	55
3.5	Selección y control de la muestra	57
3.6	Preenfriamiento	57
3.7	Evaluación del color del recubrimiento	65
3.8	Evaluación microscópica del recubrimiento	69

<b>CONCLUSIONES</b>	73
---------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	74
---------------------	----

### **APÉNDICES**

### **ANEXOS**



---

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Caída de presión y altura de lecho frente a velocidad superficial en un lecho de sólidos.	2
Figura 2.	Componentes de un sistema por hidrofluidización.	7
Figura 3.	Sistema piloto por hidrofluidización.	8
Figura 4.	Vista frontal de la cámara de hidrofluidización.	9
Figura 5.	Diseño de la unidad de hidrofluidización.	9
Figura 6.	Unidad de hidrofluidización, (a) tanque experimental, (b) charola perforada, (c) rebosadero, (d) retorno de líquido.	10
Figura 7.	Configuración de las boquillas para hidrofluidización.	11
Figura 8.	Arreglo de orificios de las boquillas para hidrofluidización.	11
Figura 9.	Comportamiento reológico de los fluidos.	13
Figura 10.	Distribución de velocidades en régimen turbulento.	15
Figura 11.	Patrón de flujo debido a las interferencias chorro-chorro en un sistema de chorros de choque múltiple, a) orificio, b) placa con orificios, c) chorro libre, d) punto de estancamiento, e) zona de estancamiento, f) flujo secundario, g) flujo recirculado, h) vórtices, i) superficie de choque.	16
Figura 12.	Curva de hidrogenfriamiento en mangos.	20
Figura 13.	Caracterización de un proceso de preenfriamiento.	23
Figura 14.	Funciones selectivas y activas de un recubrimiento.	24
Figura 15.	Recubrimiento en bicapa (a) y emulsificada (b).	25
Figura 16.	Recubrimiento de queso por aspersion en un tornillo rotatorio.	26
Figura 17.	Representación de nanoesferas y nanopartículas.	28
Figura 18.	Diferentes estructuras nanocapsulares, a) centro líquido, b) matriz polimérica y c) dispersion de sustancia activa.	29
Figura 19.	Clasificación de los sistemas de preenfriamiento.	35



---

Figura 20.	Enfriador por inmersión.	37
Figura 21.	Preenfriador por aspersión.	37
Figura 22.	Microscopio óptico IROSCOPE SI-SHF.	47
Figura 23.	Diagrama isométrico del preenfriador por hidrofluidización y sus distintos componentes.	49
Figura 24.	Unidad experimental de hidrofluidización.	50
Figura 25.	Vista frontal y superior del tanque limitante.	51
Figura 26.	Placas para generar chorros fluidizantes.	52
Figura 27.	Termograma del medio refrigerante.	53
Figura 28.	Comportamiento reológico del sistema modelo.	55
Figura 29.	Dimensiones características de la uva <i>Red Globe</i> .	57
Figura 30.	Gráfico semilogarítmico de la relación adimensional de temperaturas (Y) en función del tiempo para esferas de pera <i>d'Anjou</i> preenfriadas por hidrofluidización con la placa de orificios de 2mm.	58
Figura 31.	Gráfica de efectos principales y gráfica de Pareto en la velocidad de enfriamiento (°C/s).	59
Figura 32.	Gráfica de efectos principales y gráfica de Pareto en el coeficiente superficial de transferencia de calor (h).	63
Figura 33.	Figura 33. Comparación de los tratamientos de recubrimiento sobre la Intensidad de color. HF: hidrofluidización, CF: enfriamiento en cámara de refrigeración por convección forzada	67
Figura 34.	Uvas sin hollejo (A) y pera (B) recubiertas por hidrofluidización.	69
Figura 35.	Uvas sin hollejo (A) y pera (B) recubiertas por hidrofluidización durante un minuto, preenfriadas por convección forzada.	69
Figura 36.	Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) sin tratamiento a 20X.	70
Figura 37.	Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) enfriadas por hidrofluidización en la placa con orificios de 2 mm a 20X.	71

---



---

Figura 38.	Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) recubiertas por inmersión durante un minuto a 20X.	72
Figura 39.	Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) recubiertas por hidrofuidización a temperatura ambiente a 20X.	72
Figura 40.	Coeficiente K para expansión suave.	84
Figura 41.	Coeficiente K para reducciones bruscas.	85



---

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Principales componentes estructurales de las nanocápsulas.	30
Tabla 2.	Composición química de la uva y la pera.	32
Tabla 3.	Propiedades térmicas de uva y pera.	32
Tabla 4.	Tabla de variables.	40
Tabla 5.	Actividades experimentales realizadas para el diseño factorial $2^2$ .	40
Tabla 6.	Concentración de los componentes del fluido modelo empleado durante la experimentación.	42
Tabla 7.	Tratamientos para recubrimiento.	45
Tabla 8.	Patrones de diseño en el equipo prototipo para hidrofuidización.	48
Tabla 9.	Parámetros reológicos del sistema modelo a $2\pm 0.5^\circ\text{C}$ y $372.8\text{ s}^{-1}$ (3,560 rpm).	55
Tabla 10.	Dimensiones características, sólidos solubles y densidad de la fruta fresca cortada.	57
Tabla 11.	Parámetros de enfriamiento.	62
Tabla 12.	Coefficientes superficiales de transmisión de calor para aplicaciones de contacto directo.	64
Tabla 13.	Resultados de la evaluación del color a los tratamientos de aplicación para el recubrimiento de las esferas de fruta.	65
Tabla 14.	Valores calculados para la determinación de las pérdidas de carga.	83



## NOMENCLATURA

<b>Letras latinas</b>		<b>Unidades</b>
A	Área	m <sup>2</sup>
C <sub>b</sub>	Cabezal	N/m <sup>2</sup>
CC	Coefficiente de enfriamiento	s <sup>-1</sup>
C <sub>D</sub>	Coefficiente de arrastre	
C <sub>p</sub>	Capacidad calorífica	kJ/kg°C
d <sub>p</sub>	Diámetro del producto	m
D	Diámetro de tubería	m
D <sub>o</sub>	Diámetro de orificio	m
g	Constante de gravedad	9.81 m/s <sup>2</sup>
h	Coefficiente superficial de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> °C
h <sub>L</sub> o ΔP	Pérdida de carga	J/kg
j	Factor lag	
k <sub>T</sub>	Conductividad térmica	W/m°C
K	Índice de consistencia	Pa·s <sup>n</sup>
ln	Logaritmo natural	
m	Flujo másico	Kg/s
n	Índice de comportamiento al flujo	
P	Potencia	HP
Q	Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /s
Q <sub>o</sub>	Cantidad de calor	W



---

$q_0$	Velocidad de transferencia de calor	$W/m^2$
S	7/8 del tiempo de enfriamiento	s
$t$	Tiempo de enfriamiento	s ó min
$T_p$	Temperatura del punto donde es colocado el termopar	$^{\circ}C$
$T_m$	Temperatura del medio de enfriamiento	$^{\circ}C$
$T_i$	Temperatura inicial del alimento	$^{\circ}C$
$v_{mf}$	Velocidad mínima de fluidización	m/s
$v_t$	Velocidad límite	m/s
$v_0$	Velocidad del medio de enfriamiento en orificios	m/s
V	Volumen	$m^3$
W	Trabajo	J/kg
x	Dimensión característica	m
Y	Relación adimensional de temperatura	
Z	Tiempo medio de enfriamiento	s
Bi	Número adimensional de Biot	
Fo	Número adimensional de Fourier	
Gr	Número adimensional de Grashof	
Nu	Número adimensional de Nusselt	
Pr	Número adimensional de Prandlt	
Re	Número adimensional de Reynolds	
$Re_o$	Número adimensional de Reynolds en orificios	
$^{\circ}h$	Angulo de tono	grados

---





---

### Letras griegas

$\alpha$	Difusividad térmica	$\text{m}^2/\text{s}$
$\beta$	Coefficiente de expansión térmica	$\text{K}^{-1}$
$\Delta z$	Altura	m
$\Delta E$	Diferencia total de color	
$\varepsilon$	Porosidad	
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalla	$\text{s}^{-1}$
$\mu$	Viscosidad	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
$\rho$	Densidad del medio de enfriamiento	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_p$	Densidad del producto	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\sigma$	Esfuerzo de cizalla	Pa
$\varphi_s$	Esfericidad	
$\pi$	Número pi =3.1416	



---

## INTRODUCCIÓN

El consumo de frutas en la dieta diaria tiene un efecto benéfico para la salud debido a que son una excelente fuente de vitaminas, minerales y fibra. En la actualidad, este consumo es muy bajo respecto a las recomendaciones hechas por profesionales de la salud. La introducción en los mercados de los productos frescos cortados es una manera de incrementar el consumo de frutas dentro de la población, por su atractiva presentación, apariencia y sabor (Rojas-Graü y Martín Belloso, 2006).

La nanotecnología es el entendimiento y manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular. Estas tecnologías emergentes han mostrado un gran potencial en las industrias farmacéutica y alimentaria; se ha empleado en alimentos funcionales para la liberación de componentes bioactivos (Chau *et al.*, 2007).

Los recubrimientos comestibles se han aplicado para reducir el deterioro al formar una barrera semipermeable que permite extender la vida útil (Rojas-Graü *et al.*, 2008). El desarrollo de la formulación de estos recubrimientos se ha complementado con la integración de activos encapsulados que contribuyen a la preservación de las cualidades de fruta fresca cortada por medio de la liberación de sustancias que intervienen en las reacciones de deterioro durante el almacenamiento a bajas temperaturas (Embuscando and Huber, 2009).

Actualmente las películas y recubrimientos comestibles se elaboran a partir de una gran variedad de polisacáridos, proteínas, ceras naturales y resinas; ya sea como componentes únicos o combinados para desarrollar películas compuestas con las que se pretende crear una atmósfera modificada en el interior del fruto para retardar el proceso de maduración y senescencia de una forma similar a la de una atmósfera controlada que es mucho más costosa.

Se debe considerar el método de aplicación de estos recubrimientos debido a que este depende de las características del producto así como de los componentes del fluido empleado como recubrimiento; estos factores son descritos a detalle en el trabajo “Elaboración de



recubrimientos comestibles formulados con goma de mezquite y cera de candelilla para reducir la cinética de deterioro en fresco del limón persa (*Citrus latifolia* Tanaka)” realizado por la Dra. Elsa Bósquez-Molina (2003).

Dados los beneficios de los recubrimientos y la eficiencia en la integración de sistemas de talla nanométrica es importante el desarrollo de métodos que permitan su aplicación práctica y eficaz de estos recubrimientos. De la misma manera dichos componentes pueden interaccionar fisicoquímicamente con el alimento causando modificaciones en sus características organolépticas.

El hidrogenfriamiento es uno de los métodos más eficientes para cubrir el área total de los frutos, es por ello que los tiempos de enfriamiento son menores respecto a otros métodos (Teruel *et al.*, 2003). Este es uno de los métodos más comunes de preenfriamiento y consiste simplemente en la aplicación de agua con una temperatura alrededor de 1°C. Los productos que se adaptan a éste son algunas frutas y hortalizas de raíz.

El enfriamiento se produce al igual que cuando se emplea el aire frío; por conducción de calor desde el interior del fruto hasta su superficie y por convección entre ésta y el medio de enfriamiento. La capacidad del agua para absorber calor es mayor que la del aire, por lo que el descenso de temperatura se produce rápidamente.

Una de las variantes de este método es la hidrofluidización, que consiste en un sistema de recirculación en donde se sumerge el producto en un medio líquido a baja temperatura, el cual es bombeado a través de orificios o boquillas hasta un contenedor, creando así un lecho fluido de corrientes sumergidas que agitan el líquido aumentando la transferencia de calor a los alimentos (Brosnan and Sun, 2001). La hidrofluidización es un método que surgió a partir de la combinación del enfriamiento en lecho fluido y por inmersión, ofreciendo las ventajas de ambos métodos y compensando las desventajas como bajos coeficientes de transferencia de calor, pérdidas de humedad superficiales, altos consumos energéticos e incorporación de solutos al alimento (Jácome, 2011).



Debido a que los métodos de recubrimiento en frutos por inmersión y pulverización presentan dificultades en cuanto a la homogeneidad del recubrimiento, se utilizó un hidrofuidizador a fin de desarrollar una alternativa para el recubrimiento que a su vez permita la disminución de la temperatura en la fruta fresca cortada como pretratamiento para su almacenamiento en frío.

La modificación de los procesos convencionales para la preservación de alimentos ha mejorado su eficiencia y el tamaño de los equipos se ha reducido considerablemente. Los alimentos refrigerados y congelados representan el 68% de las actividades económicas relacionadas con las aplicaciones del frío. La hidrofuidización es una tecnología emergente que ha sido aplicada para realizar operaciones de congelación y preenfriamiento en productos hortofrutícolas.

La hidrofuidización representa una potencial aplicación con remarcables ventajas: la turbulencia superficial y la velocidad del medio refrigerante, cubren la superficie total del producto e incrementan el coeficiente superficial de transferencia de calor; el enfriamiento individual de alimentos, la adición de sustancias al medio de enfriamiento como antioxidantes, saborizantes y macronutrientes que conservan las propiedades nutricionales así como sensoriales en los alimentos (Peralta *et al.*, 2009). Sin embargo, no se ha estudiado como método para la aplicación de recubrimientos y por consecuencia es un amplio campo de investigación.

La aplicación uniforme de los recubrimientos en fruta cortada generalmente es una operación complicada, las técnicas de recubrimiento comúnmente empleadas son: inmersión, aspersion y contacto por cepillo. El propósito del presente trabajo fue establecer el proceso de hidrofuidización como un método de enfriamiento que pueda ser utilizado alternativamente en la aplicación de algún recubrimiento para la conservación de fruta fresca cortada.



---

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Fundamentos de fluidización.

Las expresiones “fluidización” y “lecho fluidizado” se utilizan para describir la condición de las partículas completamente suspendidas. La fluidización ocurre cuando un fluido (gas o líquido) pasa de forma ascendente a través de una cama de partículas. A bajas velocidades la cama permanece inmóvil; pero con un aumento en la velocidad, las partículas comenzaran a moverse y separarse una de la otra, entonces se dice que las partículas se expanden.

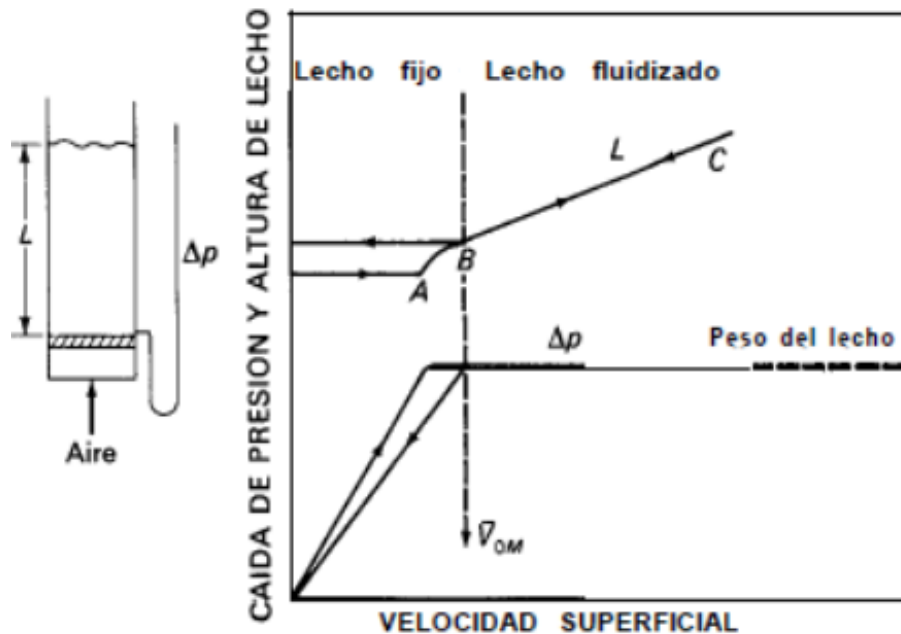
Los sólidos fluidizados pueden descargarse del lecho a través de tuberías y válvulas como un líquido, y esta fluidez es la principal ventaja del uso de la fluidización para el tratamiento de sólidos (McCabe *et al.*, 1991).

Si se continúa aumentando la velocidad, se alcanzará un punto en el cual se ejercerá una fuerza de arrastre por el fluido sobre las partículas, equilibrando la fuerza ejercida por la gravedad y por el peso neto de las partículas. Este es el punto mínimo de fluidización y en el cual las partículas son suspendidas por el movimiento ascendente de una corriente del fluido (Smith, 2007).

Para una cierta velocidad, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre las partículas y un posterior aumento de la velocidad provoca el movimiento de las partículas, lo anterior se representa en el punto A de la figura 1.

Al aumentar más la velocidad, las partículas están suficientemente separadas entre sí como para moverse en el lecho y comienza la verdadera fluidización (punto B). Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión a través del lecho permanece constante.

Cuando la caída de presión contrarresta el peso del lecho en un punto B, entonces este punto en lugar del A deberá considerarse como el correspondiente a la velocidad mínima de fluidización



**Figura 1.** Caída de presión y altura de lecho frente a velocidad superficial en un lecho de sólidos (McCabe *et al.*, 1991).

La velocidad superficial del fluido en la cama de partículas en el punto mínimo de fluidización es conocida como velocidad mínima de fluidización ( $v_{mf}$ ). La velocidad superficial está definida como el flujo volumétrico dividido por la sección transversal de la cama de partículas.

Cuando se excede la velocidad mínima de fluidización podrían ocurrir dos fenómenos. El primero es que la cama de partículas continúe expandiéndose uniformemente en el espacio, este fenómeno es conocido como fluidización particulada u homogénea y en general ocurre cuando el medio de fluidización es líquido. Alternativamente, un exceso de fluido provocará que éste pase a través de la cama de partículas en forma de burbujas.

Las partículas son agitadas y mezcladas violentamente a altas velocidades y las burbujas se elevan a través de la cama de partículas para romperse en la superficie, esto es conocido como fluidización agregativa o heterogénea y ocurre usualmente cuando el medio de fluidización es un gas (McCabe *et al.*, 1991; Smith, 2007).



En muchas aplicaciones de fluidización en alimentos, las partículas son pequeñas y ligeras cumpliéndose la condición de  $Re < 10$ . Por lo tanto, se puede emplear la relación de Kozeny-Carman para calcular la velocidad mínima de fluidización (Berk Z. , 2009):

$$v_{mf} \approx (D_p^2) \left[ \frac{(\rho_p - \rho)}{(150)(\mu)} \right] \left[ \frac{(\varepsilon^3)}{(1-\varepsilon)} \right] (g) \quad (1)$$

Para números de Reynolds elevados, superiores a aproximadamente 1000, la ecuación para la velocidad mínima de fluidización de Blake-Plummer considera la caída de presión a través del lecho igual al peso del lecho por unidad de área de la sección transversal y tomando en cuenta la fuerza de flotación del fluido desplazado (McCabe *et al.*, 1991):

$$v_{mf} \approx \left[ \frac{\varphi_s D_p g (\rho_p - \rho) \varepsilon^3}{1.75 \rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde  $v_{mf}$  es la velocidad mínima de fluidización,  $\varphi_s$  corresponde a la esfericidad de la partícula sólida,  $D_p$  es el diámetro de la partícula esférica,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho_p$  es la densidad de la partícula,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\varepsilon$  es la porosidad mínima para fluidización.

La ecuación 2 permite calcular la velocidad mínima de fluidización para  $Re > 10^3$  y es aplicable tanto a líquidos como a gases (McCabe *et al.*, 1991).

La generalización de que los líquidos favorecen una fluidización particulada de sólidos mientras que los gases favorecen una fluidización agregativa no es completamente válida, ya que hay que considerar la diferencia de densidad.

Un sólido de alta densidad que es fluidizado por un líquido puede presentar una fluidización agregativa, mientras que un sólido de baja densidad fluidizado por un gas a alta presión puede presentar una fluidización particulada. Las ventajas de la fluidización consisten en que el sólido se encuentra sujeto a una agitación vigorosa por el fluido o agente fluidizante. Dicho movimiento da lugar a elevadas velocidades de transmisión de calor (Jácome, 2011).



Cualquier objeto sumergido en la corriente de un fluido está sometido a una fuerza neta que resulta de los esfuerzos de corte y de las diferencias de presión causadas por el movimiento del fluido. La fuerza de arrastre es el componente paralelo a la dirección de flujo. El coeficiente de arrastre está definido como (Kreith, 2000):

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(\rho)(v)^2(A)} \quad (3)$$

En general el coeficiente de arrastre puede ser expresado en función del número de Reynolds, de la rugosidad relativa y fuerza de rozamiento  $F_D$ . Para  $1000 < Re < 200\,000$  el coeficiente de rozamiento es aproximadamente constante y las ecuaciones son:

$$C_D = 0.44 \quad (4)$$

$$F_D = \frac{0.055(\pi)(D_p^2)(v_{mf}^2)(\rho)}{gc} \quad (5)$$

$$v_{mf} = 1.75 \sqrt{\frac{(g)(D_p)(\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad (6)$$

La ecuación 6, es la velocidad límite de los sólidos durante la hidrofuidización y se aplica solamente para partículas relativamente grandes que caen en gases o fluidos de baja viscosidad.

## 1.2 Hidrofuidización.

El enfriador por hidrofuidización consiste esencialmente en un sistema de recirculación en donde se sumerge el producto en un medio líquido a baja temperatura. En este sistema se bombea el líquido de enfriamiento en dirección ascendente a través de orificios o boquillas hacia un recipiente de refrigeración generando chorros de líquido. De esta forma se obtiene un líquido altamente turbulento y un lecho fluidizado de productos, además de altos coeficientes de superficiales transferencia de calor.





Esta tecnología emergente ha sido desarrollada con el propósito de disminuir los tiempos de enfriamiento de los productos al sumergirse en agua (Verboven *et al.*, 2002). El preenfriamiento por medio de hidrogenfriadores es un método efectivo ya que puede enfriar rápidamente los productos y presenta la principal ventaja de no causar grandes pérdidas de humedad en el producto.

La desventaja del hidrogenfriamiento es que se debe de contar con suficiente agua y de un adecuado tratamiento de la misma la cual incluye un tratamiento con cloro en concentraciones de 50 a 100 ppm. Asimismo, también se debe tener un perfecto control sobre el pH, recomendándose en un valor de 7.0 para lograr la máxima efectividad del cloro en el agua del hidrogenfriador (BONH de México, 2008).

La modificación de los procesos convencionales de preservación de alimentos para aumentar la eficiencia y minimizar el tamaño de los equipos se ha convertido en una tendencia a nivel mundial. Los alimentos refrigerados y congelados representan en 68% del peso económico de las actividades relacionadas con aplicaciones de frío. Por esa razón es importante el desarrollo de sistemas de producción de frío a un menor costo, de tamaño pequeño y que permitan obtener altas velocidades de enfriamiento.

El hidrogenfriamiento por inmersión involucra un contacto directo del producto con el medio de enfriamiento líquido a baja temperatura, generalmente se emplean soluciones de NaCl, etanol, glucosa, etcétera o agua simplemente.

El principio de funcionamiento de un sistema de hidrogenfluidización se basa en los sistemas de chorros de choque, los cuales son mecanismos de enfriamiento bastante eficientes debido a que desarrollan altos coeficientes superficiales de transferencia de calor. Es un sistema de gran importancia a nivel industrial debido a sus aplicaciones en el enfriamiento de metales, turbinas, entre otras (Glynn and Murray, 2005).

Los sistemas de chorros de choque han sido empleados particularmente como un método alternativo para la congelación de alimentos debido a que sus características generan una alta turbulencia mejorando la calidad final del producto.



Es importante considerar que la eficiencia de los chorros de choque es afectada por factores como la velocidad del fluido a la salida del orificio, la geometría del orificio, las características superficiales del producto y el diseño del sistema (Jácome, 2011).

En la publicación “Desing and construction of hydrofluidization system: study of the heat transfer on a stationary sphere” desarrollado por Peralta y col., (2009); se revisan los criterios de diseño y parámetros de estudio en donde se hace mención de las remarcables ventajas que posee el sistema: un enfriamiento individual de alimentos, mayor coeficiente superficial de transferencia de calor, la adición de sustancias al medio de enfriamiento tales como antioxidantes, saborizantes y macronutrientes que extienden la vida útil conservando sus propiedades nutricionales así como sensoriales. Entre los factores más sobresalientes de operación que influyen directamente en el proceso de preenfriamiento por hidrofluidización se mencionan los siguientes:

- a) Diámetro de boquillas.
- b) Temperatura del medio de enfriamiento.
- c) Flujo volumétrico.
- d) Diámetro del producto.

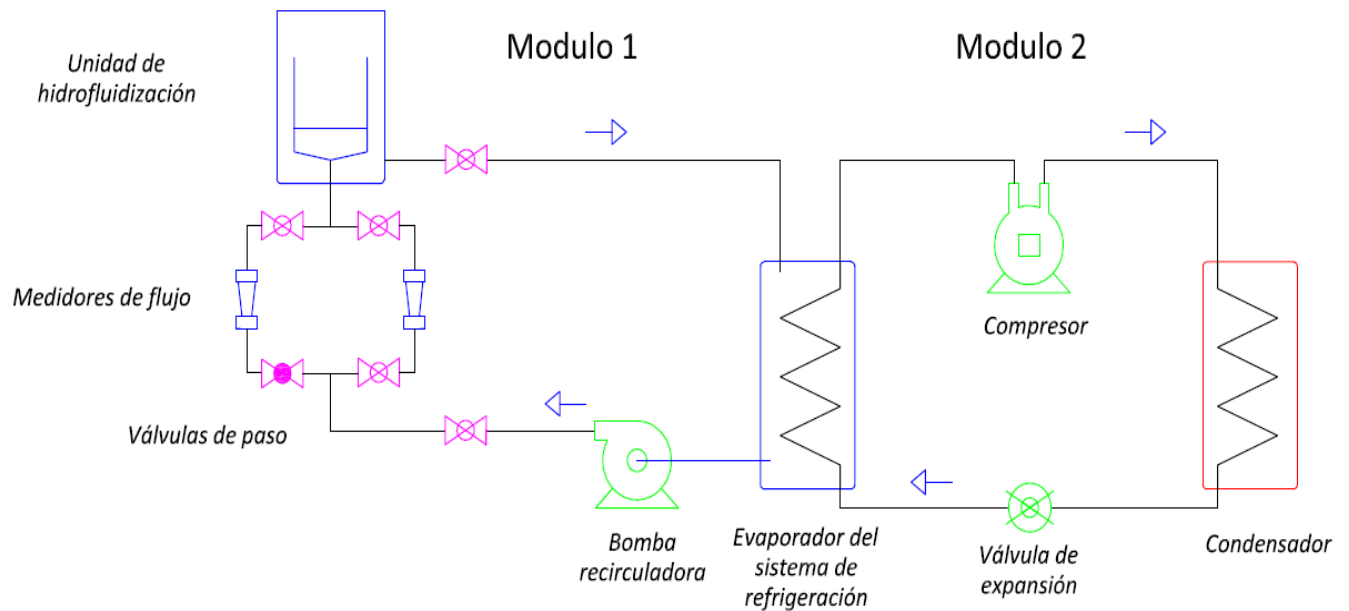
### **1.3 Componentes de un sistema de preenfriamiento por hidrofluidización.**

Los sistemas de hidrofluidización son compactos y versátiles, ya que permiten diversas modificaciones desde el punto de vista de operación. En la figura 2 se esquematiza un sistema de hidrofluidización que consiste generalmente en dos módulos; el primer módulo es un sistema de refrigeración compuesto de una unidad de compresión, condensación y válvula de expansión, así como de un intercambiador para retirar el calor proveniente del sistema en el medio de enfriamiento.

El segundo módulo está compuesto por una bomba que recircula el medio de enfriamiento a través de un conjunto de válvulas, tuberías y medidores de flujo hasta la unidad de hidrofluidización, la cual está compuesta por un tanque que posee en su base una placa con orificios o boquillas que generan los chorros fluidizantes.



Este medio de enfriamiento puede ser desde agua helada hasta hielo fluido, dependiendo de la aplicación, el tipo de producto y las condiciones de operación del sistema.



**Figura 2.** Componentes de un sistema por hidrofuidización (Peralta *et al.*, 2009).

- a) *Sistema de refrigeración:* consiste de un circuito de tuberías por donde fluye el refrigerante, incluyendo un evaporador, condensador, compresor, un termostato (figura 3); así como un tanque secundario para enfriar y recircular el medio de enfriamiento (Verboven *et al.*, 2002).
- b) *Unidad de bombeo:* el medio de enfriamiento es recirculado mediante una bomba a través de un sistema de tuberías hasta la unidad de hidrofuidización. También la compone un juego de válvulas de tipo mariposa o globo para regular el flujo del medio de enfriamiento por el sistema, así como medidores del flujo volumétrico. Se emplean bombas centrífugas con variador de velocidades y manómetros para registrar la presión a la que descarga la bomba (Peralta *et al.*, 2009).



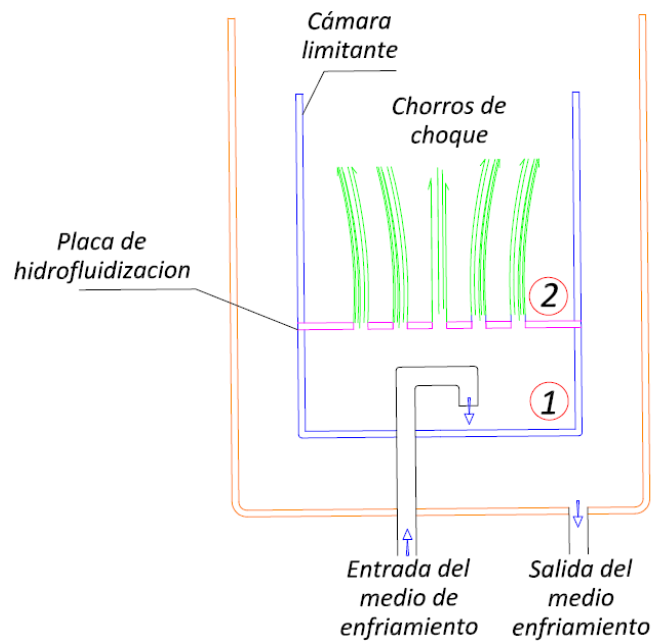
- c) *Unidad de hidrofuidización*: está conformada por una cámara de fondo para homogenizar el flujo antes de generar los chorros de líquido, un tanque limitante por encima de la placa con las boquillas para hidrofuidizar donde se colocan los productos. Un tanque anular que recibe el líquido de los dos anteriores, para recircularlo al tanque secundario de enfriamiento (Verboven *et al.*, 2002).



**Figura 3.** Sistema piloto por hidrofuidización (Peralta *et al.*, 2009).

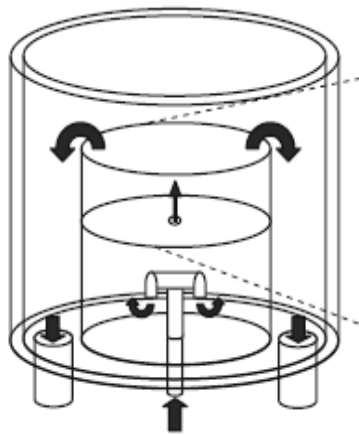
Verboven y Nicolai (2002) en su publicación “Surface heat transfer coefficients to stationary spherical particles in an experimental unit for hydrofluidisation freezing of individual foods” sugieren dichos criterios, y se hace mención en que el diseño de la unidad de hidrofuidización es de gran importancia para lograr el principio de funcionamiento en el que se basa este sistema para congelar o preenfriar alimentos.

La salida de la tubería que descarga directamente a la cámara de fondo puede tener diferentes configuraciones para contribuir a la mejor homogenización del fluido antes de formar los chorros de agua. Estas configuraciones pueden ir desde una prolongación de 90°, hasta una configuración de descarga en “T” para evitar que el fluido salga a través de las boquillas de hidrofuidización antes de llenarse por completo la cámara de fondo con el medio de enfriamiento.



**Figura 4.** Vista frontal de la cámara de hidrofluidización (Verboven *et al.*, 2002).

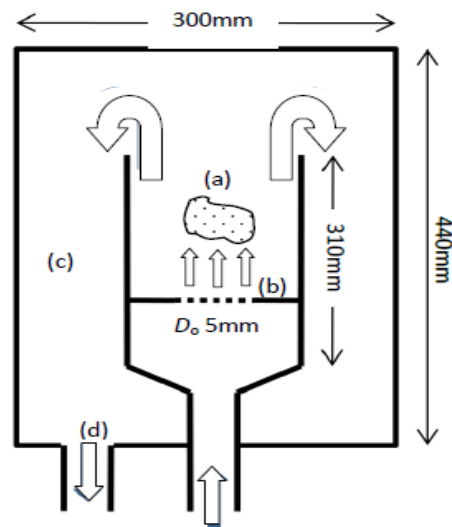
La descarga del fluido al tanque anular puede ajustarse mediante orificios de drenaje en la parte superior de las paredes del tanque limitante para recircular el exceso fluido y a su vez que los productos no salgan del área directa de fluidización por los chorros de líquido. Esta descarga puede ser directa llenándose por completo el tanque limitante cuando se desee tratar alimentos de manera individual o en pequeñas cantidades.



**Figura 5.** Diseño de la unidad de hidrofluidización (Peralta *et al.*, 2010).



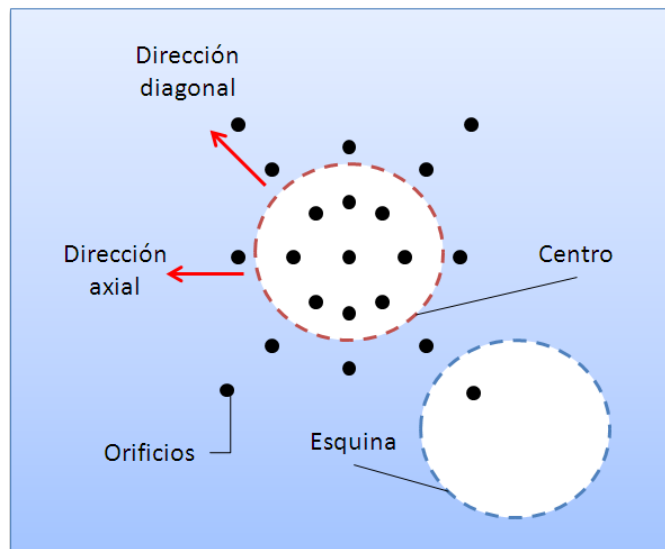
En la figura 4 se esquematiza la unidad de hidrofluidización, donde la descarga del fluido a la cámara de fondo es de  $90^\circ$  (1) y la salida del fluido al tanque anular es controlada por orificios en la parte superior de las paredes en la cámara limitante (2). La circulación de fluido del tanque anular al tanque de enfriamiento es a través de una tubería en la parte inferior del tanque anular. En la figura 5 se muestra otro diseño de la unidad de hidrofluidización, en el que la descarga del fluido a la cámara de fondo se encuentra en forma de "T" y la salida del fluido al tanque anular es directa.



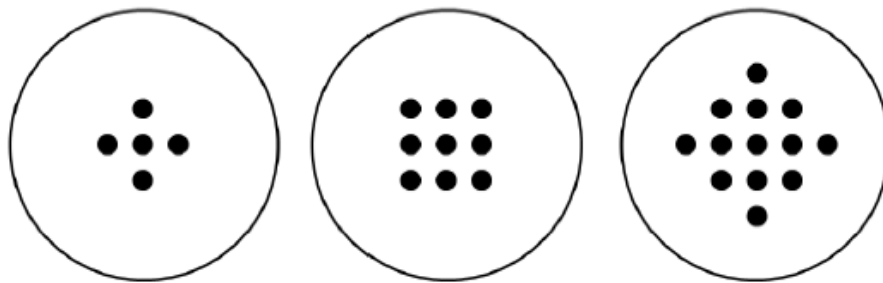
**Figura 6.** Unidad de hidrofluidización, (a) tanque experimental, (b) charola perforada, (c) rebosadero, (d) retorno de líquido (Jácome, 2011).

Recientemente se han realizado pruebas de preenfriamiento en papas, donde la unidad de hidrofluidización posee la descarga del fluido a la cámara de fondo de manera directa (figura 6). La placa para crear los efectos de la fluidización puede tener diferentes configuraciones en cuanto a la distribución y el diámetro de las boquillas (orificios) en la superficie de la placa.

Estas boquillas deben ubicarse en el centro de la cámara limitante; sin embargo todas las consideraciones mencionadas deben crear un flujo de circulación dentro del tanque que mejore aún más la fluidización de los alimentos. Según la configuración de estas boquillas, se debe realizar un análisis del nivel de agitación en cada una de las zonas del tanque limitante como se muestran en la figuras 7 y 8:



**Figura 7.** Configuración de las boquillas para hidrofuidización (Verboven *et al.*, 2002).



**Figura 8.** Arreglo de orificios de las boquillas para hidrofuidización (Jácome, 2011).

#### 1.4 Fenómenos de transporte presentes durante la hidrofuidización.

El transporte molecular en el fluido refrigerante durante la hidrofuidización de productos alimenticios puede ser de momento lineal, calor y de masa; los cuales se llevan a cabo debido a los movimientos aleatorios de las moléculas individuales.

Cada molécula se mueve aleatoriamente produciendo flujos en todas direcciones. Por lo tanto, si existe un gradiente de concentración de la propiedad, habrá un flujo neto desde la concentración más alta a la más baja. Esto sucede porque se difunde el mismo número de moléculas en todos sentidos entre las regiones de alta y baja concentración (Geankoplis, 1998).



En este trabajo se revisaron a fondo los fenómenos de momento lineal y transferencia de calor presentes durante la hidrofuidización, así como su influencia en el preenfriamiento y recubrimiento de fruta fresca cortada empleando como medio de enfriamiento un fluido modelo de dispersión de nanocápsulas. Estos causados mediante la recirculación del fluido por la bomba y el gradiente de temperatura existente entre el fruto y la dispersión de nanocápsulas.

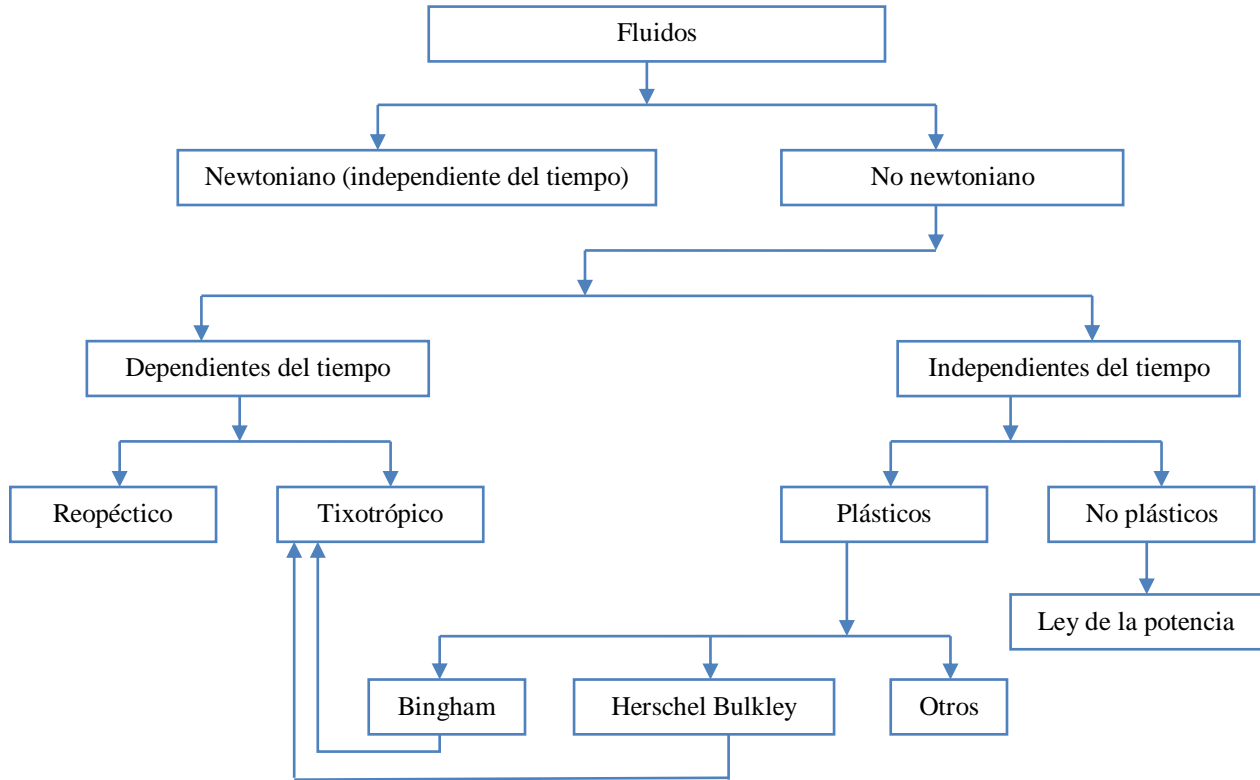
Para caracterizar el comportamiento al flujo se suele recurrir al empleo de modelos matemáticos que expresan con una ecuación la relación entre el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) y la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ), dichos comportamientos se clasifican comúnmente como se muestra en la figura 9. El fluido es un material que siempre fluye bajo la aplicación continua de un esfuerzo, la deformación crece mientras el esfuerzo sea aplicado (Steffe, 1996).

El comportamiento del material se visualiza al graficar el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla; la curva resultante se modela matemáticamente. Otra representación gráfica común en los fluidos es la curva de viscosidad ( $\mu$ ), la cual está en función de la velocidad de cizalla (Steffe, 1996).

Como su nombre lo indica, el preenfriamiento por hidrofuidización, emplea agua como medio de enfriamiento, la cual ha sido referencia del comportamiento newtoniano de ciertos fluidos. En un fluido newtoniano el esfuerzo aplicado y la deformación producida son proporcionales a la constante denominada la viscosidad del fluido ( $\mu$ ) (Steffe, 1996).

El comportamiento del medio de enfriamiento y la temperatura del mismo, son factores importantes a considerar en el diseño de un preenfriador por hidrofuidización. El comportamiento de fluidos newtonianos dentro de una tubería así como el factor de fricción y las caídas por presión provocadas por accesorios, válvulas y la propia bomba del sistema han sido ampliamente estudiados por lo que la caracterización del sistema con este tipo de fluidos resulta menos compleja.





**Figura 9.** Comportamiento reológico de los fluidos (Berk, 2009).

En fluidos no newtonianos, en donde no es constante la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla, la viscosidad del fluido no permanece constante. Estos materiales en lugar de tener un coeficiente viscosidad poseen un coeficiente de viscosidad aparente, que se define como la relación entre el esfuerzo de cizalla puntual y la velocidad de cizalla correspondiente cuando la relación entre ambos no es lineal (Steffe, 1996).

Existen diversos modelos matemáticos que explican el comportamiento de los fluidos; el modelo que describe el comportamiento para los fluidos fluidificantes es el modelo de la potencia (Steffe, 1996).

Los fluidos fluidificantes también llamados pseudoplásticos, son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de cizallamiento que cuando son sometidos a un cizallamiento lento. La viscosidad aparente depende de la velocidad de cizalla, pero no del tiempo en que están sometidos al esfuerzo de cizalla. La velocidad de cizalla aumenta en proporciones más



altas que el esfuerzo aplicado por lo que la viscosidad aparente disminuye a medida que la velocidad de cizalla aumenta (Steffe, 1996).

Estos fluidos pueden presentar tixotropía, es decir, después de un tiempo de cizallamiento la viscosidad del fluido decrece, cambiando así el comportamiento del fluido. Este fenómeno es irreversible y provoca que la estructura de los componentes del fluido se modifique (Steffe, 1996).

Se ha estudiado el comportamiento reológico de dispersiones de nanocápsulas compuestas por mezclas de xilitol, sorbitol, manitol, maltodextrinas y algunos monosacáridos. Estas dispersiones presentan un comportamiento fluidificante que cumple con los modelos de la potencia y Herschel Bulkley (Schilling *et al.*, 2002).

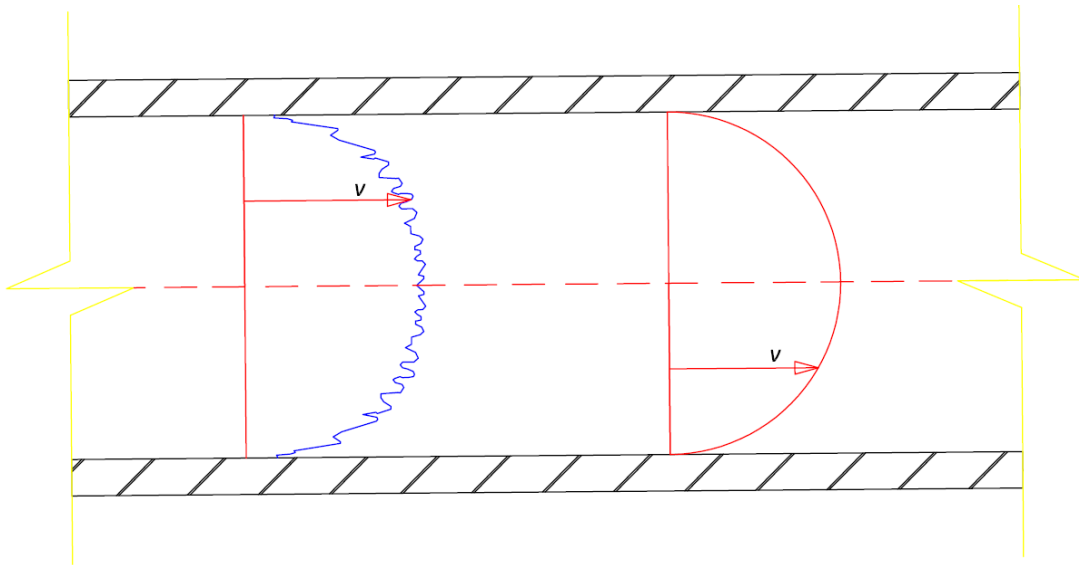
Se debe considerar que el comportamiento de estas dispersiones de nanocápsulas es distinto al de un fluido newtoniano por lo que es necesario contemplar estos cambios al emplearlas en un preenfriador por hidrofluidización.

Cuando un fluido fluye a través de una tubería o entre dos placas planas, se representan dos tipos de flujo, dependiendo de la velocidad de dicho fluido. A velocidades bajas, fluye como un patrón bien ordenado donde se supone que las capas de fluido se deslizan una sobre otra.

El movimiento en régimen laminar es ordenado, estratificado: el fluido se mueve como clasificado en capas que no se mezclan entre sí. A este régimen o tipo de flujo se le llama flujo laminar y obedece la ley de Newton (Geankoplis, 1998).

A velocidades más altas se forman remolinos, el movimiento en régimen turbulento es caótico (figura 10) por lo que la distribución de velocidades en una tubería de sección circular es logarítmica.

Al aumentar la velocidad, llega a cierto límite y su movimiento se vuelve errático, la velocidad a la que se presenta el cambio de tipo de flujo se llama *velocidad crítica* (Bird *et al.*, 1992).



**Figura 10.** Distribución de velocidades en régimen turbulento (Bird *et al.*, 1992).

Con diversos estudios se ha podido demostrar que la transición del flujo laminar al turbulento en tuberías no está sólo en una función de la velocidad, sino también de la densidad, viscosidad del fluido y del diámetro del tubo.

Estas variables se combinan en la expresión del número de Reynolds, que es adimensional. La inestabilidad del flujo que conduce a un régimen turbulento está determinada por la relación de las fuerzas cinéticas y las fuerzas viscosas de la corriente fluida (Geankoplis, 1998).

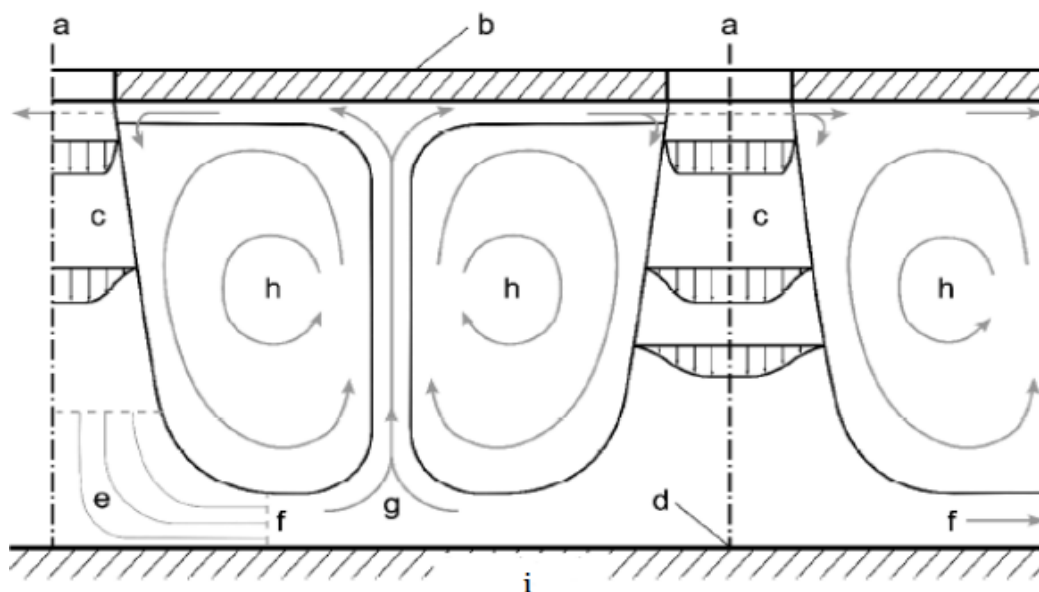
Para fluidos newtonianos:

$$\text{Re} = \frac{(D)(v)(\rho)}{\mu} \quad (7)$$

Cuando el número de Reynolds es menor de 2,100 para una tubería circular recta, el flujo siempre es laminar. Cuando el valor es superior a 4,000 el régimen será turbulento; entre estos dos valores será *región de transición* (Geankoplis, 1998).



En la figura 11 se esquematiza el patrón de flujo en un sistema de chorros de choque, el cual es muy útil para estudiar las condiciones en que desarrolla el patrón de flujo en un sistema de preenfriamiento por hidrofuidización.



**Figura 11.** Patrón de flujo debido a las interferencias chorro-chorro en un sistema de chorros de choque múltiple, a) orificio, b) placa con orificios, c) chorro libre, d) punto de estancamiento, e) zona de estancamiento, f) flujo secundario, g) flujo recirculado, h) vórtices, i) superficie de choque (Weigand and Spring, 2009).

### 1.5 Transferencia de calor aplicada a sistemas de preenfriamiento por hidrofuidización.

Los alimentos son sistemas complejos debido a que son materiales compuestos por diversas biomoléculas susceptibles a cualquier fenómeno, por lo que no pueden tratarse idealmente, de esta manera la transferencia de calor es en estado no estacionario: su temperatura cambia respecto a la posición y al tiempo.

Para el estudio de los mecanismos de transferencia de calor que se presentan durante el preenfriamiento por hidrofuidización, es importante considerar ecuaciones que proporcionen soluciones de acuerdo a la forma geométrica de producto a enfriar.



En sólidos con forma regular esférica, la función de Bessel resuelve el estudio de transferencia de calor en estado no estacionario de la siguiente manera (Kreith, 2000):

$$\frac{T_p - T_m}{T_i - T_m} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\text{sen}(\lambda_n R) - \lambda_n R \cos(\lambda_n R)}{\lambda_n R - \text{sen}(\lambda_n R) \cos(\lambda_n R)} \right] \left\{ \exp \left[ (\lambda_n^2 R^2 Fo) \left( \frac{\text{sen}(\lambda_n r)}{\lambda_n r} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

La conducción en un sistema por hidrofuidización, se presenta en el producto a preenfriar a través del intercambio de energía cinética en sus moléculas, es decir, existe una transmisión de energía calorífica de las moléculas con mayores niveles de energía (en el centro producto) a aquellas con un menor nivel (superficie del producto).

En los sistemas sólidos como lo son por ejemplo las frutas y hortalizas, la única forma de transferencia de calor es por este mecanismo debido a que los electrones entran en movimiento solo si están libres y transportan energía cuando existe un gradiente de temperaturas en el sistema; la ley de Fourier de la conducción de calor afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el sistema (Geankoplis, 1998).

En un sistema de hidrogenfriamiento, el mecanismo de transferencia de calor por el cual el medio de enfriamiento absorbe el calor proveniente del producto, es por convección. Al existir una diferencia de temperatura en el interior del fluido se producirá un movimiento en el mismo, este transfiere calor de una parte del fluido a otra mediante la convección (Bird *et al.*, 1992). La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con los que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

La ley del enfriamiento de Newton, la cual establece la velocidad con la que un fluido transfiere calor por movimiento es la siguiente (Dinçer, 1997):

$$q_0 = -(h)dT \quad (9)$$

Durante la hidrofuidización, las turbulencias creadas por el sistema en el medio de enfriamiento aceleran la disminución de la temperatura en el producto, debido a que se encuentra en contacto constante con este. Si bien, el medio de enfriamiento fluye alrededor del



producto nos encontramos con el estudio de dos sistemas diferentes (líquido y sólido), por lo cual los mecanismos de transferencia de calor por convección y conducción estarán presentes durante el preenfriamiento del producto.

El número adimensional de Nusselt permite establecer que mecanismo de transferencia de calor predomina durante enfriamiento de un alimento. Está determinado por la siguiente ecuación (Dinçer, 1997):

$$Nu = \frac{(h)(D)}{k_T} \quad (10)$$

$0 < Nu < 1$ : Predomina la conducción

$1 \leq Nu < 2$ : Predomina la convección natural o libre

$Nu \geq 2$ : Predomina la convección forzada

La transferencia de energía desde el alimento hacia el medio de enfriamiento puede ser estudiada por medio de las variables incluidas en el número adimensional de Biot:

$$Bi = \frac{(h)(x)}{k_T} \quad (11)$$

Este número adimensional relaciona la velocidad de enfriamiento en estado no estacionario; es afectado por la velocidad de transferencia de calor entre el medio y el alimento, así como la velocidad de transferencia de calor dentro del alimento. Siendo una relación de resistencias convectivas y conductivas.

Cuando el Biot es menor que 0.2 la resistencia interna a la transferencia de calor se considera despreciable en comparación con la resistencia externa. Entonces, se considera que la temperatura a través del producto es uniforme durante el proceso, por lo tanto se puede aplicar la ley de Newton de enfriamiento para obtener los parámetros de enfriamiento durante la hidrofuidización, los cuales están determinados por las condiciones de operación y el tipo de alimento. Esta ley puede ser expresada de la siguiente forma (Rennie, 1999):



$$Y = \frac{T_p - T_m}{T_i - T_m} = e^{-\left[\frac{(h)(A)}{(\rho)(C_p)(V)}\right](t)} \quad (12)$$

Para valores de Biot mayores a 10, el coeficiente convectivo es lo suficientemente grande que hace a la conductividad térmica un factor limitante. Por lo tanto, la diferencia de temperaturas entre la superficie del producto y el medio de enfriamiento es despreciable.

Cuando el número de Biot se encuentra entre 0.2 y 10, existen resistencias internas y externas. Para esta situación la relación adimensional de temperaturas ( $Y$ ), es función del número de Biot ( $Bi$ ) y del número de Fourier ( $Fo$ ).

$$Fo = \frac{k_T}{(\rho)(C_p)(x)} \quad (13)$$

Las gráficas de tiempo-temperatura basadas en la relación adimensional de temperatura, número de Fourier y el Biot, se pueden usar para encontrar la solución a problemas de transferencia de calor en formas definidas como esfera, cilindro infinito y placa infinita.

En la hidrofuidización de alimentos, se debe estudiar la forma en la que el flujo del medio de enfriamiento en torno al alimento afecta la transferencia de calor, por lo que se requiere conocer cómo se modifica el coeficiente superficial de transferencia de calor en función a las variables de operación. Diversos autores han evaluado el coeficiente superficial de transferencia de calor en sistemas hidrofuidizados, concluyendo que varían en función del tipo de medio de enfriamiento y sus propiedades termofísicas, las condiciones del flujo, la turbulencia, el tamaño del alimento y la agitación en el medio, la cual determina la distribución espacial de los coeficientes de transferencia de calor (Jácome, 2011).

El diseño de los sistemas de hidrogenfriamiento y las especificaciones de los parámetros del proceso requieren de una estimación adecuada de los tiempos de preenfriamiento en frutas y hortalizas, realizando los ajustes apropiados que consideren la naturaleza propia del alimento para evitar cualquier tipo de deterioro en el mismo (Ravindra and Goswami, 2008).

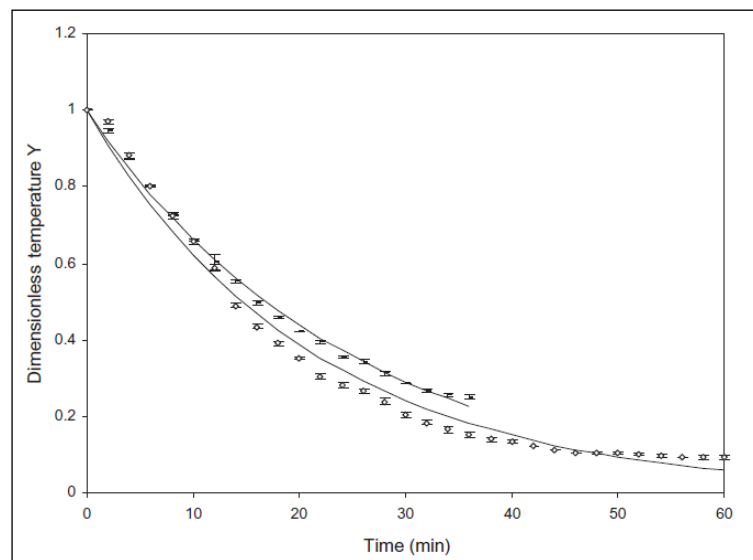


Para frutas y hortalizas de forma irregular donde sus propiedades termofísicas son dependientes de la temperatura o con otros factores de variación, no es posible realizar una solución exacta analítica de los tiempos de hidrogenfriamiento mediante la ecuación de transferencia de calor de Fourier.

Estos tiempos pueden ser resueltos con estimaciones numéricas apropiadas como el método del elemento finito o diferencias finitas a través de programas computacionales que resuelven la ecuación de Fourier contemplando las condiciones antes mencionadas.

Todos los procesos de hidrogenfriamiento exhiben comportamiento similar; la temperatura en el centro térmico del alimento decrece exponencialmente, este comportamiento se puede apreciar en la figura 12 en donde se aprecia dicho comportamiento (Ravindra and Goswami, 2008).

Fricke y Becker (2002) explican en su publicación “Hydrocooling time estimation methods” las consideraciones que se deben realizar con respecto a las ecuaciones que determinan los parámetros de enfriamiento.



**Figura 12.** Curva de hidrogenfriamiento en mangos (Ravindra and Goswami, 2008).





La determinación de estos parámetros es muy importante durante el preenfriamiento por hidrofluidización debido a que de esta manera pueden ser comparados estos parámetros con otros métodos comunes de preenfriamiento, así como la caracterización de determinado producto durante la disminución de su temperatura dentro del sistema.

El coeficiente de enfriamiento representa el cambio en la temperatura del producto por unidad de tiempo por cada grado de diferencia de temperaturas entre el producto y el medio de enfriamiento, este puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$CC = \frac{\ln Y}{t} \quad (14)$$

La mayoría de las veces no se cumple esta condición en la ley de Newton, debido a que el preenfriamiento es un proceso muy rápido. Es inevitable despreciar el gradiente de temperaturas dentro del producto por lo que la asíntota al tiempo cero intercepta la relación de temperaturas en un valor mayor o menor que la unidad. En este caso el coeficiente de enfriamiento puede ser expresado de la siguiente forma:

$$CC = \frac{(\ln Y_1 - \ln Y_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (15)$$

El tiempo en el que se reduce a un medio la diferencia de temperaturas entre el producto y el medio de enfriamiento se conoce como tiempo medio de enfriamiento (Z), y cuando la diferencia de temperaturas se reduce siete octavos se conoce como tiempo siete octavos de enfriamiento (S), teóricamente estos tiempos de enfriamiento son independientes de la temperatura inicial del producto.

Los tiempos de enfriamiento se pueden predecir usando el coeficiente de enfriamiento; este es una indicación de la resistencia al enfriamiento en un producto alimenticio objeto de refrigeración. Este coeficiente 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 sus alrededores (Dinçer, 1997).



El coeficiente de enfriamiento se obtiene de la pendiente de los valores  $\ln Y$  respecto la curva de tiempo, construida sobre un eje semi-logarítmico de los datos experimentales de tiempo y temperatura. El coeficiente de enfriamiento depende de la capacidad calorífica ( $Cp$ ) y la conductividad térmica ( $k_T$ ) del medio de enfriamiento. El tiempo de enfriamiento puede ser estimado usando este coeficiente para un proceso en particular (Becker and A. Fricke, 2002):

$$t = -\left(\frac{1}{CC}\right)\left[\ln\left(\frac{Y}{j}\right)\right] \quad (16)$$

El factor lag ( $j$ ) es una medida del tiempo entre el comienzo del enfriamiento y el punto en el cual la pendiente del ( $\ln Y$ ) respecto al tiempo de enfriamiento ( $t$ ) empieza a ser constante, es decir, presenta un comportamiento lineal. Esta en función del tamaño, la forma y las propiedades térmicas del alimento, al igual que el coeficiente superficial de transferencia de calor, la conductividad térmica y la difusividad térmica cuantifica la resistencia a la transferencia de calor del producto sus alrededores. De aquí la relación del factor lag ( $j$ ) con el número de Biot (Dinçer, 1997).

En las aplicaciones de enfriamiento en alimentos, la velocidad de reducción de temperatura está directamente asociada con los tiempos de operación. La determinación del tiempo medio de enfriamiento y del tiempo 7/8 de enfriamiento son los parámetros más comunes para estudios de conservación de alimentos a bajas temperaturas (Dinçer, 1997).

Los tiempos de enfriamiento en alimentos se ven influenciados por las propiedades térmicas del alimento, sus propiedades y dimensiones físicas, la geometría y propiedades termofísicas del material contenedor para envase y del medio de enfriamiento (Dinçer, 1997). Estos tiempos de enfriamiento son útiles para caracterizar el proceso de hidrogenenfriamiento como se muestra en la figura 13. El tiempo medio de enfriamiento se refiere al tiempo requerido para reducir la diferencia de temperatura entre el alimento y el medio de enfriamiento a la mitad. Esto es equivalente al tiempo necesario para reducir la relación adimensional de temperatura ( $Y$ ) a la mitad.



El tiempo medio de enfriamiento ( $Z$ ) es independiente de la temperatura inicial del alimento y se mantiene constante a lo largo el período de enfriamiento, siempre que la temperatura del medio se mantenga constante.

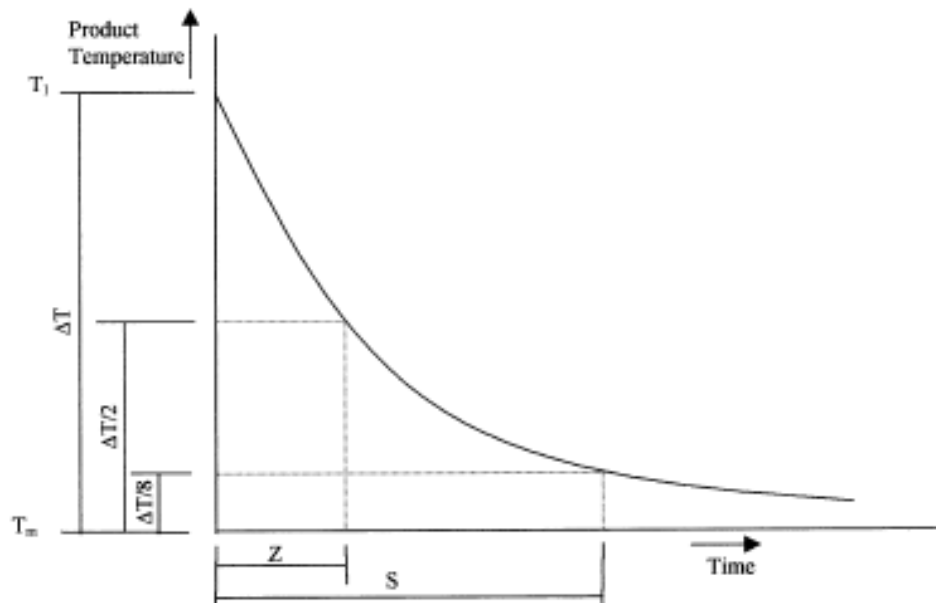
El tiempo de hidrogenfriamiento para frutas y vegetales, puede ser determinado mediante la sustitución del valor de ( $Z$ ) en la siguiente ecuación (Becker and A. Fricke, 2002):

$$t = \frac{- (Z)(\ln Y)}{(\ln 2)} \quad (17)$$

De la misma manera el tiempo medio de enfriamiento puede determinarse en función del coeficiente de enfriamiento y la relación adimensional de temperatura ( $Y$ ), mediante la siguiente ecuación (Dinçer, 1997):

$$Z = \frac{\ln 2 (Y)}{(CC)} \quad (18)$$

En cuanto al parámetro de  $7/8$  del tiempo de enfriamiento, describe la velocidad de enfriamiento en términos del tiempo necesario para reducir la temperatura del producto por  $7/8$  de diferencia entre la temperatura del producto y el medio de enfriamiento.



**Figura 13.** Caracterización de un proceso de preenfriamiento (Brosnan and Sun, 2001).



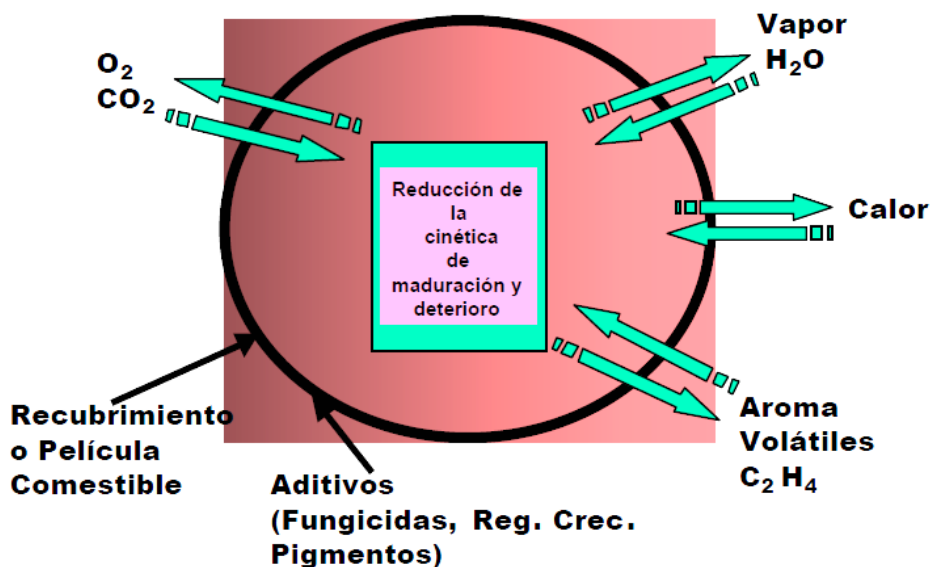
Este parámetro de enfriamiento se puede obtener en función del coeficiente de enfriamiento y la relación adimensional de temperatura ( $Y$ ) (Dinçer, 1997):

$$S = \frac{\ln 8(Y)}{(CC)} \quad (19)$$

### 1.6 Recubrimientos comestibles.

El incremento de la demanda de productos frescos y seguros ha provocado el desarrollo de los recubrimientos comestibles. Como una alternativa a las películas plásticas se pueden usar recubrimientos basados en carbohidratos, proteínas y lípidos, que por su composición permiten que sean comestibles.

Estos recubrimientos forman una barrera semipermeable y su principal objetivo es extender la vida útil de la fruta fresca, por medio de la reducción de la deshidratación, intercambio gaseoso y velocidades de reacción oxidativas (Rojas-Graü *et al.*, 2007). Actualmente, los recubrimientos son ampliamente usados en la preservación de alimentos mínimamente procesados y almacenados a baja temperatura (4 - 8°C).



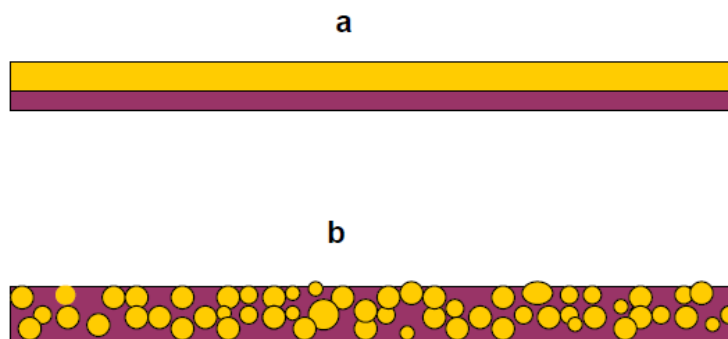
**Figura 14.** Funciones selectivas y activas de un recubrimiento (Bósquez-Molina *et al.*, 2003).



En cualquier caso la selección de los componentes de una formulación puede obedecer a distintas motivaciones: si se busca reducir la pérdida de humedad del producto se recomienda usar un lipocoloide ó si se desea controlar el flujo de gases como O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> es frecuente el uso de hidrocoloides.

A menudo se requiere un doble propósito por lo que es deseable un equilibrio entre ambos materiales, lo que sugiere la selección de compuestos que favorezcan el control de un balance hidrofílico-lipofílico (Valle-Guadarrama *et al.*, 2008).

Una de las ventajas de esta tecnología es el hecho de que estos materiales pueden servir como vehículos de otros ingredientes con un propósito específico diferente, así por ejemplo, se han incorporado en las formulaciones agentes antimicrobianos, saborizantes, antioxidantes y pigmentos. Los recubrimientos desarrollados con la combinación de sustancias hidrofóbicas y sustancias hidrofílicas básicamente pueden tener dos formas: una cubierta en bicapa o un recubrimiento emulsificado (figura 15).



**Figura 15.** Recubrimiento en bicapa (a) y emulsificada (b) (Bósquez-Molina *et al.*, 2003).

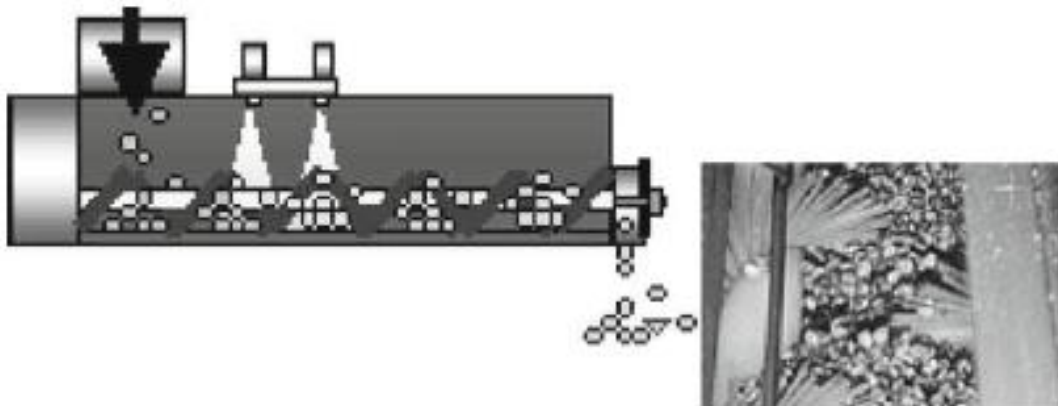
Estos materiales se aplican directamente en la superficie de los productos y llegan a formar parte de estos. Las principales formas de aplicación de estos recubrimientos son: inmersión, aspersión (figura 16), por contacto con cepillos y por lecho fluidizado; los cuales son ampliamente utilizados en la industria alimentaria y farmacéutica para recubrir dulces, semillas y fármacos.



También existe un método en el que el recubrimiento se aplica por aspersion mientras el producto se encuentra en un recipiente en rotación. Sin embargo, una de las desventajas de algunos de estos métodos es que se forman aglomerados, es decir, el recubrimiento no es uniforme. La elección del método para aplicar un recubrimiento depende del producto a recubrir y de las características del fluido utilizado.

La viscosidad es muy importante debido a que el proceso de aspersion requiere una viscosidad baja, mientras que la inmersión requiere de una alta viscosidad. Por estas razones, el entendimiento reológico de las dispersiones empleadas como recubrimiento asegura que las condiciones requeridas por cada proceso sean adecuadas.

Estos recubrimientos pueden provocar que algunas propiedades organolépticas de los alimentos se modifiquen y por esta razón los consumidores rechazan estos productos.



**Figura 16.** Recubrimiento de queso por aspersion en un tornillo rotatorio (Embuscado and Huber, 2009).

Dependiendo de la concentración de la dispersión utilizada como recubrimiento, el producto absorberá cierta cantidad de recubrimiento y cuando sea sometida a un proceso de estabilización, formará la capa protectora en la superficie del alimento. En muchos casos, es necesario incluir en la formulación un plastificante. Estos componentes son de bajo peso molecular y son adicionados para modificar la rigidez de los recubrimientos, debido a que



reducen las fuerzas intermoleculares e incrementan la movilidad de las cadenas poliméricas. Algunos plastificantes de grado alimenticio pueden ser glicerol, manitol, sorbitol y sacarosa.

Como con cualquier aditivo, el beneficio tiene que justificar el costo adicional del uso de los recubrimientos. El costo de los componentes de los recubrimientos es menor en comparación con el costo de los equipos requeridos para su aplicación y estabilización.

En el caso de frutas y hortalizas, el uso de una tecnología que pueda llevar a cabo el enfriamiento y la aplicación de un recubrimiento sería una importante aportación a los métodos de conservación de alimentos.

### **1.7 Nanotecnología.**

La nanotecnología es el entendimiento y manipulación de materiales a las escalas atómica, molecular y macromolecular. Estas tecnologías han mostrado un gran potencial en las industrias farmacéutica y alimentaria; se han empleado en alimentos funcionales para la liberación de componentes bioactivos (Chau *et al.*, 2007). Estos componentes biológicos pueden ser vitaminas, sabores, antimicrobianos y antioxidantes.

Actualmente existen distintos métodos para la preparación de partículas en escala nanométrica a partir de distintos polímeros; estos pueden ser categorizados en dos grupos dependiendo de los pasos que se lleven a cabo durante su proceso de elaboración.

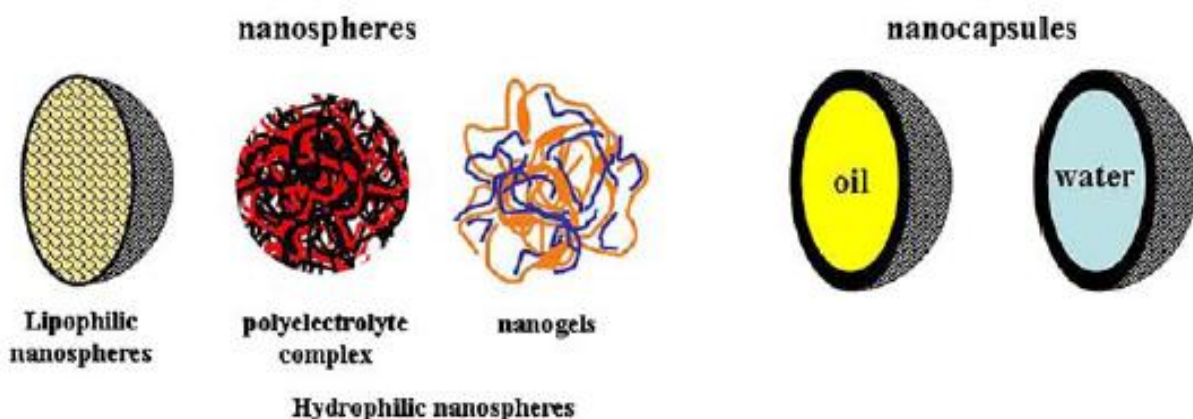
Ejemplos del primer grupo son el método de emulsificación-difusión, emulsificación- evaporación y emulsificación-coacervación. Los cuales están basados en dos pasos: el primero es la preparación de la emulsión, mientras el segundo está basado en la formación de la partícula por precipitación del polímero.

El segundo grupo está basado en la precipitación del polímero bajo condiciones de dispersión y formación de la partícula a partir de una solución de polímero o interacción de sus macromoléculas, o bien por síntesis de polieléctrolitos complejos. Ejemplos de este tipo de procedimientos incluyen el desplazamiento de solvente, también llamado nanoprecipitación, difusión de solvente o deposición interfacial (Mora-Huertas *et al.*, 2011).



Existen muchos componentes biológicos que tienen poca solubilidad en agua, es decir, tienen poca estabilidad en medio acuoso. Sin embargo, en años recientes han surgido tecnologías que pueden resolver este tipo de problemas. Esta tecnología se conoce como portadores coloidales de fármacos (Colloidal drug carriers, CDC), debido a su origen en la industria farmacéutica. Los CDC se definen solo en base a su tamaño y son partículas cuyo tamaño es menor a 1  $\mu\text{m}$ .

Aunque, algunos científicos establecen como límite máximo 0.5  $\mu\text{m}$ ; los CDC son muy heterogéneos en aspectos como: estabilidad termodinámica, composición química y estado físico. Incluyendo sólido, líquido, o dispersiones líquido cristalinas. Los ejemplos más importantes son nanopartículas, nanoemulsiones, nanocápsulas, liposomas, nanosuspensiones, micelas y microemulsiones (Naztruzzi, 2005). En este proyecto se utilizó un fluido modelo de nanocápsulas para recubrir fruta fresca cortada, por lo que solo se citará información acerca de esta tecnología



**Figura 17.** Representación de nanoesferas y nanopartículas (Vauthier and Bouchemal, 2009).

Generalmente, las nanopartículas son definidas como partículas sólidas coloidales en las cuales se incluyen nanoesferas y nanocápsulas (figura 17). Estas son preparadas por medio de métodos de polimerización y síntesis con polímeros preformados.

Las nanocápsulas son sistemas poliméricos coloidales, que como principal característica poseen un núcleo lipofílico rodeado por una capa polimérica. El componente bioactivo se

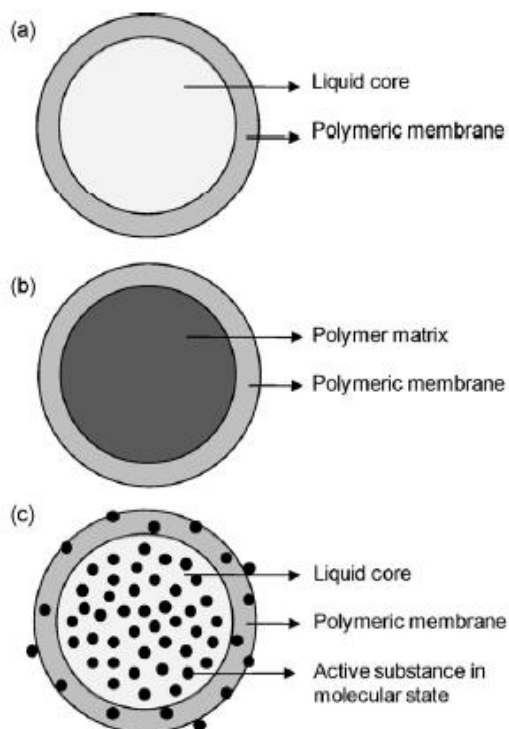




encuentra disuelto en la fase lipídica. Adicionalmente, el componente puede ser absorbido en la interface partícula/agua (Fontana *et al.*, 2010).

Las nanocápsulas lipídicas sólidas tienen básicamente tres componentes: la fase lipídica, la fase acuosa y un surfactante no iónico (Huynh *et al.*, 2009). Estos sistemas nanométricos tienen una gran área de contacto, lo cual les otorga grandes propiedades para el empleo de sustancias lipofílicas.

Para llevar a cabo un estudio general de las nanocápsulas es necesario establecer la influencia de sus componentes en un sistema disperso (tabla 1).



**Figura 18.** Diferentes estructuras nanocapsulares, a) centro líquido, b) matriz polimérica y c) dispersión de sustancia activa (Mora-Huertas *et al.*, 2010).

Los lípidos son sustancias no polares y son altamente hidrofóbicos. Estas sustancias son ácidos grasos esenciales, mono, di y triglicéridos, los cuales son de origen animal o vegetal.



Estos lípidos pueden ser utilizados para solubilizar componentes no polares lipofílicos y formar sistemas dispersos como emulsiones o microemulsiones (Huang *et al.*, 2009). Uno de los componentes importantes es el surfactante, su elección y concentración tienen una gran influencia en la calidad de las dispersiones de nanocápsulas.

Los surfactantes son moléculas superficialmente activas que consisten de un grupo hidrofílico y de otro lipofílico. La funcionalidad de estos componentes depende de las características moleculares de cada grupo. Con altas concentraciones de surfactante se reduce la tensión superficial y se facilita la división de las partículas durante la homogeneización (Naztruzzi, 2008).

**Tabla 1.** Principales componentes estructurales de las nanocápsulas (Huang *et al.*, 2009).

	<b>Características importantes</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Lípidos</b>	Estabilidad química Perfil de fusión Polaridad	Grasas animales y vegetales esencias
<b>Surfactantes</b>	Solubilidad (HLB) Carga Geometría molecular Carga superficial	No iónico: Tween, Span Anicónico: SLS, DATEM, CITREM Catiónico Zwitterionico: lecitina
<b>Biopolímeros</b>	Masa molar Conformación Carga Hidrofobicidad Flexibilidad	Proteínas globulares Proteínas flexibles Polisacáridos no iónicos: alginato, pectina, xantana. Polisacárido catiónico: quitosán.

Otro componente es el biopolímero, los que comúnmente se utilizan son polisacáridos o proteínas. La funcionalidad de estos biopolímeros está determinada por sus características moleculares, por ejemplo: peso molecular, conformación, flexibilidad, polaridad, hidrofobicidad e interacciones. Estas características moleculares están determinadas por el tipo, número y secuencia de monómeros de la cadena del polímero.



### 1.8 Propiedades termofísicas y fisicoquímicas de la uva *Red Globe* y de la pera *d'Anjou*.

La conductividad térmica es la capacidad de los materiales para transmitir energía calorífica a través de su sección transversal. Se han desarrollado varias correlaciones para la determinación de esta propiedad en distintos grupos alimenticios. Choi y Okos propusieron el siguiente modelo, el cual depende tanto de la temperatura como de la composición del alimento.

$$k_T = \sum (k_{Ti})(X_i^v) \quad (20)$$

Los valores de conductividad térmica de los componentes puros de los alimentos se encuentran en el ANEXO A (Heldmand and Lund, 1992).

El calor específico de un material alimenticio es la medida de la cantidad de energía requerida por unidad de masa para aumentar su temperatura un grado centígrado. El calor específico ha sido determinado experimentalmente por distintos métodos, incluyendo el método de mezclas y por medio del calorímetro diferencial de barrido.

A continuación se presenta la relación propuesta por Choi y Okos:

$$C_p = \sum (C_{pi})(X_i^w) \quad (21)$$

De la misma manera presentaron los modelos para determinar la difusividad térmica en productos alimenticios.

$$\alpha = \sum (\alpha_i)(X_i^v) \quad (22)$$

Las propiedades termofísicas que se han presentado dependen de la composición química del alimento, dicha composición se presenta a continuación:

**Tabla 2.** Composición química de la uva y la pera (CESNID, 2008).

Componente	Uva	Pera
Agua	81.42	83.01
Proteína	1.47	0.4
Lípidos	0	0.4
Carbohidratos	16.5	14
Fibra	0.2	2
Cenizas	0.40	0.18

Alternativamente, a continuación se presentan datos bibliográficos de las propiedades termofísicas de uva y pera.

**Tabla 3.** Propiedades térmicas de uva y pera (Alvarado y Aguilera, 2001).

Producto	$C_p$ (kJ/kg °C)	$K_T$ (W/m °C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)
Uva ( <i>Vitis vinífera</i> )	3.51	0.50	1.81X10 <sup>-7</sup>
Pera ( <i>Pyrus communis</i> )	3.53	0.43	1.25X10 <sup>-7</sup>

### 1.9 Preenfriamiento.

El preenfriamiento se refiere a la remoción del calor de campo de frutas y hortalizas recién cosechadas antes de su transporte, almacenamiento o transformación (Becker and Fricke, 2002). El preenfriamiento, es un tratamiento previo a las operaciones de refrigeración y congelación muy recurrente en alimentos hortofrutícolas, con este tratamiento previo, hay una serie de efectos y consecuencias positivas en mantenimiento de la calidad.

El calor de campo puede causar el deterioro rápido de algunos cultivos hortofrutícolas y por lo tanto es necesario remover este calor tan rápido como sea posible. Los efectos más considerables son la disminución de la respiración con una reducción consecuente del



marchitamiento y de la pérdida de peso, la disminución de la actividad metabólica del producto que permite controlar el proceso de maduración y la senescencia, así como la actividad metabólica de los microorganismos patógenos (Vallespir, 1990). Para conservar la calidad, el producto fresco debe enfriarse de un modo seguro, llevándolo a su temperatura de almacenamiento óptima de una manera práctica y económica (Teruel *et al.*, 2003).

El preenfriamiento ofrece otras ventajas además de conservar la calidad del producto; minimiza la carga térmica a retirar por el sistema de producción de frío en vehículos especializados para su transporte, debido a que no cuentan normalmente con suficiente capacidad para la producción del frío necesario y así descender la temperatura del producto.

Por otra parte, las cámaras para conservación no necesitan estar sobredimensionadas en su capacidad frigorífica; al colocar en ellas el producto proveniente de la cadena de frío, su función se limita al mantenimiento de la temperatura u obtener un descenso de unos pocos grados (Vallespir, 1990).

La disminución de la temperatura de un producto expuesto a un medio de bajas temperaturas no es lineal; esta es más rápida al principio pero a medida que se aproxima a la temperatura del medio es cada vez más lenta y el costo de energía se incrementa considerablemente.

Por ello en las operaciones comerciales es recomendable reducir la temperatura hasta cuando el producto ha perdido  $7/8$  de la diferencia de temperatura de campo y la deseada. Es recomendable que una octava parte se pierda durante el almacenamiento o transporte.

Además de la diferencia de temperaturas entre el producto y el medio de enfriamiento, la velocidad de enfriamiento depende en gran medida del volumen individual de cada producto, así como de la superficie expuesta. En el enfriamiento de una hortaliza con hojas el tiempo de enfriamiento es casi cinco veces menor que en frutos voluminosos como melones o sandías (BONH de México, 2008). El medio de enfriamiento y la velocidad con que circula alrededor del producto son factores que influyen en el proceso de preenfriamiento.

La fisiología del producto determina en gran medida los requerimientos y los métodos de preenfriamiento. Algunos frutos y hortalizas son altamente perecederos y deben ser

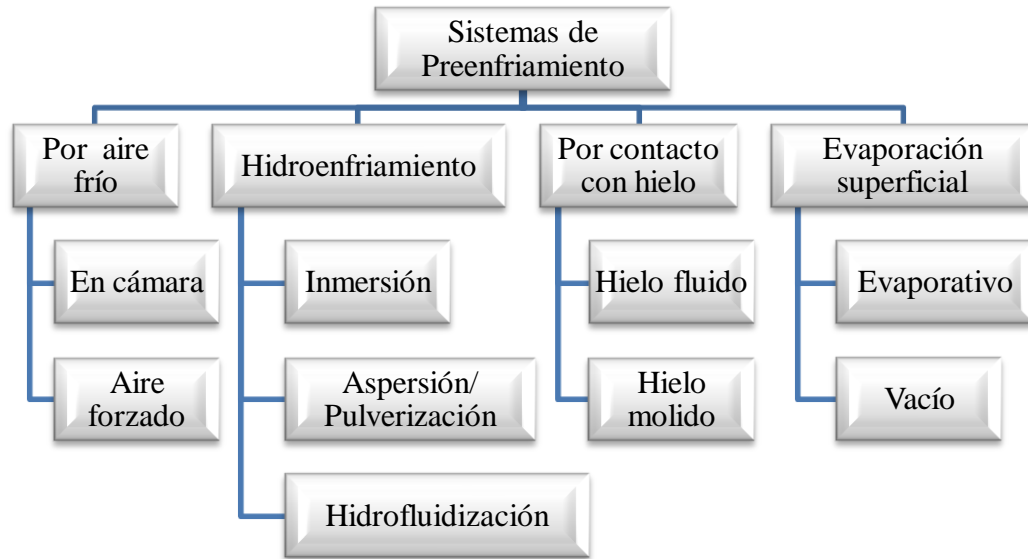


preenfriados inmediatamente después de su cosecha, esto incluye espárragos, brócoli, coliflor, calabaza, tomates, hortalizas de hoja, alcachofas, coles de bruselas, apio, zanahorias, rábanos, aguacates, melones, duraznos, ciruelas, guayaba, mango papaya, piña, entre otros (Becker and A. Fricke, 2002).

Cada sistema de preenfriamiento se adecua según el tipo de producto que se desee enfriar, en la publicación “Precooling techniques and applications for horticultural products: a review” realizada por Brosnan and Sun (2001) se explican a profundidad cada uno de ellos, de los cuales se pueden clasificar como se muestra en la figura 19.

La elección de alguno de estos métodos de enfriamiento está influenciada por los siguientes factores:

- a) Naturaleza del producto. Distintos tipos de producto tienen diferentes requerimientos de enfriamiento. Por ejemplo: las fresas y el brócoli requieren temperaturas cercanas a la congelación, en comparación con el jitomate que sufriría daños por las bajas temperaturas.
- b) Requerimientos de envase. El material y diseño del envase influyen los requerimientos del método de enfriamiento y en la velocidad de enfriamiento.
- c) Flujo de producto. Invariablemente algunas técnicas de enfriamiento son más rápidas que otras. Si el volumen de producto a ser enfriado por sesión, por hora o por día es grande es necesario un equipo de enfriamiento rápido.
- d) Restricciones económicas. Los costos de construcción y operación varían entre los distintos métodos de enfriamiento. Los costos del método de enfriamiento elegido deben ser justificados con base a los precios de venta del producto o en otros beneficios económicos.



**Figura 19.** Clasificación de los sistemas de preenfriamiento (Brosnan and Sun, 2001).

No todos los productos se adaptan de igual forma a cualquiera de estos métodos. El enfriamiento por aire resulta en este sentido el más adaptable, adecuándose al 100% de las especies siempre y cuando se provea una humedad relativa elevada que evite la deshidratación de las más susceptibles al oscurecimiento no enzimático como las hortalizas de hoja.

### 1.10 Hidroenfriamiento.

El hidroenfriamiento es esencialmente la utilización de agua helada para disminuir la temperatura del producto antes o después de su envasado. En este caso el agua es el medio de enfriamiento y por su mayor capacidad para retirar el calor hace que sea más rápido que el preenfriamiento por aire. El agua es uno de los mejores medios de enfriamiento, debido a su alto calor específico y a su gran capacidad de contacto con el producto.

Existen tres tipos de hidroenfriamiento: por aspersión, inmersión y fluidización. En estos métodos el agua es enfriada por medio de un sistema de refrigeración mecánica (el evaporador del sistema de refrigeración es colocado en el contenedor de agua) y posteriormente es empleada como medio de enfriamiento. Cuando el agua está en contacto con el producto, la temperatura de su superficie llegar a ser la misma que la temperatura del agua.



Con el suficiente flujo volumétrico de agua, la resistencia a la transferencia de calor en la superficie del producto puede ser despreciada; y por lo tanto, la velocidad de enfriamiento se vuelve dependiente solo de características del producto, tales como su forma, tamaño y conductividad térmica (Rennie, 1999).

Una de las ventajas del hidrogenfriamiento es que se previene la pérdida de humedad durante el proceso. Los tiempos de enfriamiento con este método son de 20 a 30 minutos, en comparación con el enfriamiento con aire forzado que normalmente puede tomar varias horas (Brosnan and Sun, 2001).

Existen distintos diseños de hidrogenfriadores, los cuales difieren en la velocidad de enfriamiento y en la eficiencia de la operación. El hidrogenfriamiento puede realizarse por inmersión, aspersión, (BONH de México, 2008) y recientemente la hidrofuidización.

En general los productos hidrogenfriados no deben sufrir daños por la caída de agua, tolerar la humedad y los desinfectantes que esta pueda contener (Brosnan and Sun, 2001). El agua normalmente es recirculada por lo que es muy importante la adición de cloro de 150-200 ppm para evitar la acumulación de patógenos y su dispersión a otros tejidos vegetales sanos (BONH de México, 2008).

El enfriamiento se produce al igual que cuando el medio refrigerante es el aire frío, debido a la transmisión por conducción del calor desde el interior del fruto hasta su superficie, y por convección entre ésta y el agua fría (Vallespir, 1990).

En los equipos por inmersión el producto circula a través de un tanque que contiene agua helada. El contacto con el agua es total, lo que optimiza la transferencia de calor. Una bomba mantiene en movimiento el agua para uniformizar su temperatura.

Comúnmente estos hidrogenfriadores, acoplados a la línea de envasado, sirven como elemento de conducción hacia las secciones de calibrado y acondicionamiento. En la figura 20 se muestra un enfriador por inmersión, en el cual las cajas de productos son cargados sobre una





banda transportadora en un extremo del tanque, el producto viaja sumergido a lo largo del tanque y sale por el extremo opuesto al mismo (Laitram Machinery, 2010).



**Figura 20.** Preenfriador por aspersión  
(Meyer Industries, 2010).



**Figura 21.** Enfriador por inmersión  
(Laitram Machinery, 2010).

En los equipos de preenfriamiento por aspersión mostrado en la figura 20, el producto pasa por un baño de agua fría, este es llevado a cabo por la inundación de una charola perforada con agua fría.

El agua fría cae por gravedad y pasa a través de la charola perforada hacia al producto; se les puede incorporar bandas transportadoras para transportar el producto (Meyer Industries, 2010).

El preenfriamiento por pulverización sustituye la ducha utilizada en el preenfriamiento por aspersión, en donde se emplean toberas que aplican vertical u horizontalmente una mezcla de aire con partículas de agua en suspensión.



---

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION EXPERIMENTAL

### 2.1 Objetivos.

#### **Problema.**

Debido a que los métodos convencionales de recubrimiento en frutos presentan dificultades en su homogeneidad, se planteó la adaptación de un hidrofuidizador a fin de desarrollar una alternativa de recubrimiento que permita el enfriamiento de fruta fresca cortada para su manejo a bajas temperaturas.

#### **Objetivo General.**

Evaluar el recubrimiento por hidrofuidización de un sistema modelo de nanocápsulas a baja temperatura sobre fruta fresca cortada; interrelacionando la topografía y color del recubrimiento, con los parámetros de transmisión térmica durante la operación para el desarrollo de un método alternativo en el manejo de frutos.

#### **Objetivos Particulares.**

1. Evaluar el color y formación del recubrimiento de una dispersión modelo de nanocápsulas aplicada por hidrofuidización a bajas temperaturas sobre uva *Red Globe* sin hollejo y esferas de pera *d'Anjou*.
2. Evaluar una dispersión de nanocápsulas como medio de enfriamiento sobre uva *Red Globe* sin hollejo y esferas de pera *d'Anjou*, mediante el análisis de los parámetros de transmisión térmica durante el enfriamiento por hidrofuidización.
3. Analizar el efecto de las condiciones de recubrimiento en uva *Red Globe* sin hollejo y esferas de pera *d'Anjou*, interrelacionando las propiedades físicas y fisicoquímicas del alimento.



## 2.2 Selección y justificación de variables.

Se eligió la uva *Red Globe* y esferas de pera *d'Anjou* debido a que ambos tipos de fruta difieren en su composición química, textura y propiedades físicas. Todos estos factores intervienen directamente con los principios básicos de fluidización; operación que ha sido estudiada a profundidad en productos esféricos (McCabe *et al.*, 1991).

Las propiedades reológicas de la dispersión de nanocápsulas están determinadas principalmente por la goma xantana y el propilenglicol a las concentraciones indicadas en la tabla 6; así que para fines de estudio sólo se emplearon dichos componentes sin incluir el componente bioactivo. Por esta razón cuando se haga referencia a un fluido modelo se considerara la dispersión de goma xantana y propilenglicol en agua a las concentraciones mencionadas en la tabla 6. La adaptación y caracterización del equipo se realizó en base al funcionamiento de éste operando con agua y posteriormente con el fluido modelo de la dispersión de nanocápsulas.

Se emplearon dos platos para hidrofuidización con orificios de 4 y 2 mm de diámetro respectivamente; debido a que el tamaño del diámetro en los orificios del plato repercute en la velocidad de los chorros fluidizantes así como en las turbulencias generadas alrededor del alimento.

Estas variables influyen en la formación del recubrimiento y valores obtenidos de los parámetros de transmisión térmica durante la hidrofuidización. Las propiedades de la uva *Red Globe* y pera *d'Anjou* tienen una relación directa con los tiempos de enfriamiento que dependen de los coeficientes de transferencia de calor dados por las turbulencias generadas en el medio de enfriamiento.

Dichas turbulencias influyen en el flujo del líquido de la capa límite del alimento, resultando valores de coeficientes de transferencia de calor específicos para el sistema que originan una topografía de recubrimiento específica para cada tipo de esferas de fruta. En la tabla 4 se presentan los factores y niveles de variación, número de réplicas, variables correspondientes a las actividades experimentales relacionadas con este estudio.

**Tabla 4.** Tabla de variables.

Factores de variación	Niveles de variación	Réplicas/ Repeticiones	Variable Dependiente	Variable Independiente
<b>Diámetro de los orificios para fluidización</b>	2 mm	3 repeticiones	Régimen de flujo	Parámetros enfriamiento Coeficiente convectivo Velocidad de enfriamiento
	4 mm		Tiempo de enfriamiento	
<b>Tipo de fruto</b>	<i>Pera d'Anjou</i>	3 réplicas	Tiempo de enfriamiento	Parámetros enfriamiento Velocidad de enfriamiento Difusividad térmica Valores de L, a y b
	<i>Uva Red Globe</i>		Topografía del recubrimiento	

### 2.3 Diseño experimental.

De acuerdo a la relación de variables descrita con anterioridad, el diseño factorial  $2^2$  describe adecuadamente la interacción de los 2 variables experimentales con 2 niveles de variación. La relación de los valores obtenidos durante la experimentación se realizará mediante el software Minitab Release 14®, dicho diseño experimental se describe en la tabla 5.

**Tabla 5.** Actividades experimentales realizadas para el diseño Factorial  $2^2$ 

Producto	Diámetro de orificios de la placa (mm)	Repeticiones
<i>Uva Red Globe</i>	2	3
	4	3
<b>Esferas de pera <i>d'Anjou</i></b>	2	3
	4	3



#### **2.4 Selección y control de la materia prima.**

La uva *Red Globe* y pera *d'Anjou* fueron adquiridas en estado de madurez comercial y posteriormente se seleccionó el producto tomando en cuenta: color, forma y dimensiones características del producto, con la finalidad de tener una forma geométrica esférica para realizar el estudio. Los frutos fueron mínimamente procesados; a las uvas se les retiró el hollejo, las peras fueron peladas y después fueron cortadas en forma de esfera.

Se adquirieron tres racimos uva *Red Globe*, de los cuales se seleccionaron tres grupos conformados por diez uvas de dimensiones y forma semejantes entre sí. Las uvas *Red Globe* sin hollejo y las esferas de pera *d'Anjou* fueron pesadas en una balanza analítica, además de obtener su diámetro mediante un calibrador digital para garantizar la homogeneidad de los lotes.

#### **2.5 Determinación de sólidos solubles.**

El contenido de sólidos solubles de uva *Red Globe* y pera *d'Anjou* se determinó utilizando un refractómetro ABBE, expresando los resultados en grados Brix promedio de tres mediciones (SEP, 2008).

#### **2.6 Determinación de la densidad.**

La densidad de los frutos se determinó por medio del método de desplazamiento de volumen. Se utilizó aceite comestible de canola el cual es un fluido hidrófobo y se registró el cambio en volumen correlacionándolo con el peso de la muestra.

#### **2.7 Preparación del fluido modelo.**

Para la preparación de las dispersiones se empleó goma xantana, propilenglicol y antiespumante marca DOW Corning®. Este último se empleó debido a que previamente se observó que se generaba espuma debido a las características y constante recirculación del fluido.



La formulación del recubrimiento presentada en la tabla 6 fue empleada en el trabajo de tesis “Efecto del recubrimiento a base de nanocápsulas de vitamina E, sobre el índice de oscurecimiento de rebanadas de manzana variedad *Red Delicious*” (Sánchez, 2011) y también en el estudio “Efecto de la concentración de nanopartículas lipídicas sólidas sobre las propiedades ópticas y mecánicas de recubrimientos *in vitro*” (Petrón, 2011).

El fluido modelo se preparó mediante la dispersión de goma xantana, propilenglicol y antiespumante a una temperatura de  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Se almacenó durante aproximadamente 24 horas a  $0^{\circ}\text{C}$ , para su posterior utilización. El colorante azul de metileno fue utilizado para evaluar el recubrimiento.

Cabe señalar que los componentes del sistema modelo seleccionados son similares en componentes y concentración a las formulaciones de dispersiones de nanocápsulas estudiadas actualmente para recubrimiento en fruta fresca cortada, por lo que sus propiedades físicas y térmicas se apegan a las dispersiones con agentes de liberación encapsulados. En la tabla 6 se muestra la concentración de los componentes del fluido modelo empleado como medio de enfriamiento.

**Tabla 6.** Concentración de los componentes del fluido modelo empleado durante la experimentación.

	Concentración (p/p)
<b>Goma xantana</b>	0.1
<b>Propilenglicol</b>	0.5
<b>Antiespumante</b>	0.001
<b>Azul de metileno</b>	0.01

El fluido se colocó en el tanque, en donde se sometió a recirculación durante el proceso de preenfriamiento.



## **2.8 Caracterización reológica del fluido modelo.**

La caracterización reológica del fluido se realizó en un reómetro HAAKE RheoWin 323 con el dispositivo Z-40<sub>DIN</sub> geometría de cilindros concéntricos. La prueba de flujo se realizó a las condiciones de cizallamiento provocadas por la bomba (3560 rpm o 400 s<sup>-1</sup>). Se graficó la curva de ascenso y descenso para determinar el comportamiento del fluido en función al tiempo de cizallamiento durante la operación de hidrofuidización.

## **2.9 Determinación de los parámetros de enfriamiento.**

La determinación de las propiedades térmicas de la pera y uva se realizaron mediante ecuaciones establecidas dependientes de la composición química y temperatura del alimento (Heldmand and Lund, 1992) descritas en el ANEXO A.

Para la obtención de la historia térmica de las esferas de fruta, se seleccionaron dos esferas por tipo de fruta a las cuales se les introdujo un termopar digital HANNA HI 98509 CHECKTEMP 1C tipo K hasta el centro geométrico para el registro de temperaturas en el fruto y medio de enfriamiento.

La determinación de los parámetros de enfriamiento se llevó a cabo mediante la construcción de la curva de enfriamiento (tiempo-temperatura). De manera consecutiva se realizó el enfriamiento por hidrofuidización, monitoreando y registrando la temperatura del producto y del medio de enfriamiento cada 30 segundos.

El estudio de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento por hidrofuidización, se realizó de acuerdo al método establecido por Dinçer. Esta técnica indica que se debe calcular la relación adimensional de temperaturas ( $Y$ ) y graficar en papel semilogarítmico en función del tiempo.

A partir de esta gráfica se obtiene una línea recta a través de los puntos. Las ecuaciones que representan estas curvas son:



$$\frac{T_P - T_m}{T_i - T_m} = j e^{-(CC)(t)} \quad (23)$$

$$\log \frac{T_P - T_m}{T_i - T_m} = -(CC)(t) + \log j \quad (24)$$

El coeficiente de enfriamiento ( $CC$ ) está representado por la pendiente del gráfico semilogarítmico. El signo menos muestra que la pendiente de la recta es negativa y el factor lag ( $j$ ) indica la intersección de la curva en el eje del adimensional de temperaturas. Si la curva corta al eje de la relación adimensional de temperaturas exactamente en la unidad, entonces se considera que se sigue la ley de enfriamiento de Newton (Dinçer, 1997).

Cuando se lleva a cabo el enfriamiento de un cuerpo de manera inestable en un medio convectivo, pero la resistencia interna del cuerpo no puede ser despreciable, el análisis es más complejo. A continuación se muestra la función de Bessel para la solución del estudio de transferencia de calor en un cuerpo esférico (Kreith, 2000):

$$\frac{T_P - T_m}{T_i - T_m} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\text{sen}(\lambda_n R) - \lambda_n R \cos(\lambda_n R)}{\lambda_n R - \text{sen}(\lambda_n R) \cos(\lambda_n R)} \right] \left\{ \exp \left[ (\lambda_n^2 R^2 Fo) \left( \frac{\text{sen}(\lambda_n r)}{\lambda_n r} \right) \right] \right\} \quad (25)$$

Para determinar el coeficiente convectivo se realizó la siguiente secuencia de cálculo. En primera instancia se determinó el número de Reynolds ( $Re$ ) a la salida de los orificios (Verboven *et al.*, 2002):

$$Re_o = \frac{(\rho)(v_o)(D)}{(\mu)} \quad (26)$$

El número de Nusselt se calculó con base a una correlación para el enfriamiento de productos esféricos en agua, esta correlación tiene una certeza del 88% (Dinçer, 1997):

$$Nu = 0.2671(Re)^{0.433} (Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$





## 2.10 Evaluación del recubrimiento.

Para comparar los resultados obtenidos empleando la hidrofluidización como método de recubrimiento en frutos frescos cortados, se llevaron a cabo los tratamientos descritos en la tabla 7; de los cuales se evaluaron los parámetros de color y topografía del recubrimiento mediante microscopía.

Después de realizar el recubrimiento por los tres tratamientos anteriores se estabilizó el recubrimiento, colocando las muestras de frutos en contacto directo con aire a  $16\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 7.** Tratamientos para recubrimiento

	<b>Tratamiento</b>
<b>1</b>	Recubrimiento por hidrofluidización, temperatura inicial del producto a $20\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ y medio de enfriamiento a $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , durante tiempo de preenfriamiento de 5 a 6 min.
<b>2</b>	Recubrimiento por hidrofluidización durante 1 minuto, temperatura inicial del producto a ( $20\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ) y medio de enfriamiento a $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
<b>3</b>	Recubrimiento por hidrofluidización durante 1 minuto, temperatura medio de enfriamiento a $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en producto previamente enfriado en cámara de refrigeración a $4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
<b>4</b>	Recubrimiento convencional por inmersión durante 1 minuto a temperatura del recubrimiento de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 2.10.1 Color.

Con la finalidad de evaluar la homogeneidad de la distribución del recubrimiento se evaluó el color dado por el azul de metileno indicativo del recubrimiento. Se utilizó un colorímetro Minolta CR-300 a  $2^{\circ}$  del observador con referencia del iluminante y tomándose los resultados en coordenadas CIELAB.



Para cuantificar la diferencia de color entre una esfera de fruta recubierta y una sin recubrir se deben emplear las ecuaciones de diferencias de color, las cuales matemáticamente corresponden a la distancia geométrica en un sistema cromático determinado, entre las coordenadas estándar y las de la muestra a comparar (Gallardo, 2010). Se realizaron 3 réplicas para cada esfera de fruta a la que se le evaluó el color para obtener valores de la mayoría del área recubierta. Con las coordenadas anteriores se realizó el siguiente cálculo.

1. La diferencia de claridad entre el estándar y la muestra está dada por:

$$\Delta L = L_{estándar} - L_{muestra} \quad (28)$$

2. La diferencia cromática rojo-verde:

$$\Delta a^* = a^*_{estándar} - a^*_{muestra} \quad (29)$$

3. La diferencia cromática amarillo-azul:

$$\Delta b^* = b^*_{estándar} - b^*_{muestra} \quad (30)$$

4. La diferencia color total está dada como:

$$\Delta E_{L a b}^{* * *} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (31)$$

5. Croma (intensidad de color), que es la distancia del color desde su origen (a=b=0) en el plano a, b.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (32)$$

6. Determinación del ángulo de tono, el cual expresa en grados de 0° a 360°, donde 0°=rojo, 90°=amarillo, 180°= verde, 270°= azul y 360°=0°.

$$h^\circ = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (33)$$

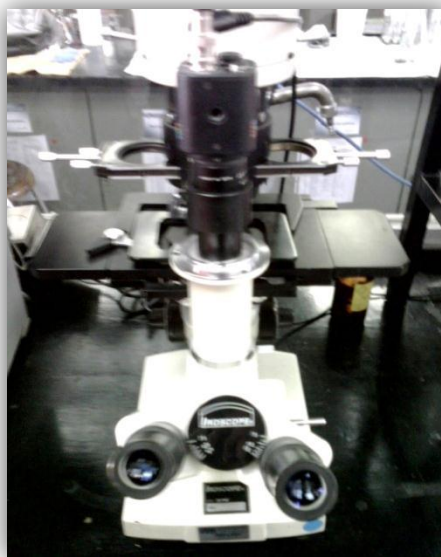


### 2.10.2 Microscopía.

El uso del microscopio óptico se fundamenta en la visualización de un objeto a corta distancia a través de dos lentes convergentes en un punto focal ocular, en donde la luz emerge del ocular en forma de haz paralelo como si procediese de un punto situado a gran distancia delante de la lente produciendo una imagen real invertida a mayor tamaño (SEP, 2008).

Los componentes mecánicos del microscopio son el soporte, la platina, el tubo, el revólver y los mandos de enfoque. Los componentes ópticos del microscopio son: los objetivos, los oculares, fuentes de luz, el condensador y el diafragma.

El análisis de la topografía del recubrimiento se llevó a cabo mediante un microscopio óptico marca IROSCOPE SI-PHF con un aumento de 20X, este instrumento contaba con una cámara fotográfica instalada que permitió capturar las imágenes de cada tratamiento.



**Figura 22.** Microscopio óptico IROSCOPE SI-SHF.



## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 Adaptación y modificación del equipo experimental de enfriamiento.

Para el reajuste y modificación del equipo experimental de hidrofluidización se partió del diseño y construcción del equipo realizado por Jácome (2011), que constaba de un recipiente de plástico o depósito donde se deposita el medio de enfriamiento (agua fría). El medio de enfriamiento era bombeado a través de la tubería de policloruro de vinilo (PVC) con diferentes arreglos de válvulas hasta la unidad de hidrofluidización, que consistía de un envase cilíndrico de plástico, dentro del cual se encontraba fija una charola perforada por donde se creaban los chorros fluidizantes. El diámetro de la tubería principal era de 1", mientras que los diámetros para obtener distintos flujos volumétricos eran de 1/2" y 1/4".

Los patrones de diseño considerados para modificación del equipo se presentan a continuación:

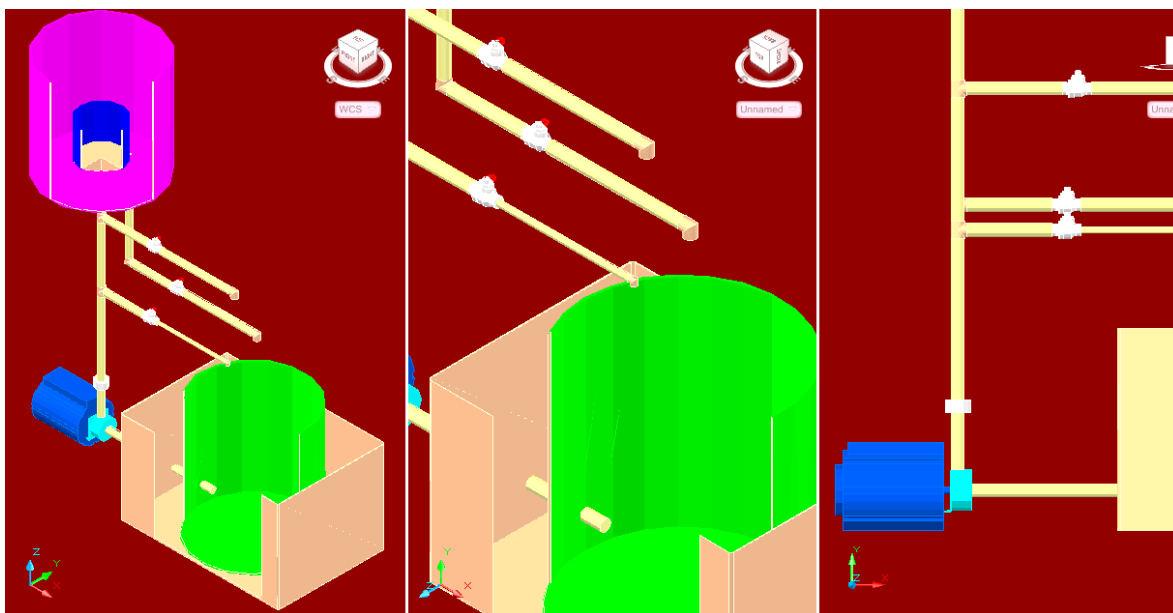
**Tabla 8.** Patrones de diseño en el equipo prototipo para hidrofluidización.

<b>Patrón de diseño</b>	<b>Valor empleado</b>	<b>Valor bibliográfico</b>	<b>Referencia</b>
<b>Potencia de la bomba</b>	0.5 HP	0.5 HP	Peralta <i>et al.</i> , (2009) Jácome, (2011)
<b>Diámetro de tubería</b>	1"	1"	Peralta <i>et al.</i> (2009) Jácome, (2011)
<b>Volumen tanque anular</b>	35 L	20 L	Jácome, (2011)
<b>Altura del tanque limitante</b>	23 cm	31 cm 10 cm	Jácome, (2011) Verboven y col, (2003)
<b>Diámetro de los orificios hidrofluidizantes</b>	2 mm y 4 mm	5 mm	Jácome, (2011)



En la figura 23 se muestra el diagrama del equipo prototipo utilizado, el cual consta de un tanque de recirculación, una bomba centrífuga y la unidad de hidrofuidización.

En relación a lo revisado en los antecedentes, el equipo hidrofuidizador debe tener un sistema mecánico de producción de frío para garantizar que la temperatura del medio de enfriamiento permanezca constante (Peralta *et al.*, 2009).



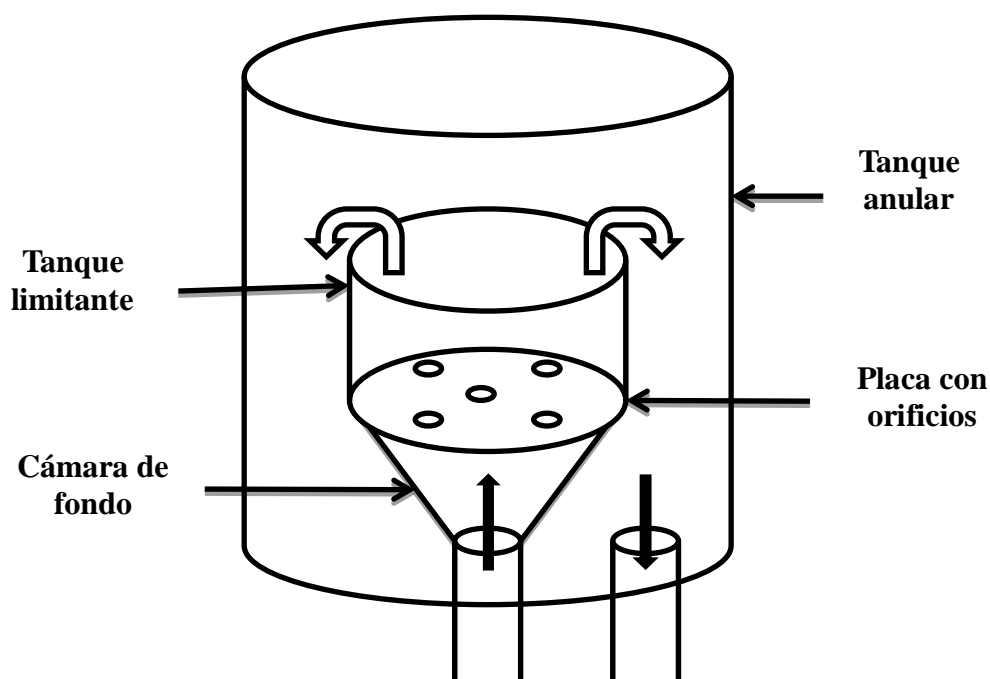
**Figura 23.** Diagrama isométrico del preenfriador por hidrofuidización y sus distintos componentes.

En el equipo prototipo rediseñado para este estudio una de las modificaciones realizadas fue la introducción de un tanque de latón dentro del tanque de recirculación, para desempeñar la función de un intercambiador de calor y mantener la temperatura del medio de enfriamiento a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ; dado que la conductividad térmica de este metal es  $109 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  (Geankoplis, 1998) facilita que la mezcla de hielo con agua helada colocada entre el tanque de recirculación y el tanque interno, absorbiendo el calor proveniente del medio refrigerante recirculado.



En la figura 24 se muestra la unidad de hidrofuidización que está conformada de un tanque anular. En el centro de este tanque anular se encuentra la salida de la tubería de 1" por donde es bombeado el medio refrigerante hasta la cámara de fondo de forma cónica con diámetro inferior de 2.54 cm (1") y diámetro superior de 17 cm. La forma geométrica de la cámara limitante tiene dos propósitos: generar una acumulación del medio de enfriamiento dentro de la misma y funcionar como un accesorio de expansión suave del medio de enfriamiento al fluir de la salida de la tubería de 1" a la cámara de fondo (Ver apéndice C).

Esto permite una distribución uniforme del medio de enfriamiento antes de que este fluya por la placa con orificios los cuales permiten homogenizar el flujo en el tanque limitante y así crear los chorros fluidizantes mediante la reducción brusca que provocan estos orificios por la acumulación del fluido en la cámara de fondo. Cuando el medio de enfriamiento sale de la cámara limitante fluye por presión hidrostática hacia la tubería de salida, la cual desemboca en el tanque de recirculación donde el fluido es enfriado para comenzar nuevamente el ciclo.

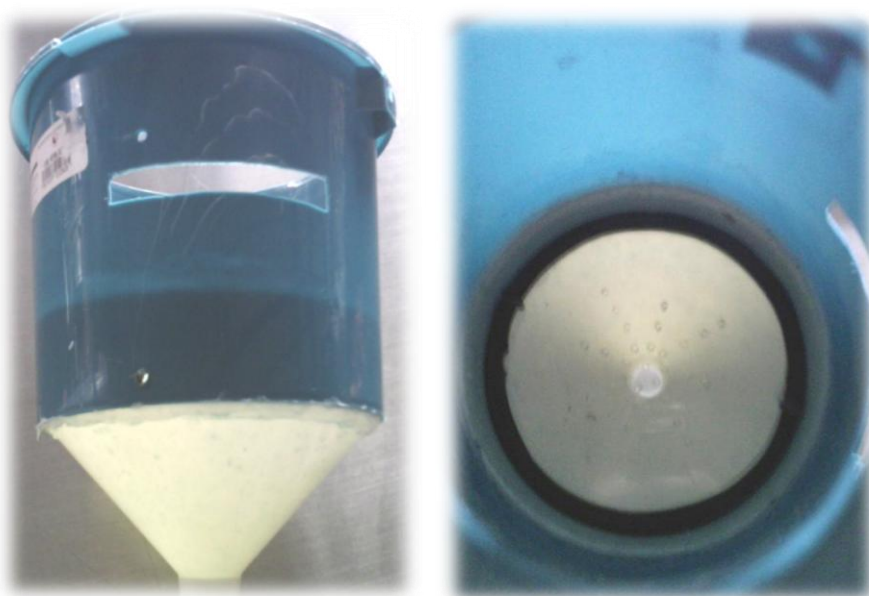


**Figura 24.** Unidad experimental de hidrofuidización.



Otra modificación realizada en el equipo fue la reducción de la altura en el tanque limitante de 31 cm a 23 cm, para minimizar la presión estática originada por la altura. Esto se debe a que al emplear un fluido más denso que el agua como medio de enfriamiento (dispersión de nanocápsulas) se provoca una mayor caída de presión y disminuyen las turbulencias originadas por los chorros fluidizantes en el tanque limitante (Ver apéndice C).

Así mismo para tener un flujo volumétrico constante en el tanque limitante de 1.8 L, se realizaron dos cortes a la mitad de la circunferencia del tanque iguales al valor por triplicado del diámetro equivalente de la tubería de 1". Dichos cortes se muestran en la figura 25.



**Figura 25.** Vista frontal y superior del tanque limitante.

Las placas con orificios fueron elaboradas con acrílico transparente de 4 mm de espesor para evitar que la placa se deformara por la presión ejercida del medio de enfriamiento proveniente de la cámara de fondo, además de facilitar la visibilidad del medio de enfriamiento al fluir de la cámara de fondo al tanque limitante.



Para la distribución de los orificios en la placa se consideró el diseño propuesto por Verboven *et al.*, (2003), el cual menciona que para una buena distribución de los chorros fluidizantes dentro de la cámara limitante, es preciso considerar no solo la zona central del área de la placa circular si no también deben existir orificios en las direcciones axial y diagonal al conjunto de orificios existentes en el centro de la placa.

De esta manera el movimiento de los productos generado por los chorros fluidizantes se mantendrá en la zona del tanque limitante con mayor turbulencia. Tomando en cuenta estas consideraciones se realizaron dos placas con orificios de 2 y 4 mm de diámetro distribuyendo 29 orificios como se muestra en la figura 26.



**Figura 26.** Placas para generar chorros fluidizantes.

El flujo volumétrico en la cámara limitante fue determinado de acuerdo al tiempo en que tarda el fluido en ocupar el volumen de la cámara. A partir de este valor se calculó la velocidad del fluido dentro de la cámara. Se determinó la distribución de temperaturas dentro de la cámara limitante para asegurar la homogeneidad de la temperatura del medio refrigerante durante el tiempo de enfriamiento.

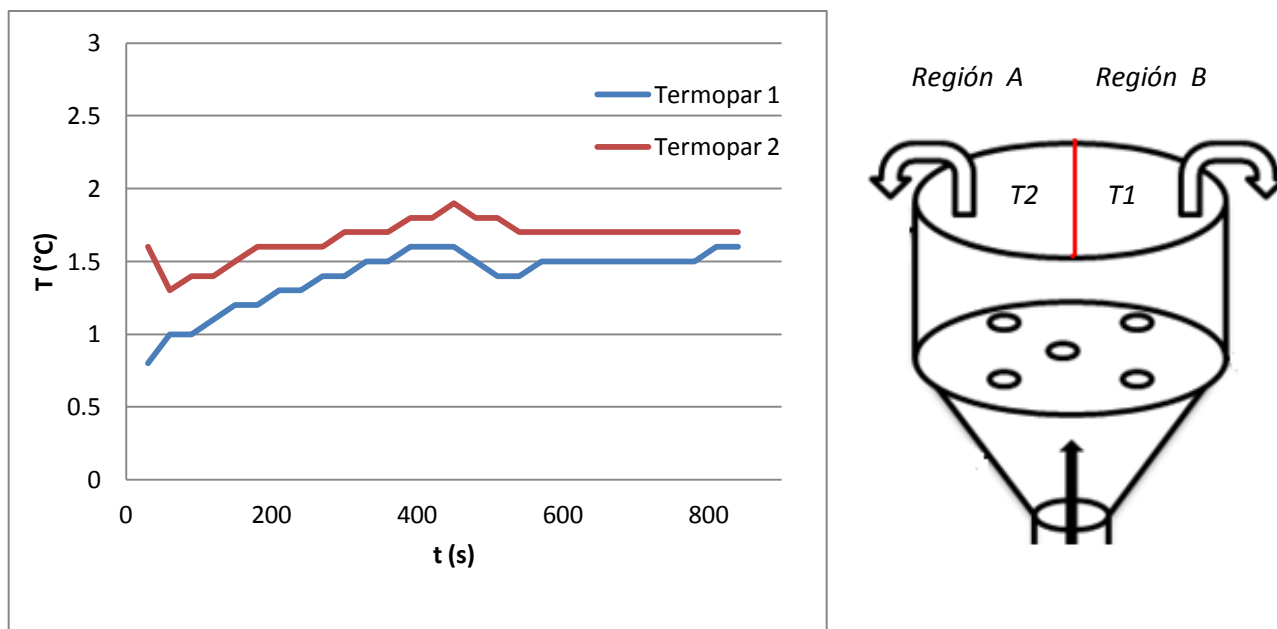




Se colocaron dos termopares dentro de la cámara limitante en distintos puntos a una altura de 4 cm de altura de dicha cámara, se monitoreó y registró la temperatura cada 30 segundos durante 15 minutos.

### 3.2 Caracterización de hidrofuidizador.

La temperatura del medio para alcanzar la temperatura de preenfriamiento de  $4^{\circ}\text{C}$  en las esferas de fruta es  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , se realizó un estudio del medio de enfriamiento dentro de la cámara limitante dividiéndola en dos regiones dentro del dispositivo hidrofuidizador, para conocer los cambios de temperatura que tiene el medio de enfriamiento durante la operación.



**Figura 27.** Termograma del medio refrigerante.

En la figura 27 se muestra que no existió diferencia considerable en la historia térmica obtenida del medio de enfriamiento, puesto que la tendencia es la misma con una variación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . La región A con el termopar 2 presentó una temperatura promedio de  $1.7\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , mientras que la región B con el termopar 1 un promedio de  $1.4\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ .



Estos resultados garantizan la homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara limitante en donde se llevó a cabo el recubrimiento y a su vez el enfriamiento de las esferas de fruta.

El aumento de temperatura observado en la figura 27 se origina por el intercambio de calor entre el producto, el medio de enfriamiento y el ambiente; además, el sistema de bombeo también representa una entrada de calor, debido al movimiento y a la fricción de sus componentes. De acuerdo al estudio térmico tanto teórico como experimental se demuestra que la implementación del tanque de recirculación fue un ajuste adecuado en el equipo.

### 3.3 Determinación de la velocidad mínima de fluidización.

El valor experimental de velocidad en la cámara limitante es 0.0288 m/s, y fue determinado en base al flujo volumétrico en la cámara limitante.

Velocidad mínima de fluidización (Berk Z., 2009):

$$v_{mf} \approx d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{150\mu} \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} g \quad (34)$$

$$v_{mf} = (0.016m)^2 \left( \frac{(1067 - 1018) \frac{kg}{m^3}}{150(0.008 \frac{kg}{ms})} \right) \left( \frac{0.4334^3}{1 - 0.4334} \right) (9.81 \frac{m}{s^2}) = 0.014 \frac{m}{s} \quad (35)$$

Velocidad mínima de fluidización (McCabe *et al.*, 1991):

$$v_{mf} \approx \left[ \frac{\varphi_s d_p g (\rho_p - \rho) \varepsilon^3}{1.75\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

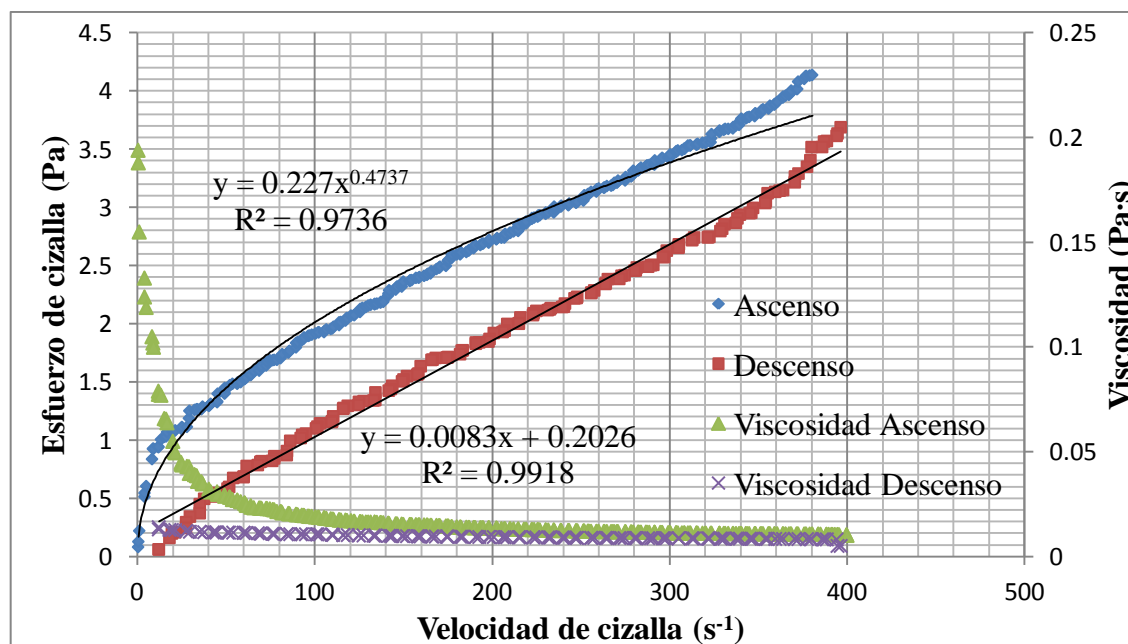


$$v_{mf} = \sqrt{\frac{(1)(0.016m)(9.81 \frac{m}{s^2})(1067 - 1018) \frac{kg}{m^3} (0.4334)^3}{1.75(1018 \frac{kg}{m^3})}} = 0.0187 \frac{m}{s} \quad (37)$$

Dado que la velocidad mínima de fluidización es 0.0187 m/s y la velocidad experimental en la cámara limitante es 0.0288 m/s, se demuestra la fluidización de los frutos.

### 3.4 Caracterización reológica del fluido modelo.

Se realizó la caracterización reológica de una dispersión al 0.1% de goma xantana y 0.5% de propilenglicol a una temperatura de  $2 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Estas concentraciones para el sistema modelo fueron determinadas con base a la formulación de la dispersión de nanocápsulas de referencia sin la sustancia de liberación.



**Figura 28.** Comportamiento reológico del sistema modelo.

**Tabla 9.** Parámetros reológicos del sistema modelo a  $2 \pm 0.5^\circ\text{C}$  y  $372.8 \text{ s}^{-1}$  (3,560 rpm).

Modelo	$\mu$ (Pa·s)	r
Newtoniano	0.008	0.9960



Como se puede apreciar en el reograma anterior, el sistema modelo es un fluido tixotrópico (dependiente del tiempo). El comportamiento de la curva de ascenso es fluidificante ajustándose al modelo de la potencia; mientras que los valores de descenso presentaron un comportamiento que se ajusta al modelo de un fluido newtoniano; esta diferencia entre los valores de ascenso y descenso representa un cambio significativo en la viscosidad del fluido al transcurrir el tiempo.

La unidad de bombeo en el hidrofuidizador se compone de un conjunto de válvulas y tuberías con una bomba centrífuga; según los criterios para selección de bombas, una bomba centrífuga puede transportar fluidos menores de 200 cP (0.200 Pa·s). Aunque la dispersión al empezar a fluir posee una viscosidad de 227 cP (0.227 Pa·s), al continuar cizallándose disminuye su viscosidad hasta 8 cP (0.008 Pa·s), lo cual permitió emplear el fluido modelo de dispersión de nanocápsulas como medio de enfriamiento en el hidrofuidizador.

La acción del propilenglicol como plastificante en la formulación de nanocápsulas es asociar fisicoquímicamente la estructura de la goma xantana, reduciendo así la cohesión de su cadena polimérica para extender y abrir la estructura. Al cizallarse esta dispersión, la cohesión de la cadena polimérica ya debilitada por el plastificante, se abre aún más disminuyendo notablemente su viscosidad.

La bomba centrífuga del hidrofuidizador al manejar  $372.8 \text{ s}^{-1}$  (3,560 rpm) transporta el fluido hasta la cámara de fondo a los 4.2 s, esto quiere decir que durante este lapso el cizallamiento del fluido ocasionado por la bomba es suficiente para que ocurra el cambio en su viscosidad de 10 cP de viscosidad aparente a 8 cP.

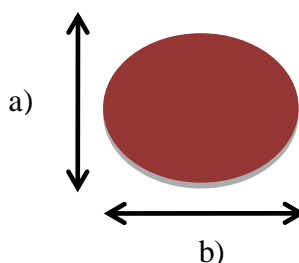
Debido a los fundamentos explicados con anterioridad, la determinación de la potencia requerida en la bomba para recirculación del fluido fue en base a su comportamiento newtoniano; tomando en cuenta su viscosidad así como la tubería de PVC con la está construido el dispositivo hidrofuidizador.



### 3.5 Selección y control de la muestra.

En la tabla 10 se muestran los resultados promedio con su desviación estándar de las dimensiones características y propiedades fisicoquímicas de la uva *Red Globe* y esferas de pera *d'Anjou*, controlando de esta forma las dimensiones del producto previamente al enfriamiento por hidrofluidización. El control del tamaño de las esferas de pera fue más uniforme debido a que se cortaron con un molde de 2.5 cm de diámetro.

Los grados Brix de la uva *Red Globe* y de la pera *d'Anjou* representan la cantidad de sólidos solubles presentes en los frutos. El contenido de estos componentes representa una resistencia interna a la transferencia de calor durante el proceso, en este caso representaría una resistencia a la disipación del calor de campo.



**Figura 29.** Dimensiones características de la uva *Red Globe*.

**Tabla 10.** Dimensiones características, sólidos solubles y densidad de la fruta fresca cortada.

Fruto	°Brix	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dimensión característica (cm)
<i>Uva Red Globe</i>	19.22±0.33	1067±13	a) 1.676±0.088
			b) 1.244±0.086
<i>Pera d'Anjou</i>	16.88±0.10	1028±10	2.5±0.04

### 3.6 Preenfriamiento.

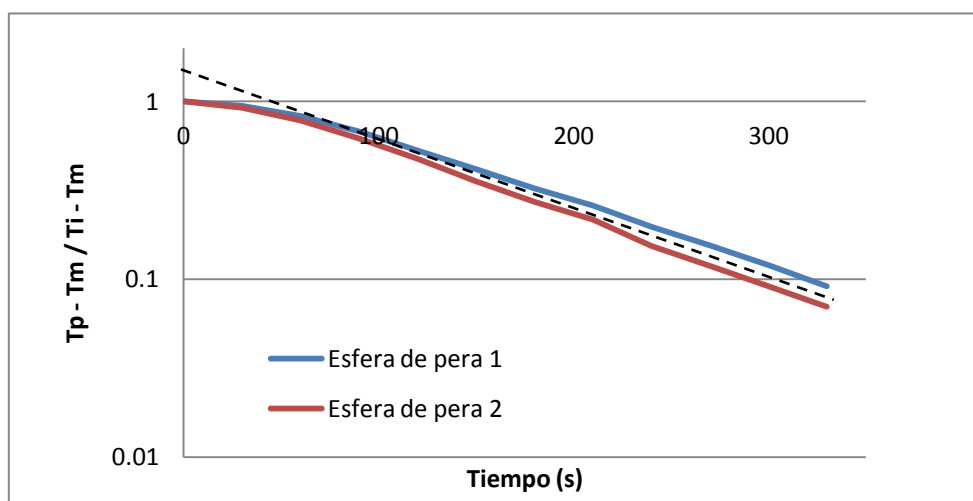
Los valores de tiempo y temperatura fueron registrados en tablas para cada combinación de acuerdo con el diseño factorial propuesto. Estos datos fueron graficados en coordenadas rectangulares, obteniéndose un comportamiento exponencial en todos los casos.



Para obtener la velocidad de enfriamiento ( $v_e$ ) se utilizó la siguiente ecuación:

$$v_e = \frac{T_0 - T}{t} \quad (38)$$

También se realizó el gráfico de la relación adimensional de temperatura ( $Y$ ) en función del tiempo (figura 30). A partir de la regresión exponencial de estos gráficos, se obtuvieron los parámetros de enfriamiento: coeficiente de enfriamiento, tiempo medio de enfriamiento ( $Z$ ), tiempo 7/8 de enfriamiento ( $S$ ), factor lag ( $j$ ), número de Biot ( $Bi$ ), velocidad de enfriamiento y el coeficiente superficial de transferencia de calor ( $h$ ).



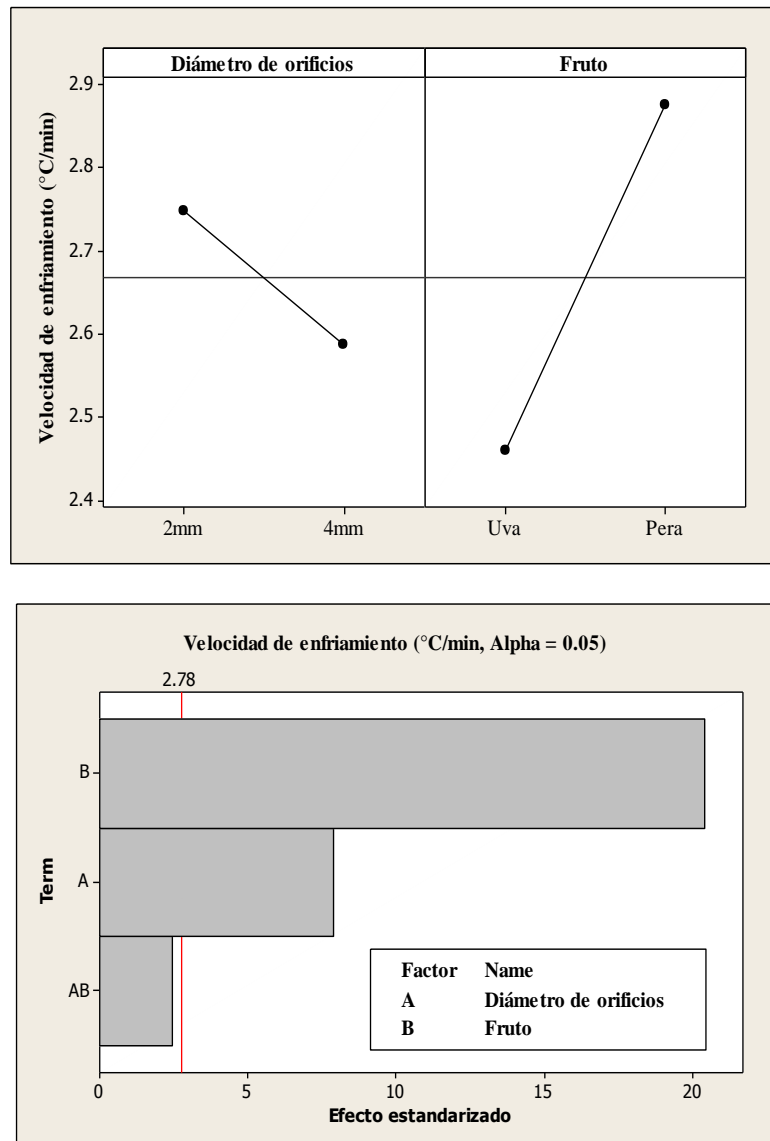
**Figura 30.** Gráfico semilogarítmico de la relación adimensional de temperaturas ( $Y$ ) en función del tiempo para esferas de pera *d'Anjou* preenfriadas por hidrofuidización con la placa de orificios de 2mm.

La velocidad de enfriamiento es un parámetro que indica que tan rápido se está llevando a cabo el proceso de disipación de calor desde el producto hacia el medio refrigerante.

En la figura 31 se muestra la dependencia de la velocidad de enfriamiento en función del diámetro de los orificios y del tipo de fruto, se aprecia que la mayor velocidad se alcanza con la placa de hidrofuidización con orificios de 2 mm y que es más rápido enfriar frutos porosos. La velocidad de enfriamiento depende de la diferencia de temperaturas entre el medio de enfriamiento y el producto, de las propiedades térmicas tanto del fluido como del producto, de la geometría y estructura del producto.



La uva es un fruto con una conductividad térmica de 0.50 kJ/kg°C y una difusividad térmica de 1.81E-7 m<sup>2</sup>/s y la pera tiene una conductividad de 0.43 kJ/kg°C y una difusividad térmica de 1.25E-7 m<sup>2</sup>/s (ver tabla 3). Es decir, de manera teórica la uva es un producto que debería enfriarse más rápido que la pera, sin embargo, se debe considerar que la uva tiene un mayor contenido de sólidos y una mayor densidad lo que impide la disipación de calor de campo disminuyendo su velocidad de enfriamiento.



**Figura 31.** Gráfica de efectos principales y gráfica de Pareto en la velocidad de enfriamiento (°C/s).



La pera tiene un porcentaje de porosidad que está entre 45.67 y 66.57% (Ozturk *et al.*, 2009) en comparación con la porosidad de la uva la cual va de 41.76 a 43.34 % (Kilickan *et al.*, 2010). Estos valores bibliográficos pueden ser contrastados con la densidad determinada experimentalmente, ya que la densidad indica la cantidad de materia que ocupa un cierto volumen.

Como se observa en la tabla 10 la uva tiene una densidad de  $1067 \pm 13 \text{ kg/m}^3$  y la pera tiene  $1028 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ . Los espacios de los frutos están ocupados por aire, el cual tiene una conductividad térmica de  $0.0249 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$  (Geankoplis, 1998) por lo tanto actúa como una resistencia térmica.

En la figura 31, los puntos muestran la media de los tratamientos llevados a cabo en las condiciones indicadas en cada eje y la línea intermedia horizontal muestra la media de todos los tratamientos. De acuerdo con lo observado en la gráfica de Pareto, la diferencia en la velocidad de enfriamiento entre los tratamientos fue significativa. Los efectos que se extienden más allá de la línea roja en esta gráfica son significativos en un 95%.

El efecto del diámetro de los orificios y del tipo de fruto, influyen significativamente en los parámetros de enfriamiento. El enfriamiento por hidrofuidización con orificios de 2 mm es un arreglo adecuado en el enfriamiento de frutos de forma esférica debido a que permite una mayor velocidad de enfriamiento y como se muestra en la tabla 11 los mayores coeficientes superficiales de transferencia de calor se alcanzaron con este diámetro de orificio. Sin embargo, el movimiento turbulento del fluido puede provocar daño en la estructura de los frutos y reducir el tiempo de vida útil.

Cuando un fruto es golpeado algunas células se rompen y se liberan enzimas, las cuales comienzan su actividad al ponerse en contacto con su respectivo sustrato. Estas reacciones bioquímicas son la causa del acortamiento de la vida útil de los alimentos frescos.

El coeficiente superficial de transferencia de calor se determinó a partir de la correlación presentada en la metodología. Para usar esta correlación se cumplió con la condición de que el número de Reynolds estuviese entre 100 y 100,000 (Dinçer, 1997).





El uso de la placa con orificios de 4 mm prolongó los tiempos de enfriamiento debido a que la turbulencia que se genera dentro de la cámara limitante es menor que la causada con la de orificios de 2 mm. El factor lag ( $j$ ) muestra que el enfriamiento por hidrofuidización no sigue la ley de Newton, esto significa que este proceso debe tratarse de una forma distinta a lo establecido por esta ley y que de manera opuesta a lo que dice Newton se deben considerar las propiedades del producto.

Con el valor de coeficiente superficial de transferencia de calor ( $h$ ), la conductividad térmica de los frutos ( $k_T$ ) y su dimensión característica ( $x$ ) se calculó el número adimensional de Biot. Los números de Biot que se observan en la tabla 11 indican que la resistencia a la transferencia de calor presentada por el medio de enfriamiento es despreciable, mientras que la resistencia de los productos fue significativa; es decir, características como estructura y componentes de los frutos impiden la disipación de calor.

El coeficiente de enfriamiento de es el indicador de la capacidad de enfriamiento de un producto sometido a baja temperatura, denota el cambio en la temperatura del producto por unidad de tiempo por cada grado de diferencia de temperatura entre el alimento y sus alrededores.

Un enfriamiento relativamente lento de la uva con chorros hidrofuidizantes provocado por una menor turbulencia en sus alrededores, por efecto de tener una placa con orificios de 4 mm de diámetro; induce a que el factor de retardo sea mayor (ver tabla 11); sin embargo, esto no ocurre en el caso de las esferas de pera debido a que este parámetro térmico no solo está en función de la velocidad de enfriamiento, sino también de las propiedades de cada producto (tamaño, forma, composición química y estructura).

En la publicación de I. Dinçer “Air Flow Precooling of Individual Grapes” (1995) se presentaron resultados del enfriamiento de uvas en una cámara de refrigeración a distintas velocidades. Se obtuvieron coeficientes de enfriamiento ( $CC$ ) de  $2.6E-3$  a  $3.4E-3$  y factor lag ( $j$ ) de 1.04 a 1.07 con velocidades de aire de 1 y 2 m/s respectivamente. El tiempo de enfriamiento  $7/8$  fue de 13 minutos, en comparación con el proceso de hidrofuidización estos parámetros de enfriamiento fueron menores (tabla 11). Esta diferencia en tiempos de



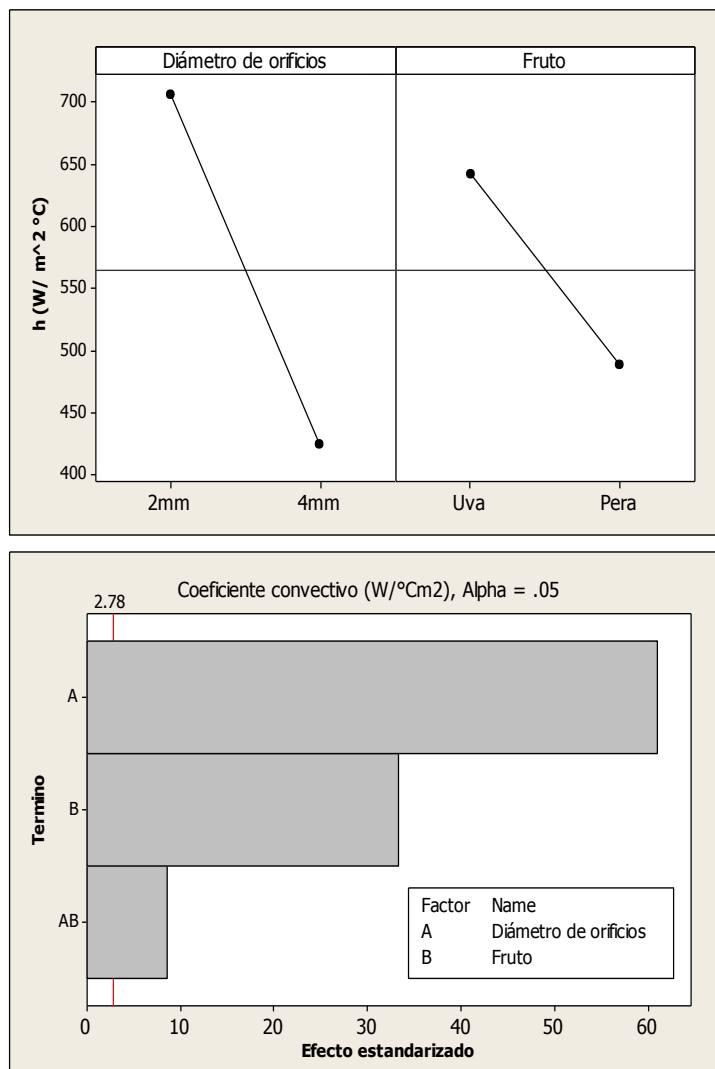
proceso es relativamente grande debido a las diferencias en las propiedades termofísicas entre el fluido modelo y el aire.

**Tabla 11.** Parámetros de enfriamiento.

Producto	Diámetro de orificios de la placa	Tiempo 1/2 de enfriamiento (min)	Tiempo 7/8 de enfriamiento (min)	$j$	Bi	$h_m$ (W/m <sup>2</sup> °C)
Uva	2 mm	2.08	5.42	1.2153	13.4	805.08
	4 mm	2.53	6.00	1.2494	8.1	485.32
Pera	2 mm	1.78	4.74	1.2135	17.5	602.33
	4 mm	1.93	4.98	1.2025	10.5	363.10

El preenfriamiento por hidrofuidización para las esferas de uva y pera tuvo una duración de 5 a 6 min, por lo que los parámetros  $Z$  y  $S$  son de gran utilidad para indicar la proximidad de terminación del proceso tanto de preenfriamiento como de recubrimiento. De acuerdo con la teoría, durante el preenfriamiento debe reducir un 87.5% (7/8) de la temperatura inicial hasta la temperatura óptima para la conservación de determinado producto, en este caso se consideró como 2°C la temperatura de almacenamiento para fruta fresca cortada. Por lo tanto, se abatió la temperatura desde 20°C hasta 4°C, por lo que durante el almacenamiento se debe reducir la temperatura de 4 a 2°C en aplicaciones prácticas.

La convección es un mecanismo de transferencia de calor propio de los fluidos, en el cual la naturaleza del fluido, la forma de agitación y una diferencia de temperaturas tienen influencia sobre el coeficiente superficial de transmisión de calor. En la figura 32 se observa que el coeficiente convectivo es mayor cuando el fluido pasa a través de la placa con orificios de 2 mm debido a que cuando un fluido pasa a través de una tubería de cierto diámetro y a continuación fluye por una reducción, aumenta la velocidad del fluido y la turbulencia en esa región.



**Figura 32.** Gráfica de efectos principales y gráfica de Pareto en el coeficiente superficial de transferencia de calor ( $h$ ).

La velocidad en la cámara limitante es de 0.028 m/s, esta velocidad es mayor que la velocidad mínima de fluidización la cual es de 0.019 m/s lo que promueve la fluidización y enfriamiento de los frutos. Durante el proceso, cuando el sistema modelo fluye a través de cambios de diámetro se provocan turbulencias dentro de la cámara limitante por lo que el fluido se encuentra en constante agitación. Este fenómeno promueve tiempos cortos de enfriamiento a menor diámetro de orificios y se puede observar en la tabla 11.



Lucas y Raoult-Wack (1998) presentaron algunos valores de coeficientes superficiales de transferencia de calor en distintos sistemas de enfriamiento. Para procesos de convección natural se tienen coeficientes de 210 a 290 W/m<sup>2</sup> °C y en procesos de convección forzada valores de 680 a 2,600 W/m<sup>2</sup> °C. Fikiin (1992) reportó valores por arriba de 900 W/m<sup>2</sup> °C en el proceso de hidrofluidización para congelar pescado y vegetales (Laurindo *et al.*, 2010).

En la tabla 12 se muestran otros valores de coeficientes superficiales de transmisión de calor obtenidos para diferentes procesos. Se puede observar que en el proceso de hidrofluidización se genera mayor convección en comparación con algunos otros procesos en condiciones similares.

**Tabla 12.** Coeficientes superficiales de transmisión de calor para aplicaciones de contacto directo.

Proceso	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	Referencia
<b>Inmersión</b> <b>-Convección forzada</b>	40-530	Lentz y Van der Berg, (1957)
	110-140	Venger y Nikiforov, (1990)
	200-400	Fikiin, (1992)
	80-213	Dincer, (1994)
	220-460	Ditchev <i>et al.</i> , (1990)
<b>-Con Burbujeo</b>	260-470	Fikiin, (1992)
<b>Aspersión</b>	330-430	Fikiin, (1992)
<b>Hidrofluidización</b>	550-900	Fikiin, (1992)
	154-1,548	Vervoven <i>et al.</i> , (2003)
	402-710	Jácome, (2011)

En la hidrofluidización se han reportado valores de coeficiente superficial de transferencia de calor de 154 a 1,548 W/m<sup>2</sup> °C; los valores obtenidos en este estudio para esferas de uva y pera resultan en este rango, siendo dependientes del diámetro de los orificios y en menor magnitud para frutos porosos.



En el presente trabajo se obtuvieron coeficientes superficiales de transferencia de calor entre 360 y 800 W/m<sup>2</sup> °C, para el enfriamiento de frutos de forma esférica. De acuerdo con el análisis de las micrografías presentadas en la siguiente sección, no se presentó daño estructural aparente en los frutos por causa de la agitación provocada por los chorros fluidizantes.

### 3.7 Evaluación del color del recubrimiento

Se empleó el plato hidrofuidizador con orificios de 2 mm de diámetro debido a que con este tamaño se obtuvieron menores tiempos de enfriamiento. A continuación se presentan los valores de croma (intensidad del color), ángulo de tono y diferencia total de color ( $\Delta E$ ). Para cada tipo de muestra respectivamente se consideró el valor de ángulo de tono según los siguientes valores: 0°=rojo, 90°=amarillo, 180°= verde, 270°= azul y 360°=0°.

En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos haciendo referencia a los tratamientos anteriormente descritos en la metodología.

**Tabla 13.** Resultados de la evaluación del color a los tratamientos de aplicación para el recubrimiento de las esferas de fruta.

Tratamiento	Uva sin hollejo			Esferas de pera		
	Croma	$^{\circ}h$	$\Delta E$	Croma	$^{\circ}h$	$\Delta E$
<b>TESTIGO</b>	4.33	55 <i>Amarillo-rojo</i>		20.49	75.63 <i>Amarillo-rojo</i>	
<b>1</b>	4.55	276.35 <i>Azul-rojo</i>	11.76	18.97	299.27 <i>Azul-rojo</i>	22.37
<b>2</b>	5.4	276.36 <i>Azul-rojo</i>	12.64	9.17	305 <i>Azul-rojo</i>	28.08
<b>3</b>	2.6	294.11 <i>Azul-rojo</i>	9.32	12.38	287.24 <i>Azul-rojo</i>	33.28
<b>4</b>	3.33	324.48 <i>Azul-rojo</i>	10.21	27.40	291.25 <i>Azul-rojo</i>	14.18

Los valores de  $\Delta E$  determinan el cambio total del color de la fruta sin recubrir a los tratamientos realizados en las esferas recubiertas; cuando este valor es igual a 1 se considera que no hay diferencia entre la muestra y el testigo (Gallardo, 2010).



En este caso para los cuatro tratamientos se obtuvieron resultados de  $\Delta E$  mayores a 1; por lo que en todos los casos hubo una diferencia de color con tendencia hacia el azul indicada por el ángulo de tono con valores cercanos a  $270^\circ$ , valor en CIELAB igual al azul, indicando que en todos los tratamientos existió un recubrimiento.

Las esferas de pera *d`Ajou* sin recubrir presentaron un valor de luminosidad ( $L^*$ ) promedio de 70.33; el cual disminuyó por el recubrimiento teñido de azul de metileno obteniéndose la luminosidad menor de 45.13 del tratamiento 2 (recubrimiento por hidrofuidización a temperatura ambiente  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , dispersión a  $2 \pm 0.5^\circ\text{C}$  durante tiempo de convencional de recubrimiento de 1min). Al existir una diferencia numérica mayor entre los valores de  $L^*$  respecto de  $a^*$  y  $b^*$ , los valores de  $\Delta E$  resultan mayores debido a que al comparar una luminosidad cercana a 100 (blanco) de 70.33 a una de 43.13 aproximada al negro (Casassa, 2006), la diferencia de color entre las esferas de pera testigo y las recubiertas resulta mayor.

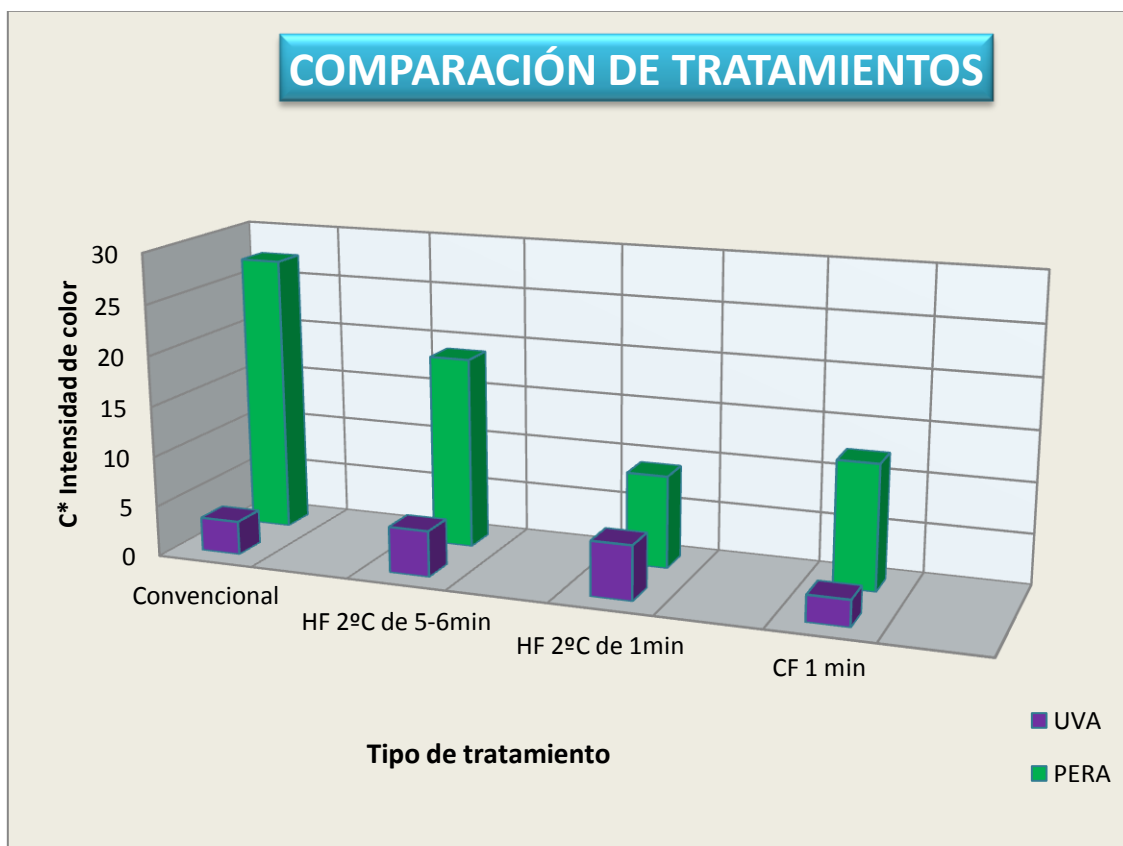
Lo anterior se sustenta en valores de  $L^*$  experimentales de 72 reportados para pera mínimamente procesada para su almacenamiento a  $4^\circ\text{C}$  en cámara de refrigeración, en donde dicha luminosidad se ve reducida en promedio a 30 por su impregnación al vacío con agentes antioxidantes (Perez-Cabrera *et al.*, 2011).

Para las uvas *Red Globe* sin recubrir con una  $L^*$  promedio de 32.33, su luminosidad también se vio disminuida de manera más significativa para el tratamiento 2 con  $L^*$  de 23.48, aunque con valores de  $\Delta E$  menores debido a que la diferencia numérica entre los valores de luminosidad no es grande respecto de  $a^*$  y  $b^*$ .

Los valores reportados de croma ( $C^*$ ) o intensidad de color, indican la saturación del color hacia la cual va dirigido en ángulo de tono (Casassa, 2006). Aunque todos tratamientos para recubrir poseen una tendencia al azul (cercana a los  $270^\circ$ ), la saturación entre los mismos es distinta. En escala CIE-LAB la saturación de azul antes de pasar del color rojo saturado es entre los ángulos  $290^\circ$  y  $310^\circ$ , mientras los grados del  $225^\circ$  al  $290^\circ$  presentan la gama de tonalidades del azul no saturado siendo formalmente el color azul puro  $270^\circ$ .



En la figura 33 se muestra la comparación del C\* de los tratamientos aplicados para recubrir las esferas de fruta, con el tratamiento convencional para recubrir fruta fresca cortada con dispersiones de nanocápsulas.



**Figura 33.** Comparación de los tratamientos de recubrimiento sobre la Intensidad de color HF: hidrofluidización, CF: enfriamiento en cámara de refrigeración por convección forzada.

De acuerdo a lo anterior, el tratamiento convencional (recubrimiento por inmersión durante un minuto a temperatura del recubrimiento de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) presentó la intensidad de color más elevada de 27.40 con ángulo de tono de  $291.25^\circ$  en saturación del azul respecto a los otros tratamientos; el color del recubrimiento se absorbe en la estructura porosa de la pera debido a que ésta permanece inerte durante la inmersión.

Si bien el objetivo es formar el recubrimiento en la superficie de la esfera de fruta, en el caso de la pera, la hidrofluidización limita la formación del recubrimiento durante la



operación por las turbulencias generadas; obteniéndose la saturación del color y ángulo de tono más adecuados de 18.97 y 299.27° en el tratamiento 1 (recubrimiento por hidrofluidización, temperatura inicial del producto a  $20\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  y medio de enfriamiento a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , durante tiempo de preenfriamiento de 5 a 6 min) el cual presenta una mayor intensidad del color azul respecto a otros tratamientos por hidrofluidización en la estructura porosa de la pera, como se comprobó en los resultados de microscopía, con un ángulo de tono 299.27°.

La uva *Red Globe* al poseer una estructura no porosa, crea un efecto de deslizamiento del recubrimiento en su superficie, por ello el recubrimiento convencional presenta una intensidad de color de 3.33 y un ángulo de tono de 324.48° en rojo saturado, debido a que la inmersión por un minuto no es suficiente para que exista una intensidad uniforme del azul en la superficie de la uva sin hollejo.

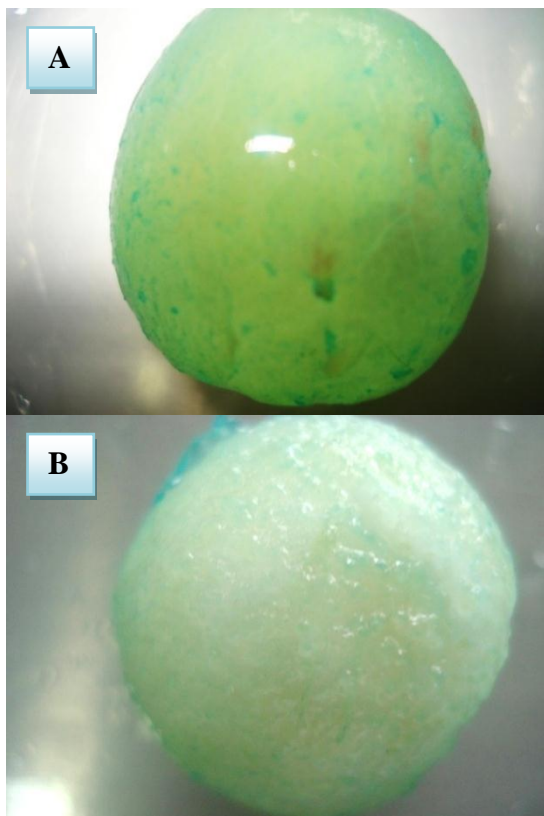
El recubrimiento por hidrofluidización (figura 34) de los tratamientos 1 y 2 (recubrimiento por hidrofluidización, temperatura inicial del producto a  $20\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  y medio de enfriamiento a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , durante tiempo de preenfriamiento de 5 a 6 min y recubrimiento por hidrofluidización durante 1 minuto, temperatura inicial del producto a ( $20\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ) y medio de enfriamiento a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) resultaron similares; la intensidad de color de 4.55 y 5.4 respectivamente con ángulo de tono de 276° cercano al azul puro, permiten una intensidad más uniforme del azul en la superficie total de la uva sin hollejo.

El movimiento de las esferas de fruta durante la hidrofluidización no permite que la dispersión se asiente de la misma manera que en el recubrimiento convencional. Para el recubrimiento por hidrofluidización durante un minuto, temperatura medio de enfriamiento a  $2\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  en producto previamente enfriado en cámara de refrigeración por convección forzada a  $4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , la intensidad de color para la uva fue la menor de todos los tratamientos aplicados; la adherencia del fluido a la pared del fruto a  $4^{\circ}\text{C}$  es menor en comparación a las uvas *Red Globe* sin hollejo con tratamiento por hidrofluidización desde su temperatura ambiente.

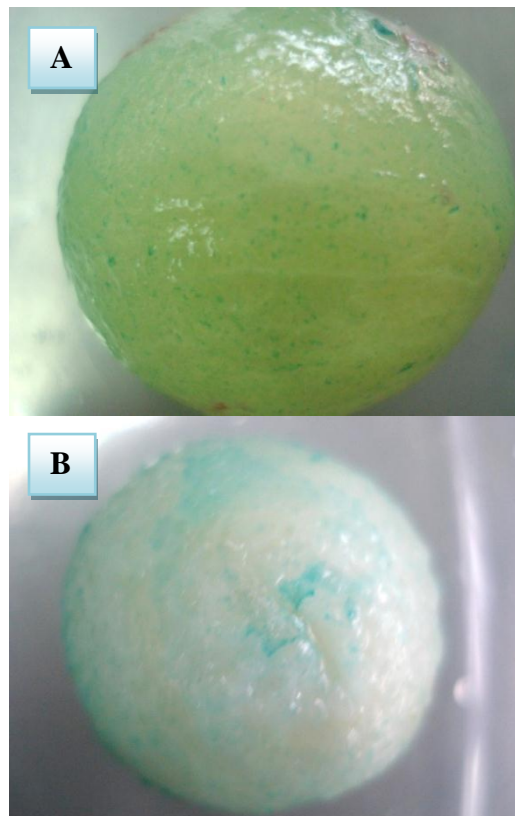




En cuanto al tratamiento por hidrofluidización para la uva en el que no considera el tiempo de enfriamiento (figura 35); la intensidad de color es más elevada respecto a la obtenida por hidrofluidización considerando el tiempo de preenfriamiento. Lo que indica que el tiempo necesario para el preenfriamiento disminuye la capacidad de recubrimiento del dispositivo hidrofluidizador.



**Figura 34.** Uvas sin hollejo (A) y pera (B) recubiertas por hidrofluidización.



**Figura 35.** Uvas sin hollejo (A) y pera (B) recubiertas por hidrofluidización durante 1 min, preenfriadas por convección forzada.

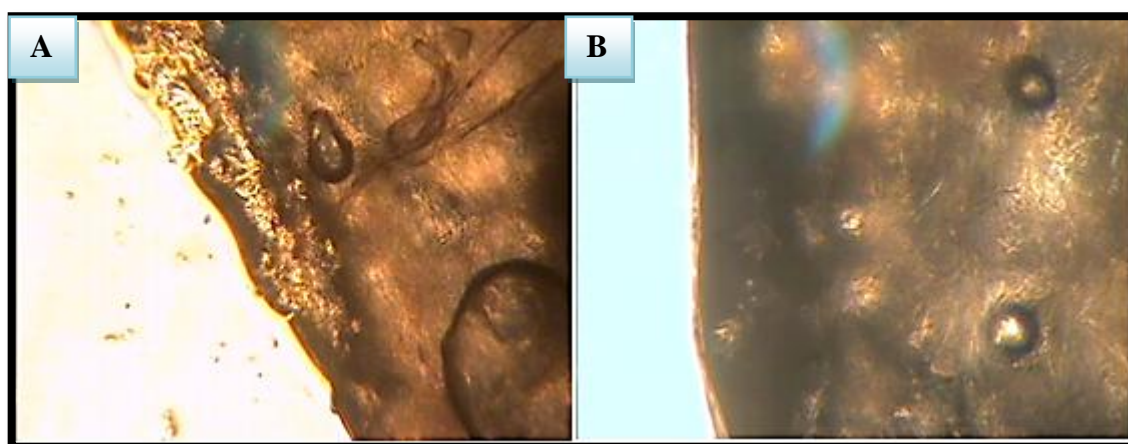
### 3.8 Evaluación microscópica del recubrimiento

Uno de los objetivos principales del presente trabajo fue implementar el método de hidrofluidización como método de aplicación de un recubrimiento de nanocápsulas; debido a la gran importancia que han adquirido los recubrimientos biodegradables y comestibles como una tecnología emergente en la conservación de alimentos frescos.



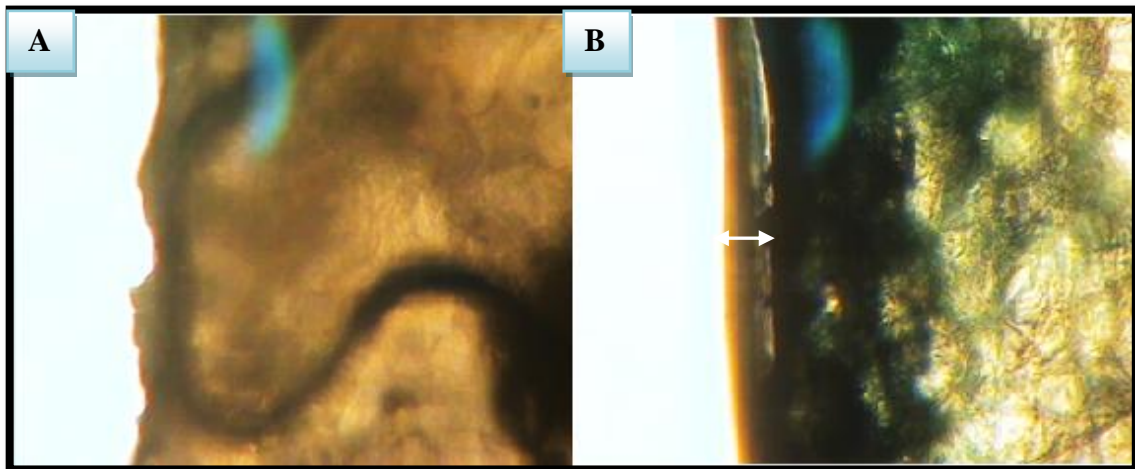
Algunos de los métodos convencionales para la aplicación de recubrimientos tienen la desventaja de formar recubrimientos que no son homogéneos. El propósito de estos recubrimientos es prolongar la vida útil en refrigeración y controlar la pérdida de peso, sabores y aromas volátiles, actuando como barrera a la humedad, oxígeno y dióxido de carbono; o bien, actuar como portador de sustancias bioactivas que mejoren o conserven las propiedades organolépticas del fruto.

La evaluación microscópica permitió observar el recubrimiento formado por hidrofuidización, así como comparar las diferencias existentes con el método convencional para aplicar recubrimientos y el cual es la inmersión. En la figura 36 se muestran las micrografías de los frutos sin haber recibido algún tratamiento de enfriamiento o recubrimiento. Estas fotografías fueron incluidas como punto de referencia para el análisis de las siguientes imágenes.



**Figura 36.** Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) sin tratamiento a 20X.

Las micrografías de la figura 37 se ven teñidas de color azul y en el caso de la uva se aprecia la formación del recubrimiento. Esta capa es una resistencia a la disipación del calor de campo e influye en la operación aumentando los tiempos de enfriamiento. El tiempo 7/8 de enfriamiento por hidrofuidización de la uva con la placa de 2 mm fue de 325 s (5.4 min) y el de la pera fue de 284 s (4.7min). La baja viscosidad del fluido, la porosidad y las turbulencias formadas en la cámara limitante provocaron que no se formara la capa de recubrimiento alrededor de la pera.

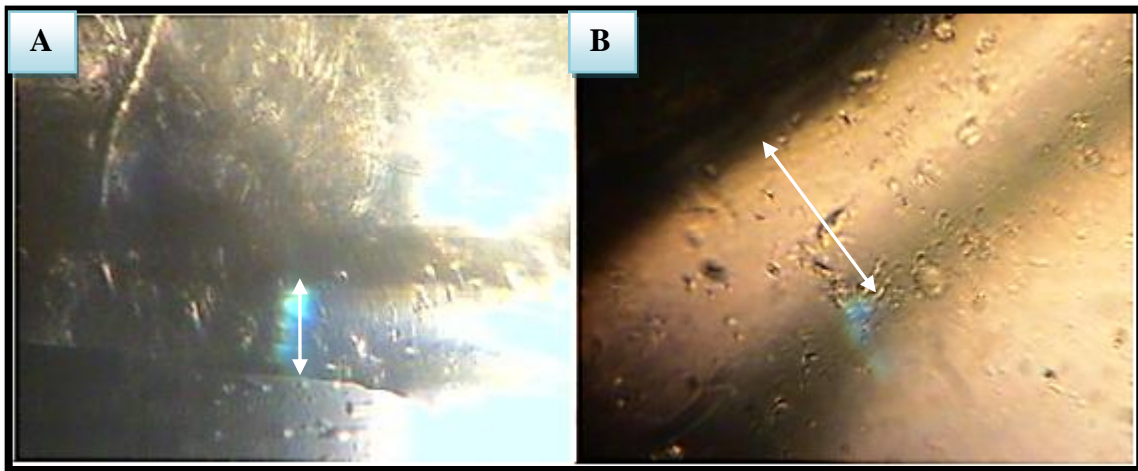


**Figura 37.** Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) enfiadas por hidrofluidización en la placa con orificios de 2 mm a 20X.

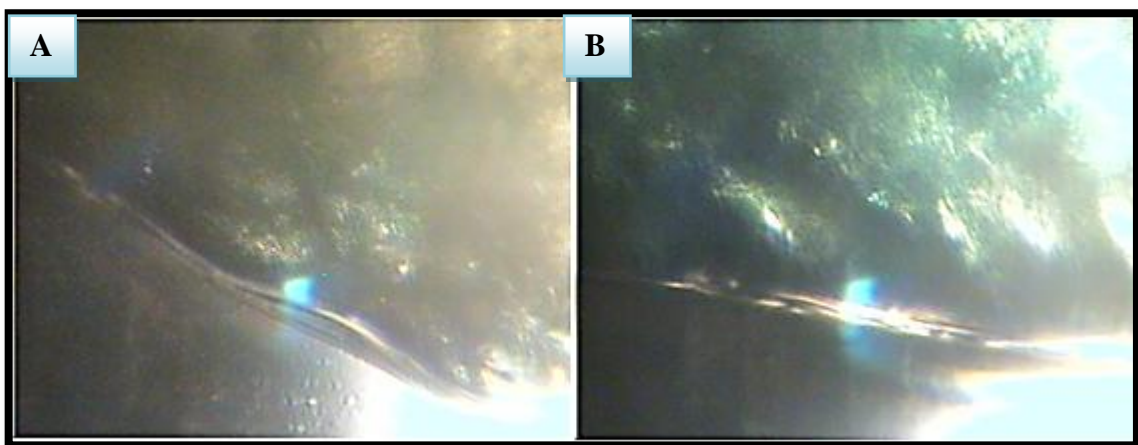
El método convencional de recubrimiento es la inmersión durante un minuto y en comparación con el método por hidrofluidización existen grandes diferencias; la primera de estas es el tiempo de residencia en el hidrofluidizador que está determinado por el tiempo de preenfriamiento (aproximadamente entre 4.7 y 5.4 minutos).

Otra de las diferencias más significativas entre las dos operaciones es que en la hidrofluidización predomina la convección forzada, es decir, el fruto se encuentra en constante movimiento provocado por las corrientes turbulentas presentes en el sistema. Estas turbulencias ocasionan que la capa límite formada alrededor de los frutos sea de menor espesor o en el caso específico de productos porosos que no se forme, como se observa en la micrografía de la pera en la figura 37 (A).

El método de inmersión como método de recubrimiento es de los más utilizados para la aplicación de recubrimientos por ser una operación simple y de bajo costo (Embuscado and Huber, 2009). En la figura 38 se observa que la inmersión es un método de recubrimiento efectivo tanto en productos porosos como en aquellos que no lo son. En estas micrografías se observa claramente la formación del recubrimiento por inmersión durante un minuto a temperatura ambiente.



**Figura 38.** Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) recubiertas por inmersión durante 1 minuto a 20X.



**Figura 39.** Micrografías de esfera de pera (A) y uva sin hollejo (B) recubiertas por hidrofluidización a temperatura ambiente a 20X.

También se realizó el tratamiento de hidrofluidización a una temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ , para conocer el efecto de la temperatura en el recubrimiento. Las propiedades de flujo de fluidos dependen de la temperatura, al aumentar la temperatura la viscosidad de los fluidos disminuye y esto provocó que el recubrimiento no se adhiriera sobre los frutos en la hidrofluidización a temperatura ambiente y que sólo se tiñeran. Además de la baja viscosidad del fluido, los chorros fluidizantes causaron que no se formara el recubrimiento, de acuerdo a las micrografías de la figura 39.



## CONCLUSIONES

La principal ventaja del preenfriamiento por hidrofuidización es que hace posible la aplicación de un recubrimiento de nanocápsulas en fruta fresca cortada, estableciendo esta operación como un método alternativo y eficaz en el manejo postcosecha de frutos, pudiendo ser empleada a escala industrial. La evaluación de la topografía de los frutos permitió establecer que la formación del recubrimiento depende de las propiedades reológicas del fluido modelo, de las características físicas y superficiales del producto a preenfriar. El fluido modelo de nanocápsulas a baja temperatura, el cual tuvo como principal objetivo formar un recubrimiento sobre los frutos, fue un medio con las propiedades termofísicas adecuadas para el abatimiento de la temperatura de los productos. Los valores obtenidos de Biot mayores a 10 evaluados a partir de los parámetros de transmisión térmica de la dispersión modelo de nanocápsulas y de los productos esféricos; determinaron que durante el enfriamiento, las resistencias térmicas externas pueden ser despreciables y que las propiedades termofísicas de los productos son las que influyen más en la disipación de calor durante el proceso. Emplear una dispersión de nanocápsulas como medio de enfriamiento en la hidrofuidización, tuvo resultados benéficos para la operación; ya que se obtuvieron valores de coeficientes superficiales de transferencia de calor entre 363.10 y 805.05  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ . La formación del recubrimiento durante la hidrofuidización depende del tiempo de enfriamiento, de la viscosidad del medio, porosidad del fruto y de las turbulencias formadas durante la operación. En condiciones de altos coeficientes convectivos se obtuvieron los valores más altos de intensidad de color en las esferas de fruta. Se logró recubrir la uva sin hollejo y las esferas de pera empleando una dispersión modelo de nanocápsulas durante el tiempo de preenfriamiento. Sin embargo, se concluye que en el caso de productos porosos se necesita un fluido de mayor viscosidad. Los resultados del estudio ubican a la hidrofuidización como una alternativa más para el procesamiento de fruta mínimamente procesada, de la cual se pueden retomar los resultados para realizar futuras investigaciones empleando una dispersión de nanocápsulas en un equipo prototipo.



---

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J. d., y Aguilera, J. M. (2001). Métodos para medir Propiedades Físicas en Industrias de Alimentos. Acribia, España.
- Becker, B. R., and A. Fricke, B. (2002). Hydrocooling time estimation methods. Int. Commite of Heat Mass Transfer, 29 (2), 165-174.
- Berk, Z. (2009). Food Processing Engineering and Technology. Academic Press, New York.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. (1992). Fenómenos de Transporte. Repla, México.
- BONH de México. (2008). Boletin 32: Panorámica del preeenfriado en frutas y vegetales. BOHN de México, 1-14.
- Bósquez-Molina, E. (2003). Elaboración de recubrimientos comestibles formulados con goma de mezquite y cera de candelilla para reducir la cinetica de deterioro en fresco del limon persa (*Citrus latifolia* Tanaka). Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.
- Brosnan, T., and Sun, D.-W. (2001). Precooling techniques and applications for horticultural products: a review. International Journal of Refrigeration, 154-170.
- Casassa, F., y Sari, S. (2006). Aplicación del Sistema CIE-LAB a los vinos tintos. Correlación con algunos parametros tradicionales. Revista Enología (3).
- CESNID. (2008). Tablas de Compocisión de Alimentos. Mc Graw Hill, Madrid.
- Dinçer, I. (1995). Air Flow Precooling of Individual Grapes. Journal of Food Engineering, 26, 243-249.
- Dinçer, I. (1997). Heat Transfer in Food Cooling Applications. Washington: Taylor and Francis.
- Embuscado, M. E., and Huber, K. C. (2009). Edible films and coatings for food applications. Springer, New York.
- Fricke, B. A., and Becker, R. B. (2002). Hydrocooling time estimation methods. International Commite of Heat Transfer, 165-174.



- 
- Gallardo, J. C. (2010). Manejo de las fórmulas de diferencias de color vs límites de aceptabilidad. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Departamento de Óptica, Puebla.
- Gast, K. L. (1991). Precooling produce: fruits and vegetables. Extension Food Engineering Specialist, Agricultural Engineering. Kansas.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3ra ed., CECSA, México.
- Glynn, C., and Murray, D. (2005). Jet impingement cooling in microscale. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, 25-30.
- Heldmand, D. R., and Lund, D. B. (1992). Handbook of Food Engineering. Mercel Dekker Inc., New York.
- Huynh, N. T., Passirani, C., Saulnier, P., and Benoit, J. P. (2009). Lipid nanocapsules: A new platform for nanomedicine. International Journal of Pharmaceutics, 379, 201-219.
- Jácome, A. (2011). Propuesta de correlación matemática para precedir parámetros de transmisión térmica en un proceso de enfriamiento por hidrofuidización. Tesis de Licenciatura de Ingeniería en Alimentos, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Kilickan, A., Ucer, N., and Yalcin, I. (2010). Moisture-dependent physical properties of black grape (*Vitis vinifera* L.) seed. Scientific Research and Essays, 5 (16), 2226-2233.
- Kreith, F. (2000). *The CRC of Thermal Engineering* . CRC Press, USA.
- Laurindo, J., Carciofi, B., Silva, R., Dennenhauer, C., and Hense, H. (2010). Evaluation of the effects of water agitation by air injection and water recirculation on the heat transfer coefficients in immersion cooling. Journal of Food Engineering, 96, 59-65.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw Hill, España.
- Mora-Huertas, C. E., Fessi, H., and Elaissari, A. (2011). Influence of process and formulation parameters on the formation of submicron particles by solvent displacement and emulsification-diffusion methods critical comparison. Advances in Colloid and Interface Science, 163, 90-122.



- 
- Naztruzzi, C. (2005). *Lipospheres in drug targets and delivery: approaches, methods and applications*. CRC Press, Boca Raton.
- Ozturk, I., Ercisli, S., Kalkan, F., and Demir, B. (2009). Some chemical and physico-mechanical properties of pears cultivars. *African Journal of biotechnology*, 8 (4), 687-693.
- Petrón, M. (2011). Efecto de la concentración de nanopartículas lipídicas sólidas sobre las propiedades ópticas y mecánicas de recubrimientos in vitro”. Tesis de Licenciatura de Ingeniería en Alimentos, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Peralta, J. M., Rubiolo, C., and Zorrilla, E. (2009). Desing and construction of hydrofluidization system. *Journal of Food Engineering*, 90, 358-364.
- Perez-Cabrera, L., Chafer, M., Chiralt, A., and Gonzalez-Martinez, C. (2011). Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear. *LWT-Food Sience and Technology*, 1-8.
- Ravindra, M. R., and Goswami, T. (2008). Comparative performance of precooling methods for the storage of mangoes. *Journal and Food Process Engineering*, 31, 354-371.
- Rojas-Graü, M. A., y Martín Belloso, O. (2006). Factores que afectan la calidad de productos vegetales cortados. *CIAD*, 23-48.
- Rojas-Graü, M., Tapia, M., Rodríguez, F., Carmona, A., and Martin-Belloso, O. (2007). Alginate and gellan-based edible coatings as carriers of antibrowning agents applied on fresh-cut Fuji apples. *Food Hydrocolloids* , 21, 118-127.
- Sánchez, V. (2011). Efecto del recubrimiento a base de nanocápsulas de vitamina E, sobre el índice de oscurecimiento de rebanadas de manzana variedad *Red Delicious*”. Tesis de Licenciatura de Ingeniería en Alimentos, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
-





- 
- Schilling, C. H., Sikora, M., Tomasik, P., Li, C., and García, V. (2002). Rheology of alumina–nanoparticle suspensions: effects of lower. *Journal of the European Ceramic Society*, 22, 917-921.
- SEP (2008). *Control de Calidad de Productos Agropecuarios*. Trillas, México.
- Smith, P. G. (2007). *Applications of Fluidization to Food Processing*. Backwell Publishing, Oxford.
- Sotelo A., G. (1982). *Hidraulica general*. 6ta ed., vol. 1. Limusa, México.
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Freeman Press, USA.
- Timothy, J. R. (1999). *Effects of vacuum rate on the vacuum cooling lettuce*. Tesis de Maestria en Ciencias, McGill University, Montreal.
- Valle-Guadarrama, S., López-Rivera, O., Reyes-Vigil, M., Castillo-Merino, J., y Santos-Moreno, A. (2008). Recubrimiento comestible basado en goma arábica y carboximetilcelulosa para conservar furtas en atmósfera modificada. *Revista de Chapingo*, 14 (3), 235-241.
- Vallespir, A. N. (1990). El Preenfriamiento. *Horticultura global: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola*, 56-79.
- Verboven, P., Scheerlinck, N., and Nicolai, B. M. (2002). Surface heat transfer coefficients to stationary spherical particles in an experimental unit for hydrofluidisation freezing of individual foods. *International Journal of Refrigeration*, 26, 328-336.
- Weigand, B., and Spring, S. (2009). Multiple jet impingement – A review. *Int. Symp. On Heat Transfer in Gas Turbine System*. Antalya, Turkey.



## APÉNDICE A. Cálculo para determinar la necesidad de aislante.

El sistema de tuberías del hidrofluidizador es de PVC con un diámetro nominal de 1", diámetro interno de 1.049 in y diámetro externo de 1.315 in. La conductividad térmica del PVC es de 0.16 W/m °C. Considerando una temperatura ambiental de 22°C y una temperatura del medio de enfriamiento de 2°C, se determinó si era necesario colocar material aislante alrededor del sistema de tuberías.

El flujo volumétrico en la tubería se estableció experimentalmente obteniendo como resultado 4.59E-4 m<sup>3</sup>/s.

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4(4.59 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s})}{\pi(0.0266m)^2} = 0.826 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{(0.0266m)(0.826 \frac{m}{s})(999.93 \frac{Kg}{m^3})}{1.6728 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}} = 13,133.7$$

Debido a que el régimen de flujo fue turbulento, se utilizó la siguiente correlación para calcular el número adimensional de Nuselt (Nu). El número de Prandlt (Pr) se estableció por medio de las tablas de propiedades de transferencia de calor (Geankoplis, 1998).

$$Nu = 0.23 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.23(13,133.7)^{0.8} (12.48)^{0.4} = 1,244.3$$

Por lo tanto, el coeficiente superficial de transferencia de calor del agua a 2°C es:

$$h = \frac{(Nu)(k_T)}{D_{tub}} = \frac{(1,244.33)(0.5648 \frac{W}{m^{\circ}C})}{0.0266m} = 26,420.22 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$



Se empleó la siguiente secuencia de cálculo para determinar el coeficiente superficial del aire. Las propiedades físicas y el número de Prandtl del aire se establecieron a partir de tablas (Geankoplis, 1998).

$$Gr = \frac{(D_{ext})^3(\rho)^2(g)(\beta)(\Delta T)}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{(0.0334m)^3 (1.192 \frac{kg}{m^3})^2 (9.81 \frac{m}{s})(3.375 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1})(22 - 2)^\circ C}{(1.84 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms})^2}$$

$$Gr = 103,544.97$$

$$Nu = 0.59[(Gr)(Pr)]^{0.25} = 0.59[(103,544.97)(0.701)]^{0.25} = 9.68$$

$$h = \frac{(Nu)(k_T)}{D_{ext}} = \frac{(9.68)(0.0245 \frac{W}{m^\circ C})}{0.0334m} = 7.1 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$q_0 = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_{agua}} + \frac{\Delta x}{k_{TPVC}} + \frac{1}{h_{aire}}}$$

Velocidad de transferencia de calor con la que adquiere energía el fluido del medio ambiente.

$$q_0 = \frac{20^\circ C}{\frac{1}{26,420.22 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}} + \frac{0.0067m}{0.16 \frac{W}{m^\circ C}} + \frac{1}{7.1 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}} = 109.43 \frac{W}{m^2}$$

Se calculó la velocidad de transferencia de calor con la que se debería ganar energía.

$$\dot{m} = Q\rho = (4.59 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s})(999.93 \frac{kg}{m^3}) = 0.4689 \frac{kg}{s}$$



$$Q_0 = m\dot{C}_p\Delta T = (0.4589 \frac{kg}{s})(4.213 \frac{kJ}{kg^\circ C})(1.5^\circ C) = 2.9 \frac{kJ}{s} = 2900W$$

$$q_0 = \frac{Q_0}{A} = \frac{2900W}{0.2506 m^2} = 11,572.22 \frac{W}{m^2}$$

Se concluyó que no es necesario recubrir el sistema de tuberías con material aislante debido a que la velocidad de transferencia de calor con la que se gana calor es aproximadamente 100 veces menor que la velocidad con la que debería ganar calor.



## APÉNDICE B. Cálculos mecánica de fluidos y transferencia de calor.

El número de Reynolds se determinó en distintas zonas del dispositivo hidrofuidizador para relacionar la influencia del régimen de flujo sobre los parámetros de transferencia de calor de mayor importancia durante el preenfriamiento y recubrimiento de uva *Red Globe* sin hollejo y esferas de pera *d'Anjou*.

Las ecuaciones para la determinación del Re se consideraron para un fluido newtoniano, según lo establecido con anterioridad en la caracterización reológica del fluido modelo.

$$Re_{tub} = \frac{(D)(v)(\rho)}{\mu}$$

$$Re_{tub} = \frac{(0.026m)(0.787 \frac{m}{s})(1018 \frac{kg}{m^3})}{0.008 \frac{kg}{m.s}} = 2603.78$$

Las siguientes ecuaciones para la determinación del Re a la salida de los orificios del plato hidrofuidizador consideran la velocidad del fluido por orificio (Verboven *et al.*, 2002).

$$v_o = \frac{Q_{camara\ limitante}}{(\text{Número de orificios})(\text{Area de orificios})}$$

$$v_{o4mm} = \frac{4.09E - 04 \frac{m^3}{s}}{(29)(1.2566E - 5m^2)} = 1.12 \frac{m}{s}$$

$$v_{o2mm} = \frac{6.54E - 04 \frac{m^3}{s}}{29 \times 3.14E - 6m^2} = 7.18 \frac{m}{s}$$



$$Re_o = \frac{D_o v_o \rho}{\mu}$$

$$Re_{o_{2\text{mm}}} = \frac{(0.002\text{m})(7.18 \frac{\text{m}}{\text{s}})(1018 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{0.008 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}} = 1827.3$$

$$Re_{o_{4\text{mm}}} = \frac{(0.004\text{m})(1.12 \frac{\text{m}}{\text{s}})(1018 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{0.008 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}} = 570.0$$

Para el cálculo del régimen de flujo en el tanque limitante se consideraron las siguientes ecuaciones (Verboven *et al.*, 2002). A continuación se presentan la secuencia de cálculo para la obtención de los parámetros de transferencia de calor. Ejemplo: hidrofuidización de pera empleando plato hidrofuidizador con orificios de 2 mm de diámetro.

$$Pr = \frac{Cp\mu}{k_T} = \frac{(4160 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}})(0.008 \frac{\text{kg}}{\text{ms}})}{(0.56 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}})} = 59.42$$

$$Nu = (0.267188)(1827.31)^{0.432436} (59.42)^{\frac{1}{3}} = 26.89$$

$$h = \frac{Nuk_T}{D} = \frac{(26.89)(0.56) \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}}{(0.025\text{m})} = 602.33 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$$

$$Bi = \frac{hx}{k_T} = \frac{602.33 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \times 0.0125\text{m}}{0.43 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} = 17.5$$



### APÉNDICE C. Pérdidas de carga y balance mecánico de energía.

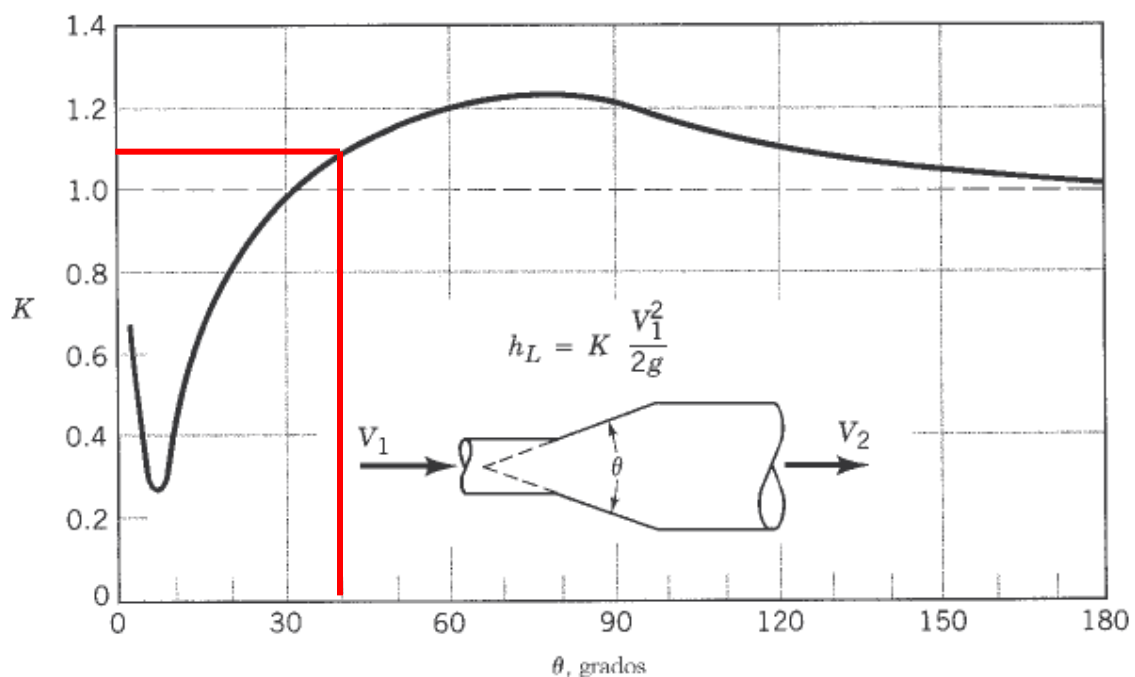
Para la determinación de las pérdidas de carga (caída de presión) originadas por el diseño del dispositivo hidrofluidizador, se determinó el coeficiente de resistencia K en la reducción y expansión existentes desde la cámara de fondo a la cámara limitante respectivamente. Se consideraron los siguientes valores anteriormente calculados:

**Tabla 14.** Valores calculados para la determinación de las pérdidas de carga.

<b>Número de placas para hidrofluidizar</b>	<b>2</b>
<b>Diámetro orificios 4mm</b>	0.004 m
<b>Diámetro orificios 2mm</b>	0.002 m
<b>Diámetro tubería 1"</b>	0.026 m
<b>Diámetro de embudo (17cm)</b>	0.17 m
<b>Número de orificios</b>	29
<b>Diámetro orificios 4mm</b>	0.004 m
<b>Diámetro orificios 2mm</b>	0.002 m
<b>Velocidad tanque limitante 2 mm</b>	0.028 m/s
<b>Velocidad tanque limitante 4mm</b>	0.017 m/s
<b>Velocidad en orificio 2 mm 29 orificios</b>	7.1784 m/s
<b>Velocidad en orificio 4 mm 29 orificios</b>	1.1223 m/s
<b>Velocidad en tubería</b>	0.787 m/s

-Cálculo de K y pérdidas de carga para una expansión suave:

Debido a que el embudo representa una expansión gradual de 40°; que es el valor del ángulo en pendiente del embudo de un diámetro de 0.26 m a 0.17 m es necesario determinar las perdidas por carga que representan a la salida del diámetro de tubería de la bomba al tanque que es de 1". Se consideró el material de elaboración del embudo, el cual es PVC. Las determinaciones de las pérdidas de carga en este material han sido ampliamente estudiadas por la hidráulica, por lo tanto considerando que el fluido modelo (simulación para la dispersión de nanocápsulas) es un fluido newtoniano, es posible emplear estas ecuaciones para la determinación de K y pérdidas de carga.



**Figura 40.** Coeficiente K para expansión suave (Sotelo A., 1982).

Valor gráfico de K para expansión suave con un ángulo de 40°: 1.1

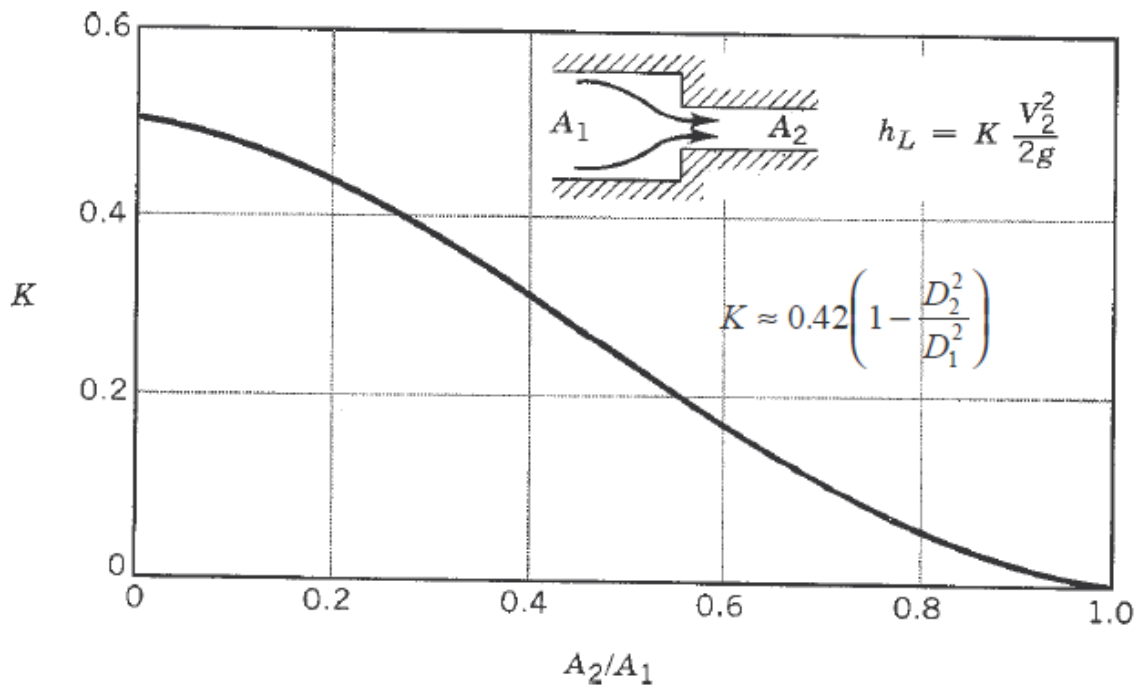
$$h_L = K \frac{v_1^2}{2g} = 1.1 \left[ \frac{(0.787 \frac{m}{s})^2}{2g} \right] = 0.34 \frac{J}{kg}$$

-Cálculo de K y pérdidas de carga para una expansión suave en una reducción brusca:

Se determinaron las pérdidas de carga por orificio en el plato hidrofuidizador debido al cambio de diámetro tan significativo en el mismo. Se realizó el cálculo de la K por orificio para obtener un valor global de K para los platos con orificios de 2 y 4 mm.

Se puede realizar este cálculo por el método gráfico en el caso de una expansión, pero debido a que los diámetros de los orificios en el plato de hidrofuidización son pequeños, se empleó la ecuación representada en la figura 41.





**Figura 41.** Coeficiente K para reducciones bruscas (Sotelo A., 1982).

$$K_{4mm} = 0.42 \left( 1 - \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) = 0.42 \left( 1 - \frac{0.004^2 m}{0.17^2 m} \right) = 0.4197 \times 29 \text{ orificios} = 12.1733$$

$$K_{2mm} = 0.42 \left( 1 - \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) = 0.42 \left( 1 - \frac{0.002^2 m}{0.17^2 m} \right) = 0.4199 \times 29 \text{ orificios} = 12.1783$$

$$h_{L4mm} = K \frac{v_2^2}{2g} = 12.1733 \times \left[ \frac{(1.1223 \frac{m}{s})^2}{2g} \right] = 7.66 \frac{J}{kg}$$

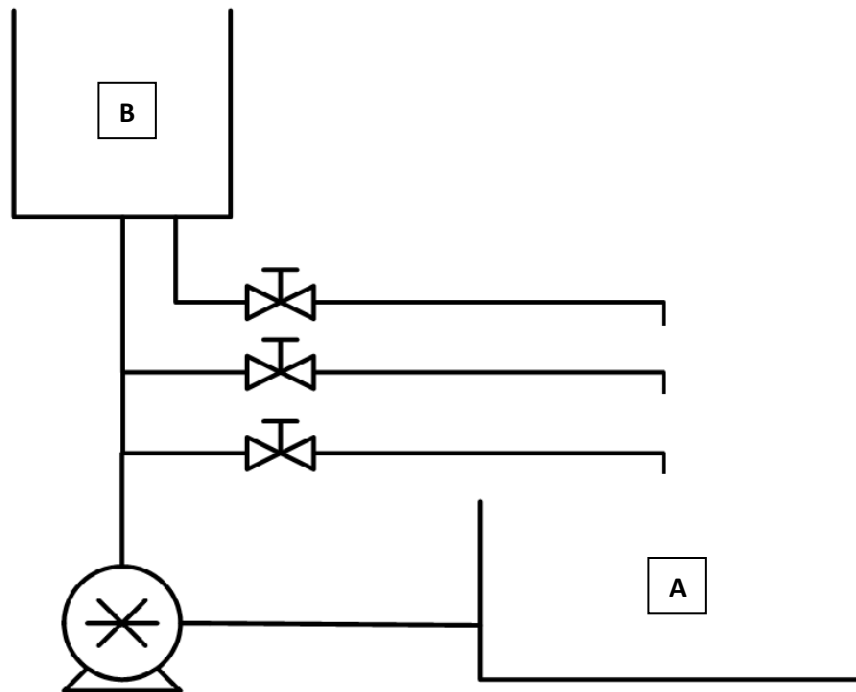
$$h_{L2mm} = K \frac{v_2^2}{2g} = (12.1783) \left[ \frac{(7.1784 \frac{m}{s})^2}{2g} \right] = 313.77 \frac{J}{kg}$$



$$\Sigma h_{L(4mm)} = 0.34 \frac{J}{kg} + 7.66 \frac{J}{kg} = 8.007 \frac{J}{kg}$$

$$\Sigma h_{L(2mm)} = 0.34 \frac{J}{kg} + 313.77 \frac{J}{kg} = 314.11 \frac{J}{kg}$$

**Balance mecánico de energía.**



$$W = \Delta P_{A-B} + \frac{\Delta z_{A-B} * g}{gc} + \frac{\Delta v^2}{2\alpha gc} + H_{FS-TUB-A-B} + H_{FS-ACC-A-B}$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{P_B}{\rho_B} - \frac{P_A}{\rho_A}$$

$$P_B = P_{ATM} + P_{H_2O}$$



$$P_{H_2O} = \frac{(\rho)(g)(h)}{gc} = \frac{(1018 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(0.08m)}{1 \frac{kgm}{Ns^2}} = 747.6Pa$$

$$P_B = 77993Pa + 747.6Pa = 78,740.6Pa$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{78,740.6Pa}{1018 \frac{kg}{m^3}} - \frac{77,993Pa}{1018 \frac{kg}{m^3}} = 0.734 \frac{J}{kg}$$

### **Pérdida de carga por diferencia de diámetros en el tanque limitante**

$\alpha=1$  para fluidos newtonianos según Steffe

$$\frac{\Delta v^2}{2(\alpha)(gc)} = \frac{(0.787 \frac{m}{s})^2}{2gc} - \frac{(0.01907 \frac{m}{s})^2}{2gc} = 0.31 \frac{J}{kg}$$

### **Pérdida de carga por diferencia de alturas en los tanques**

$$\frac{\Delta z_{A-B} * g}{gc} = \frac{(0.88m)(9.81 \frac{m}{s^2})}{1 \frac{kgm}{Ns^2}} = 8.63 \frac{J}{kg}$$

### **Pérdidas de carga por fricción en la tubería**

$$H_{FS-TUB-A-B} = \frac{(L_{TUB-A-B} v^2) F_f}{2(D)(gc)}$$

El factor de fricción fue obtenido mediante la ecuación de Colebrook. Para solucionar esta ecuación, se necesita llevar a cabo un cierto número de iteraciones hasta obtener un valor correcto.

$F_f = 0.0455$ ;  $r_e = 0.0015$  mm para PVC

$$\frac{1}{\sqrt{F_f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.71D}\right) + \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{F_f}}\right)$$



$$Re = \frac{(0.026 m)(1018 \frac{kg}{m^3})(0.787 \frac{m}{s})}{0.008 \frac{kgm}{s}} = 2,603.7$$

$$H_{FS-TUB-A-B} = \frac{L_{TUB-A-B} v^2 F_f}{2Dgc} = \frac{(1.24m)(0.787 \frac{m}{s})^2 (0.0455)}{2(0.026m) * gc} = 0.672 \frac{J}{kg}$$

### **Pérdidas de carga por fricción en accesorios**

El hidrofuidizador cuenta con dos Tee a lo largo de la tubería principal y el coeficiente de resistencia de una Tee para PVC es:

$$K_f = 1.8F_f$$

$$H_{FS-ACCESORIOS-A-B} = \frac{\sum K_f v^2}{2gc} = \frac{(3.6)(0.0455)(0.787 \frac{m}{s})^2}{2gc} = 0.0507 \frac{J}{kg}$$

### **Trabajo necesario para mover el fluido de A hasta B**

-Trabajo necesario considerando las pérdidas por carga de la expansión en la cámara de fondo y reducción brusca del plato hidrofuidizador con orificios de 4mm.

$$W = (0.73 + 0.31 + 8.63 + 0.672 + 0.0507 + 8.007) \frac{J}{kg} = 18.39 \frac{J}{kg}$$

-Trabajo necesario considerando las pérdidas por carga de la expansión en la cámara de fondo y reducción brusca del plato hidrofuidizador con orificios de 2 mm.

$$W = (0.73 + 0.31 + 8.63 + 0.672 + 0.0507 + 314.11) \frac{J}{kg} = 324.50 \frac{J}{kg}$$

### **Diferencia de presiones que debe aplicar la bomba para mover el fluido (Cabezal)**

$$Cb_{4mm} = W\rho = (18.39 \frac{J}{kg})(1018 \frac{kg}{m^3}) = 18,721.02 \frac{N}{m^2}$$

$$Cb_{2mm} = W\rho = (324.50 \frac{J}{kg})(1018 \frac{kg}{m^3}) = 330,341 \frac{N}{m^2}$$



---

$$P_{4mm} = C_b * Q = \left(18,721.02 \frac{N}{m^2}\right) * \left(4.09E - 4 \frac{m^3}{s}\right) = 7.65 \frac{J}{s} = 0.010HP$$

$$P_{2mm} = C_b * Q = \left(330,341 \frac{N}{m^2}\right) * \left(6.54E - 4 \frac{m^3}{s}\right) = 216.04 \frac{J}{s} = 0.28HP$$

De acuerdo a la potencia de la bomba calculada; la bomba del dispositivo hidrofluidizador de 0.5 HP es suficiente para transportar el fluido modelo durante la operación del dispositivo.



**ANEXO A. Propiedades térmicas de Alimentos (Heldmand and Lund, 1992).**

Propiedad térmica	Componente	Modelo	Error estándar	Porcentaje de error
<b>kT</b> (W/m°C)	Proteína	$k=1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	0.012	5.91
	Grasa	$k=1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohidrato	$k=2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	5.42
	Fibra	$k=1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Cenizas	$k=3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
<b><math>\alpha</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	Proteína	$\alpha=6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$	0.0038	4.5
	Grasa	$\alpha=9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$	0.0020	2.15
	Carbohidrato	$\alpha=8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$	0.0058	5.84
	Fibra	$\alpha=7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$	0.0026	3.14
	Cenizas	$\alpha=1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$	0.0022	1.61
<b>Cp</b> (kJ/kg°C)	Proteína	$Cp=2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Grasa	$Cp=1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.15
	Carbohidrato	$Cp=1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fibra	$Cp=1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Cenizas	$Cp=1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47