



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN**

**SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA VARIACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN UN  
PROCESO DE ESCALDADO DE MANZANA *GRANNY SMITH*.**

# **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**MIJAIL RODOLFO CASTREJÓN ALCÁNTARA**

ASESORES:

**I. A. FRANCISCO JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ**

CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



## **Agradecimientos**

Podría solo agradecerme a mí ya que yo fui el que realizo paso a paso este logro...

Pero no, dedico cada una de estas letras a mi querida María del Carmen Alcántara Mondragón, sinónimo de poder, entrega, lucha y valentía. Un gran ejemplo para salir adelante.

Para los demás...

Mariela Lopez García  
Jesús David Aguirre Ponce  
Diana Isabel Vizuet Lopez  
Flor Ortiz Olivares  
Atzelby Medina Baca  
Jenice Lizette Lopez Marin  
Andrea J. Loyda  
David Jafet Gallardo  
Patricia Galván Zarazúa  
Avalos  
Paco  
Entre otros

Gracias

## Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1 Capítulo I. Marco Teórico.....	2
1.1 Transferencia de calor.....	2
1.1.1 Calentamiento de los alimentos.....	2
1.1.2 Propiedades térmicas de los alimentos.....	4
1.1.2.1 Calor específico.....	4
1.1.2.2 Conductividad Térmica.....	4
1.1.2.3 Difusividad Térmica.....	5
1.1.3 Mecanismos de transferencia de calor.....	5
1.1.3.1 Transferencia de calor por conducción.....	6
1.1.3.2 Transferencia de calor por convección.....	6
1.1.3.3 Transferencia de calor por radiación.....	7
1.1.3.4 Transferencia de calor por conducción y convección.....	7
1.1.3.5 Transferencia de calor en estado estacionario y no estacionario.....	8
1.1.3.6 Transferencia de calor en estado estacionario.....	9
1.1.3.7 Transferencia de calor en estado no estacionario.....	9
1.1.3.7.1 Deducción de la ecuación de transferencia de calor en estado no estacionario..	10
1.1.3.7.2 Transferencia térmica empleando conducción y convección.....	12
1.1.3.7.3 Método numérico para transferencia de calor en estado no estacionario.....	14
1.2 Conservación de alimentos.....	16
1.2.1 Tratamientos térmicos.....	17
1.2.2 Cinética de destrucción de los microorganismos.....	18
1.2.2.1 Efecto del tiempo de proceso.....	18
1.2.2.2 Efecto de la temperatura de proceso.....	19
1.2.3 Otros tratamientos.....	22
1.3 Escaldado.....	22
1.3.1 Definiciones.....	23
1.3.2 Objetivos del escaldado.....	23
1.3.3 Tipos de escaldado.....	24
1.3.4 Equipos.....	25
1.3.5 Acción del calor sobre los constituyentes de los alimentos.....	26

1.3.5.1	Acción sobre el agua .....	27
1.3.5.2	Acción sobre los lípidos .....	27
1.3.5.3	Acción sobre los glúcidos .....	27
1.3.5.4	Acción sobre las proteínas .....	27
1.3.5.5	Acción sobre las vitaminas .....	28
1.3.6	Estudios relacionados.....	28
1.4	Propiedades físicas de los alimentos.....	30
1.4.1	Propiedades de los alimentos .....	30
1.4.2	Textura .....	30
1.4.3	Definición de textura.....	30
1.4.4	Percepción de la textura. ....	31
1.4.5	Evaluación de la textura con técnicas instrumentales.....	31
1.4.5.1	Ensayos Empíricos. ....	32
1.4.5.2	Ensayos Imitativos.....	32
1.4.5.3	Ensayos Fundamentales.....	35
1.4.6	Propiedades Fundamentales y medida de propiedades mecánicas.....	35
1.4.6.1	Deformación.....	35
1.4.6.2	Equipos y ensayos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.5	Simulación .....	36
1.5.1	Definición. ....	38
1.5.2	Etapas para un estudio de simulación. ....	38
1.5.3	Programación y Software.....	40
1.5.4	Metodología aplicada a la simulación.....	41
1.5.4.1	Software educativo. ....	41
1.5.4.2	Análisis.....	42
1.5.4.3	Diseño.....	43
1.5.4.4	Arquitectura del software .....	44
1.5.4.4.1	Propiedades estructurales. ....	45
1.5.4.4.2	Propiedades Extra-funcionales.....	45
1.5.4.4.3	Familias de sistemas relacionados .....	45
1.5.4.5	Diseño de interfaz .....	45
1.5.4.6	Documentación .....	46

1.5.4.7	Desarrollo .....	46
1.5.5	Diferencias Finitas. ....	46
1.5.5.1	Clasificación de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. ....	46
1.5.5.2	Polinomio de Taylor generado por una función.....	47
1.5.5.3	Polinomio de Taylor en una dimensión.....	49
1.5.5.3.1	Primera derivada .....	49
1.5.5.3.2	Segunda Derivada.....	50
2	Capitulo II. Metodología.....	51
2.1	Problema. ....	51
2.2	Objetivo General: .....	51
2.2.1	Objetivo Particular 1.....	51
2.2.2	Objetivo Particular 2.....	51
2.2.3	Objetivo Particular 3.....	51
2.3	Selección de variables y modelo matemático.....	51
2.4	Actividades Preliminares. ....	51
2.5	Diseño experimental. ....	53
2.6	Metodología de software educativo.....	55
2.6.1	Selección y control de la materia prima.....	57
2.6.2	Equipo Utilizado. ....	57
3	Capítulo III. Resultados.....	60
3.1	Actividades Preliminares. ....	60
3.2	Penetración de Calor y evaluación de la dureza. ....	64
3.3	Variación de Tamaño y Peso .....	71
3.4	Programa. ....	76
3.5	Validación y contrastación. ....	83
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de los intercambiadores de calor más comunes.....	2
Figura 1.2 Transmisión de calor incluyendo convección y conducción.....	8
Figura 1.3 a) Transferencia de calor y gradiente de temperatura a lo largo de una barra bien aislada (AB) y una no aislada (CD). .....	9
Figura 1.4 Conducción en estado no estacionario en una dirección.....	10
Figura 1.5 Ecuación de balance de calor. ....	11
Figura 1.6 Nomenclatura para la solución numérica de problemas de conducción unidimensional en estado no estacionario. ....	15
Figura 1.7 Curva de supervivencia teorica para un microorganismo a una T°.....	19
Figura 1.8 Curvas de reducción decimal a distintas T° . ....	20
Figura 1.9. Obtención de la resistencia Termica (Valor Z) a partir de los valores D. ....	20
Figura 1.10 Circuito de intercambio de calor de las aguas de precalentamiento y de preenfriamiento de un proceso integrado de escaldado.....	26
Figura 1.11 Aspectos de un análisis de un perfil de textura (TPA). ....	33
Figura 1.12 Proceso de solución de problemas en ingeniería.....	37
Figura 1.13 Esquema de diferencias finitas en un dirección. ....	48
Figura 2.1 Representación en el plano del diseño factorial 2 <sup>3</sup> .....	54
Figura 2.2 Metodología aplicada a la simulación educativa.....	55
Figura 2.3 Diagrama de flujo planteado. ....	56
Figura 2.4 Marmita basculante.....	58
Figura 2.5 Termopar de aguja de acero inoxidable. ....	58
Figura 2.6 Central para registro de temperaturas. ....	59
Figura 2.7 Cilindro metálico de pruebas.....	59
Figura 3.1 Gráfico de resultados de la validación de termopares (exactitud).....	60
Figura 3.2 Gráfico de resultados de validación de termopares (linealidad). ....	61
Figura 3.3 Centro térmico en manzana. ....	62
Figura 3.4 Curva patrón de densidad en manzana sometido a escaldado a 92.8 °C.....	64
Figura 3.5 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 92.8 °C. ....	65
Figura 3.6 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 89 °C. ....	65
Figura 3.7 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 85 °C. ....	66
Figura 3.8 Curvas de ajuste de penetración de calor a 92.8, 89 y 85 °C.....	67
Figura 3.9 Curvas de Dureza (carga máxima) Vs Tiempo.....	69
Figura 3.10 Curva para el cálculo de Valores D, Log de Carga Máxima Vs Tiempo. ....	69
Figura 3.11 Curva para cálculo de valor Z de textura, Log D Vs T°. ....	70
Figura 3.12 Curva de relación de Textura Vs F <sub>92.8</sub> (Textura). ....	71
Figura 3.13 Curva de variación de Tamaño Vs F <sub>92.8</sub> (Textura).....	72
Figura 3.14 Curva de variación de Peso Vs F <sub>92.8</sub> (Textura). ....	72
Figura 3.15 Curva de %Variación de Peso Vs Tiempo de proceso.....	73
Figura 3.16 Curva de Log de %Variación Vs Tiempo.....	74
Figura 3.17 Curva de Log de Valores D (peso) Vs Tiempo de Proceso.....	75
Figura 3.18 NetBeans IDE 7.0.1. ....	76
Figura 3.19 Curva de validación a 92.8 °C.....	83
Figura 3.20 Curva de validación a 89 °C.....	83
Figura 3.21 Curva de validación a 85 °C.....	84



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Operaciones que presentan procesos de energía. ....	3
Tabla 1.2 Comparación entre el Agua y el Vapor como agentes de escaldado.....	25
Tabla 1.3 Parametros medidos por un análisis de perfil de textura.....	34
Tabla 2.1 Combinaciones del diseño factorial 2^3. ....	54
Tabla 2.2 Combinaciones de experimentación .....	55
Tabla 2.3 Propiedades de la manzana <i>Granny Smith</i> . ....	57
Tabla 3.1 Resultados de la validación de termopares. ....	60
Tabla 3.2 Prueba de Tukey para día 2 y día 3 .....	61
Tabla 3.3 Prueba de Tukey para día 2 y día 1 .....	61
Tabla 3.4 Resultados y condiciones de la ubicación de centro térmico. ....	62
Tabla 3.5 Densidad de aceite.....	63
Tabla 3.6 Calculo de densidad en manzana.....	63
Tabla 3.7 Condiciones de prueba en el equipo INSTRON. ....	67
Tabla 3.8 Resultados de dureza a 92.8°C.....	68
Tabla 3.9 Resultados de dureza a 89°C.....	68
Tabla 3.10 Resultados de dureza a 85°C.....	68
Tabla 3.11 Resultados de carga máxima (kN).....	68
Tabla 3.12 Log ( ) de los resultados de dureza. ....	69
Tabla 3.13 Valores D para carga máxima. ....	70
Tabla 3.14 Variación de %Peso.....	73
Tabla 3.15 Log de la Variación de %Peso.....	73
Tabla 3.16 Valores D (Peso).....	74

## INTRODUCCIÓN.

La mayoría de los alimentos son de origen biológico y es precisamente esta naturaleza la causa del desarrollo de una serie de transformaciones que llegan a producir su deterioro. En estas transformaciones se incluyen reacciones químicas y bioquímicas, pero además los alimentos son también adecuados para el desarrollo de los microorganismos (Casp Vanaclocha, 2003).

Los principales medios de control de microorganismos son el calor, el frío, entre otros. El procesado térmico implica el calentamiento del alimento (de su estructura) bien dentro de un recipiente o bien haciéndolo pasar a través de un intercambiador de calor, seguido del correspondiente envasado, en este proceso es importante asegurar que el alimento ha recibido el tratamiento térmico adecuado y reducir la contaminación post-proceso; existen varias operaciones de tratamiento térmico como: escaldado, pasteurización, UHT entre otras (Brennan, 2006).

El escaldado es un proceso de corta duración a temperatura moderada aplicada principalmente a frutas y vegetales. El proceso consiste en mantener el producto por algunos minutos a una  $T^{\circ}$  entre 70 y 100  $^{\circ}\text{C}$  en un medio de calentamiento como agua (salmueras) y vapor para mantener los objetivos principales del escaldado como la inactivación de enzimas y bacterias, y la eliminación de gases ocluidos para su posterior procesamiento (Casp Vanaclocha, 2003; Rodriguez, 2002; Sharma, 2007).

Dentro de la industria alimentaria el escaldado es una operación importante y necesaria para el óptimo manejo de las distintas operaciones, ya que comúnmente el escaldado es una operación previa a un tratamiento final o almacenamiento y por lo cual se debe prever el cuidado de la estructura y propiedades de los alimentos, que pueden verse modificados por los cambios de temperatura que sufren los productos durante el proceso de escaldado (Mafart, 1994). Estas modificaciones pueden ser predichas con cálculos y métodos como la simulación que en conjunto con los recursos informáticos como computadoras y calculadoras programables, nos ayudan a tener resultados confiables de manera rápida.

La simulación implica el uso de métodos numéricos aplicados a las variaciones en los procesos que están regidos por ecuaciones y que afectan a los productos. Uno de los métodos numéricos más utilizados para los procesos térmicos son las *Diferencias Finitas* que nos permiten reemplazar las derivadas por diferencias, este método es una aproximación para encontrar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el modelo matemático de un sistema continuo (Coss Bu, 2003).

En esta investigación sobre manzana, la simulación del proceso del escaldado, se basa en la penetración de calor en estado no estacionario y los efectos que causa dentro de la estructura de la manzana, como: en su dureza, tamaño y peso, utilizando la mayor cantidad de factores que interfieren en el proceso para tener mayor certeza en los resultados.

# 1 Capítulo I. Marco Teórico.

## 1.1 Transferencia de calor.

La mayoría de los métodos de conservación de alimentos incluyen transferencia de energía (calor), hacia o del alimento. El calentamiento y enfriamiento son los procesos más habituales en una planta de procesamiento de alimentos. Es habitual encontrar en la industria alimentaria unidades de refrigeración, congelado, esterilización, secado y evaporación. En estas unidades tiene lugar la transmisión de calor entre un producto y un agente calefactor o refrigerante (Lewis, 1993).

El estudio de la transmisión de calor es importante, ya que muestra la base sobre la que operan varios de esos procesos. El suministro de energía se realiza en varias formas, tales como agua caliente, vapor de agua, electricidad, aire comprimido y agua de refrigeración las cuales pueden en algún momento reaprovecharse para concluir el proceso y obtener un ahorro energético (Singh & Heldman, 1998).

### 1.1.1 Calentamiento de los alimentos.

En la industria el calentamiento y enfriamiento de alimentos se lleva a cabo en equipos denominados intercambiadores de calor. En la Figura 1.1 se muestran intercambiadores de calor que pueden calificarse de forma genérica en directos e indirectos. Como sugiere esta clasificación, en los intercambiadores indirectos el producto y el agente calefactor o refrigerante se mantienen separados físicamente mediante una pared metálica. En los intercambiadores de calor directos hay contacto físico entre el producto y el agente calefactor. En la Tabla 1.1 se muestran las operaciones unitarias en las que hay transferencia de calor, sus condiciones, ejemplos y breve descripción.

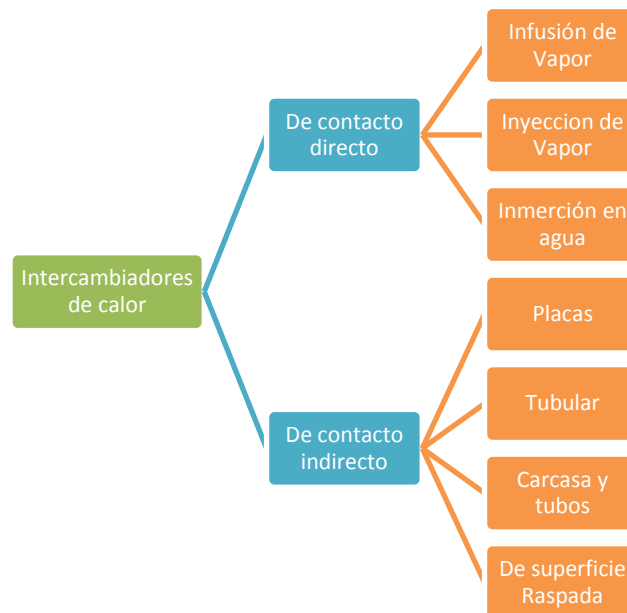


Figura 1.1 Clasificación de los intercambiadores de calor más comunes (Lewis, 1993).

Tabla 1.1 Operaciones que presentan procesos de energía. (Lewis, 1993)

Operación	Descripción	Ejemplos	Medio de transferencia	Condiciones de proceso
Pasteurización	Eliminación de microorganismos patógenos; aumento de la vida útil de productos perecederos	Leche, zumo de frutas, cerveza, huevo.	Agua caliente, vapor, electricidad	63-85 °C 15s a 30min
Escaldado	Eliminación de microorganismos, inactivación de encimas, evitar el deterioro de los alimentos almacenados	Frutas y vegetales	Agua caliente y vapor	70-100 °C 1 a 10min
Esterilización 1.-En el Recipiente 2.-Métodos de fluido continuo (UHT)	Esterilización de sólidos y líquidos; 6 meses de vida útil. Esterilización de fluidos seguida de empaquetamiento aséptico	Carne, pescado, sopas, vegetales y frutas Leche, natillas, nata, postres, sopas	Agua caliente, vapor Agua caliente, vapor	100-125 °C 15min a 2h 135-150 °C 1 a 10s
Evaporación	Eliminación de agua; producción de concentrado líquido	Leche, zumos de frutas y vegetales, café, suero de queso	Vapor, electricidad	40-100 °C 2s a 2h
Deshidratación	Eliminación de agua: producción de materia seca con baja Aw	Leche, papas, vegetales, frutas, carne, pescado	Aire caliente, vapor, agua caliente, electricidad	100-250 °C
Cocido y Horneado	Cocido de alimentos, horneado de alimentos basados en cereales	Operaciones de restauración, pan, pasteles, empanadas	Vapor, aire caliente	70-150 °C 1min a varias horas
Freír	Inmersión en aceite en ebullición	Papas fritas, rosquillas	Aceite caliente	100-150 °C
Refrigeración y congelación	Reducir la temperatura hasta el punto de congelación o por debajo del mismo	Productos lácteos, carne, pescado, frutas, vegetales, postres	Aire frío, fluidos criogénicos	10-0 °C -18 a -30 °C 2min a 4 días

En la mayoría de los casos la mejor opción es calentar y enfriar los alimentos tan rápidamente como sea posible. Esto mejora la economía del proceso por incremento de la capacidad, y generalmente resulta un producto de mucha mayor calidad. Las velocidades y mecanismos de transferencia de calor son muy importantes. El calor se transmite por conducción, convección o radiación, o por combinación de estos. La velocidad de calentamiento o enfriamiento depende de una variedad de factores tales como el estado físico (sólido, líquido o suspensión), el tamaño y la naturaleza del producto, sus propiedades térmicas (calor específico y conductividad térmica), el

mecanismo de transferencia de calor y la temperatura, y la naturaleza del fluido de transferencia. Como se ha mencionado los procesos térmicos tienen un uso primario para alargar la vida útil de productos perecederos y eliminar organismos patógenos. Esto se lleva a cabo por la inactivación de microorganismos, que son probablemente la causa del deterioro de los alimentos, intoxicaciones alimentarias o enfermedades.

### 1.1.2 Propiedades térmicas de los alimentos.

En los procesos térmicos las propiedades térmicas son las que modifican la transferencia de calor en los alimentos estas propiedades son: el calor específico, la conductividad térmica y la difusividad. Estas propiedades dependen de la composición química y estructura de los materiales.

#### 1.1.2.1 Calor específico.

El calor específico es la cantidad de calor ganada o perdida por una unidad de peso de producto para provocar un determinado incremento de temperatura sin que tenga lugar a un cambio de estado. Es una medida de la cantidad de energía necesaria para elevar una unidad de temperatura la unidad de masa (Lewis, 1993).

$$C_p = \frac{Q}{M(\Delta T)} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde Q es el calor ganado o perdido (kJ), M es la masa (kg),  $\Delta T$  es el incremento de temperatura del material ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $C_p$  es el calor específico ( $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ).

El calor específico de un producto depende de su composición, humedad, temperatura y presión y aumenta con la humedad. El calor específico de los gases a presión constante  $C_p$ , es mayor que el calor específico a volumen constante,  $C_v$ . En la mayoría de las aplicaciones se usa calor específico a presión constante ya que esta se mantiene generalmente constante.

#### 1.1.2.2 Conductividad Térmica.

La conductividad térmica de un producto es una medida de la velocidad con la que el calor se transmite a través de un espesor unidad de ese material cuando existe un gradiente de temperatura unida entre sus extremos. La conductividad térmica provee un medio para cuantificar las propiedades de transmisión de calor de los materiales sólidos alimenticios y puede definirse considerando el flujo de calor a través de la unidad de área transversal y la unidad de gradiente de temperatura (Holman, 1998; Casp Vanaclocha, 2003).

$$k = \frac{J}{s \times m \times ^{\circ}\text{C}} = \frac{W}{m \times ^{\circ}\text{C}} \quad \text{Ec. 1.2}$$

La mayoría de los alimentos con alto contenido de humedad tienen una conductividad térmica cercana a la del agua. La mayoría de los alimentos son malos conductores del calor y por eso los

procesos de transferencia de calor en que la conducción es el mecanismo predominante son lentos.

La conducción térmica de un alimento está influenciada por la composición, al igual que el calor específico; el agua ejerce la mayor influencia. Otros factores que también afectan a la conductividad térmica son la presión (que es particularmente importante en las operaciones de liofilización) y la temperatura.

### 1.1.2.3 Difusividad Térmica.

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es la menos estudiada de las propiedades térmicas, quizás debido a la escasez de equipos comerciales destinados a tal fin.  $\alpha$ , da una medida de cómo fluye el calor por el material. La difusividad térmica  $\alpha$  es la relación entre la conductividad térmica ( $k$ ) y el calor específico ( $C_p$ ) del producto multiplicado por su densidad ( $\rho$ ) (Holman, 1998).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times C_p} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Por consiguiente, las unidades de la Difusividad térmica son metros cuadrados por segundo ( $m^2s^{-1}$ ) o pies cuadrados por segundo ( $ft^2s^{-1}$ ).

$$\alpha = \frac{(J \times s^{-1} \times m^{-1} \times K^{-1})}{(kg \times m^{-3})(J \times kg^{-1} \times K^{-1})} = \frac{m^2}{s} \quad \text{Ec. 1.4}$$

En términos físicos la difusividad térmica da una medida de rapidez del cambio de temperatura cuando hay calentamiento o enfriamiento. Los materiales que tienen una difusividad térmica alta pueden ser calentados o enfriados rápidamente; a la inversa sustancias con una baja difusividad térmica se calientan o enfrían lentamente. La difusividad es una propiedad importante cuando se consideran situaciones de calor en estado no estacionario (Holman, 1998; Incropera & De Witt, 1999).

### 1.1.3 Mecanismos de transferencia de calor.

La conductividad térmica y la difusión térmica describen la transmisión de calor característica de sustancias alimenticias y la rapidez con que el producto se calienta o enfría durante el tratamiento térmico. Se han estudiado las distintas clases de calor que se presentan en los distintos procesos de transferencia en las operaciones de la industria alimentaria. El calor se trasmite por 3 mecanismos diferentes, denominados conducción, convección y radiación. La conducción es el principal mecanismo de transmisión de calor en materiales sólidos, mientras que la convección es apropiada para fluidos. En los procesos de transmisión de calor por radiación la energía se trasmite por medio de ondas electromagnéticas, es decir, infrarrojo, ultravioleta o microondas. La mayoría de las operaciones no están limitadas a un solo mecanismos sino que están combinados de acuerdo al diseño de los intercambiadores de calor y las propiedades de los alimentos (suspensión, emulsión, tamaño de partícula, tipo de fuente de calor, entre otras).

### 1.1.3.1 Transferencia de calor por conducción.

La conducción es la forma en que tienen lugar la transferencia de energía a escala molecular. Cuando las moléculas absorben energía térmica vibran sin desplazarse, aumentando la amplitud de la vibración conforme aumenta el nivel de energía. Esta vibración se trasmite de unas moléculas a otras sin que tenga lugar movimiento alguno de traslación. En otra teoría sobre el mecanismo de la conducción establece que la conducción tiene lugar a escala molecular debido al desplazamiento de los electrones. Por eso los metales son los mejores conductores de energía ya que es común que tengan electrones libres (Incropera & De Witt, 1999).

Cabe resaltar que en la transmisión de calor por conducción no hay movimiento de materia. La conducción es el método más habitual de transferencia de calor en procesos de calentamiento-enfriamiento de materiales sólidos opacos.

Si existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, tendrá lugar una transmisión de calor desde la zona de alta temperatura hasta la que está a temperatura más baja. El flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura:

$$\frac{q_x}{A} \propto \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1.5}$$

e introduciendo la constante de proporcionalidad

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Siendo “ $q_x$ ” el flujo de calor por conducción en la dirección  $x$  (W), “ $k$ ” la conductividad térmica (W/m·°C), “ $A$ ” el área (normal a la dirección  $x$ ) a través de la que fluye el calor (m<sup>2</sup>),  $T$  la temperatura (°C) y  $x$  la distancia (m). La ecuación anterior describe la transferencia de calor por conducción en cualquier sistema, se denomina Ley de Fourier de la conducción y se debe al físico francés Joseph Fourier. El signo negativo en la Ecuación 1.6 expresa que el flujo siempre será en el sentido de mayor a menor temperatura, satisfaciendo así la segunda Ley de la termodinámica. Como se sabe el flujo de calor es siempre de mayor a menor temperatura (Holman, 1998; Incropera & De Witt, 1999).

### 1.1.3.2 Transferencia de calor por convección.

El calor se trasmite en líquidos y gases por el movimiento global de las moléculas; este proceso se conoce como convección. La distribución de calor y la eliminación de gradientes de temperatura se realizan por movimiento molecular. Se consideran dos tipos de convección, la natural o libre y la forzada. La convección forzada implica el uso de algún medio mecánico, como una bomba o un ventilador, para provocar el movimiento del fluido. Por el contrario, la convección natural tiene lugar a causa de diferencia de densidad provocadas a su vez por gradientes de temperatura. Ambos mecanismos pueden provocar un movimiento laminar o turbulento del fluido.

El flujo de calor en la convección se puede expresar por medio de la Ley de Newton, que considera el efecto global de la convección.

$$q = hA(T_p - T_\infty) \quad \text{Ec. 1.7}$$

En esta Ecuación el flujo de calor, “q”, se expresa en función del gradiente de temperatura ( $T_p - T_\infty$ ). “A” es el área ( $m^2$ ) y “h” es el coeficiente de transmisión de calor por convección (también llamado a veces coeficiente de transmisión de calor de superficial), en  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

### 1.1.3.3 Transferencia de calor por radiación.

Todos los objetos emiten radiación electromagnética a una temperatura superior a  $0^\circ K$ ; las características de esta radiación dependerán de la naturaleza de la sustancia y de su temperatura. Esta radiación viaja a través del vacío a la velocidad de la luz; cuando hace contacto con algún objeto, la radiación es reflejada, transmitida o absorbida. Solamente la radiación absorbida comunicara su energía y dará lugar a un cambio de temperatura.

La transmisión de calor por radiación tiene lugar entre superficies mediante la emisión y posterior absorción de la radiación electromagnética. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere ningún medio para su propagación y puede tener lugar incluso en el vacío.

La energía irradiada por una superficie es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia y depende de las características de la superficie. El flujo de calor emitido por una superficie se expresa de la siguiente ecuación:

$$\frac{q}{A} = \sigma \epsilon T_A^4 \quad \text{Ec. 1.8}$$

Siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $5.669 \text{ E-8 } W/m^2 \cdot K^4$ . La emisividad “ $\epsilon$ ”, expresa la medida en que una superficie se asemeja a un cuerpo negro. La de un cuerpo negro es 1.

### 1.1.3.4 Transferencia de calor por conducción y convección.

En muchas circunstancias prácticas de transmisión de calor pueden considerarse la conducción y la convección simultáneamente; la mayor parte de los procesos indirectos incluyen tres resistencias. Si se imagina la transferencia de calor desde un fluido a través de una pared hasta un segundo fluido (Figura 1.2), hay dos resistencias convectivas a la transmisión, “ $h_A$ ” y “ $h_B$ ” y una resistencia debida a la conductividad térmica de la pared de espesor “L”. Si las temperaturas de cada fluido son “ $\theta_A$ ” y “ $\theta_B$ ”, respectivamente, y prevalecen condiciones de estado estacionario, la tasa de transferencia de calor a través de la capa límite del fluido “A” es igual a la tasa a través de la pared, que a su vez es igual a la tasa a través de la capa límite del fluido “B”.



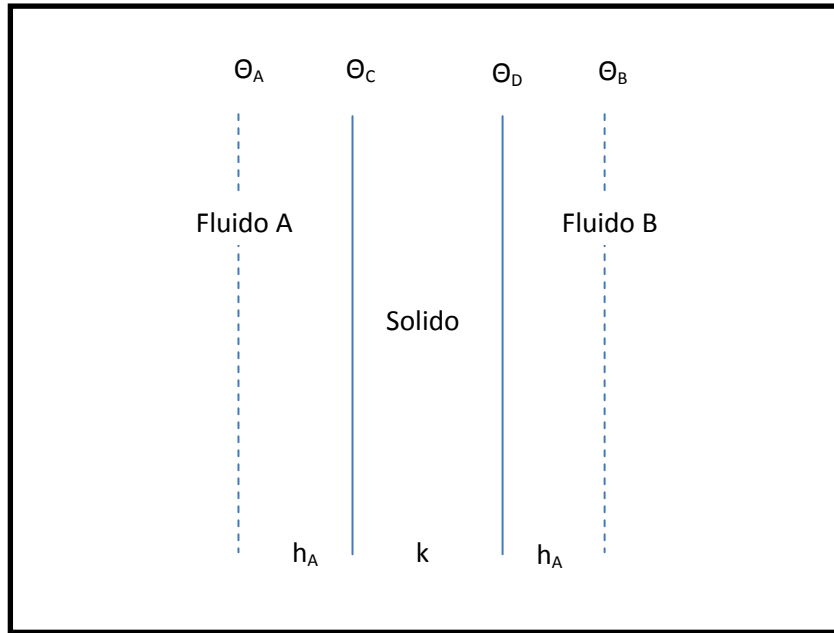


Figura 1.2 Transmisión de calor incluyendo convección y conducción (Holman, 1998).

Las temperaturas de la superficie de la pared no se conocen, pero pueden designarse como  $\theta_c$  y  $\theta_D$ . Si consideramos un área transversal a la transferencia de calor "A" ( $m^2$ ) y llamamos  $Q'$  a la tasa de calor absorbido, entonces tenemos lo siguiente:

$$Q' = h_A A (\theta_A - \theta_C) \quad \text{Ec. 1.9}$$

$$Q' = \frac{kA}{L} (\theta_C - \theta_D) \quad \text{Ec. 1.10}$$

$$Q' = h_B A (\theta_D - \theta_B) \quad \text{Ec. 1.11}$$

Sumando miembro a miembro las 3 ecuaciones escritas (1.9, 1.10, 1.11), resulta la siguiente ecuación:

$$\theta_A - \theta_B = \frac{Q'}{A} \left( \frac{1}{h_A} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_B} \right) \quad \text{Ec. 1.12}$$

Los aspectos importantes de la ecuación 1.12 son que eliminan las temperaturas desconocidas de la pared y que el calor transmitido viene expresando en función de valores fácilmente medibles.

### 1.1.3.5 Transferencia de calor en estado estacionario y no estacionario.

Es necesario poder cuantificar la tasa de transferencia de calor. Los procesos de transferencia calorífica pueden aparecer bajo dos tipos de condiciones, denominados estado estacionario y estado no estacionario.

### 1.1.3.6 Transferencia de calor en estado estacionario.

En estado estacionario, la temperatura de un sistema permanece constante en el tiempo aunque puede variar con la posición. En un proceso en estado estacionario, toda la energía térmica pasa a lo largo del material, y nada se utiliza para calentarlo. Consideramos una barra de material (Figura 1.3(a)) que se encuentra bien aislada. El calor se trasmite a lo largo de la barra desde el punto de más alta temperatura al de más baja. Cuando se alcanza el estado estacionario, todo el calor que entra por la cara frontal "A" saldrá por la cara posterior "B". por consiguiente, no hay acumulacion de calor en el material y el perfil de temperaturas a lo largo de la barra permanece constante. Si la barra no estuviera bien aislada, el estado de estacionario terminaria por alcanzarse, pero el perfil de temperatura a lo largo de la barra no seria lineal. Las condiciones de estado estacionario prevalece en la mayoria de los intercambiadores de calor, almacenado en frío y las operaciones continuas de la industria alimentaria (Lewis, 1993) (Incropera & De Witt, 1999).

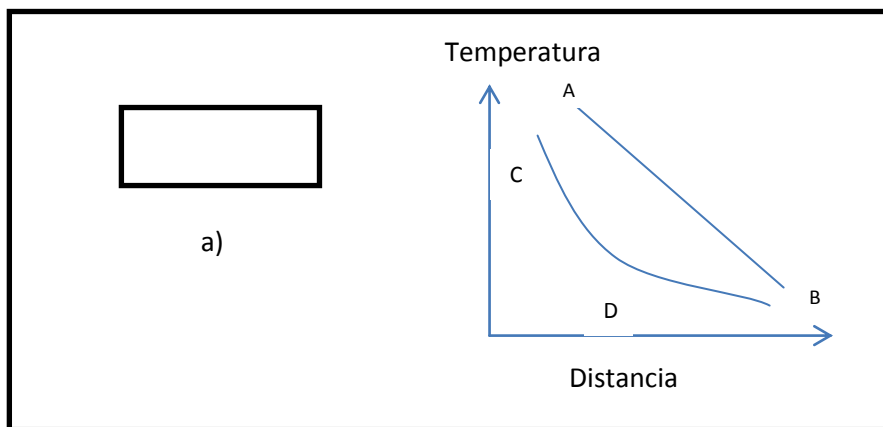


Figura 1.3 a) Transferencia de calor y gradiente de temperatura a lo largo de una barra bien aislada (AB) y una no aislada (CD) (Lewis, 1993).

### 1.1.3.7 Transferencia de calor en estado no estacionario.

Si la barra de la Figura 1.3 a) ha alcanzado el estado estacionario y la temperatura en un extremo cambia repentinamente, las temperaturas en todos los puntos a lo largo de la barra cambiara, hasta que se alcance un nuevo estado estacionario. El período durante el cual cambia la temperatura se conoce como condiciones de estado no estacionario. Por consiguiente, si la temperatura en cualquier posición para cualquier aplicación de transferencia de calor cambia con el tiempo, entonces prevalecerán las condiciones de estado no estacionario.

En muchas situaciones de transferencia térmica interesa conocer el tiempo necesario para calentar, enfriar, cocinar o secar un alimento. Pueden encontrarse soluciones para estos problemas teniendo en cuenta las ecuaciones de transferencia térmica en estado no estacionario, las cuales describen el cambio de temperatura con el tiempo para una posición determinada.

La transmisión de calor en estado no estacionario es aquella etapa del proceso de calentamiento o de enfriamiento en la que la temperatura cambia con el tiempo. Durante este período, la temperatura es función de la posición y el tiempo. Ésta es la diferencia con respecto al estado estacionario, en el que la temperatura varía solo con la posición. Durante el intervalo inicial de

estado no estacionario tienen lugar importantes reacciones en los alimentos. En el procesado térmico, el estado no estacionario puede incluso predominar durante el proceso. Por ello, el análisis de la variación de temperatura con el tiempo durante los períodos de estado no estacionario es esencial en el diseño de esos procesos.

Dado que la temperatura es función de dos variables independientes, tiempo y posición, la siguiente ecuación diferencial en derivadas parciales es la que describe la situación para el caso unidimensional:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \times c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde “ $T$ ” es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), “ $t$ ” el tiempo (s) y “ $x$ ” la posición (m). La combinación de propiedades “ $k/\rho c_p$ ” se denomina difusividad térmica,  $\alpha$ .

Para resolver esta ecuación es necesario el uso de matemáticas avanzadas. La ecuación se resuelve para varias posibles situaciones habituales en transferencia de calor en estado no estacionario. Es importante destacar que la solución analítica de la *Ecuación 1.13* solo es posible para algunas geometrías sencillas, como la esfera, el cilindro o la lámina.

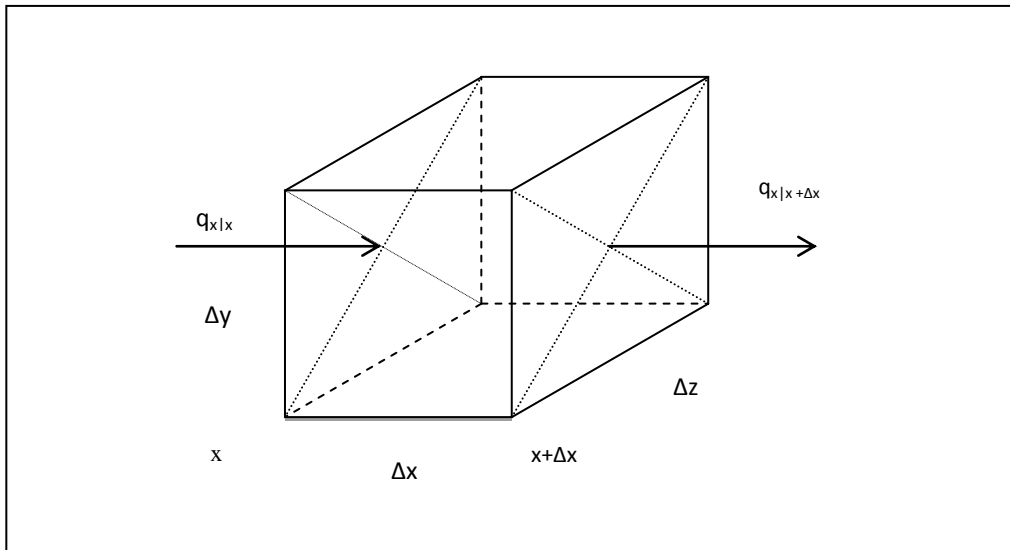


Figura 1.4 Conducción en estado no estacionario en una dirección (Singh & Heldman, 1998).

#### 1.1.3.7.1 Deducción de la ecuación de transferencia de calor en estado no estacionario

La *Figura 1.4* sirve de punto de partida para deducir la ecuación en condiciones de estado no estacionario en una dirección en un sólido. Supóngase una conducción de calor en la dirección “ $x$ ” en el cubo de dimensiones “ $\Delta x$ ”, “ $\Delta y$ ” y “ $\Delta z$ ” la expresión para la conducción en la dirección “ $x$ ” es:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1.14}$$

El término  $\partial T/\partial t$  representa la derivada parcial de "T" con respecto a "x", con las demás variables "y", "z", y el tiempo "t" manteniéndose constantes. Ahora haciendo un balance de calor con respecto al cubo, podemos escribir.

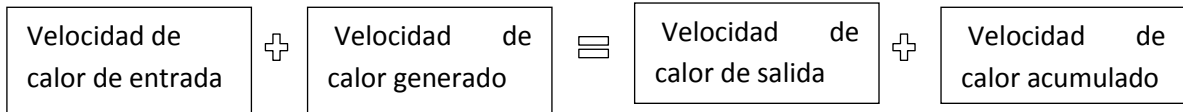


Figura 1.5 Ecuación de balance de calor (Incropera & De Witt, 1999).

Dónde:

La velocidad de calor de entrada =

$$q_{x \ x} = -k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \quad \text{Ec. 1.15}$$

La velocidad de calor de salida =

$$q_{x \ x+\Delta x} = -k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \quad \text{Ec. 1.16}$$

La velocidad de calor acumulado =

$$(\Delta x \Delta y \Delta z) \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.17}$$

La velocidad de calor generado =

$$(\Delta x \Delta y \Delta z) \dot{q} \quad \text{Ec. 1.18}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de balance de la Figura 1.5

$$-k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + (\Delta x \Delta y \Delta z) \dot{q} = -k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + (\Delta x \Delta y \Delta z) \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.19}$$

Agrupando

$$-k(\Delta y \Delta z) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) = (\Delta x \Delta y \Delta z) \left( \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{q} \right) \quad \text{Ec. 1.20}$$

Factorizando

$$\dot{q} + \frac{-k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right)}{\Delta x} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.21}$$

Cuando “ $\Delta x$ ” tiende a cero, se obtiene la segunda derivada parcial de “ $T$ ” con respecto a “ $x$ ”.

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.22}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde “ $k/(\rho c_p)$ ” es la difusividad “ $\alpha$ ”. Por otra parte en muchos casos ocurre la conducción de calor en estado no estacionario, pero la velocidad de generación de calor es cero. Entonces, la ecuación 1.23 se transforma para una dimensión a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 1.24}$$

Y para 3 dimensiones

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. 1.25}$$

### 1.1.3.7.2 Transferencia térmica empleando conducción y convección

Cuando alimentos sólidos están siendo calentados o refrigerados, empleando aire o un líquido, hay dos resistencias a la transferencia térmica; el coeficiente de película térmica “ $h$ ” y la resistencia debida a la conducción dentro del sólido. Es muy importante conocer cuál es la resistencia limitante.

Si una lámina plana y larga de espesor “ $L$ ” está siendo enfriada por aire o por agua, supongamos que la tasa de eliminación de calor cuando la temperatura del centro es  $T_c$  la temperatura de la superficie es  $T_{surf}$  y la temperatura global del fluido es  $T_b$ .

La tasa de transferencia térmica desde la superficie viene dada por

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_{surf} - T_b) \quad \text{Ec. 1.26}$$

En esta cantidad de energía debe ser transferida desde el sólido a la superficie por conducción. Por lo tanto,

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_c - T_{surf}}{\frac{L}{2}} \quad \text{Ec. 1.27}$$

Igualando

$$hA(T_{surf} - T_b) = kA \frac{T_c - T_{surf}}{L/2} \quad \text{Ec. 1.28}$$

Reordenando la expresión para que aparezca en dos grupos adimensionales

$$\frac{hL/2}{k} = \frac{T_c - T_{surf}}{T_{surf} - T_b} \quad \text{Ec. 1.29}$$

Esta es la relación de la caída de temperatura sobre el sólido respecto a la película térmica. Donde “ $(hL/2)/k$ ” se denomina número de Biot. Es una medida eficaz de la convección y la conducción. Para valores pequeños del número de Biot ( $Bi < 0.2$ ) la principal resistencia a la transferencia térmica es debida a la convección y tiene lugar sobre la película, es decir, la mayor parte del gradiente térmico tiene lugar sobre la película, y el sólido puede suponerse que está a temperatura uniforme. En este caso el tiempo es necesario para calentar el sólido desde una temperatura inicial  $T_i$  hasta una temperatura final  $T_f$  teniendo una modificación de la transferencia de calor por convección en la que el coeficiente de transferencia térmica global “ $U$ ” se sustituye por el coeficiente de película térmica.

El número de Biot para la mayoría de los alimentos de cualquier espesor razonable o dimensiones es mayor de 0.2, y la transferencia de calor por conducción es el mecanismo predominante; el objeto se calentará o enfriará más lentamente de lo predicho por la ecuación. En estas situaciones la solución de las ecuaciones de transferencia térmica en estado no estacionario implicadas han sido representadas gráficamente y el problema puede ser resuelto usando las gráficas adecuadas. Los factores que afectan a la temperatura en el centro geométrico pueden ser explicados por los siguientes grupos adimensionales. El *factor temperatura*, que es la fracción de cambio de temperatura que no se completa, se representa por

$$\frac{T_H - T_F}{T_H - T_I} \quad \text{Ec. 1.30}$$

El *Número de Fourier Fo*, que concierne a las propiedades físicas y dimensiones del sólido y al tiempo, está dado por

$$Fo = \frac{k \times t}{c_p \times \rho \times \delta^2} \quad \text{Ec. 1.31}$$

El *número de Biot Bi*, o en relación de las tasa de transferencia térmica convectiva y conductiva, viene dada por

$$Bi = \frac{h \times \delta}{k} \quad \text{Ec. 1.32}$$

Donde  $\delta$  es una semi-dimensión característica;  $\delta$  es el radio en el cilindro o esfera y el semi-espesor para una lámina.

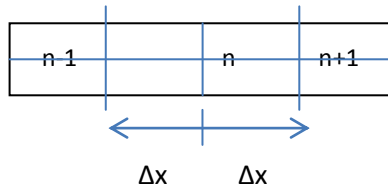
Existen gráficas que nos dan la relación entre estos 3 factores para una esfera, una lámina infinita y un cilindro entre distintos rangos de factor de temperatura, estos gráficos se presentan usualmente como el factor de temperatura frente al número de Fourier para diferentes valores del número de Biot invertido.

#### 1.1.3.7.3 Método numérico para transferencia de calor en estado no estacionario.

En la mayoría de los casos las ecuaciones diferenciales parciales para la conducción en estado no estacionario se usan para resolver varias geometrías simples, sin embargo las formas de interés práctico no pertenecen a esta categoría; además, con frecuencia se encuentran problemas en las que las condiciones de contorno que varían con el tiempo. Estas condiciones de contorno transitorio así como la forma geométrica del cuerpo pueden ser tales que no sea posible una solución analítica. En estos casos los problemas se pueden tratar mejor por técnicas numéricas. Los métodos de cálculo numérico para la conducción de calor en estado no estacionario son semejantes a los métodos numéricos para el estado estacionario. El sólido se subdivide en secciones o planchas de igual longitud y en el centro de cada sección se coloca un nodo ficticio. Después se hace un balance de calor para cada nodo. Este método difiere del método en estado estacionario ya que en la conducción en estado no estacionario se tiene una acumulación de calor en un nodo. A continuación se describe la estructuración de los cálculos:

Considere un cuerpo unidimensional dividido en incrementos como se muestra en la Figura 1.6 la letra "n" denota la posición en el eje x. La ecuación que rige el flujo de calor al interior de sólido es

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 1.33}$$



**Figura 1.6 Nomenclatura para la solución numérica de problemas de conducción unidimensional en estado no estacionario (Incropera & De Witt, 1999).**

Suponiendo propiedades constantes se aproxima la segunda derivada parcial;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} \right) (T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) \quad \text{Ec. 1.34}$$

La derivada parcial de la ecuación se aproxima a

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \left( \frac{T_n^{P+1} - T_n^P}{\Delta t} \right) \quad \text{Ec. 1.35}$$

En esta relación los superíndices designan el incremento del tiempo. Y la combinación de las relaciones anteriores corresponde a

$$\left( \frac{1}{\alpha} \right) \left( \frac{T_n^{P+1} - T_n^P}{\Delta t} \right) = \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} \right) (T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) \quad \text{Ec. 1.36}$$

Agrupando

$$T_n^{P+1} = Fo(T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) + T_n^P \quad \text{Ec. 1.37}$$

A partir de esta ecuación se pueden conocer las temperaturas de los distintos nodos en un instante determinado, después de un incremento de tiempo determinado. Por otra parte la deducción para 2 y 3 dimensiones puede hacerse muy fácilmente.

No todos los alimentos tienen forma de placa o son procesados de esta manera. Es por eso que existen ecuaciones específicas para determinadas formas como el cilindro y la esfera. En ambos casos las ecuaciones tienen implícito el radio. (Geankoplis, 1998)

Para el caso del cilindro;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Ec. 1.38}$$



Aproximando las derivadas

$$T_n^{P+1} = Fo(T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) + \frac{\alpha}{r\Delta r}(T_{n+1} - T_n) + T_n^P \quad \text{Ec. 1.39}$$

Para el caso de **la esfera** la ecuación diferencial parcial es la siguiente

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad \text{Ec. 1.40}$$

Resolviendo la derivada del término de la derecha

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r^2} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial T}{\partial r} 2r \right) \quad \text{Ec. 1.41}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{2\alpha}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Ec. 1.42}$$

Aproximando las derivadas

$$T_n^{P+1} = Fo(T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) + \frac{2\alpha\Delta t}{r\Delta r}(T_{n+1} - T_n) + T_n^P \quad \text{Ec. 1.43}$$

Con estas ecuaciones se puede determinar la transferencia de calor por conducción en los nodos de las distintas geometrías y dar una solución bastante aproximada a la transferencia de calor en distintos materiales en base a las propiedades físicas y mecánicas.

## 1.2 Conservación de alimentos.

Casi todos los alimentos derivan de las plantas y animales, son por tanto de origen biológico y es, precisamente, esta naturaleza biológica la causa del desarrollo una serie de transformaciones que no solo modifican sus características originales, sino que llegan a producir su deterioro. En estas transformaciones se incluyen reacciones químicas y bioquímicas, pero además, los alimentos que el hombre utiliza, son también adecuados para muchos de los microorganismos que abundan en el suelo, en el agua y en el aire por lo tanto en el deterioro de los alimentos interviene también procesos microbianos (Casp Vanaclocha, 2003).

La conservación comercial de alimentos no se estableció hasta principios del siglo XIX. Después de una serie de descubrimientos que permitieron sentar las bases científicas y técnicas para dicha conservación, sin embargo a pesar del completo desconocimiento que se tenía en la antigüedad

de las causas de degradación de los alimentos, nuestros antepasados desarrollaron muchos métodos de conservación más o menos efectivos, que se emplearon durante cientos de años.

Las técnicas primitivas de conservación se desarrollaron a partir de la experiencia y de la necesidad, el hombre utilizó, según el hábitat en que vivía, diferentes formas de conservación de sus alimentos. En climas fríos, el invierno era tiempo de escasez, después de la cosecha de verano y otoño anteriores se disponía de pocos alimentos frescos hasta la primavera siguiente. Los métodos más comunes de conservación fueron secado, ahumado, salado, encurtido y cuando las temperaturas eran suficientemente bajas, congelación. Con frecuencia estos métodos se utilizaban combinados, para obtener un producto que se mantuviera mejor que el conservado por un único método.

Los métodos tradicionales de conservación de alimentos se desarrollaron por prueba y error y conducían a productos de características variables y de inconsistente vida útil. Aunque estos métodos fueron refinándose con el tiempo, muchos de ellos no producían un alimento adecuadamente conservado que fuese además nutritivo y apetitoso. Ninguno fue capaz de conservar todos los alimentos y en general estaban muy limitados a productos específicos. Fue hacia finales del siglo XVIII cuando la industrialización y los largos viajes por mar produjeron la necesidad de conseguir que los métodos de conservación de alimentos fueran aplicables a productos muy diferentes y por consiguiente el costo de la producción de alimentos procesados fuera menor y al alcance de todas las clases sociales y los lugares más alejados (Lewis, 1993).

### **1.2.1 Tratamientos térmicos.**

Bajo el título de tratamientos térmicos se suelen englobar todos los procedimientos que tiene entre sus fines la destrucción de los microorganismos por el calor por lo tanto nos estamos refiriendo a la pasteurización y a la esterilización cuya finalidad principal es precisamente esta destrucción microbiana, como al escaldado y a la cocción, procesos en los que también se consigue una cierta reducción de la flora microbiana presente, pero tienen otros objetivos principales. Esto es así, porque un tratamiento térmico, junto a su capacidad de destrucción microbiana, tienen también una acción sobre los demás componentes del alimento: enzimas, proteínas, vitaminas, entre otros, que llega a afectar a sus propiedades físicas: color forma, consistencia, etc. (Singh & Heldman, 1998)

El procesado térmico de un alimento implica el calentamiento del alimento, dentro de un recipiente cerrado o bien haciéndole pasar a través de un intercambiador de calor, seguido del correspondiente envasado. En este proceso es importante asegurar que el alimento ha recibido el tratamiento térmico adecuado y reducir la contaminación post-proceso. En consecuencia, el alimento debe enfriarse rápidamente y puede requerir almacenamiento refrigerado o bien ser estable a temperatura ambiente. El proceso puede hacerse de forma continua o discontinua. El objetivo de todos los procesos térmicos debería ser calentar y enfriar el producto lo más rápidamente posible. Esta práctica tiene implicaciones económicas y también puede conducir a una mejora de calidad en los alimentos tratados.

## 1.2.2 Cinética de destrucción de los microorganismos

### 1.2.2.1 Efecto del tiempo de proceso

Los primeros estudios de la destrucción de los microorganismos por el calor se deben a Bigelow y a Ball, desarrollaron la teoría de la evaluación del procesado térmico con respecto a la muerte o inactivación de los microorganismos (Casp Vanaclocha, 2003).

El concepto básico de estas teorías es que los microorganismos y sus esporas mueren a cualquier temperatura pero que cuanto mayor sea la temperatura mayor será la probabilidad de que tenga lugar la muerte. La probabilidad de cada espora de escapar a la destrucción no cambia con el tiempo, y define la resistencia térmica de un determinado microorganismo a una temperatura concreta (Casp Vanaclocha, 2003).

Si se denomina “P” a la probabilidad de escapar a la muerte por unidad de tiempo, de un microorganismo expuesto a una temperatura determinada, se tendrá que para t unidades de tiempo esta probabilidad valdrá “P<sup>t</sup>”.

Considerando que existen N esporas de idéntica resistencia térmica, entonces el número de supervivientes después de un tratamiento que se prolongue durante un tiempo t, vendrá expresado por la ecuación

$$S = N \cdot P^t \quad \text{Ec. 1.44}$$

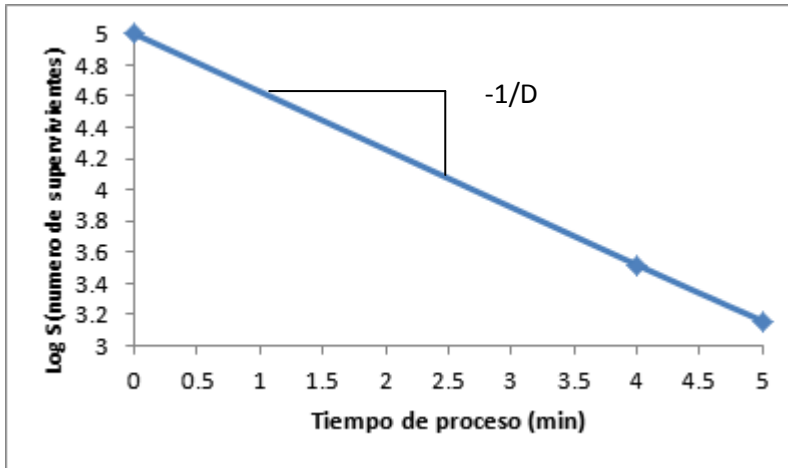
Con logaritmos

$$\log S = \log N + t \log P \quad \text{Ec. 1.45}$$

De acuerdo con lo anterior la destrucción de los microorganismos puede representarse por una ecuación logarítmica, donde “S” es número de supervivientes “y” y el tiempo es “x”, se obtendrá una curva de pendiente:

$$\frac{d(\log S)}{dt} = \log P \quad \text{Ec. 1.46}$$

Que es evidente constante y la curva es una recta, el valor de “P” es de 0 a 1 por lo que su logaritmo será negativo como se ve en la Figura 1.7



$$\text{Log } S = \text{Log } N - t/D$$

Figura 1.7 Curva de supervivencia teórica para un microorganismo a una T° (Casp Vanaclocha, 2003).

Donde:

$$\log P = -\frac{1}{D} \quad \text{Ec. 1.47}$$

O lo que es lo mismo se denomina “D” al tiempo necesario para que la recta recorra un ciclo logarítmico, se tendrá que:

$$\log S = \log N - \frac{t}{D} \quad \text{Ec. 1.48}$$

O en forma exponencial

$$S = N \times 10^{\frac{-t}{D}} \quad \text{Ec. 1.49}$$

Se conoce como el tiempo de reducción decimal y se expresa usualmente en minutos.

Ya que el parámetro “D” es un tiempo, se podría expresar en función de la duración total del tratamiento:  $t = n \cdot D$ , siendo por lo tanto “n” el número de reducciones decimales que se aplican con un determinado tratamiento térmico.

### 1.2.2.2 Efecto de la temperatura de proceso

Si la experiencia representada se repite a diferentes temperaturas, se podrían trazar rectas que permitan calcular el valor de reducción decimal “D” para cada una de estas temperaturas, como puede ver en la Figura 1.8.

Es evidente que cuanto mayor sea la temperatura menor será el valor de la reducción decimal; y será necesario menos tiempo para conseguir la destrucción del 90% de los microorganismos

iniciales, ya que como puede verse al aumentar la T° se incrementara la pendiente de las curvas conseguidas

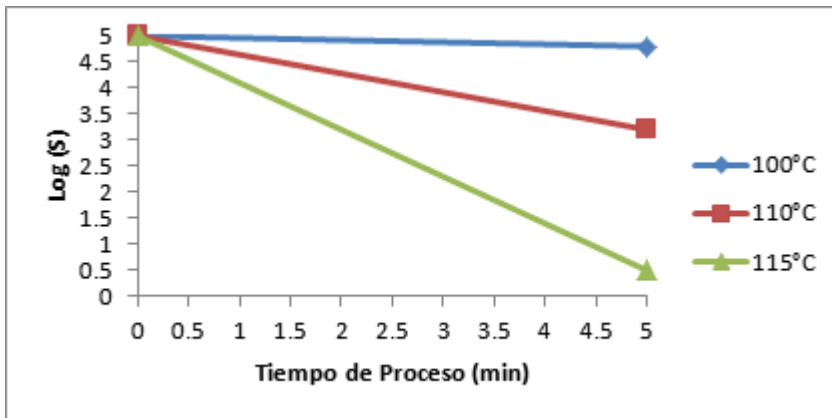


Figura 1.8 Curvas de reducción decimal a distintas T° (Casp Vanaclocha, 2003).

Si se representan los valores de “D” que se proponen frente a las temperaturas a las que han sido obtenidos, en un papel semi-logaritmico se comprobara que también se ajustan a una recta.

Del mismo modo que se obtuvo el parámetro D, se podría en este caso conseguir otro parámetro “z” en °C cuyo valor corresponderá también al paso de la recta por un ciclo logarítmico.

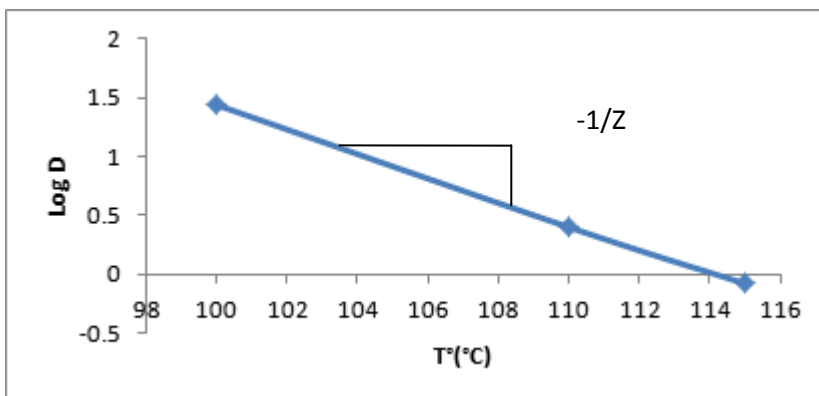


Figura 1.9. Obtención de la resistencia Térmica (Valor Z) a partir de los valores D (Casp Vanaclocha, 2003).

El parámetro “z” define como la termoresistencia característica de cada especie de microorganismos en un medio de composición definida y su significado práctico es el siguiente:

Cuando se eleva la temperatura de un tratamiento en “z” grados el tiempo requerido para conseguir la misma destrucción térmica es 10 veces menor

$$\log D = a - \frac{T}{z} \quad \text{Ec. 1.50}$$

Cuantificación de los tratamientos térmicos

Si se pretende dominar el proceso térmico, es necesario disponer de un criterio para evaluar la eficiencia de cualquier tratamiento. El sistema que se emplea es establecer una comparación con otro tratamiento ya conocido de eficacia conocida.

Se debe de elegir un microorganismo de referencia. En los casos de tratamiento térmico es el *Clostridium botulinum*, cuyo parámetro “Z” se admite que tiene valor de 10 °C, el segundo paso es elegir una temperatura de referencia, que para la esterilización es 121.1 °C una vez escogidos los microorganismos y la temperatura podremos convertir cualquier tratamiento a las condiciones de referencia, para conocer su intensidad.

$$L_T = \frac{D^*}{D} \quad \text{Ec. 1.51}$$

Siendo “D\*” el valor de reducción decimal de tiempo de referencia (121.1 °C) y D el valor de reducción decimal de tiempo a una temperatura dada. De este cociente se puede calcular a partir de

$$L_T = \frac{D^*}{D} = 10^{\frac{T-T^*}{z}} \quad \text{Ec. 1.52}$$

Esta sería la relación de letalidad entre 2 tratamientos de 1min, uno realizado a la temperatura de referencia (T\*) y otro a cualquier temperatura (T), para un microorganismo cuyo parámetro de termoresistencia vale “z” (°C). si el tratamiento es de t minutos tendremos:

$$F_{T^*} = L_T \cdot t = t \cdot 10^{\frac{T-T^*}{z}} \quad \text{Ec. 1.53}$$

A la relación de letalidad se denomina “F<sub>T\*</sub>” cuando el tratamiento es de más de 1 min. Cuando la temperatura de referencia es 121.1 °C y el microorganismo de referencia tiene valor z=10 °C, la relación de letalidad se denomina F<sub>0</sub>:

$$F_0 = F_{121.1}^{10} \quad \text{Ec. 1.54}$$

Estas consideraciones son para un tratamiento a T° constante y por lo tanto el calentamiento y enfriamiento instantáneos. Esto es imposible en la práctica y por lo tanto se tiene que considerar el enfriamiento y el calentamiento y queda expresado en la siguiente expresión:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T-121.1}{10}} dt \quad \text{Ec. 1.55}$$

Expresado de otra manera “F<sub>0</sub>” tiempo en minutos @ 250 °F (121.1 °C) que produce el mismo grado de esterilidad que el proceso considerado a su “T°” de proceso.

### 1.2.3 Otros tratamientos

Aparte de los tratamientos térmicos existen otros métodos de conservación de alimentos como pueden ser la refrigeración, congelación, fermentación, la deshidratación, entre otros, cierto es que para aplicar uno de los métodos anteriores es necesario primero aplicar algún tratamiento térmico debido a que estos procesos no controlan en muchas ocasiones la actividad enzimática o el desarrollo de la carga microbiana inicial.

**Refrigeración:** la temperatura es un factor importante para mantener la calidad de los alimentos almacenados. El descenso de la temperatura disminuye la velocidad de las reacciones que producen el deterioro de la calidad en los alimentos. En general se acepta que un descenso de temperatura de 10 °C reduce la velocidad de reacción a la mitad.

**Congelación:** La conservación de alimentos mediante congelación se produce debido a diferentes mecanismos. La reducción de la temperatura del producto a niveles por debajo de 0 °C produce un descenso significativo en la velocidad de crecimiento en el deterioro del producto debido a la actividad microbiana. La misma influencia de la temperatura puede aplicarse a la mayoría de las reacciones que pudieran ocurrir en el producto tales como las reacciones enzimáticas y de oxidación. Además, la formación de cristales de hielo dentro del producto disminuye la disponibilidad del agua para participar en dichas reacciones. Cuanto menor sea la temperatura y más agua pase a estado sólido, menos agua se encontrará disponible para intervenir en las reacciones que pueden causar el deterioro del producto.

**Deshidratación:** La disminución de la humedad de los alimentos es uno de los métodos más antiguos utilizados para su conservación. Al reducir el contenido de agua de un alimento hasta un nivel muy bajo se elimina la posibilidad de deterioro biológico y se reducen apreciablemente las velocidades de otros mecanismos de deterioro. Además de del efecto conservante, mediante la deshidratación se reduce el peso y el volumen del alimento, aumentando la eficiencia del proceso de transporte y almacenaje.

También se usa la fermentación y el encurtido; la fermentación es el proceso de desarrollar microorganismos no dañinos y que dan por su actividad nuevos productos que pueden ser conservados de en condiciones adversas e incluso obtener nuevas propiedades, por su parte el encurtido es la el cambio de condiciones sobre para que no se desarrollen los microorganismos, como el cambio de pH por medio de salmueras con bajo contenido de agua y altos porcentajes de sales y sustancias que evitan la actividad de microorganismos.

## 1.3 Escaldado.

Dentro de los tratamientos de conservación de alimentos el escaldado es una operación que ayuda al control o al mejoramiento de estos tratamientos modificando la estructura de los alimentos, con la disminución de la actividad microbiana y enzimática, pero si no se tiene un control del escaldado puede causar daños y por consiguiente alterar negativamente los

tratamientos a los que sean sometidos los alimentos, es por eso que el escaldo debe tener un buen control de acuerdo a los alimentos aplicados, y por consiguiente se debe tener estudios que fundamenten su aplicación.

### **1.3.1 Definiciones.**

El escaldado es tratamiento térmico a 95-100 °C que dura varios minutos que tiene como fin destruir las enzimas susceptibles de alterar las verduras y frutas y algunas de sus características antes de algún tratamiento de conservación como la eliminación de gases ocluidos, reducción de carga microbiana, llenado en caliente de latas, eliminación de sabores extraños y eliminación de problemas provocados por el almidón (Mafart, 1994).

Se entiende por escaldado un tratamiento térmico de corta duración y a temperatura moderada. Generalmente consiste en mantener el producto algunos minutos a una temperatura de 95 a 100 °C. el escaldado no es un sistema de conservación en sí mismo, es una operación previa de suma importancia en los procesos de conservación por calor de productos envasados, congelados y deshidratación de productos sólidos (Casp Vanaclocha, 2003).

Este tratamiento térmico, también conocido como blanqueo, persigue la inhibición de la actividad enzimática residual en frutas y verduras que pueden ser alteradas en sus nutrientes o propiedades organolépticas. El escaldado cumple una serie de objetivos secundarios que varían según el proceso que se plantea con posteridad para asegurar la conservación del alimento. El tratamiento es moderado, entre 70 y 100 °C, con agua o con vapor de agua. (Rodríguez, 2002)

En resumen el escaldo es una operación de tratamiento térmico suave previa a algún método de conservación de alimentos.

### **1.3.2 Objetivos del escaldado.**

Como ya se mencionó algunos objetivos en las definiciones el escaldado tiene varias funciones en diferentes métodos de conservación:

- Antes de la apertización:
  - Se incrementa la densidad del producto y que no flote.
  - Eliminar los gases ocluidos para que la presión interior del envase durante la esterilización coincida con la presión de vapor.
  - Eliminar los gases ocluidos para eliminar la concentración de oxígeno, para impedir la oxidación del producto y la corrosión de la lata.
  - Incrementar su flexibilidad del producto y evitar fracturas en el llenado.
- Previo a la liofilización.
  - Destrucción enzimática.
  - Facilitar la rehidratación.
  - Reducción de cargas microbianas.
- Previo a la congelación.
  - Destrucción enzimática.
  - Eliminación de gases ocluidos para evitar la oxidación.
- Previo a la deshidratación.
  - Reducción microbiana.



- Reducción enzimática.

Además de estos objetivos en el escaldado también existen modificaciones en la estructura del alimento lo cual nos da variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas las cuales pueden ser o no agradables, estas variaciones están relacionadas con la transferencia de energía y de masa principalmente de la transferencia de estado no estacionario ya que esta transferencia depende del tiempo (Mafart, 1994).

### 1.3.3 Tipos de escaldado.

El escaldado se puede llevar a cabo mediante la inmersión del producto en baño de agua caliente o haciéndolo pasar a través de una atmosfera de vapor (Rodriguez, 2002).

La simplicidad de los **equipos de escaldado con agua**, son los menos costosos en inversión, constituye el principal factor a favor del escaldado con agua. Por otra parte, el rendimiento energético de los equipos de escaldado con agua es menor que con escaldadores de vapor. El escaldado con agua se beneficia igualmente de una mayor versatilidad de funcionamiento en lo que concierne al control de la temperatura que se realiza mediante simple regulación de inyección de vapor.

Por el contrario, los efluentes producidos en los equipos de escaldado de agua tienen el inconveniente de ser voluminosos y concentrados debido al efecto de extracción de escaldado. Paralelamente a la solubilización de las materias solubles, tiene lugar la penetración de agua en el producto. Esta agua, durante la cristalización en el proceso de congelación, contribuye a la alteración mecánica de los tejidos. Por otra parte si la renovación de agua no es continua se corre el riesgo de selección de flora bacteriana termófila (Rodriguez, 2002).

**Los equipos de escaldado de vapor:** son netamente menos contaminantes que los de agua, gracias a una mejor retención de los constituyentes solubles. Por otra parte, la masa de efluente se reduce, puesto que la entalpia másica del vapor es de 6 o 7 veces superior a la del agua a la misma temperatura.

En contra parte, debido a las fugas de vapores que no condensan completamente, los rendimientos energéticos de los escaldadores de vapor clásicos son deplorables. En la medida en que el vapor se mezcla necesariamente con el aire, los coeficientes de convección son más bajos y transferencia externa de calor es más lenta que cuando el producto está sumergido en agua. Por otro lado, el escaldado con vapor condiciona a trabajar a una temperatura constante que está dada por la presión del vapor. Por último el escaldado con vapor no produce ningún efecto de lavado y elimina con menor eficacia que el agua los sabores extraños. En la Tabla 1.2 se puede observar un comparativo entre los 2 sistemas de escaldado (Mafart, 1994).

Tabla 1.2 Comparación entre el Agua y el Vapor como agentes de escaldado (Rodríguez, 2002).

Escaldador	Ventajas	Inconvenientes
<b>Agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Instalación sencilla y económica.</li> <li>◦ Rendimiento energético aceptable.</li> <li>◦ Permite operar a distintas temperaturas.</li> <li>◦ El lavado es simultáneo al proceso del escaldado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Extracción significativa de componentes solubles.</li> <li>◦ Da lugar a vertidos cuantiosos y contaminantes.</li> <li>◦ Contraindicada para conservaciones por congelación, el agua puede dañar los tejidos por cristalización.</li> </ul>
<b>Vapor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Extracción mínima de componentes solubles</li> <li>◦ Menos contaminación de contenido de materia orgánica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Los equipos se esterilizan con facilidad.</li> <li>◦ Instalación costosa.</li> <li>◦ Rendimiento energético muy bajo.</li> <li>◦ Equipos poco versátiles están diseñados para operar a una sola temperatura.</li> <li>◦ No lava el producto</li> <li>◦ Hay que parar la producción para proceder al lavado de las instalaciones.</li> </ul>

### 1.3.4 Equipos

En general el desarrollo de las instalaciones de escaldado tiende a mejorar el aprovechamiento energético y a reducir los consumos de agua y vapor de agua, que aproximadamente en algunos equipos es de 1 y 0.5 toneladas por tonelada de producto respectivamente. Otra línea de interés se centra en la disminución del contenido de materia orgánica de los vertidos asociados a esta operación potenciando la retención de sus componentes hidrosolubles, lo que acarrea una mayor calidad del producto escaldado (Mafart, 1994).

#### a) Equipos de escaldado con agua.

- **Cilindro rotatorio:** El alimento se transporta a través de un tambor perforado y coaxial a la cuba parcialmente sumergido a la misma, el alimento se desplaza por medio del corte helicoidal interno que actúa como tornillo sin fin. El tiempo de residencia depende de la velocidad de giro del cilindro. La temperatura del agua se regula por inyección de vapor, el flujo de producto y el volumen de agua se controlan por rebose. La reposición de agua que arrastra el producto se efectúa continuamente.
- **Tubos:** Es el sistema tradicional consiste en bombear una suspensión de alimento en el agua de escaldado a través de un tubo metálico. En este caso el tiempo de residencia se controla por medio de la velocidad de circulación de la suspensión y de la longitud de tubo. Estas instalaciones, que ofrecen una mayor capacidad de tratamiento y ocupan menos espacio pueden emplearse como medio de transporte.

El escaldado por inmersión en agua tiene, en las dos modalidades anteriores, expuestas, un deficiente aprovechamiento energético y una alta tasa contaminante. La solución más inmediata para afrontar estos 2 inconvenientes consiste en la recirculación parcial del agua. Sin embargo este método recircular el agua tiene un inconveniente que es la posible proliferación de flora bacteriana termófila y se por lo cual se debería usar algún método como la cloración para usarla como germicida. La extracción de ácidos orgánicos durante el escaldado con agua puede originar, su acidulación, lo que a su vez favorece la lixiviación de clorofila. Muchos inconvenientes mencionados se han solucionado con un escaldador–enfriador, que permite mejorar el aprovechamiento energético y reducir el potencial contaminante de estas instalaciones.

**Proceso integrado.** Consta de tres etapas en serie: Pre calentamiento con agua, escaldado con agua/vapor, pre-enfriamiento con agua y enfriamiento con aire. El producto se transporta mediante una cinta sinfín a través de las secciones, donde el agua se distribuye por aspersión y se recoge por la parte inferior; el aire frío incide perpendicularmente sobre el producto en un sentido u otro, de tal forma que el alimento alcanza una temperatura baja.

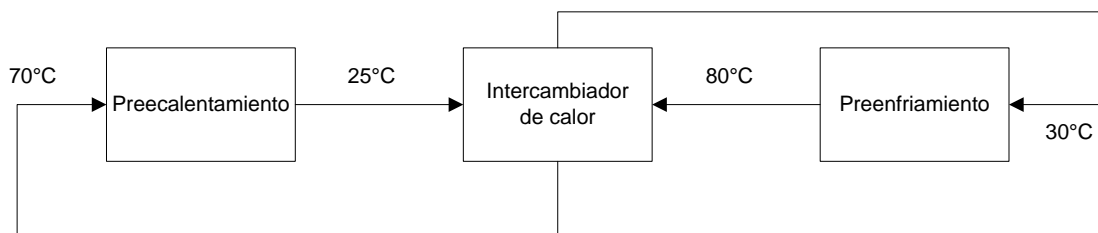


Figura 1.10 Circuito de intercambio de calor de las aguas de pre calentamiento y de preenfriamiento de un proceso integrado de escaldado (Rodríguez, 2002).

#### b) Equipos de escaldado con vapor.

- **De túnel:** consiste en un túnel por el que se transporta el alimento sobre una cinta sinfín bajo atmosfera de vapor. El control del tiempo de residencia se efectúa actuando sobre la velocidad de paso del producto. En cualquier caso el rendimiento energético es muy bajo. Para mejorar este aspecto se han desarrollado distintas soluciones como cortinas de agua a la entrada y a la salida del producto o con la ayuda de válvulas rotatorias para la carga y descarga de producto (Mafart, 1994).

### 1.3.5 Acción del calor sobre los constituyentes de los alimentos

Como se ha dicho anteriormente la aplicación del calor sobre los alimentos no solamente va a afectar a su carga microbiana, sino que también actuara sobre el resto de sus propiedades.

Al efecto del calor sobre la flora del alimento se le denomina destrucción térmica y al efecto sobre el resto de sus componentes se denomina cocción, se aplica para hacer a los alimentos apropiados para el consumo (Potter, 1970; Mafart, 1994).

#### **1.3.5.1 Acción sobre el agua**

El agua es el componente mayoritario de los alimentos en sus dos estados: agua ligada a otros constituyentes y agua libre, móvil, de volumen y estructura variables y fáciles de extraer.

La elevación de la temperatura acelera la evaporación superficial de esta agua, hasta que se produce una verdadera vaporización a 100 °C cuando se produce este fenómeno tiene 2 consecuencias esenciales:

- Realentiza los intercambios térmicos, ya que absorbe una gran cantidad de calor.
- Es el principal origen de la desecación superficial.

La cocción favorece también la conversión en agua libre de una cierta cantidad de agua ligada. Este fenómeno aumenta con la temperatura de calentamiento (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

#### **1.3.5.2 Acción sobre los lípidos**

El primer efecto que se produce sobre las grasas con un tratamiento térmico es su fusión. La fusión de las grasas es variable en función de sus características físico-químicas y estructurales.

Además el aumento de temperatura favorece la oxidación. La oxidación provoca la aparición de peróxidos que por escisión dan compuestos responsables del aroma y el sabor (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

#### **1.3.5.3 Acción sobre los glúcidos**

El almidón es sensible al calor en medio acuoso: se transforma en engrudo, red de polímeros lineales que se enriquece en agua y que puede impregnar las estructuras vecinas. Se utiliza por sus efectos de hinchado y como ligante (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

La gelatinización comienza de 52 a 75 °C en función del origen de glúcido. En el caso de la cocción de ciertas legumbres y frutas, se pueden necesitar temperaturas bastante más elevadas (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

La gelatinización puede también acelerar las reacciones de Maillard, con las que se produce la aparición de diversas sustancias aromáticas (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

La descomposición térmica de los azúcares (caramelización) no se produce más que a temperaturas muy altas del orden de 150 a 164 °C y tienen un interés muy limitado (Lewis, 1993; Mafart, 1994; Potter, 1970).

#### **1.3.5.4 Acción sobre las proteínas**

La considerar las proteínas de origen animal, por regla general se constata que a medida que se va elevando la temperatura se produce primero la activación de ciertas enzimas y a partir de un determinado umbral térmico, la desnaturalización de las proteínas.

- La activación de las enzimas se manifiesta entre 30 y 50 °C y afecta principalmente a la lipasa y proteasa. A estas temperaturas el sabor y la dureza de las carnes se incrementan.
- La desnaturalización a temperaturas superiores se traduce por:
  - Una pérdida de actividad biológica, sobre todo enzimática pero también antigénica cuyo estudio posterior permite conocer el grado de calentamiento aplicado.
  - Un cambio de solubilidad: formación de gel más o menos homogéneo
  - Un cambio de color: la carne parece gris por transformación de la mioglobina en una proteína cromófora
  - Un cambio de estructura con retracción más o menos importante de las proteínas fibrilares
  - Una modificación de la sensibilidad a las enzimas: las proteínas desnaturalizadas son más sensibles a los jugos digestivos.

La desnaturalización de las proteínas solubles comienza entre 50 y 55 °C, es prácticamente total entre 66 y 70 °C y se completa a 80 °C.

La desnaturalización de las fibras musculares se traduce por su acortamiento y disminución del poder de retención de agua

#### **1.3.5.5 Acción sobre las vitaminas**

Las vitaminas son sensibles a las temperaturas de cocción, salvo la vitamina B<sub>1</sub>. Por el contrario el calor puede acelerar los fenómenos de oxidación cuando los alimentos se cuecen sin protección. Este es el caso de las vitaminas A, E, B<sub>2</sub> y C. Aunque las pérdidas que se derivan no son tan importantes que puedan producir carencias entre los consumidores (Casp Vanaclocha, 2003).

#### **1.3.6 Estudios relacionados.**

Existen estudios sobre los efectos del escaldado que han sido de gran utilidad en la conservación de alimentos y cambios estructurales que suceden durante el proceso, muchos de estos estudios o investigaciones están basados en la simulación del proceso.

En 2007 Gonçalves y Pinheiro realizaron un estudio sobre la cinética de la inactivación de la peroxidasa y los cambios en el color y la textura de la calabaza durante el escaldado. El experimento se llevó a cabo en agua a diferentes temperaturas, con muestras cilíndricas de 50mm de diámetro y 15mm de alto. Para el análisis de la actividad de la peroxidasa se utilizó un método modificado de un estudio anterior basada en espectrofotometría. Para determinar el color se utilizó un colorímetro midiendo los valores  $L^*a^*b$ . Para la textura se utilizó un texturómetro utilizando una carga de celda máxima de 500N, un punzón de 10mm de diámetro y una profundidad de 5mm a una velocidad de 1mm/s.

Los resultados de este experimento arrojaron que la temperatura mayor a 90 °C reduce en más del 90% la actividad de la peroxidasa para el color existen variaciones leves en, entre un 60 a 80% de retención. Inevitablemente la textura se ve grandemente afectada, variando entre 14 y 25% en la dureza, reduciendo la calidad del producto (Gonçalves & Pinheiro, 2007).

En 2009 Lespinard y Goñi realizaron un estudio sobre la determinación experimental y simulación de la variación de tamaño, la transferencia de calor e índices de calidad durante el escaldado. El experimento se realizó en agua a diferentes temperaturas (50, 60, 70, 80 y 90 °C), la contracción y variación de tamaño se determinaron con una cámara digital que registraba estas variaciones, la penetración de calor se llevó a cabo por el método del elemento finito seccionando el muestra de acuerdo a su forma utilizando la ecuación de transferencia de calor " $\rho C_p ((\delta T)/(\delta t)) = \nabla(k \nabla T)$ ". La textura se determinó con un texturómetro utilizando los parámetros siguientes; un punzón de 10mm de diámetro una velocidad de 5mm/s, con una penetración del 30% de la muestra y una carga de disparo de 0.05N. La variación de color y la actividad enzimática se determinaron con un colorímetro.

Los resultados arrojaron los siguientes datos, el tamaño se reduce más rápido a mayor temperatura, en cuanto a la penetración de calor la temperatura tiene una correlación estable mientras que el champiñón reduce su tamaño, en cuanto a la textura es bastante afectada entre un 64 a 80% dependiendo la temperatura de escaldado. Para el color se determinó que se oscurece en mayor grado a menor temperatura y para la actividad enzimática se elimina mejor a mayor temperatura (Lespinard & Goñi, 2009).

También en el 2007 Liu y Scanlon investigaron sobre la simulación de efecto de las condiciones de escaldado sobre la textura de papas para freír. El experimento con tiras de del centro de cada papa, se realizó en un hervidor de agua-vapor con un rango de temperaturas de 62.8 °C a 90.6 °C durante 2 a 20min. La textura se midió con texturómetro usando una un punzón cilíndrico de 2mm de diámetro una carga máxima de celda de 20N y una velocidad de 5mm/min.

Los resultados de esta prueba indicaron que la textura de las tiras escaldadas a baja no temperatura no tenían mucha variación debido a la poca activación de la pectina y a los puentes de calcio que se forman durante el proceso, las temperaturas consideradas bajas son de <74 °C. En contraste las papas que se escaldaron a temperaturas mayores a 74 °C se iban ablandando conforme avanzaba el escaldado. En conclusión el tiempo de escaldado puede ayudarnos a inactivar los procesos enzimáticos y conservar en gran medida la textura pero si la temperatura de escaldado es alta la textura se ve bastante afectada en cuanto a la firmeza (Liu & Scanlon, 2007).

Como se puede observar en los tres experimentos citados anteriormente, en el proceso de escaldo las propiedades físicas de los alimentos se ven claramente afectadas como es el caso del color y la firmeza de los productos evaluados. Es por eso que estas consecuencias deben ser consideradas para lograr los objetivos del escaldado sin afectar gravemente los parámetros de calidad de los productos o en ciertos casos que los productos vayan destinados a procesos donde estas características no sean de suma importancia.

## 1.4 Propiedades físicas de los alimentos.

En el estudio de los alimentos y sus tratamientos térmicos siempre están en juego las propiedades físicas y químicas de estos. Las propiedades son aquellas características, como presión, temperatura o color, que definen el estado de equilibrio de un sistema termodinámico. Las propiedades no dependen de como se ha alcanzado ese estado del sistema sino que son sólo función de ese estado. Es decir, las propiedades son independientes del proceso por el cual el sistema ha alcanzado su estado. La reología ha sido definida como la deformación de los objetos bajo la influencia de fuerzas aplicadas a ellos. Los sólidos, como los líquidos, pueden verse sometidos a un gran número de diferentes tipos de fuerzas (Rosenthal, 2001).

### 1.4.1 Propiedades de los alimentos

#### 1.4.1.1 Propiedades intensivas

Las propiedades intensivas son aquellas que no dependen de la masa del sistema que se considere; por ejemplo, la temperatura, la presión y la densidad son propiedades intensivas.

#### 1.4.1.2 Propiedades extensivas

Las propiedades extensivas dependen del tamaño del sistema considerando, por ejemplo, masa longitud, volumen y energía. Esta definición implica que cada propiedad extensiva de un sistema es suma de los valores parciales correspondientes a las partes del sistema.

### 1.4.2 Textura

Los alimentos están sometidos a fuerzas durante su procesado, particularmente durante las operaciones unitarias; además del material de envasado principalmente en latas y bolsas flexibles sufrirá tensión, particularmente durante su envasado.

En lo referente a las propiedades mecánicas, estas se refieren a la manera en que los materiales responden a la aplicación de fuerzas, a consecuencia de las cuales se deforman o fluyen en función del tiempo. La medición de esta respuesta constituye el campo de la reología y la textura. Como consumidor nos damos cuenta con precisión de la textura cuando comemos o bebemos sólidos y líquidos, y no puede dudarse de que la textura es un factor importante en la calidad del alimento. En el proceso de masticación, las fuerzas a las que se somete un alimento son complejas. El masticado rompe el alimento y lo hace más digerible (Lewis, 1993 & Rosenthal, 2001).

#### 1.4.3 Definición de textura

La palabra textura deriva del latín *textura*, que significa tejido, y originalmente se tomó en referencia a la estructura, sensación y apariencia de los tejidos. No fue hasta la década de 1960 que se empezó a utilizar para describir <<la constitución, estructura o esencia de cualquier cosa en relación con sus constituyentes, elementos formativos>> (Oxford University, 2011).

Varios intentos de definir la textura de un alimento han culminado en cierto acuerdo internacional con el desarrollo de la norma internacional ISO 5492, que se relaciona con la evaluación sensorial. La textura se define como "Todos los atributos mecánicos, geométricos y superficiales de un

producto perceptibles por medio de receptores mecánicos, táctiles y, si es apropiado, visuales y auditivos” (Rosenthal, 2001).

La textura describe el atributo de un producto alimenticio que resulta de una combinación de propiedades físicas y químicas, percibidas en gran medida mediante los sentidos del tacto, vista y oído.

#### **1.4.4 Percepción de la textura.**

Como parte importante que debe tenerse en cuenta es que la textura es más una característica psicológica o sensorial que una propiedad física. Por lo tanto. La textura puede solamente ser medida mediante técnicas sensoriales que implican el uso de jurados de catadores, tanto entrenados como sin entrenar.

Antes de la década de 1940, se consideraba de forma generalizada que las medidas sensoriales de la textura de los alimentos eran puramente subjetivas y como tales generalmente poco fidedignas. La variación de los individuos así como la variabilidad de una persona de un día a otro pareció hacer de los análisis sensoriales de los alimentos un arte y no digno de ser un estudio científico serio. Ya que nuestros valores y actitudes están fundados en la reproducibilidad, la mayoría de los investigadores serios están convencidos en confiar en técnicas instrumentales de medidas llevadas a cabo bajo condiciones normalizadas (Rosenthal, 2001).

La textura juega un papel muy importante en nuestra apreciación del alimento. Nuestra percepción de la textura del alimento a menudo constituye un criterio por el cual juzgamos su calidad y frecuentemente es un factor importante en si seleccionamos un artículo o lo rechazamos. Exprimimos y pinchamos frutas y queso para evaluar su madurez e inclinamos botellas para estimar la viscosidad de su contenido. La textura se puede expresar por sonidos que los alimentos hacen al manipularlos, hasta el punto que escuchamos los alimentos para estimar su calidad. En muchos casos determinar la textura de los alimentos con métodos de medida empíricos con son la punción pequeños golpes o estrujamiento han llegado a ser medidas establecidas de calidad para algunos para algunos productos e incluso pueden fijar los precios del mercado. Seguramente, si un individuo puede evaluar la textura mediante pequeños golpes, entonces una máquina que golpea y mide la fuerza involucrada dará una medida reproducible del aspecto de la textura y por tanto la calidad (Rosenthal, 2001; Casp Vanaclocha, 2003).

Habiendo aceptado la idea de que una maquina puede tomar el lugar de un humano para evaluar la textura de un alimento, podremos recordar que antes que todo también la textura de un alimento es esencialmente una experiencia humana que surge de nuestra interacción con el alimento.

#### **1.4.5 Evaluación de la textura con técnicas instrumentales.**

Un atributo de textura es la manifestación de una combinación de propiedades físicas y químicas, que incluyen la forma tamaño, numero naturaleza y disposición de los elementos estructurales constituyentes. Es frecuentemente el resultado de la estructura del producto, y de este modo, la estructura de un producto puede a menudo conducir a una mejor comprensión de sus



propiedades físicas y, en último término, de sus características texturales. Este concepto es la base de la mayoría de los métodos instrumentales para la evaluación de la textura. Tales instrumentos pueden medir una única propiedad física, pero más frecuentemente miden la mezcla de una serie de propiedades físicas del producto estudiado; son métodos indirectos de medición de la textura, y sus resultados tienen sentido únicamente si se puede demostrar que están relacionados conceptual y estadísticamente con los obtenidos por métodos sensoriales, los cuales deben ser contemplados como definitivos (Rosenthal, 2001).

A pesar de los problemas implicados, se ha desarrollado para la evaluación de la textura un gran número de instrumentos que se basan en la deformación de una muestra. Se clasifican normalmente en:

- Ensayos empíricos, que miden alguna propiedad física bajo condiciones bien definidas.
- Ensayos imitativos, que intentan simular las condiciones a las que el material está sometido en la boca
- Ensayos fundamentales, que miden propiedades físicas bien definidas tales como viscosidad o el módulo elástico.

#### **1.4.5.1 Ensayos Empíricos.**

Por definición, los ensayos empíricos se desarrollan por experimentación y observación, y como tales pueden carecer de una base científica rigurosa. Sin embargo, esto no descalifica su utilización y en ciertos sectores de la industria de alimentos, los ensayos empíricos sirven como patrones para clasificar la calidad del alimento (Singh & Heldman, 1998; Rosenthal, 2001)

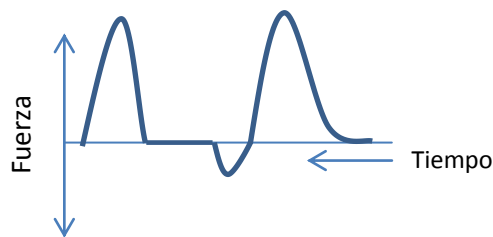
Los ensayos empíricos han sido criticados por ser normalmente específicos para unos intervalos particulares estrechos de alimentos. Cada ensayo empírico mide características del alimento de forma arbitraria, y ya que son diferentes en cada caso no tiende a comparar bien y no se puede utilizar de modo predictivo. En estas pruebas el patrón de fuerzas establecido dentro de la muestra es difícil de aplicar y por tanto no es posible expresar los resultados en unidades fundamentales. Los resultados obtenidos son normalmente característicos para ese producto particular, bajo las condiciones experimentales utilizada, y es difícil predecir por lo que es necesario citar el tamaño, velocidad o alguna parámetro utilizado (Rosenthal, 2001).

#### **1.4.5.2 Ensayos Imitativos.**

Los ensayos imitativos intentan imitar la masticación con cierto tipo de máquina que mastica el alimento. La máquina está equipada para proporcionar mediadas de esfuerzo y/o deformación durante la secuencia de ensayo. En el pasado, se crearon una diversidad de ensayos. Algunos en realidad incorporaron dentaduras humanas que imitaban el movimiento de la mandíbula teniendo en la mayoría de los ensayos desviaciones de acuerdo a los al a colocación de los sensores. Este grupo de técnicas intenta simular en cierto grado las fuerzas y deformaciones a las que está sometido el alimento mientras está siendo consumido. Diferentes científicos afirman que la textura viene principalmente evaluada principalmente a partir de las sensaciones originadas cuando el alimento entra en contacto con las partes duras y blandas de la boca. Además de los

dientes, la lengua, los carrillos, el paladar y las demás estructuras orales tienen algún papel en el proceso de masticación y en la medición de textura, y en la influencia de dicha (Rosenthal, 2001; Lewis, 1993).

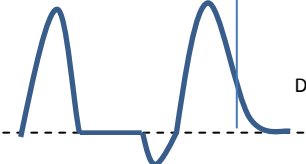
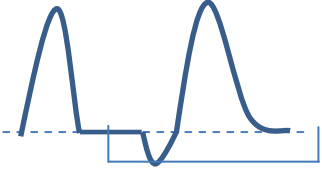
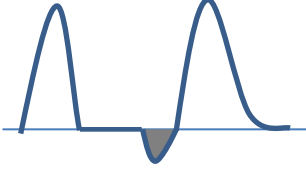
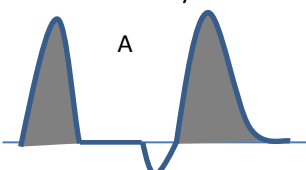
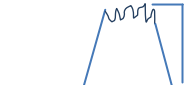
Un ensayo imitativo que ha captado la imaginación de muchos tecnólogos en alimentos debido a que pretende proporcionar valores estándar de la textura de los alimentos es el Análisis de perfiles de textura (TPA- *Texture Profile Analysis*). Creado por General Foods a mediados de los años 60's. En una serie de artículos se definieron una variedad de términos de textura, que están expuestos en la Tabla 1.3 utilizando nueve evaluadores entrenados a los que les eran familiares estos términos, varios productos fueron clasificados primero y luego indexados. Para cada uno de los atributos sensoriales, se seleccionaron distintos productos que tuvieran características diferentes pero que mantuvieran el continuo sensorial es decir una diferencia de alguna propiedad. Para cada estándar se definieron los detalles de preparación o nombres, así como los detalles de la temperatura de ensayo. Por lo tanto, se establecieron los patrones que permitieron que cualquiera pueda considerar cada uno de los atributos de textura a los diferentes niveles definidos. (Rosenthal, 2001)



**Figura 1.11 Aspectos de un análisis de un perfil de textura (TPA) (Rosenthal, 2001).**

En la Figura 1.11 se muestra una curva ideal de TPA de fuerza-tiempo. En un intento de correlacionar las definiciones de textura ya definidas, se atribuyó una función matemática a cada término en base a una serie de datos obtenidos a partir de la curva de fuerza-tiempo.

Tabla 1.3 Parametros medidos por un análisis de perfil de textura (Rosenthal, 2001).

Parámetro	Definición sensorial	Definición instrumental
Dureza	Fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares	 Dureza
Elasticidad	La extensión a la que un alimento comprimido retorna a su tamaño original cuando se retira la fuerza	 Ciclo = Segundo contacto - primero Elasticidad = Ciclo para un material Inelástico - Para el alimento
Adhesividad	El trabajo requerido para retirar el alimento de la superficie	
Cohesividad	La fuerza que los enlaces internos hacen sobre el alimento	Cohesividad = B/A 
Fragilidad	La fuerza a la que el material se fractura. Los alimentos frágiles nunca son adhesivos	 Fragilidad
Masticabilidad	La energía requerida para masticar un alimento sólido hasta que está listo para ser tragado	= Dureza X Cohesividad X Elasticidad
Gomosidad	La energía requerida para desintegrar un alimento semisólido de modo que esté listo para ser tragado	= Dureza X Cohesividad

Es evidente que el desarrollo del TPA he demostrado ser una ayuda valiosa para evaluar la textura de los alimentos. Sin embargo, se debería cuidar de hacer uso de la aceptación de los resultados para otros propósitos que no fueran de evaluación comparativa. La técnica es claramente imitativa de lo que se hace en la boca. Pero se debería de tomar nota de las diferencias entre los ensayos instrumentales y humanos por los factores de la saliva, temperatura, entre otras. Y las

instrumentales con los movimientos oscilatorios que resultan por la construcción de giro, el área de contacto entre una muestra plana y el embolo de cara plana (Rosenthal, 2001).

#### **1.4.5.3 Ensayos Fundamentales.**

Los ensayos fundamentales miden propiedades físicas innatas de los materiales tales como el módulo de Young o la razón de Poisson. Dichos ensayos son científicamente rigurosos, y los datos son expresados en unidades científicas bien definidas. Además, las relaciones entre las propiedades fundamentales de los materiales permiten la predicción de valores para una propiedad basada en valores conocidos para otras (Rosenthal, 2001).

#### **1.4.6 Propiedades fundamentales y medida de propiedades mecánicas.**

Los alimentos son materiales y por tanto poseen las propiedades mecánicas. Gran parte de la preparación de alimentos implican la trituración, que se puede relacionar con la mecánica de fractura. La textura está gobernada por la combinación de las propiedades mecánicas y de fractura y su modificación y expresión con la boca durante la masticación. Pero existen dificultades al debido a factores relacionados.

- La mayoría de alimentos son mecánicamente muy complejos
- El procesado mecánico y la masticación combinan muchos procesos que la ciencia de materiales necesita separar para cuantificarlos y comprenderlos
- El alimento en la boca está cambiando continuamente sus propiedades con el cambio de la temperatura, contenido en agua, pH, etc.
- La mayoría de los científicos en alimentos no están entrenados en la ciencia de los materiales.

Por tanto, es muy difícil medir la textura en una máquina, aunque es probablemente posible identificar los factores principales que gobiernan la textura de un material alimentario y medirlo, por lo tanto estimarlo para una gran parte de textura. Existen dos principales enfoques; el primero es la aplicación sobre la muestra de cualquier tipo de deformación mecánica, medir la respuesta e intentar correlacionar el resultado con los resultados de un panel sensorial. Y el segundo que es intentar adivinar a partir del camino en que el material responde que tipo de deformación mecánica responde mejor a lo que el alimento está siendo sometido.

En relación a lo anterior la medición de la textura de alimentos está enfocada a la idea de que las propiedades mecánicas de un alimento y sus relaciones con la estructura interna del material alimentario y las condiciones de procesado en la boca podrían estar directamente relacionadas con la textura percibida del alimento durante la comida. Esto está basado en el análisis ingenieril de la estructura de materiales, donde medidas a pequeña escala de laboratorio han sido extrapoladas a grandes magnitudes.

##### **1.4.6.1 Deformación.**

En un objeto cuando una fuerza actúa en una dirección, se dice que el objeto está bajo tracción o tensión. Esto produciría una deformación o estiramiento. La deformación es un número puro, ya

que compara la forma antes y después de la deformación. Se expresa de dos formas, o como la razón de cambio dimensional dividido por la dimensión inicial.

$$\text{Deformación} = \frac{\text{Extensión}}{\text{Longitud inicial}} \quad \text{Ec. 1.56}$$

O bien como el logaritmo natural de la longitud extendida dividida por la longitud original, conocida como *deformación de Hencky* que sirve para valores de deformación de un 10%.

La deformación máxima es tan grande como la que se consigue al estirar el material antes de rotura. Es una característica importante ya que si un material se puede estirar de una forma grande antes de romperse, puede sobrevivir a la carga que se le aplica.

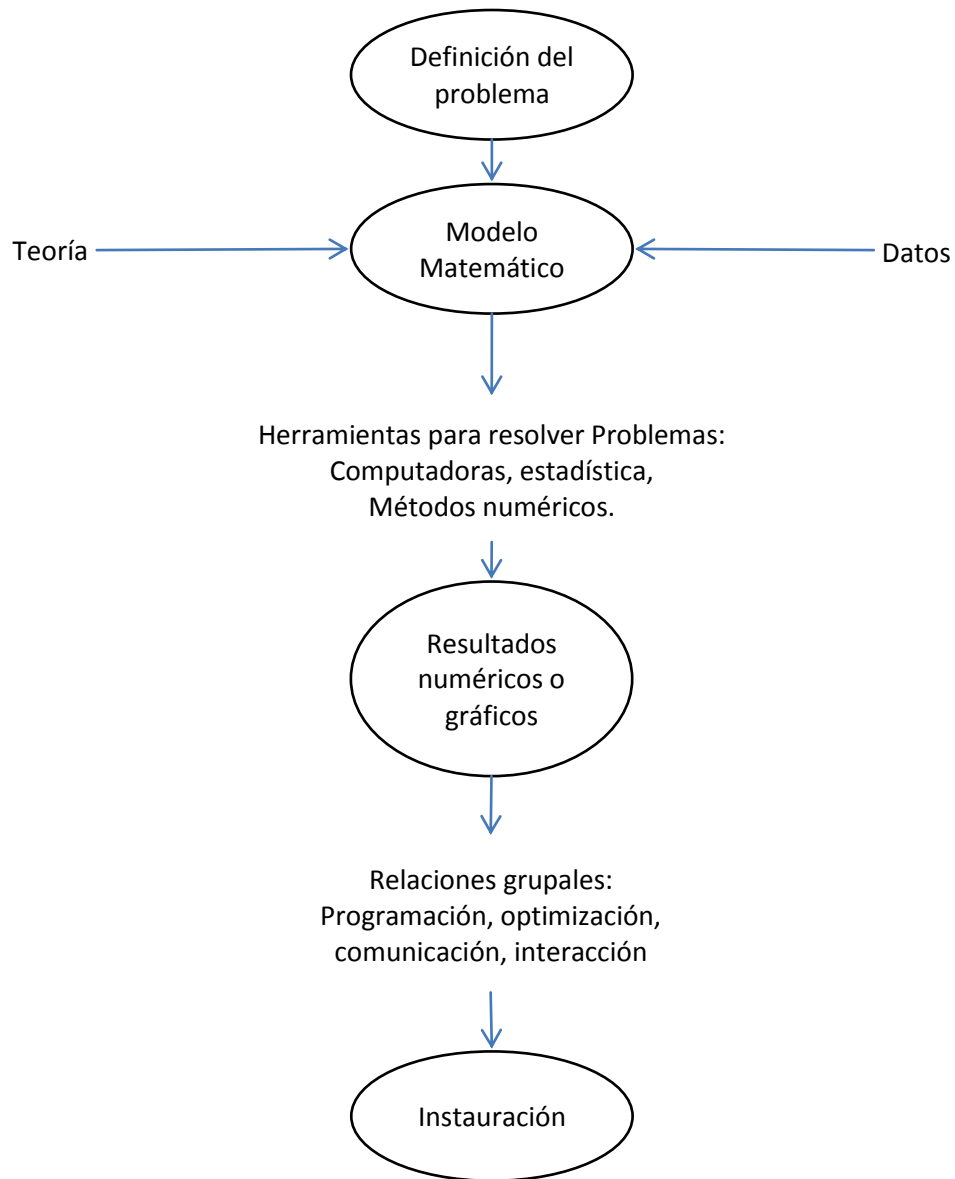
#### 1.4.6.2 Fuerza y dureza

La fuerza y la dureza a menudo se confunden, y es importante diferenciar entre ellas. La fuerza se define como el esfuerzo máximo que un objeto soportará antes de que se rompa, mientras que la dureza es la resistencia a la rotura. La dureza se define como la energía requerida para propagar una fractura para un área dada, generalmente deducida del área bajo la curva.

### 1.5 Simulación

En la actualidad es común que las computadoras se utilicen para resolver problemas de ingeniería. De ahí que se deba tener conocimiento del funcionamiento de una computadora o de alguna de sus aplicaciones. Aunque las computadoras tienen una gran utilidad, son prácticamente inútiles si no se comprende el funcionamiento de los sistemas de ingeniería. (Perros, 2009; Coss Bu, 2003)

Esta comprensión inicialmente es empírica, es decir, se adquiere por observación y experimentación. Sin embargo, aunque esta información obtenida de manera empírica resulta esencial, sólo estamos a la mitad del camino. Durante muchos años de observación y experimentación, los ingenieros y los científicos han advertido que ciertos aspectos de sus estudios empíricos ocurren una y otra vez. Este comportamiento general puede expresarse como las leyes fundamentales que engloba, en esencia, el conocimiento acumulado de la experiencia pasada. Por consiguiente muchos de los problemas de ingeniería se resuelven con el empleo de un doble enfoque: el empirismo y el análisis teórico (Figura 1.12).



**Figura 1.12 Proceso de solución de problemas en ingeniería (Coss Bu, 2003).**

Se debe de tomar en cuenta que ambos criterios no están estrechamente relacionados. Conforme se obtienen nuevas mediciones, las generalizaciones llegan a modificarse o aun a descubrirse otras nuevas. De igual manera, las generalizaciones tienen una gran influencia en la experimentación y las observaciones y la organización de lo particular. Desde la perspectiva de la solución de un problema de ingeniería, el sistema es aún más útil cuando el problema se expresa por medio de un modelo matemático (Chapra, 2007).

Un modelo matemático se define, de manera general, como una formulación o una ecuación que expresa las características esenciales de un sistema físico o de un proceso en términos matemáticos. En general el modelo se representa mediante una relación funcional de la forma:

$$\text{Variable Dependiente} = f(\text{Variables Ind} \cdot \text{Parámetros} \cdot \text{Función de fuerza}) \quad \text{Ec. 1.57}$$

Donde la variable dependiente es una característica que generalmente refleja el comportamiento o estado de un sistema; Las variables independientes son, por lo común dimensiones tales como tiempo y espacio, a través de las cuales se determina el comportamiento del sistema; los parámetros son el reflejo de las propiedades o la composición del sistema; y las funciones de fuerza son influencias externas que actúan sobre el sistema.

### 1.5.1 Definición.

Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema (Coss Bu, 2003).

Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y las estructuras de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo.

### 1.5.2 Etapas para un estudio de simulación.

Se ha descrito mucho acerca de los pasos necesarios para realizar un estudio de simulación sin embargo la mayoría de los autores de simulación opinan que los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación son:

- *Definición del sistema:* para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario realizar un análisis del sistema con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interacciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se desean obtener del estudio.
- *Formulación del modelo:* Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa al modelo.
- *Colección de datos:* Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar en el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se defina con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo se puede obtener de registros contables, de órdenes de trabajo,

de órdenes de compra, de opinión de expertos y si hay otro remedio de la experimentación.

- *Implementación del modelo en la computadora:* Con el modelo definido, el siguiente paso es decir si utiliza algún lenguaje como: fortran, basic, algol, entre otros, o se utiliza algún paquete como GPSS, simula, simscript, entre otros, para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.
- *Validación:* Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar son:
  - La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación
  - La exactitud con que se predicen datos históricos
  - La exactitud de la predicción del futuro
  - La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
  - La aceptación y confianza en el modelo de persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.
- *Experimentación:* La experimentación con el modelo se realiza después de que éste ha sido validado. La experimentación consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- *Interpretación:* En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a esto se toma una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semi-estructurado, es decir, la computadora en si no toma la decisión, sino que la información que proporciona ayuda a tomar mejores decisiones y por consiguiente a sistemáticamente obtener mejores resultados.
- *Documentación:* Dos tipos de documentación son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación de tipo técnico, es decir, a la documentación sobre que trata el modelo. La segunda se refiere al manual del usuario, con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado, a través de una terminal de computadora (Coss Bu, 2003).

Puesto que la simulación está basada fuertemente en la teoría de probabilidad y estadística en matemáticas, en ciencias computacionales entre otros, es conveniente tomar en cuenta algunos factores de desarrollo del modelo de simulación (Coss Bu, 2003).

- *Generación de variables aleatorias no uniformes:* Si el modelo de simulación es estocástico, la simulación debe ser capaz de generar variables aleatorias no-uniformes de distribuciones de probabilidad teórica o empíricas. Lo anterior puede ser obtenido si se cuenta con un generador de números uniformes y una función que transforme estos números en valores de la distribución de probabilidad deseada.
- *Lenguaje de programación:* Las primeras etapas de un estudio de simulación se refieren a la definición del sistema a ser modelado y a la descripción del sistema en términos de relaciones lógicas de sus variables y diagramas de flujo. Sin embargo, llega el momento de describir el modelo en un lenguaje que sea aceptado por la computadora que se va usar. En esta etapa se tienen dos cursos de acción a seguir si no se tiene nada de software sobre simulación: 1) Desarrollar el software requerido para el estudio de simulación, o 2) Comprar software lenguaje de programación de propósito especial. Para esta alternativa es necesario analizar evaluar varios paquetes de simulación antes de tomar la decisión.



- *Condiciones iniciales:* La mayoría de los modelos de simulación se recorren con la idea de estudiar al sistema en una situación de estado estable. Sin embargo, la mayoría de estos modelos presentan en su etapa inicial estados alternativos los cuales no son típicos del estado estable. Por consiguiente es necesario establecer claramente las alternativas o cursos de acción que existen para resolver este problema. Algunos autores piensan que la forma de atacar este problema sería a través de:
  - Usar un tiempo de corrida lo suficiente grande de modo que los periodos alternativos sean relativamente insignificantes con respecto a la condición de estado estable.
  - Excluir una parte apropiada de la parte inicial de la corrida.
  - Utilizar simulación regenerativa.

Obviamente, de las tres alternativas presentadas, la que presenta menos desventajas es el uso de simulación regenerativa. Las otras alternativas presentan desventajas en cuanto a costo.

- *Tamaño de muestra:* Uno de los factores principales a considerar en un estudio de simulación es el tamaño de la muestra. La selección de un tamaño de muestra apropiado que asegure un nivel deseado de precisión y a la vez minimice el costo de operación del modelo, es un problema algo difícil pero muy importante. Puesto que la información proporcionada por el experimento de simulación sería la base para decidir con respecto a la operación del sistema real, esta información deberá ser tan exacta y precisa como sea posible o al menos el grado de precisión presente en la información proporcionada por el modelo debe ser conocida, por consiguiente es necesario que un análisis estadístico sea realizado para determinar el tamaño de muestra requerido.

El tamaño de muestra puede ser obtenido de dos maneras:

- Previa e independientemente de la operación del modelo, o
  - Durante la operación del modelo y basado en los resultados arrojados por el modelo. Para la última alternativa se utiliza la técnica estadística de intervalos de confianza.
- *Diseño de experimentos:* Es un tópico cuya relevancia en experimentos de simulación ha sido reconocida pero raramente aplicado. El diseño de experimentos en estudios de simulación puede ser de varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que hayan planteado. Existen varios tipos de análisis que pueden ser requeridos. Entre los más comunes e importantes se pueden mencionar los siguientes:
    - Comparación de las medidas y variancias de las alternativas analizadas.
    - Determinación de la importancia y el efecto de diferentes variables en los resultados de la simulación.
    - Búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.

### 1.5.3 Programación y Software.

En la actualidad existen dos tipos de usuarios de software. Por un lado están aquellos que toman lo que se les da. Es decir, quienes se limitan a las capacidades que encuentran en el modelo estándar de operación del software existente. Como este modo de operación por lo común requiere un mínimo esfuerzo, muchos de los usuarios adoptan este modo de operación. Además, como los diseñadores de estos paquetes se anticipan a la mayoría de las necesidades típicas de los usuarios, muchos de los problemas pueden resolverse de esta manera (Coss Bu, 2003; Chapra, 2007).

Los programas computacionales son únicamente conjuntos de instrucciones que dirigen a la computadora para realizar una cierta tarea. Hay mucha gente que escribe programas para un amplio rango de aplicaciones en los lenguajes de alto nivel, porque tiene una gran variedad de capacidades.

Visto desde esta perspectiva, reducimos toda esa complejidad a unos cuantos tópicos de programación, que son:

- ✓ Representación de información sencilla (declaración de constantes, variables y tipos)
- ✓ Representación de información más compleja (estructuras de datos, arreglos y registros)
- ✓ Fórmulas matemáticas (asignación, reglas de prioridad y funciones intrínsecas)
- ✓ Entrada/Salida
- ✓ Representación lógica (secuencia, selección y repetición)
- ✓ Programación modular (funciones y subrutinas)

Las explicación de estos tópicos para personas que han tenido contacto con la programación puede suponer que los primeros cuatro puntos no son tan relevantes como los últimos dos se destaca la representación lógica porque es el área que más influye en la coherencia y la comprensión de un algoritmo y la programación modular porque contribuye de manera importante en la organización de un programa. Además, los módulos son un medio para almacenar algoritmos utilizados frecuentemente en formato adecuado para aplicaciones.

#### **1.5.4 Metodología aplicada a la simulación.**

En todo desarrollo de sistemas de software es de suma importancia el seguir alguna especificación que permita a los desarrolladores el tener una disciplina que haga que todas las etapas del desarrollo del sistema, desde la pesquisa inicial de requerimientos hasta las pruebas finales del sistema, sean no solo más coherentes sino también más formales.

El desarrollo de software que este proyecto propone, al ser una herramienta que pretende tener aplicación dentro del contexto de un problema real, tiene que seguir un proceso de análisis y diseño que proporcione los cimientos bajo los cuales se va a desarrollar la aplicación conjuntamente.

##### **1.5.4.1 Software educativo.**

Como su nombre lo dice, la Ingeniería de Software Educativo es una rama de la disciplina de la ingeniería de software encargada de apoyar el desarrollo de aplicaciones computacionales que tienen como fin implementar procesos de aprendizaje desde instituciones educativas hasta aplicaciones en el hogar. Si lo que se pretende es lograr aplicaciones de software que califiquen como educativas, es necesario que dentro de las fases de análisis y diseño de las mismas se añadan aspectos didácticos y pedagógicos con el fin de poder garantizar la satisfacción de las necesidades educativas en cuestión. Es de suma importancia involucrar efectivamente a los usuarios, para poder identificar necesidades que debe cubrirse durante la etapa de desarrollo.

Dentro del proceso de Ingeniería de Software Educativo que se utiliza dentro de este proyecto, es también necesario incorporar la distinción de los diferentes elementos que conforman un Ambiente Virtual de Aprendizaje. La identificación y aterrizaje da cada uno de estos elementos funge un papel sumamente importante en las etapas de análisis y diseño de la herramienta aplicativa que este proyecto propone. Estos elementos son los siguientes:

- **Usuarios.** Son aquellos que van a aprender a través del Ambiente Virtual de Aprendizaje. En el caso de este proyecto a personas que puedan utilizar el programa para fines educativos, y de personas a quienes se les implanta por primera vez educación acerca de las nociones básicas de los procesos térmicos.
- **Contenido.** Es lo que se va a aprender. Para este proyecto, se establece que lo que se va a aprender es un conocimiento general de las nociones básicas.
- **Especialistas.** Se refiere al cómo se va a aprender, cómo se van a materializar todos los contenidos educativos que se utilizarán en proceso de aprendizaje. Generalmente el grupo de especialistas consiste en personas con diferentes especialidades, desde los profesores de clase hasta los programadores.
- **Acceso, infraestructura y conectividad.** Este elemento se refiere a la arquitectura general de los ambientes virtuales que van a desarrollarse. Como ya se ha mencionado anteriormente, este proyecto se desarrolla principalmente en NetBeans con el fin de aprovechar todas las ventajas de la manipulación y acceso a este programa.

La metodología de software educativo establece mecanismos de análisis, diseño educativo y comunicacional de validez comprobada.

Como ya se mencionó anteriormente, la Ingeniería de Software Educativo establece actividades que tienen que ser complementadas por medio de la incorporación de los aspectos didácticos y pedagógicos. El cómo se incorporan estos aspectos al proceso de ingeniería de software que sigue este proyecto se comentará en las secciones siguientes.

#### **1.5.4.2 Análisis.**

Para que el desarrollo de un proyecto de software concluya con éxito, es de suma importancia que antes de empezar a codificar los programas que constituirán la aplicación de software completa, se tenga una completa y plena comprensión de los requisitos del software.

Fuentes (2005) establece que la tarea del análisis de requisitos es un proceso de descubrimiento, refinamiento, modelado y especificación. Se refina en detalle el ámbito del software, y se crean modelos de los requisitos de datos, flujo de información y control, y del comportamiento operativo. Se analizan soluciones alternativas y se asignan a diferentes elementos del software. El análisis de requisitos permite al desarrollador o desarrolladores especificar la función y el rendimiento del software, indica la interfaz del software con otros elementos del sistema y establece las restricciones que debe cumplir el software. El análisis de requisitos del software puede dividirse en cinco áreas de esfuerzo, que son:

- Reconocimiento del problema. Reconocer los elementos básicos del problema tal y como los perciben los usuarios finales; “Simulación del efecto del escaldado en el cambio de las propiedades mecánicas y físicas de la manzana *Granny Smith*”.
- Evaluación y síntesis. Definir todos los objetos de datos observables externamente, evaluar el flujo y contenido de la información explicado en el marco teórico, definir y elaborar todas las funciones del software como: las gráficas y operaciones a realizar, entender el comportamiento del software en el contexto de los factores que afectan al sistema como la T° y tiempo de escaldado.
- Modelado. Crear modelos del sistema con el fin de entender mejor el flujo de datos y control, el tratamiento funcional y el comportamiento operativo y el contenido de la información.
- Especificación. Realizar la especificación formal del software
- Revisión. Un último chequeo general de todo el proceso.

En el caso de este proyecto el análisis es principalmente para enriquecer la información necesaria para poder completar el programa de simulación apoyándonos en la información recabada y necesaria para obtener los mejores resultados. Se hizo la investigación y se plasmó en el marco teórico, que más bien nos introduce a los conceptos básicos de los tratamientos térmicos, la transferencia de calor, las propiedades físicas de la materia y la simulación.

Como se mencionó el software es de carácter educativo y va enfocado a estudiantes de ingeniería en alimentos y de apoyo a los profesores principalmente en las materias de transferencia de energía. La premisa esencial de este proyecto es entonces, el llevar estas actividades de los libros a entornos virtuales con comportamientos implementados de tal manera que se conserve la eficiencia de las actividades en la clase o de investigación, peor con las ventajas de la simulación computacional.

#### **1.5.4.3 Diseño.**

El diseño cuando se traduce los requerimientos funcionales y no funcionales en una representación de software. El diseño es el primer paso en el desarrollo de cualquier producto o sistema de ingeniería. De acuerdo con Fuentes, el objetivo del diseño es producir un modelo o representación de una entidad que se va a construir posteriormente (Fuentes, 2005).

Por otra parte Fuentes dice que hay tres características que sirven como parámetros generales para la evaluación de un buen diseño.

- El diseño debe implementar todos los requisitos explícitos obtenidos en la etapa de análisis: En el caso de este proyecto se desea saber las modificaciones en la manzana sometida a el proceso de escaldado por lo que los requisitos indispensables son las propiedades térmicas; Calor específico ( $C_p$ ), conductividad térmica ( $k$ ) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ). Las propiedades físicas y mecánicas; Densidad, tamaño, forma, dureza, tenacidad, etc. Así como las características del proceso como la temperatura del agua de escaldado y la  $T^\circ$  de la manzana antes de someterse al proceso. Cabe mencionar que las propiedades térmicas, físicas y mecánicas dependen directamente de la composición química de la manzana (Tabla 4).
- El diseño debe ser una guía que puedan leer y entender los que construyen el código y los que prueban y mantienen el software: el software debe ser práctico y fácil de entender, desde el diagrama de flujo hasta la finalización del programa pasando por el lenguaje, las predicciones y funciones de dicho programa.
- El diseño debe proporcionar una idea completa de lo que es el software.

El diseño es la primera de las tres actividades técnicas que implican un proceso de ingeniería de software; estas etapas son el diseño, codificación y pruebas. Generalmente la fase de diseño produce un diseño de datos, un diseño arquitectónico, un diseño de interfaz, y un diseño procedimental.

El diseño de datos esencialmente se encarga de transformar el modelo de dominio de la información creado durante el análisis. La características del programa como los cálculos y las formulas o métodos utilizados para poder darle forma a la simulación.

En el diseño arquitectónico se definen las relaciones entre los principales elementos estructurales del programa. Para una herramienta de software basada en el desarrollo de una simulación éste es un aspecto fundamental dado que en esta representación de diseño se establece la estructura modular del software que se desarrolla. Dado que este proyecto pretende ser un recurso educativo y de apoyo es esencial.

El diseño de interfaz describe como se comunica el software consigo mismo, con los sistemas que operan con él, y con los operadores que lo emplean. En caso de la herramienta del software propuesta por estudio o interfaz del software se lleva a cabo por medio de JAVA en la plataforma NetBeans. Lo cual nos da la posibilidad de generar un programa con muchas herramientas y amigable con usuario.

#### **1.5.4.4 Arquitectura del software**

El diseño de la arquitectura del software se refiere a la estructura global del software y las maneras en que esa estructura proporciona integridad conceptual a un sistema. En su forma más simple, la arquitectura es la estructura jerárquica de los módulos del programa, la manera de interactuar de estos componentes, y la estructura de los datos usados por estos módulos.

La arquitectura del software que este proyecto propone como una herramienta aplicativa dentro de un contexto de simulación, está pensada de acuerdo a las propiedades que Fuentes (Fuentes, 2005) describe como aspectos que deben especificarse como partes de un buen diseño arquitectónico. Estos aspectos son: Propiedades estructurales, propiedades extra-funcionales, y familias de sistemas relacionados.

#### **1.5.4.4.1 Propiedades estructurales.**

Este aspecto de la representación de software que define los componentes de un sistema, y la manera en que se empaquetan estos componentes e interactúan unos con los otros. Este proyecto propone representación gráfica de la simulación para formar una aplicación conjunta que puede presentarse apropiadamente a los usuarios.

#### **1.5.4.4.2 Propiedades Extra-funcionales.**

Esta especificación se refiere al cómo consigue la arquitectura del diseño los requisitos de rendimiento, capacidad, fiabilidad, seguridad, adaptabilidad, y otras características de la herramienta de software. Este proyecto relaciona los procesos de transferencia de calor en el proceso de escaldado y el cambio en sus propiedades mecánicas teniendo como fiabilidad y seguridad la validación de los resultados con una prueba de campo.

#### **1.5.4.4.3 Familias de sistemas relacionados**

Este aspecto se refiere a que el diseño debería tener la capacidad de utilizar bloques de construcción arquitectónica reutilizados. La herramienta de software que este estudio pretende implementar son pequeños programas utilizados dentro del mismo para el cálculo de las propiedades físicas, térmicas y mecánicas de la materia utilizada en el escaldado en este caso la manzana Granny Smith

#### **1.5.4.5 Diseño de interfaz**

Diseñar la interfaz de usuario es un proceso que empieza con la creación de diferentes modelos de función del sistema. De acuerdo con Fuentes, durante este proceso se crean los siguientes modelos:

- Un modelo del diseño del sistema, que incorpora representaciones de datos, arquitectónicos, de interfaces y procedimentales del software. Anteriormente se habló acerca de la estructura arquitectónica que el software de este proyecto implementa.
- Un modelo de usuario que muestra el perfil de los usuarios finales del sistema. En la etapa de análisis de este proyecto se ubica a la población objetivo que en su totalidad está constituida por estudiantes de Universidad. Es por esto que el programa debe ser entendible y de fácil uso para los estudiantes y académicos.

Normalmente el proceso del diseño de la interfaz del software es un proceso que se lleva a cabo en colaboración con los usuarios finales del mismo. En este caso el software es revisado y aprobado por expertos en la materia que tienen una visión real de las necesidades del usuario final ya que principalmente son profesores de materias relacionadas a este proyecto.

#### 1.5.4.6 Documentación

La documentación de este proyecto de software se llevara a cabo a través de las experiencias de los usuarios en la utilización del proyecto, su funcionalidad, la certeza y veracidad de los resultados obtenidos. Permitiendo en un futuro aplicarlo en otros materiales con la fiabilidad y certeza de sus resultados en este proyecto.

#### 1.5.4.7 Desarrollo

Siguiendo la metodología se desarrollara el software con la ayuda de las ecuaciones de transferencia de energía en estado no estacionario y se tomaron las siguientes consideraciones para la elaboración del software.

### 1.5.5 Diferencias Finitas.

Los métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales se basan en el remplazo de las ecuaciones deferenciales por ecuaciones algebraicas. En el caso del popular método de las diferencias finitas, esto se realiza al remplazar las derivadas por diferencias.

El método de diferencias finitas es una clásica aproximación para encontrar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el modelo matemático de un sistema continuo. Es valioso familiarizarse con ésta aproximación porque tal conocimiento reforzará la comprensión de los procedimientos de elementos finitos. (Chapra, 2007; Hernandez & Dominguez, 1984)

#### 1.5.5.1 Clasificación de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Las ecuaciones obtenidas al desarrollar trabajos de simulación de algún trabajo de ingeniería por lo regular son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales por lo que se clasifican de manera general.

Se dice que toda igualdad que relaciona a una función desconocida con sus variables independientes y con sus derivadas parciales, es una ecuación deferencial en derivadas parciales. Asimismo, una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden es una ecuación que contiene derivadas hasta de segundo orden y más de una variable independiente. Así entonces, la forma más general de una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden con dos variables independientes es:

$$A(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f \left( x, y, u, \frac{du}{dx}, \frac{du}{dy} \right) \quad \text{Ec. 1.58}$$

En donde “x” y “y” son las variables independientes y “u” es la variable dependiente. Si los coeficientes A, B y C son función únicamente de las variables independientes, son constantes o son cero, la ecuación es lineal. En consecuencia lógica, la ecuación es no lineal si cualquiera A, B o C, es función de la variable dependiente. (Hernandez & Dominguez, 1984)

Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales pueden clasificarse como elípticas, parabólicas o hiperbólicas, dependiendo del valor del discriminante  $B^2-4AC$ , para un punto dado  $(x, y)$  así entonces:

Si  $B^2-4AC < 0$  La ecuación es elíptica.

Si  $B^2-4AC = 0$  La ecuación es parabólica.

Si  $B^2-4AC > 0$  La ecuación es hiperbólica.

Como ejemplos de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de tipo elíptico se puede citar a la ecuación de Laplace (1.59) y la ecuación de Poisson (1.60).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x, y) = 0 \quad \text{Ec. 1.59}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x, y) = f(x, y) \quad \text{Ec. 1.60}$$

Un ejemplo de ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo parabólico es la ecuación de transmisión de calor en una dirección.

$$\frac{\partial u}{\partial t}(t, x) = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, x) \quad \text{Ec. 1.61}$$

Donde el flujo de calor es en la dirección X, siendo t el tiempo y  $\alpha$  una constante que depende de la conductividad térmica densidad y calor específico del material.

Por último, la ecuación que representa el movimiento de una cuerda vibrando es el ejemplo clásico de una ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo hiperbólico.

$$K^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, x) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(t, x) \quad \text{Ec. 1.62}$$

En donde la función  $y(t, x)$  proporciona la distancia perpendicular a la cuerda en el instante "t" en la posición X.

### 1.5.5.2 Polinomio de Taylor generado por una función.

Si una función  $f(x)$  posee derivadas continuas de orden "n" en el punto  $x=A$  y siendo  $n \geq 1$ , se trata de obtener un polinomio  $P(x)$  que coincida con  $f(x)$  y con sus "n" derivadas en  $x=A$

$$P(x) = f(A) + f'(A)(x - A) + \frac{f''(A)}{2!}(x - A)^2 + \frac{f'''(A)}{3!}(x - A)^3 + \dots + \frac{f^n(A)}{n!}(x - A)^n \quad \text{Ec. 1.63}$$



La ecuación 1.63 se le conoce con el nombre de polinomio de Taylor de grado n generado por f (x) en el punto A, el cual como ya se comentó, es el principio básico utilizado en la derivación de las fórmulas de aproximación en diferencias finitas.

Considere el intervalo 0, 1 dividido en R subintervalos de longitud  $\Delta x$ .

$$\Delta x = \frac{1}{R} \quad \text{Ec. 1.64}$$

En un punto cualquiera del intervalo  $x_i$  se tiene:

$$x_i = i\Delta x$$

por lo tanto:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x$$

$$x_{i-1} = x_i - \Delta x$$

La distancia entre los 2 puntos consecutivos es la “diferencia finita x”.

En el método de diferencias finitas la evaluación de las funciones y sus derivadas se efectúa solamente en los puntos  $x_i$ .

Donde:  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, R$

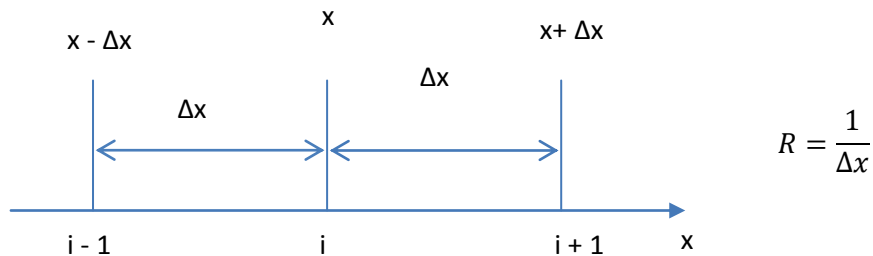


Figura 1.13 Esquema de diferencias finitas en un dirección (Hernandez & Dominguez, 1984).

En la figura anterior puede verse claramente que:

$$x - \Delta x = i - 1$$

$$x + \Delta x = i + 1$$

### 1.5.5.3 Polinomio de Taylor en una dimensión.

El polinomio de Taylor desarrollando una función  $f(x)$  en los puntos  $x_{i+1}$  y  $x_{i-1}$  se obtienen las Ecuaciones 1.65 y 1.66 esto es:

$$f_{i+1} = f_i + \Delta x \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_i + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \left. \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right|_i \quad \text{Ec. 1.65}$$

$$f_{i-1} = f_i - \Delta x \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_i + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \left. \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right|_i \quad \text{Ec. 1.66}$$

#### 1.5.5.3.1 Primera derivada.

La expresión para la primera derivada se puede obtener al despejar ésta de la Ecuación 1.65, quedando de la manera siguiente:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{3!} \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_i - \dots + \frac{(\Delta x)^{n-1}}{n!} \left. \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right|_i \quad \text{Ec. 1.67}$$

En donde el término del lado derecho de esta ecuación es una aproximación en diferencias finitas a la primera derivada de la función. La precisión de dicha aproximación depende, como podrá suponerse fácilmente, del número de términos que se tomen para obtener su valor. Así pues, el utilizar una mayor cantidad de términos, proporciona una mejor aproximación al valor real de la primera derivada. Los términos no utilizados (truncados) constituyen el error de truncamiento. En general como cada término sucesivo es menor al anterior, el error de truncamiento se determina por el orden o exponente de la diferencia finita  $\Delta x$  del primer término truncado.

La ecuación 1.74, considerando un error de truncamiento de primer orden ( $\theta(\Delta x)$ ) se escribe como sigue:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + \theta(\Delta x) \quad \text{Ec. 1.68}$$

De igual manera puede obtenerse otra expresión para la primera derivada a partir de la ecuación 1.73. Despejando de dicha ecuación la primera derivada y considerando el error de truncamiento de primer orden, resulta:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + \theta(\Delta x) \quad \text{Ec. 1.69}$$

Es posible obtener una fórmula más precisa o de mayor orden para la primera derivada al restar la ecuación 1.72 de la ecuación 1.73 así pues:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{(\Delta x)^2}{3!} \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_i + \dots \quad \text{Ec. 1.70}$$

La ecuación 1.77, considerando un error de truncamiento de segundo orden se puede escribir como sigue:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + \theta(\Delta x)^2 \quad \text{Ec. 1.71}$$

### 1.5.5.3.2 Segunda Derivada.

Una expresión para la segunda derivada se obtiene sumando las ecuaciones 1.72 y 1.73 por tanto:

$$f_{i+1} + f_{i-1} = 2f_i + (\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i + (\Delta x)^4 \left. \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} \right|_i + \dots \quad \text{Ec. 1.72}$$

Despejando de la expresión anterior la segunda derivada:

$$\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{(\Delta x)^2} - \frac{(\Delta x)^2}{12} \left. \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} \right|_i + \dots \quad \text{Ec. 1.73}$$

Considerando para la ecuación 1.80 un error de truncamiento de segundo orden, la ecuación para la segunda derivada queda como sigue:

$$\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{(\Delta x)^2} + \theta(\Delta x)^2 \quad \text{Ec. 1.74}$$

Que es la expresión utilizada para obtener la segunda derivada de una función.

Se ha resumido los dos tipos de ecuaciones que se utilizan en este trabajo de investigación para la solución de un problema de ecuaciones diferenciales y más específicamente de la transferencia de calor de en estado transitorio, que comprende una parte fundamental de la simulación pretendida. También se intentó mostrar un panorama de todas características mecánicas de un alimento y las generalidades de los procesos térmicos haciendo énfasis en el escaldado que también forma parte fundamental de la investigación. (Hernandez & Dominguez, 1984)

## **2 Capítulo II. Metodología.**

### **2.1 Problema.**

Simulación matemática del efecto del escaldado en el cambio de las propiedades mecánicas y físicas de la manzana *Granny Smith*.

### **2.2 Objetivo General:**

Predecir los cambios en las propiedades físicas y mecánicas en manzanas *Granny Smith* sometidas a un proceso de escaldado mediante aplicación del método diferencias finitas.

#### **2.2.1 Objetivo Particular 1.**

Determinar teóricamente el efecto de las condiciones de operación del escaldado sobre las propiedades físicas y mecánicas de manzana *Granny Smith*.

#### **2.2.2 Objetivo Particular 2.**

Diseñar un programa de simulación numérica de elementos finitos que permita la predicción de la variación de las propiedades físicas y mecánicas de la manzana *Granny Smith* sometida a un proceso de escaldado.

#### **2.2.3 Objetivo Particular 3.**

Validación concurrente del programa de simulación de escaldado contrastando la evidencia de la simulación teórica con un estudio de caso experimental.

### **2.3 Selección de variables y modelo matemático.**

En la conservación de alimentos hay factores que definen los procesos térmicos con los que serán tratados los alimentos para lograr el objetivo de cada tratamiento, como: el tamaño, la forma, la composición química de los alimentos, su estado de la materia (Sólido o Líquido). Pero existen dos variables que son esenciales y que siempre están involucradas en el proceso, estas variables son: tiempo de escaldado y temperatura de escaldado. Estas dos variables son esenciales y depende una de la otra para lograr un tratamiento térmico adecuado.

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior el escaldado es un tratamiento térmico 70 a 100 °C de tiempo corto, generalmente en agua aplicado principalmente a frutas y vegetales, con distintas finalidades como la eliminación de la actividad enzimática, el aire ocluido, entre otros.

El tiempo y la temperatura tienen una estrecha relación y depende uno de otro, es decir si la temperatura aumenta el tiempo de escaldado se reduce y viceversa si el tiempo aumenta la temperatura se reduce.

### **2.4 Actividades Preliminares.**

Dentro de este trabajo se llevaron a cabo actividades preliminares necesarias para realizar la experimentación como la validación de termopares, la determinación de la densidad y la ubicación del centro térmico.

### i. Validación de termopares.

La validación se describe como el estudio sistemático basado en evidencias documentadas con alta aceptación, la cual ayuda a probar que los sistemas y/o procesos sean efectuados adecuadamente y constantemente trabajen según las especificaciones o condiciones especificadas, el concepto de validación se aplica al desarrollo de cierta metodología que se emplea como guía en la comparación y/o evaluación referente a implementar, adaptar, modificar o crear la parte de proceso, Instrumentos y sistemas (Espinoza, 1994).

Para la validación de termopares se utilizó los métodos siguientes.

- a. **Exactitud y precisión en sistema isotérmico:** en la experimentación nos interesa conocer cuál es el grado de exactitud que se tiene en los instrumentos a utilizar. La exactitud de un instrumento indica la desviación que se obtiene con la lectura de un parámetro respecto a un valor establecido.  
El desarrollo experimental de las pruebas consiste en introducir los termopares empleados en la experimentación en un sistema isotérmico de temperatura conocida (agua en ebullición), donde se registran las temperaturas a intervalos iguales de tiempo hasta completar un mínimo de diez lecturas posteriormente se llevan a cabo los análisis estadísticos; prueba de hipótesis para la exactitud y coeficiente de variación para la precisión. Para seleccionar el termopar más exacto con el resultado de la prueba de hipótesis, se debe considerar que los resultados estén en la zona de aceptación según las distribución "T" y el termopar más exacto es el termopar que más se acerque su valor "T" a cero. De forma similar se selecciona al termopar de mayor precisión que tenga el menor porcentaje en el coeficiente de variación (Espinoza, 1994).
- b. **Linealidad:** T° inicial conocida con variaciones. Cuando se trata de comprender un fenómeno de interés se desea conocer la relación que existe entre las variables que intervienen en dicho fenómeno y los cambios que producen para tener cuantificado las desviaciones. Aplicado a un termopar se desea saber cuál es la correlación que presenta en las variaciones de temperatura con otro instrumento de variación. La prueba de linealidad se realiza en termopares para verificar que el tipo de termopar e instrumento a emplear guarde una correlación lineal, sobre el intervalo de temperaturas del sistema de experimentación. Para desarrollar la prueba y seleccionar al termopar que mejor ajuste tenga se llevan a cabo los siguientes pasos:
  - i. Se introducen los termopares en sistema de temperatura inicial conocida, se eleva la temperatura y se registran los datos obtenidos en intervalos de tiempo iguales.
  - ii. La prueba termina hasta llegar a una temperatura final determinada, y debe cubrir con los intervalos de temperaturas que se requieren en la experimentación.
  - iii. Con las lecturas obtenidas en la prueba, se verifica la correlación que existe entre el tiempo y la temperatura.
  - iv. El termopar que presente mayor linealidad, será aquel que cumpla con la menor dispersión de datos, es decir deberá cumplir con un coeficiente de correlación lo más cercana al valor uno.

## ii. Centro térmico:

La determinación del centro térmico se realizó de manera experimental; se colocaron termopares en distintas zonas de la manzana en las que se esperaba estuviera el centro térmico y posteriormente se sometieron las manzanas a el proceso de escaldado durante 10 minutos tomando las mediciones de temperatura de los termopares. Posteriormente mediante una gráfica se contrastaron los datos obtenidos y la zona que tuvo los menores valores en la temperatura se determinó como el centro térmico de la manzana.

## iii. Variación de densidad:

Como ya se mencionó antes La densidad es una propiedad general de todas las sustancias y sólidos. No obstante su valor es específico para cada sustancia, lo cual permite identificarla o diferenciarla de otras. En este proyecto la densidad de las manzanas es modificada de acuerdo a la cantidad de calor suministrado. Ya que durante el proceso térmico las propiedades físicas y mecánicas de la manzana se van modificando, por lo que se consideró el cálculo de la de la densidad de la manzana en las distintas etapas del tratamiento térmico; el método fue utilizar la diferencia de volúmenes este método consiste en la diferencia de volumen ocupado por una material en una sustancia de densidad conocida. Se eligió realizar la experimentación con aceite debido a que su tensión superficial evita la absorción en los poros de las manzanas evaluadas.

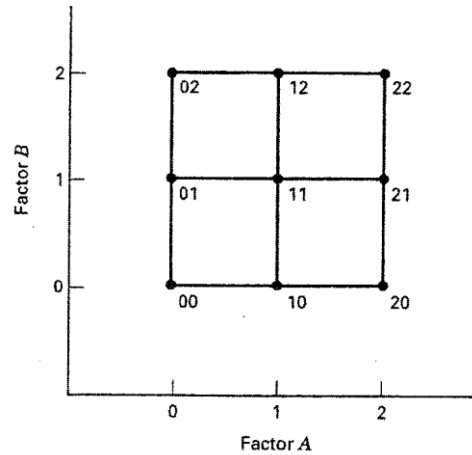
Materiales utilizados:

- Probeta graduada de 250ml
- Balanza analítica
- Vidrio de reloj
- Aceite de oliva extra virgen(por su tensión de capilaridad).
- Una muestra de manzanas
- Densímetro de bulbo
- Marmita.

## 2.5 Diseño experimental.

El diseño experimental utilizado fue un arreglo estadístico  $3^2$ , dos factores con tres niveles de variación. La notación de este arreglo es 0, 1, 2.

En un diseño  $3^2$ , 00 denota la combinación de tratamientos correspondiente a A y B ambos en el nivel bajo, y 01 denota la combinación de tratamientos correspondiente a A en el nivel bajo y B en el nivel intermedio., etc. En la siguiente Figura 2.1 se muestra la representación geométrica de un diseño  $3^2$ .



**Figura 2.1 Representación en el plano del diseño factorial  $2^3$ .**

Y en la representación tabular, para una réplica la representación es la siguiente.

**Tabla 2.1 Combinaciones del diseño factorial  $2^3$ .**

		Factor A		
		0	1	2
Factor B	0	00	01	02
	1	10	11	12
	2	20	21	22

Puesto que están presentes  $3^2=9$  combinaciones de tratamientos, los grados de libertad se distribuyen de la siguiente manera:

- 8 Grados de libertad entre estas combinaciones de tratamientos
  - 2 grados de libertad para cada uno de los efectos principales (de A y de B).
  - 4 grados de libertad para la combinación de A y B
- $3^2(n-1)$  grados de libertad del error.
- $3^2n-1$  grados de libertad totales.

Donde n=número de réplicas

En este trabajo se utilizaran los factores Temperatura y Tiempo con los siguientes niveles de variación mostrados a continuación en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Combinaciones de experimentación

Factores		Temperatura (°C)		
		85	89	93
Tiempo (min)	4	00	01	02
	7	10	11	12
	10	20	21	22

Cada combinación se realizó por triplicado para validar el proceso y los resultados

## 2.6 Metodología de software educativo

Para este proyecto se utilizó la metodología de software educativo. Como ya se menciona tiene como objetivo ser una herramienta en el aprendizaje y estudios relacionados.

La interacción entre el usuario y el software debe ser sencilla y de gran utilidad como fuente de referencia y comparación para estudios, con un margen de error mínimo en los resultados y con versatilidad en su instalación y funcionamiento.

La metodología esta descrita en la sección 1.5.4 del Capítulo 1 y se representa con la Figura 2.2

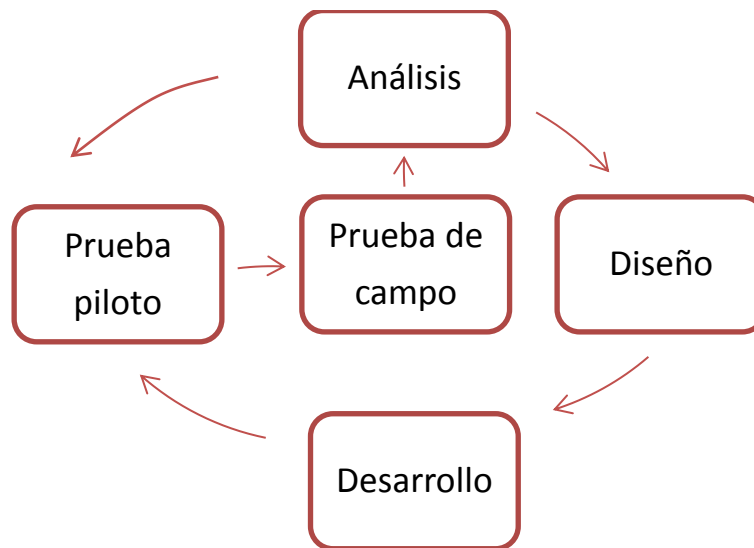


Figura 2.2 Metodología aplicada a la simulación educativa (Fuentes, 2005).

Dentro de la metodología también se encuentra el diseño del software que debe ser sencillo y debe de seguir una lógica. Para este proyecto se planteó un diagrama de flujo para la elaboración del programa como se muestra en la Figura 2.3.



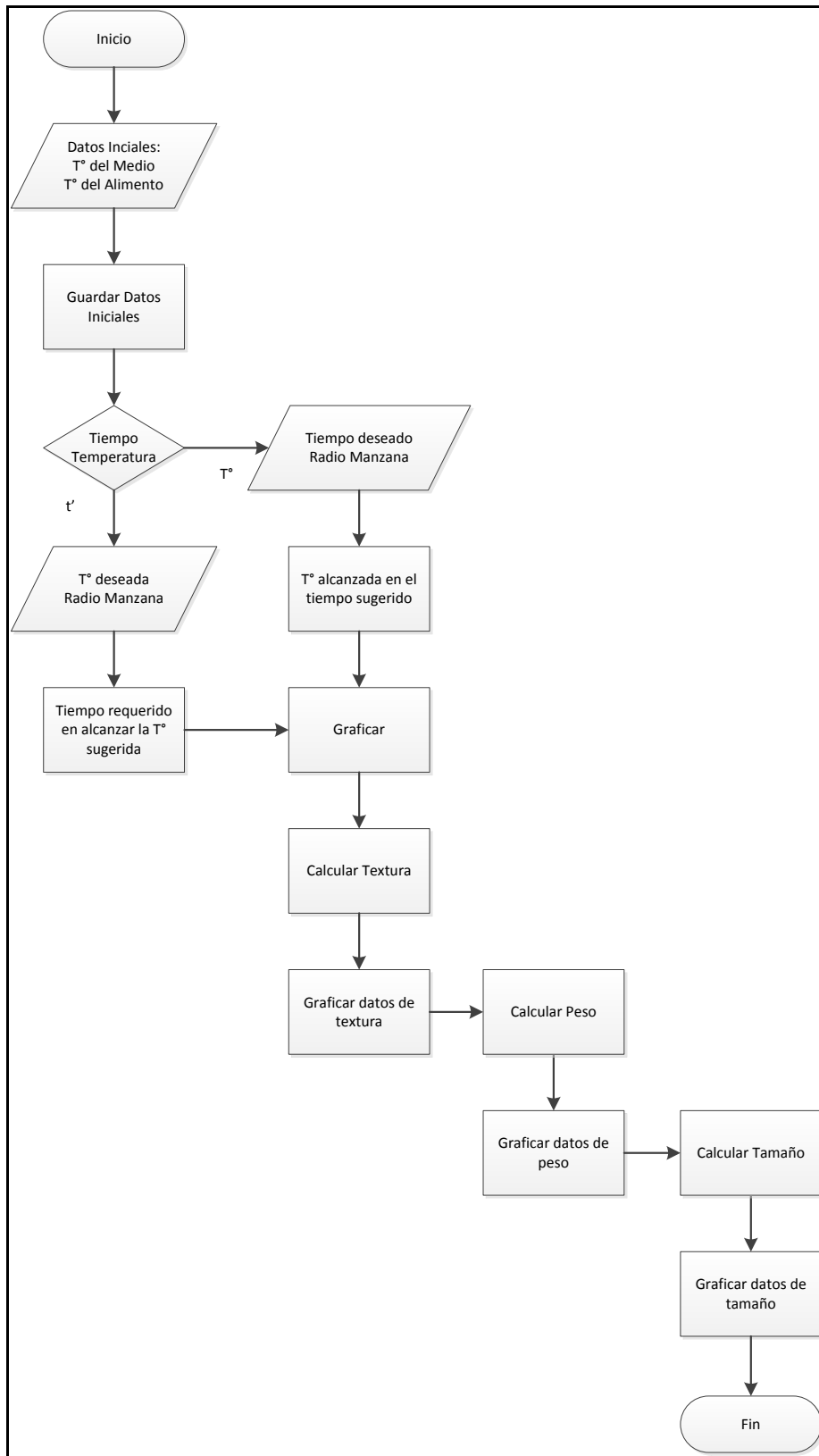


Figura 2.3 Diagrama de flujo planteado.

### 2.6.1 Selección y control de la materia prima

La materia prima utilizada fue la manzana Granny Smith esta manzana es una hibridación que tiene su origen en los años 30's en Australia. Esta variedad de manzana tiene una piel de color verde intenso, con algunos puntos blanquecinos, también llamados lenticelas, y a veces con un rubor rosado. Tiene una forma redondeada, algo cónica, y su carne es blanca, muy crujiente y jugosa, de sabor ácido y delicado aroma. Es una manzana muy versátil, apta para comer en crudo e ideal también para cocinar con ella la manzana en la industria se usa en pulpa para usarse como materia prima y en la elaboración de jugos, jaleas, mermeladas, también tiene una gran aplicación en la elaboración de manzanas deshidratadas por su sabor ácido y su gran resistencia a oxidarse. Algunas de sus propiedades utilizadas en este proyecto se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Propiedades de la manzana *Granny Smith*.

Propiedad	Valor
Forma geométrica aprox.	○ Esférica
% H <sub>2</sub> O	85.56
%Proteína	0.26
%Grasas	0.17
%CHOS	13.81
%Fibra	2.4
%Cenizas	0.2
Densidad; $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1031.1
Porosidad	0.25
Capacidad Calorífica; $c_p$ (kJ/kg°C)	3.851
Conductividad térmica; $k_t$ (W/m°C)	0.5676
Difusividad térmica; $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	1.402258E-7

El criterio para elegir las manzanas fue el tamaño. Este criterio se determinó porque en general la composición de las manzanas no varía mucho en cuanto a su madurez y sus propiedades físicas. Lo que se busca es obtener una proporción de la variación de las propiedades físicas y mecánicas aplicables a la manzana sin importar tanto su madurez.

### 2.6.2 Equipo Utilizado.

Para la realización de la experimentación se utilizó agua como medio de retorta en una marmita basculante alimentada con vapor como se muestra en la Figura 2.4, controlando la temperatura.

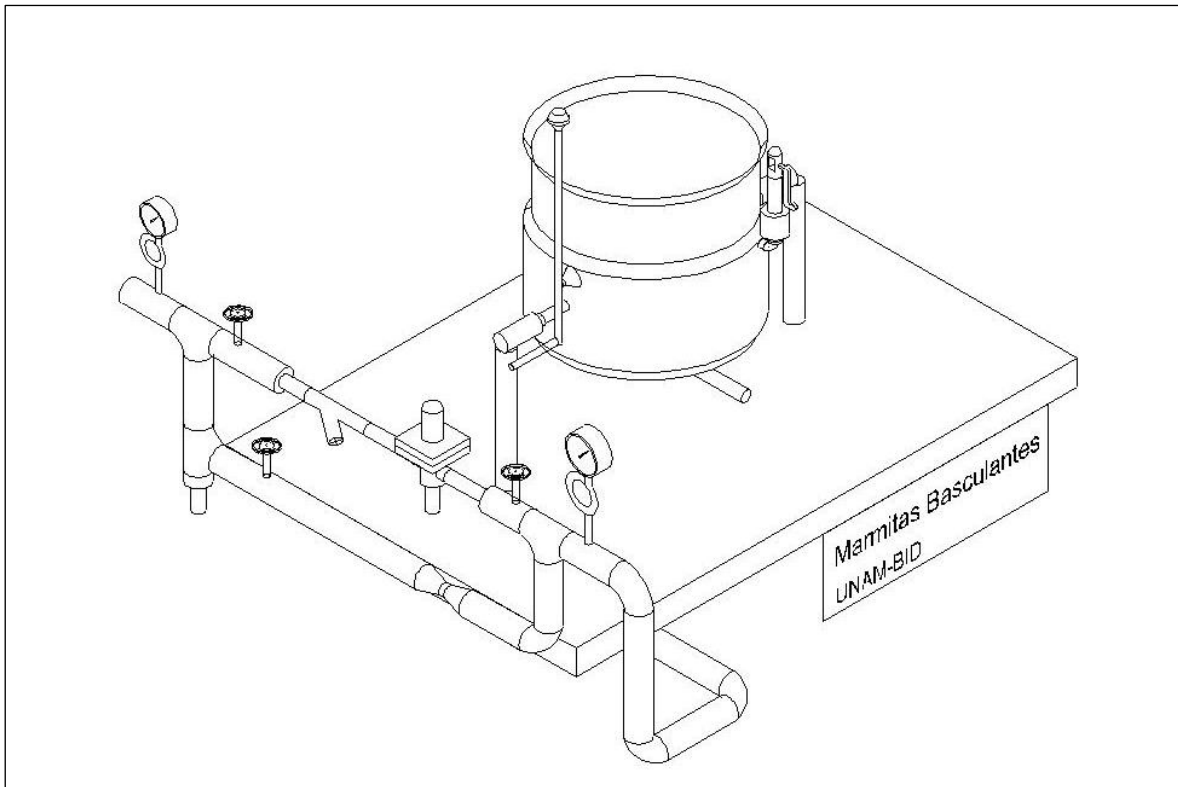


Figura 2.4 Marmita basculante.

La temperatura fue medida por termopares de aguja de acero inoxidable Figura 2.5.

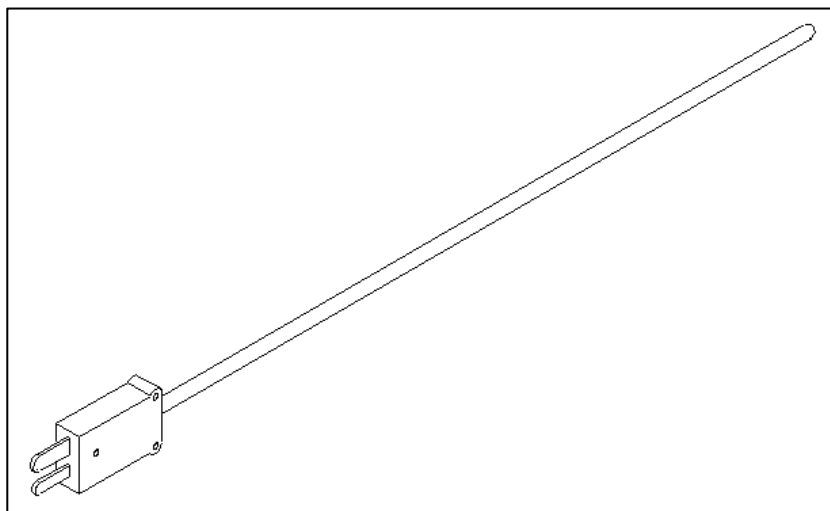
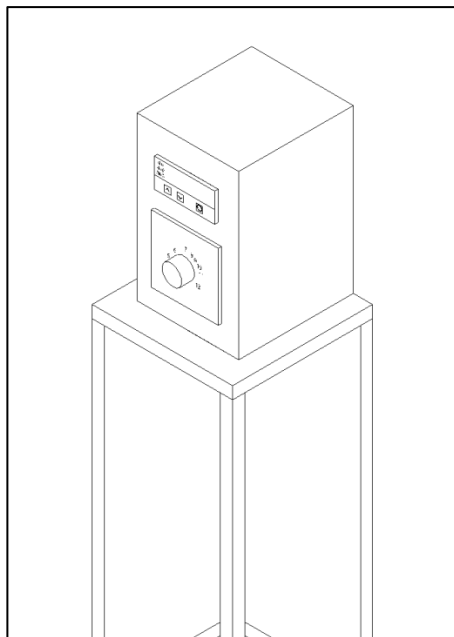


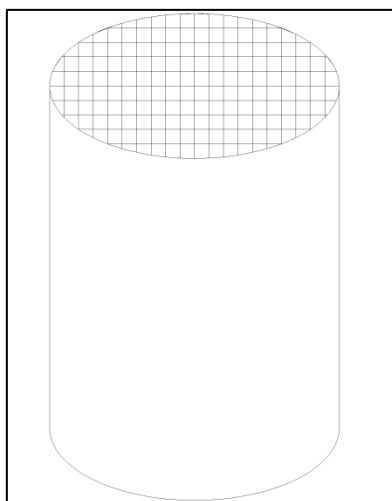
Figura 2.5 Termopar de aguja de acero inoxidable.

Los termopares estaban conectados a una central electrónica la cual registraba las temperaturas de manera continua, sin almacenarlos Figura 2.6.



**Figura 2.6** Central para registro de temperaturas.

En las corridas experimentales se utilizó cilindro metálico con una malla en los extremos, que permitiera el libre paso del medio de calentamiento, en este cilindro se introducía la manzana y se le colocaba el termopar para evitar movimientos que pudieran desprender el termopar Figura 2.7.



**Figura 2.7** Cilindro metálico de pruebas.

### 3 Capítulo III. Resultados.

#### 3.1 Actividades Preliminares.

##### Validación de Termopares.

Para la exactitud se sumergieron los termopares en agua en ebullición y los resultados fueron los siguientes; el análisis estadístico fue por “t” de student

Tabla 3.1 Resultados de la validación de termopares (exactitud).

Tiempo(s)	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4
Promedio	97	96.917	97	97.167
S	0	0.276	0.408	0.373
CV	0	0.285	0.421	0.383
t Obtenido	0	4.710	3.253	3.705
	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
		t tablas:	4.781	

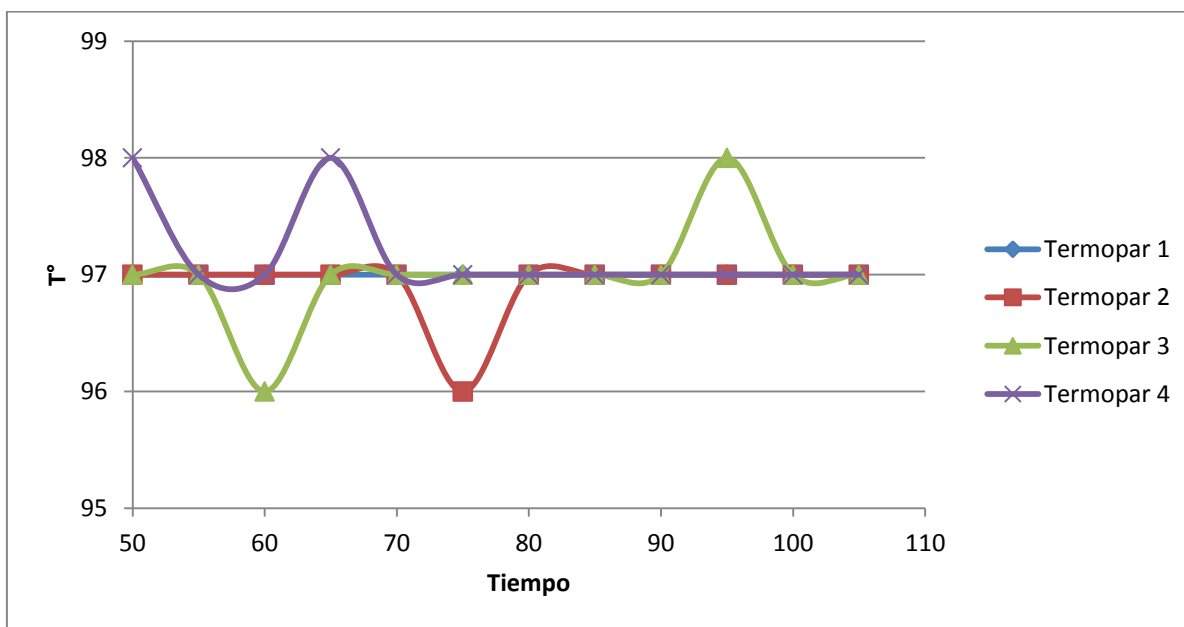


Figura 3.1 Gráfico de resultados de la validación de termopares (exactitud).

Siendo el termopar 1 el que tenía la mayor precisión y los demás están dentro del rango de aceptación de “t” de tabas de Student.

En el análisis de linealidad se sumergieron los termopares en agua a temperatura ambiente y se calentó hasta la temperatura de ebullición. La prueba se hizo tres veces en tres días diferentes (una por día) y el análisis estadístico se aplicó de la siguiente manera; una prueba de Tukey para ver si hay diferencia significativa entre las repeticiones como se muestra la comparación en las Tablas 3.2 y 3.3. Y después se utilizó la mejor prueba (2do día) para obtener las ecuaciones de corrección en función de una temperatura de referencia (termómetro).

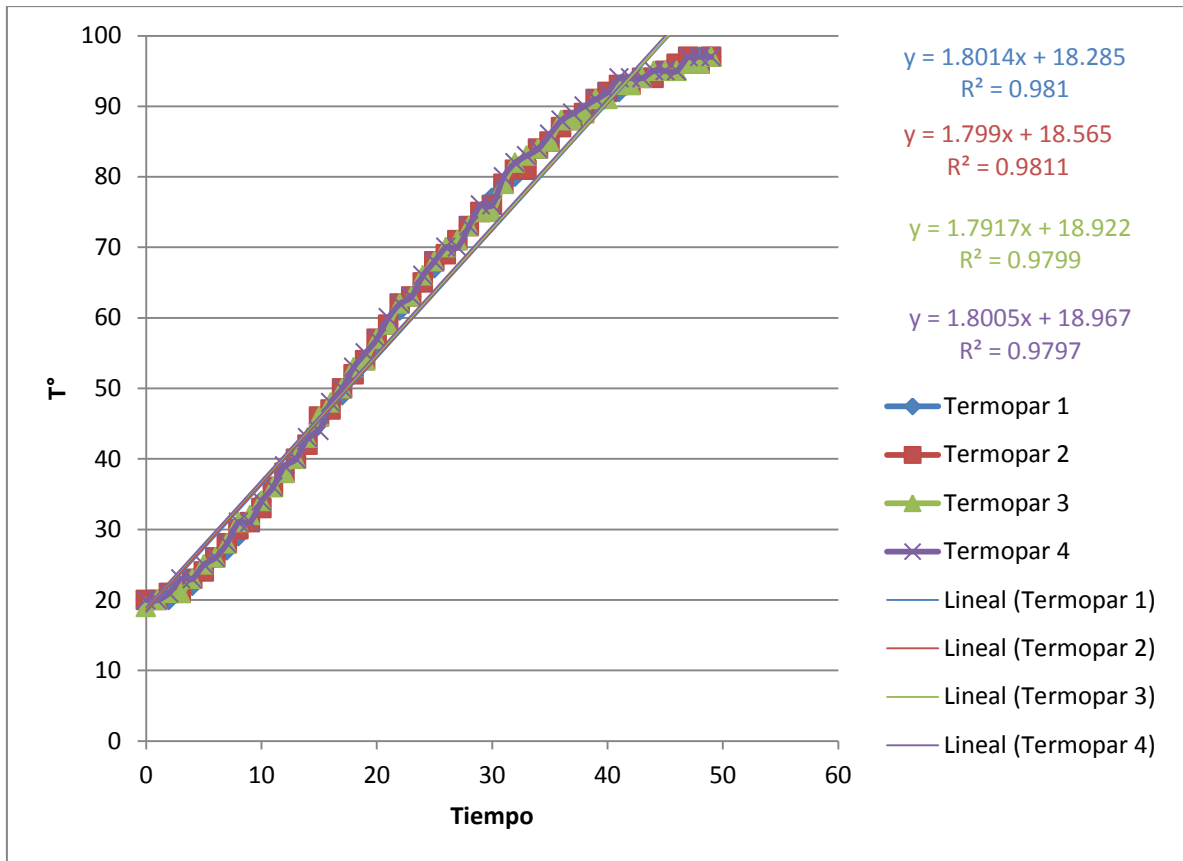


Figura 3.2 Gráfico de resultados de validación de termopares (linealidad).

Prueba de Tukey

Tabla 3.2 Prueba de Tukey para día 2 y día 3

Tukey para repetición 2 > repetición 3			
Termopar1	Termopar2	Termopar3	Termopar4
0.0350	0.0358	0.0367	0.0388

$$q = \frac{x_1 - x_2}{S_1} \quad q_{tablas} = 3.420$$

Tabla 3.3 Prueba de Tukey para día 2 y día 1

Tukey para Repetición 2 > Repetición 1			
Termopar1	Termopar2	Termopar3	Termopar4
0.0213	0.0160	0.0176	0.0198

Como se mencionó antes se utilizó el segundo día como punto de comparación ya que fue el que presento mayor uniformidad en los resultados.

### Centro térmico.

Se localizó el centro térmico colocando termopares sobre el eje axial de la manzana y se concluyó que el centro térmico esta entre el 50 y 55% del eje axial de la parte superior de la manzana hacia la parte inferior

Tabla 3.4 Resultados y condiciones de la ubicación de centro térmico.

Centro térmico			Penetración y ubicación de Termopar		
Manzana 2		Parámetros	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
Peso g	201.9	Axial (cm)	2.52	3.52	4.52
Alto (cm)	7.04	Profundidad (cm)	4.02	4.02	3.94
Ancho 1 (cm)	8.04	3.52			
Ancho 2 (cm)	8.04				
Ancho 3 (cm)	7.88				

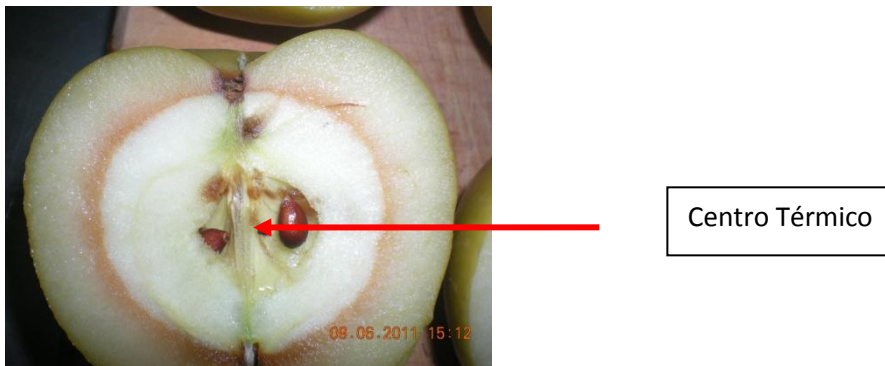


Figura 3.3 Centro térmico en manzana.

En este proyecto de tesis es de suma importancia tener definida las características de la penetración de calor en superficie y al interior de la manzana ya que como es sabido todas las características varían conforme el calor penetra y tiene contacto con las diferentes secciones de la manzana aunado a esto se tiene que la penetración de calor varia por las características propias de la manzana constituida por su componentes ya mencionados y la porosidad que afecta de manera considerable en la transferencia.

### Determinación de la densidad.

Primero se determinó la densidad del aceite por medio de una medición directa con el densímetro de bulbo (se utilizó aceite debido a su tensión de capilaridad lo que evita una rápida absorción en la manzana), posteriormente se contrasto con la otra medición de densidad del mismo aceite la cual se realizó en una probeta graduada de 250ml se llenó la probeta exactamente a los 250ml y se pesó en la balanza analítica los resultados se muestran en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Densidad de aceite.**

Densidad del aceite por cantidad de volumen(g/ml)	0.904	0.905
Densidad del aceite por densímetro de bulbo Bulbo(g/ml)	0.907	

La diferencia de ambas mediciones es estadísticamente despreciable por lo que se consideró la media de las mediciones para el cálculo de los datos.

Para determinar la densidad de la manzana se realizó por medio del volumen ocupado por una porción de manzana, se determinó la densidad de la manzana en las distintas etapas del tratamiento térmico de la siguiente manera:

- Se pesó la probeta vacía y completamente seca.
- Se cortaron y pesaron trozos uniformes de una muestra de manzanas
- Se colocaron los trozos pesados de la manzana dentro de la probeta y se llenó con el aceite hasta el nivel máximo graduado
- Se pesa la probeta con la manzana y el aceite.
- se realiza el cálculo para obtener la densidad.

Los resultados se presentan la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Calculo de densidad en manzana.**

Probeta(g)	240.6	
Probeta con aceite(g)	466.72	
Diferencia(g)	226.12	Densidad A.
Dens A.(g/ml)	0.90448	0.90574
Dens A. Bulbo	0.907	

La experimentación se realizó por triplicado y se obtuvo una curva patrón para observar la relación de los factores (densidad y tiempo)



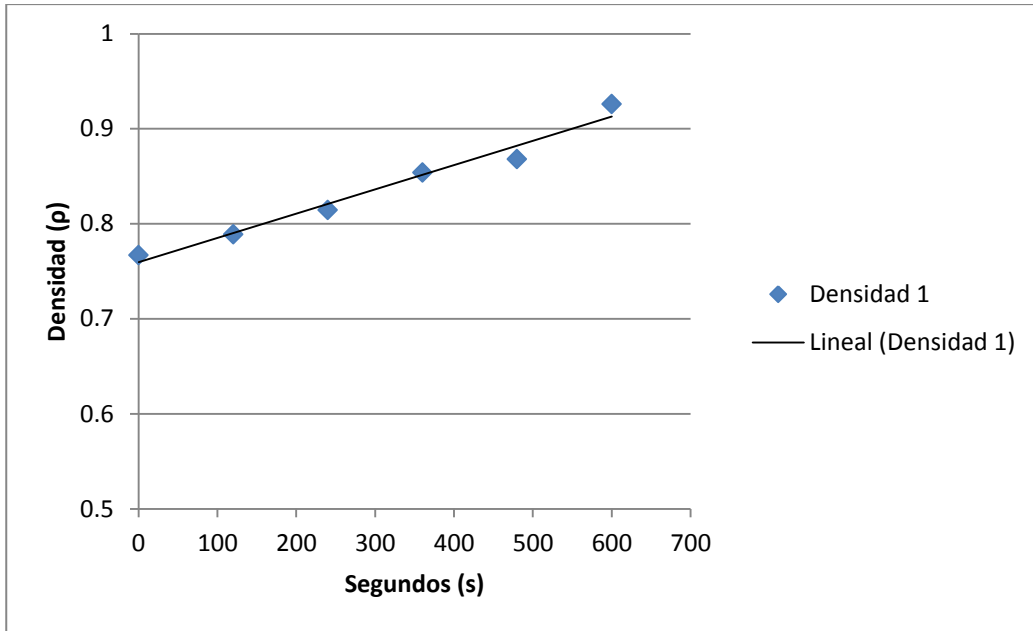


Figura 3.4 Curva patrón de densidad en manzana sometido a escaldado a 92.8 °C.

$$y = 0.0003x + 0.7598$$

Ec. 3.1

Donde se observa que existe una relación directamente proporcional entre la variación de la densidad y el tiempo. Esta variación se debe a que uno de los objetivos del escaldado es la eliminación de aire ocluido lo que provoca la porosidad en el producto y al eliminarlo se elimina parte de la porosidad. La ecuación que se obtuvo es la Ecuación 3.1

### 3.2 Penetración de Calor y evaluación de la dureza.

Durante el proceso térmico de escaldado la manzana sufre cambios en sus características relacionados con la penetración de calor principalmente en la superficie. Dentro de la experimentación se realizaron las pruebas de acuerdo al diseño experimental y se obtuvieron datos de la penetración calor los cuales validan el programa de simulación y son el punto decisivo para determinar el comportamiento de otras propiedades físicas de la manzana. Los resultados obtenidos de las experimentaciones se graficaron para obtener un comportamiento de la penetración de calor y posteriormente se realizó un tratamiento de datos con el programa Curv Expert para obtener el ajuste de datos a una línea. Estos son los resultados.

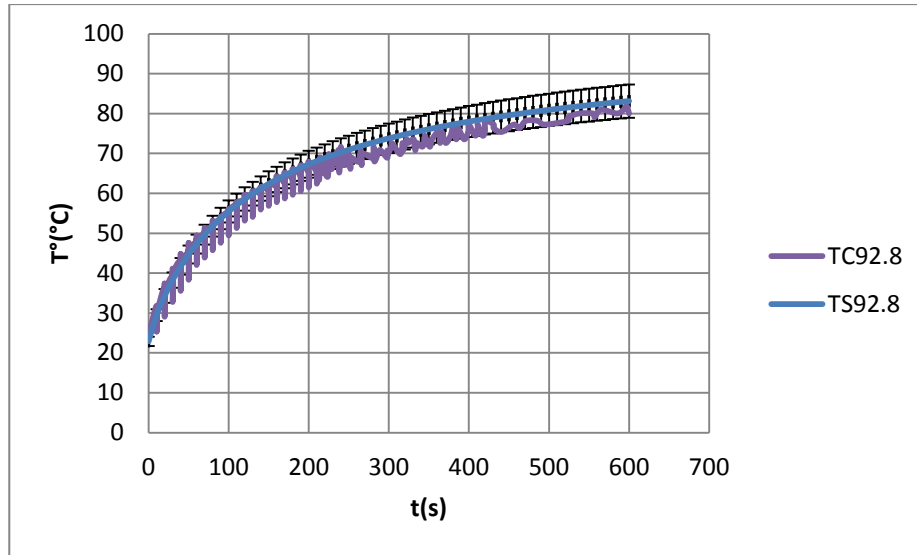


Figura 3.5 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 92.8 °C.

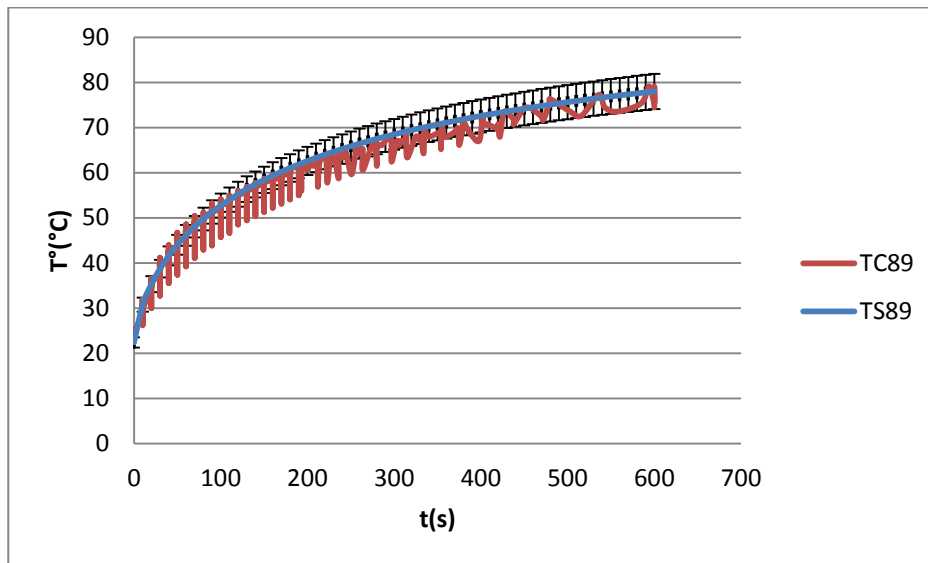


Figura 3.6 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 89 °C.

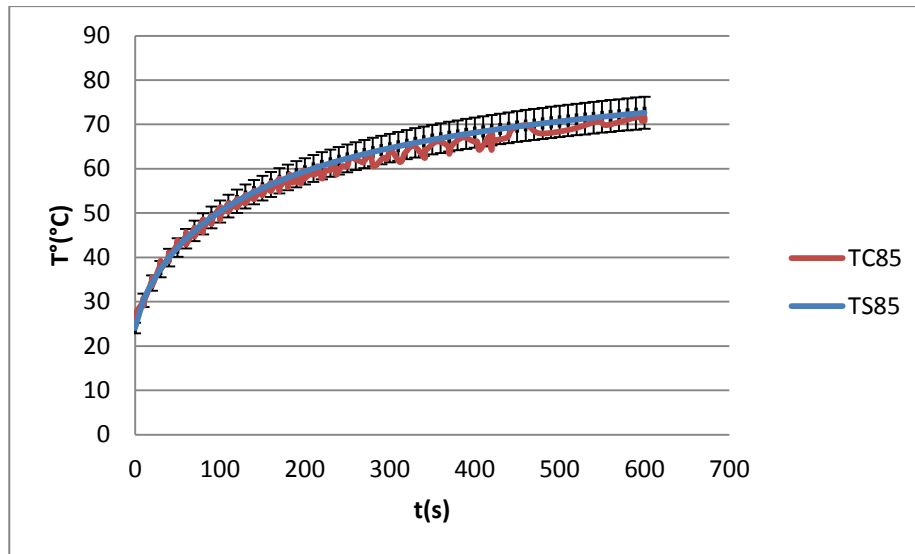
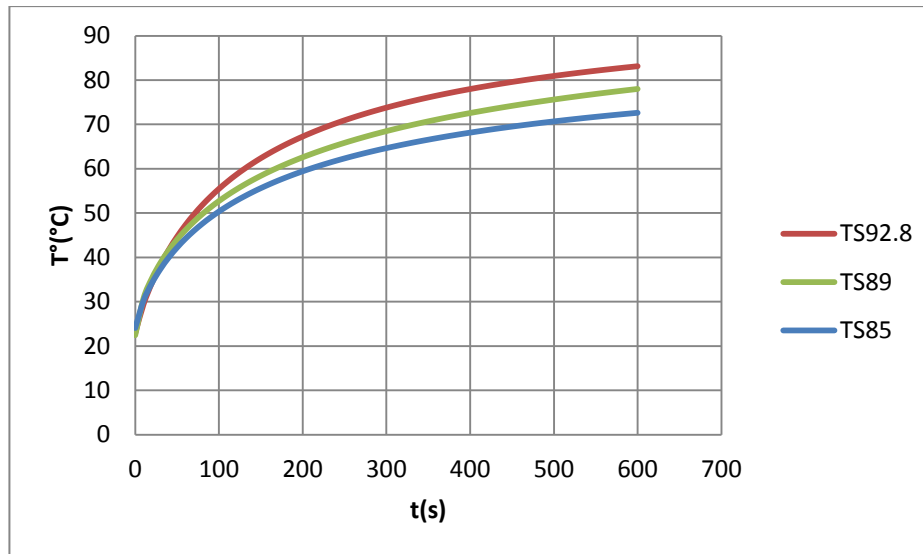


Figura 3.7 Curva de penetración de calor en superficie experimental a 85 °C.

En las gráficas anteriores se encuentran graficados los resultados de la experimentación de acuerdo a la temperatura de proceso incluyendo los tres tiempos y la línea que se muestra uniforme es el ajuste de datos obtenido. También se observa las barras de error con un 5% de índice de confianza con respecto a la línea de ajuste de datos, para comprobar la confiabilidad de los datos obtenidos. Como se muestra en las corridas a 85 °C en todo el proceso los datos graficados están dentro de rango de error y en los experimentos realizados a las temperaturas 92.8 y 89 °C los primeros datos graficados se encuentran fuera del rango de error pero los correspondientes a la parte final del proceso están dentro de este rango, esto pudo ser causa por las condiciones en las que se realizó la experimentación.



**Figura 3.8** Curvas de ajuste de penetración de calor a 92.8, 89 y 85 °C.

En la gráfica anterior se muestra el ajuste de datos de los datos de penetración de calor a las distintas T°.

Posteriormente dentro de la experimentación se efectuó el análisis de textura realizado en un equipo INSTRON de donde se obtuvieron los valores de fuerza máxima aplicada siendo esta el indicador de dureza. Las condiciones utilizadas se muestran en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Condiciones de prueba en el equipo INSTRON.

Condiciones de Prueba	
Equipo	INSTRON
Dispositivo	Punzón Dinámico 0.011KN
Diámetro	11mm
Distancia Inicial de la Probeta	12mm
Distancia del Plato	10mm
Forma Geométrica	Cilíndrica
Canal de control	Posición
Dirección de ensayo	Hacia Abajo
Velocidad de la Cruceta	25mm/min
Carga Máxima de la celda	5kN
Nivel de Carga máxima	3.5kN

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10

**Tabla 3.8 Resultados de dureza a 92.8 °C.**

Exp	92.8 °C-10min		92.8 °C-7min		92.8 °C-4min	
	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)
Prom	11.093	0.0414	8.423	0.0520	6.533	0.0627
$\sigma$	0.914	0.0012	1.132	0.0043	0.611	0.0130
CV	8.244	3.0550	13.443	8.2001	9.357	20.8046

**Tabla 3.9 Resultados de dureza a 89°C.**

Exp	89 °C-10min		89 °C-7min		89 °C-4min	
	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)
Prom	9.07	0.0537	7.19	0.0565	6.456	0.0724
$\sigma$	0.577	0.0069	0.18991226	0.0021	0.728	0.0079
CV	6.361	12.9342	2.64133881	3.717	11.284	10.896

**Tabla 3.10 Resultados de dureza a 85°C.**

Exp	85 °C-10min		85 °C-7min		85 °C-4min	
	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)	Dist. (mm)	F max (kN)
Prom	6.57	0.0584	15.643	0.0607	5.503	0.0727
$\sigma$	0.620	0.0031	2.338	0.0046	0.071	0.0029
CV	9.437	5.4094	14.945	7.6024	1.296	3.9916

En las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran los resultados de las repeticiones de la experimentación que se obtuvieron en cuanto a la dureza y las medidas estadísticas; la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación que nos dan las confiabilidad de los datos obtenidos.

Posteriormente se realizó un tratamiento de datos para obtener el comportamiento de la degradación de la textura de manera análoga al cálculo de valores D y Z (Muerte Térmica).

Los datos de dureza se recopilaron en la Tabla 3.11 de acuerdo en las condiciones de proceso en las que fueron obtenidos y se graficaron en la Figura 3.9

**Tabla 3.11 Resultados de carga máxima (kN).**

T/t	0min	4min	7min	10min
Cruda	0.0873	0.0873	0.0873	0.0873
85 °C	0.0873	0.0727	0.0607	0.0584
89 °C	0.0873	0.0724	0.0565	0.04985
92.8 °C	0.0873	0.0702	0.0520	0.042

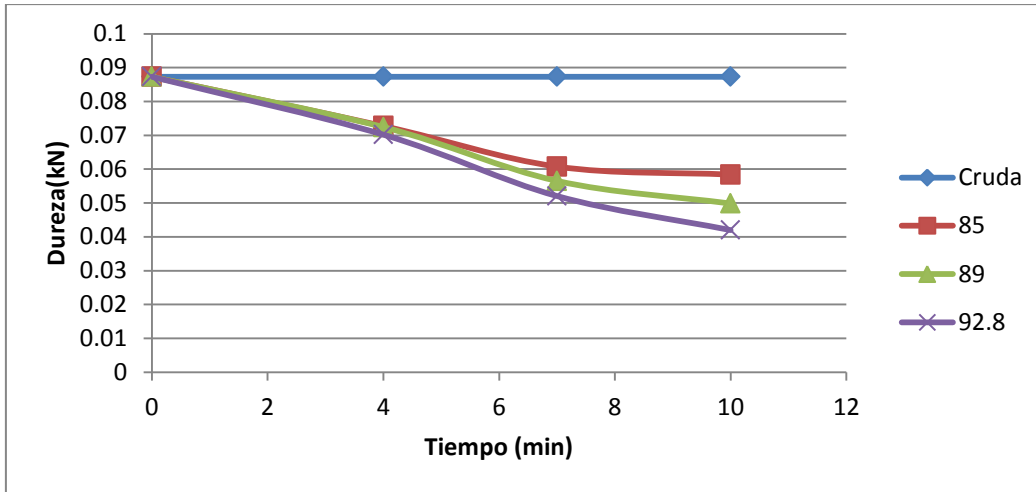


Figura 3.9 Curvas de Dureza (carga máxima) Vs Tiempo.

Posteriormente se obtuvieron los Logaritmos de los valores (Tabla 3.12) y se graficaron para obtener las pendientes como se muestra en la Figura 3.10.

Tabla 3.12 Log ( ) de los resultados de dureza.

T/t	0min	4min	7min	10min
Cruda	-1.05898576	-1.05898576	-1.05898576	-1.05898576
85 °C	-1.05898576	-1.13826651	-1.21633459	-1.23358715
89 °C	-1.05898576	-1.14006153	-1.24769541	-1.30233484
92.8 °C	-1.05898576	-1.15366289	-1.28344023	-1.37675071

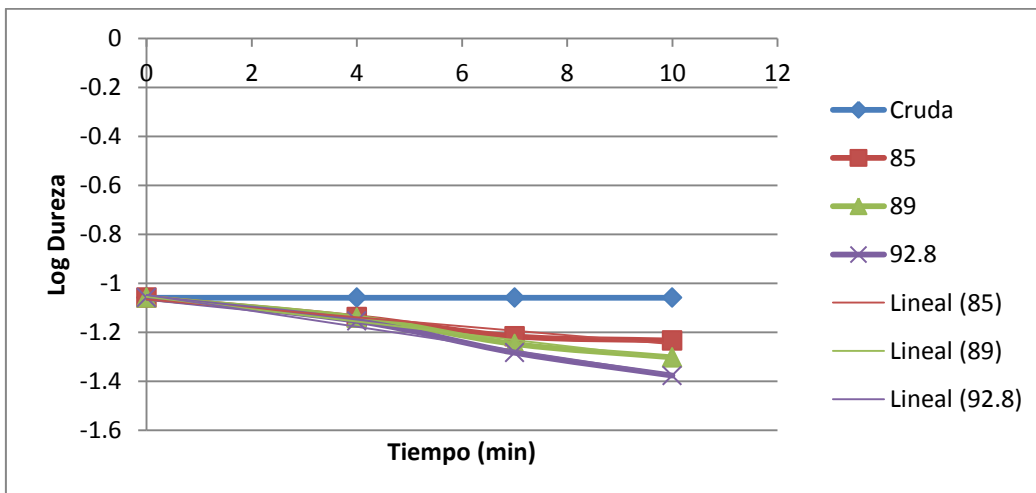


Figura 3.10 Curva para el cálculo de Valores D, Log de Carga Máxima Vs Tiempo.

Después con las pendientes se obtuvieron los valores “D” que indican la degradación en un ciclo decimal a las temperaturas correspondientes como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Valores D para carga máxima.

T	-1/D	D(min)	log D
85 °C	-0.0184	54.3478261	1.73518218
89 °C	-0.0253	39.5256917	1.59687948
92.8 °C	-0.0326	30.6748466	1.4867824

Posteriormente se obtuvieron los valores de D y se continuó con la obtención del Log de D.

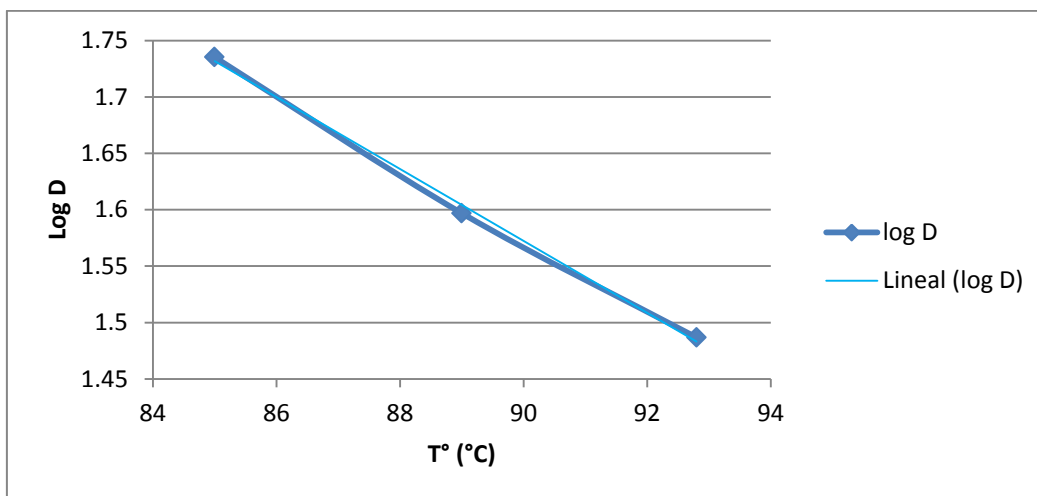


Figura 3.11 Curva para cálculo de valor Z de textura, Log D Vs T°.

En la gráfica anterior se muestran graficados los valores de Log D y el ajuste de estos valores que se utilizó para obtener la pendiente y obtener el valor Z de la degradación de la textura.

-1/Z	Z(°C)
-0.0319	31.347962

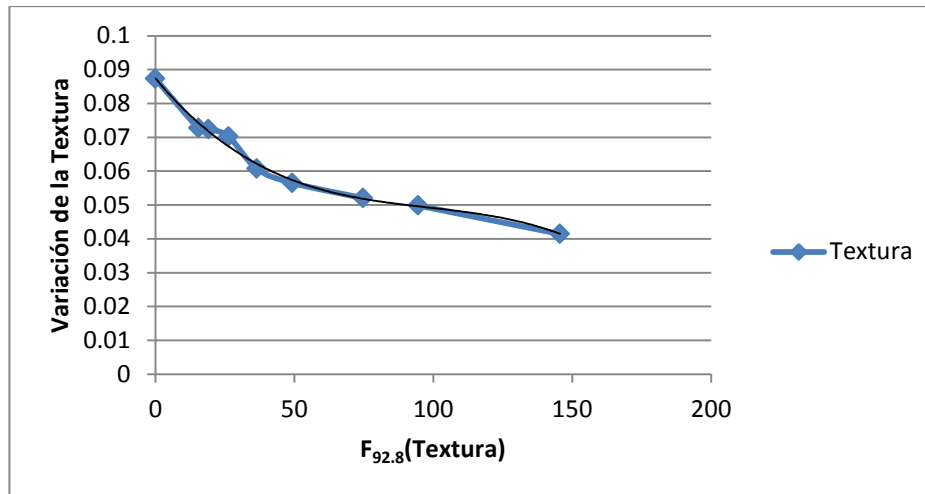


Figura 3.12 Curva de relación de Textura Vs F<sub>92.8</sub> (Textura).

$$y = -3E-08x^3 + 9E-06x^2 - 0.001x + 0.0874$$

Ec. 3.2

Ecuación 3.2 de la la relación de Textura Vs F<sub>92.8</sub>

### 3.3 Variación de Tamaño y Peso

En el proceso de escaldo debido a las reacciones que genera el calor se produce la transferencia de masa; como la eliminación de aire ocluido y de agua libre cercana a la superficie en contacto con el agua de retorta. Esto produce variaciones en las propiedades físicas y mecánicas de la manzana como son: tamaño, peso, densidad, porosidad, entre otras. En este trabajo se contemplaron dos el tamaño y el peso.

#### Variación de Tamaño.

Para realizar el análisis de la variación de tamaño primero se estableció el tamaño teórico de la manzana, utilizando el radio teórico como se realizó en una investigación previa sobre manzana *Golden Delicius* (Grotte, Duprat, Piétri, & Loonis, 2002), la cual presenta una relación de la masa y la densidad para obtener el radio teórico para frutas semiesféricas. Como se muestra a continuación:

$$R = \left[ \frac{3 \cdot m}{4 \cdot \pi \cdot \rho} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Ec. 3.3

Donde  $m$  es la masa (kg) de la manzana,  $\rho$  es densidad aparente (kg\*m<sup>-3</sup>) y  $R$  es el radio teórico (m).

Se realizaron los cálculos de las manzanas utilizada antes del proceso y al finalizar el proceso. Los resultados se graficaron en la una Gráfica 3.13. Por la relación entre las propiedades y el parámetro.



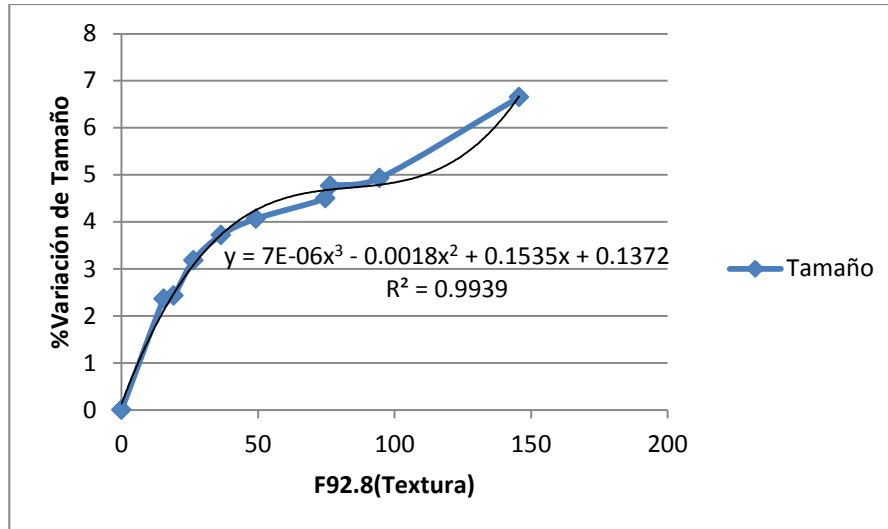


Figura 3.13 Curva de variación de Tamaño Vs  $F_{92.8}$  (Textura).

Posteriormente se obtuvo la ecuación de la línea de ajuste a estos datos, la cual fue utilizada para la obtención de datos en el programa.

#### Variación de Peso.

Para esta determinación se hizo una comparación entre el peso antes y después del proceso y se registró la diferencia en una base de datos. Posteriormente se realizó un análisis de datos para obtener la relación que existe entre “% de variación de peso” y “F92.8 de textura” y como se observa en la gráfica la variación de peso no tiene una relación directa con el F92.8 de textura.

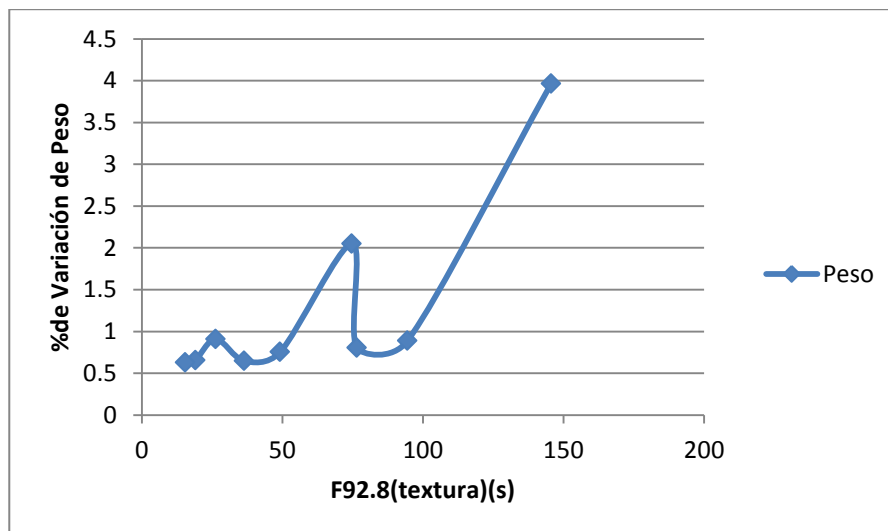


Figura 3.14 Curva de variación de Peso Vs  $F_{92.8}$  (Textura).

Prosiguiendo con el análisis, se observó que la variación de peso estaba relacionada con la  $T^\circ$  de agua de proceso. Como se muestra en la tabla y la gráfica siguientes.

Tabla 3.14 Variación de %Peso.

Variación de Peso (%)				
T/t	0min	4min	7min	10min
Cruda	0	0	0	0
85 °C	0	0.6283	0.6475	0.8067
89 °C	0	0.6575	0.7542	0.8892
92.8 °C	0	0.9099	2.0497	3.9647

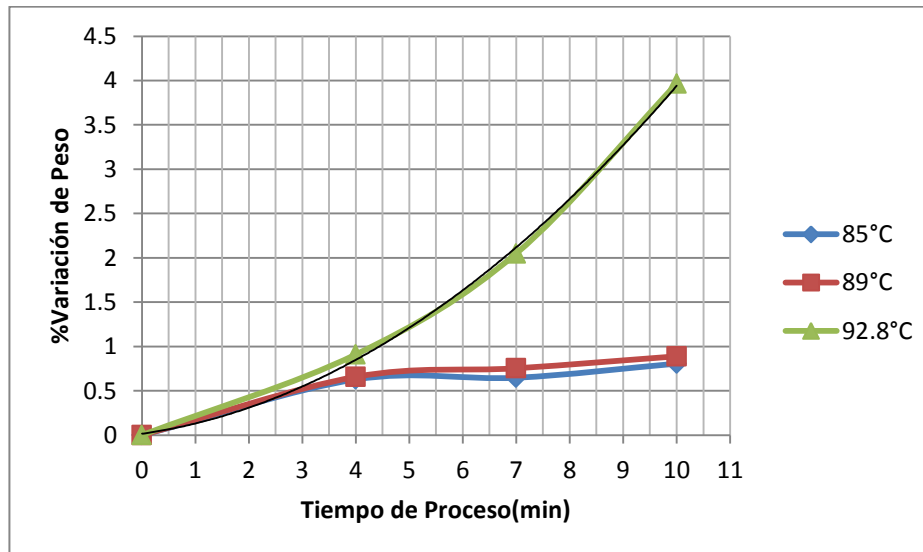


Figura 3.15 Curva de %Variación de Peso Vs Tiempo de proceso.

$$y = 0.0307x^2 + 0.0858x + 0.0156$$

Ec. 3.4

Para verificar la relación de variación se continuó con el cálculo de la variación de peso en base a el T° de agua de proceso de manera análoga al cálculo de la cinética de destrucción de M.O. en la tabla siguiente se tiene los valores de los logaritmos de los porcentajes de variación de peso de acuerdo a las condiciones de proceso.

Tabla 3.15 Log de la Variación de %Peso.

Log Variación de %Peso				
	0min	4min	7min	10min
Cruda	0	0	0	0
85 °C	0	-0.2018	-0.1887	-0.0932
89 °C	0	-0.1821	-0.1225	-0.0510
92.8 °C	0	-0.0410	0.3116	0.5982

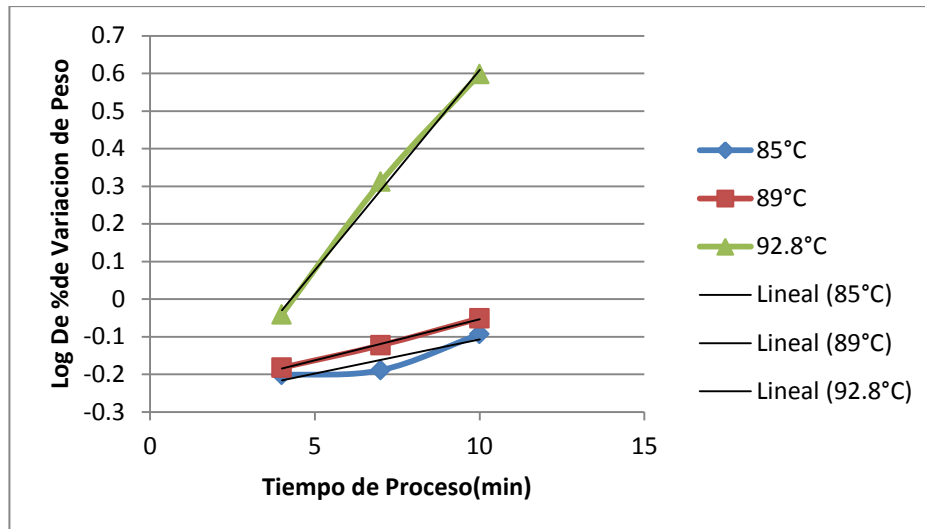


Figura 3.16 Curva de Log de %Variación Vs Tiempo.

Las pendientes obtenidas del ajuste de datos representan el inverso de los valores "D" los cuales se utilizan para calcular el valor "Z" como se muestra.

Tabla 3.16 Valores D (Peso).

Valores D			
	1/D	D	Log(D)
85 °C	0.018	55.5556	1.7447
89 °C	0.0219	45.6621	1.6595
92.8 °C	0.1065	9.3896	0.9726

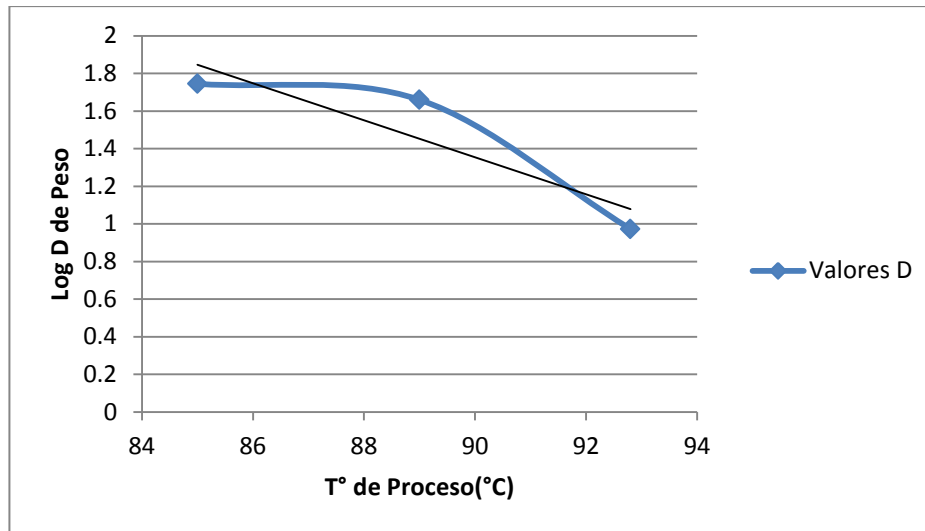


Figura 3.17 Curva de Log de Valores D (peso) Vs Tiempo de Proceso.

El Valor "Z" es el valor inverso de la pendiente de los valores "D" la cual se utiliza para calcular el F92.8 del peso.

Valor Z	
1/Z	Z(°C)
0.0983	10.17294

Los cálculos anteriores fueron generados para tener un mayor espectro en los alcances del programa y conocer más de los posibles cambios en la manzana durante el proceso, para tener un acercamiento a un proceso real.

### 3.4 Programa.

El programa se realizó en el lenguaje JAVA en la plataforma NetBeans (Versión 7.0.1).



Figura 3.18 NetBeans IDE 7.0.1.

Previamente a la elaboración de la interface gráfica, se obtuvo la composición química de la manzana evaluada a las diferentes temperaturas, esta información fue capturada como plataforma de dicha interface.

#### Funcionamiento del programa.

La interface gráfica y el funcionamiento del programa se presentan a continuación con las siguientes instrucciones.

- 1) Se introduce la temperatura del medio y de la manzana y se presiona el botón **Guardar** para cargar los datos al sistema.

Penetración De Calor En Manzana

Temperatura del medio °C (60-100°C)

Temperatura de la Manzana °C (0-50°C)

Guardar

El programa desplegara dos opciones dentro de la misma pantalla

- a. ¿Tiempo de proceso?
- b. ¿Temperatura Final?

- 2) Elegir la opción para calcular los datos que se requieren.

Si se eligió la opción de **¿tiempo de proceso?** el programa pide los datos de que temperatura requiere que alcance la manzana en la superficie (°C) y el radio de la manzana (m) y aparece el botón de **Calcular**

Si se eligió la opción de **¿temperatura fina?** el programa pide los datos del tiempo de proceso que se requiere(s) y el radio de la manzana (m) y aparece el botón de **Calcular**

Penetración De Calor En Manzana

Temperatura del medio °C (60-100°C)

Temperatura de la Manzana °C (0-50°C)

¿Que Quiere Calcular?

¿Tiempo de Proceso?

¿Temperatura Final?

¿Que t(s) Necesita de proceso?

Radio de la Manzana(m)

3) En cualquiera de las dos opciones se introducen los datos requeridos y se presiona el botón **Calcular**.

Penetración De Calor En Manzana

Temperatura del medio °C (60-100°C)

Temperatura de la Manzana °C (0-50°C)

¿Que Quiere Calcular?

¿Tiempo de Proceso?

¿Temperatura Final?

¿Que t(s) Necesita de proceso?

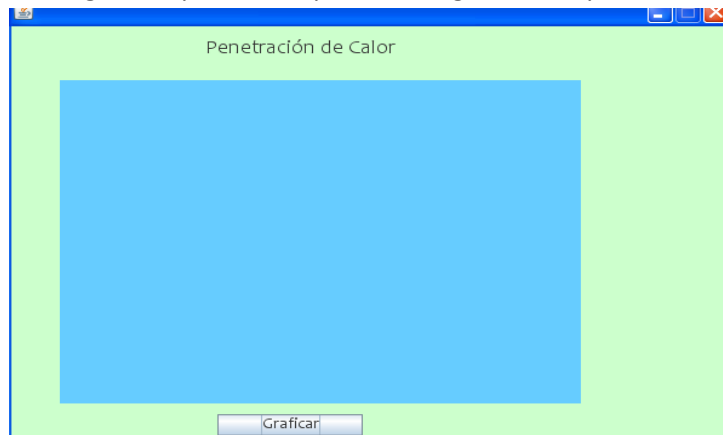
Radio de la Manzana(m)

Tiempo(s)	Centro	25% del Rad..	50% del Rad..	75% del Rad..	Superficie
0	4	4	4	4	4
30	4	4	4.01	4.062	14.811
60	4	4.005	4.211	8.004	23.848
90	4.008	4.048	4.85	11.94	31.556
120	4.048	4.191	5.949	16.146	38.187
150	4.167	4.486	7.429	20.339	43.926
180	4.41	4.964	9.192	24.382	48.913
210	4.812	5.637	11.152	28.212	53.263
240	5.392	6.501	13.239	31.8	57.069
270	6.158	7.547	15.403	35.143	60.407
300	7.105	8.758	17.603	38.244	63.343
330	8.225	10.116	19.813	41.116	65.932
360	9.502	11.603	22.012	43.774	68.219
390	10.92	13.198	24.186	46.234	70.245
420	12.458	14.884	26.327	48.514	72.044
450	14.1	16.644	28.437	50.626	73.644

TEMPERATURA= 79.45

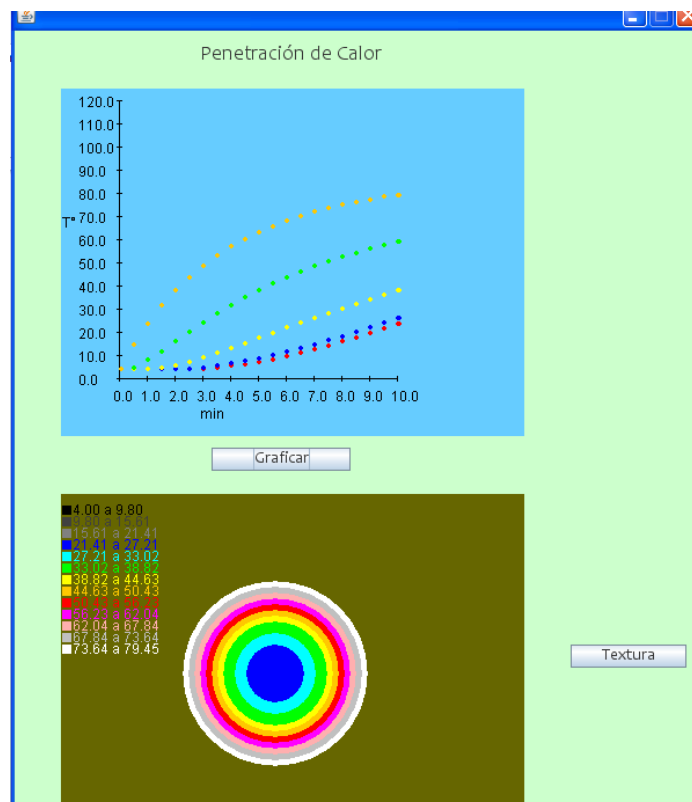
El programa mostrara una tabla que contiene seis columnas una del tiempo trascurrido en intervalos de 30 segundos y las otras cinco muestran la penetración de calor a diferentes distancias del centro de la manzana (centro, 25%, 50%, 75% y superficie), en seguida aparecen dos rótulos bajo el botón **Calcular** que muestran el tiempo final que tardo en alcanzar la temperatura requerida si elegiste la opción **¿Tiempo de proceso?**, y la temperatura final que alcanzo en la superficie en el tiempo requerido si elegiste la opción **¿Temperatura final?**. También aparece el botón **Graficar**.

- 4) Presiona el botón de graficar para ir a la pestaña de graficas de penetración de calor



El programa abrirá otra ventana con el título Penetración de Calor y botón **Graficar**.

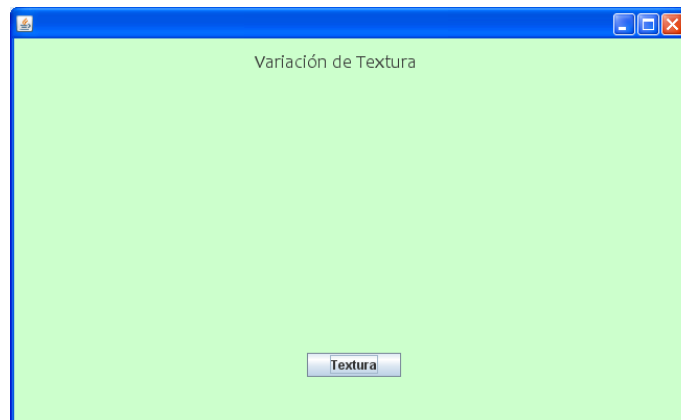
- 5) Presionar el botón **Graficar** para obtener la gráfica que representa los valores de la tabla anterior y el diagrama de penetración de calor.



El diagrama de temperaturas muestra cómo va variando la penetración de calor en distintas zonas de la manzana. En el costado superior derecho del diagrama aparece el rango de temperaturas, las cuales son representadas por colores. Además aparece un botón que tiene el nombre de textura.

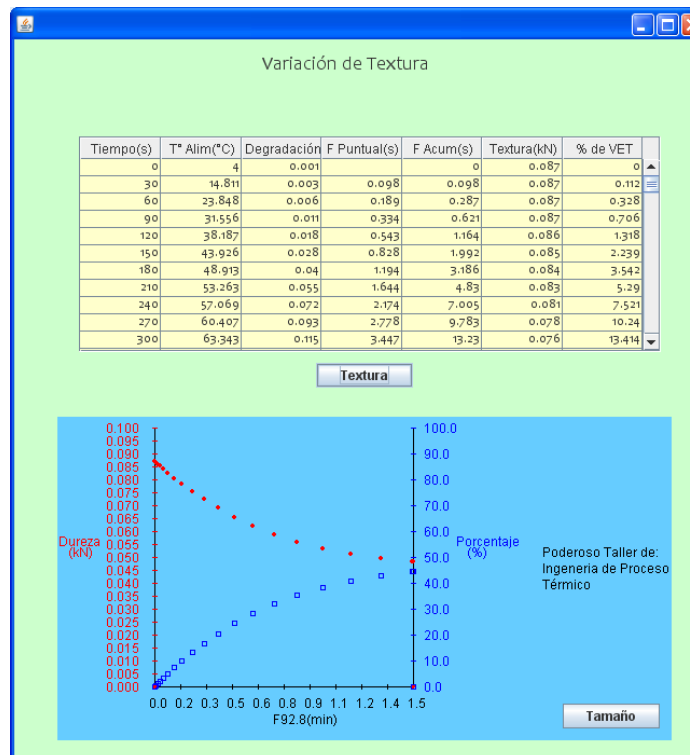


6) Presionar el botón textura, para ir a la ventana de **Textura**.



El programa abre una pestaña con el título de Variación de textura y el botón **Textura**.

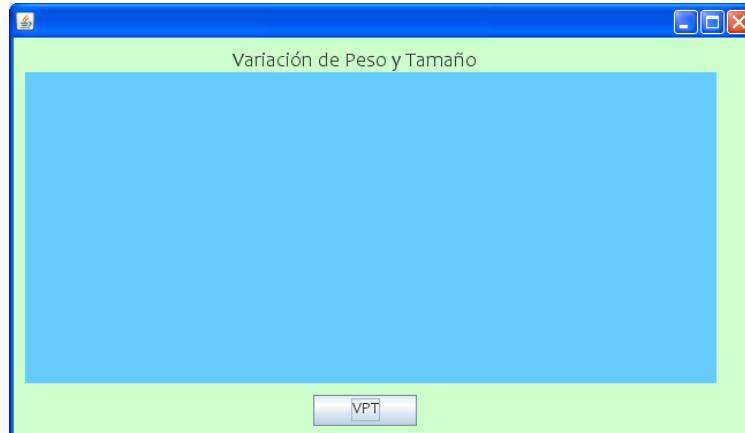
7) Presionar el botón de **Textura** para obtener los datos y la gráfica de textura.



En la tabla se muestran siete columnas; la primera con el tiempo de proceso en intervalos de 30s, la segunda tiene la temperatura de la manzana en la superficie, la tercera contiene la degradación correspondiente a cada temperatura, la cuarta contiene el F de Textura puntual(s) por temperatura, la quinta contiene el F de Textura Acumulado(s), la sexta variación de textura(kN) correspondiente al F acumulado y la séptima contiene el porcentaje de variación de la textura con respecto a la textura inicial.

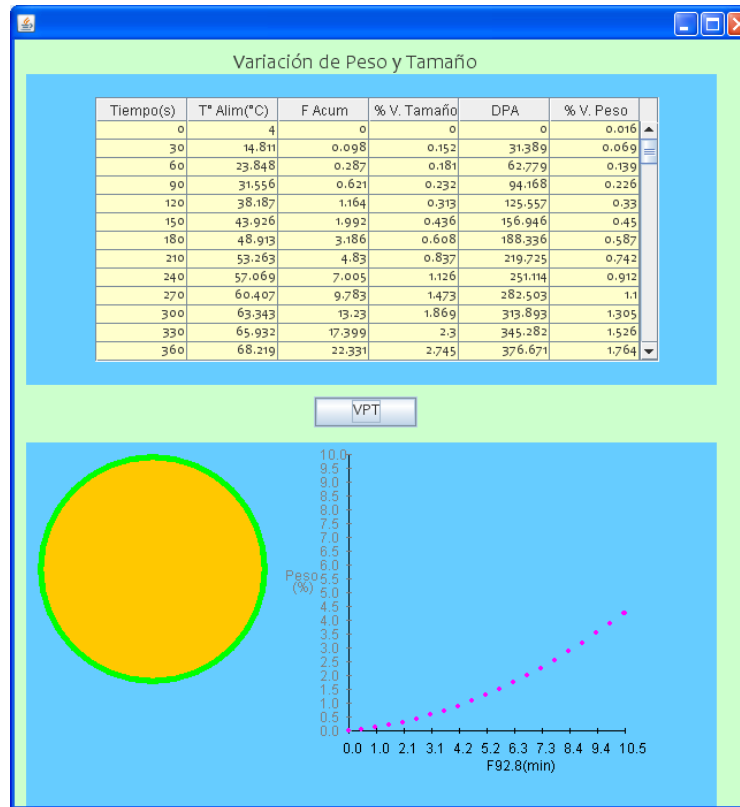
En la gráfica de esta ventana se representa los datos de la variación de textura en color rojo y el % de variación en textura con respecto a la textura inicial en color azul. También aparecerá el botón **Tamaño**.

- 8) Presionar el botón **Tamaño** para ir a la ventana de Variación de Peso y Tamaño.



El programa abre una ventana con el título Variación de Peso y Tamaño y el botón **VPT**.

- 9) Presionar el botón **VPT** para que el programa muestre los datos obtenidos en una tabla y las gráficas representando las variaciones de tamaño y peso.



El programa muestra una tabla de datos con seis columnas; en la primera columna muestra el tiempo de proceso en intervalos de 30s, la segunda muestra la T° de la manzana en la superficie, la tercera muestra los valores del “F92.8 de textura” acumulado, la cuarta muestra el porcentaje de variación de tamaño registrada con respecto a los valores de “F92.8 Textura”. La quinta muestra el “F92.8 Peso” acumulado y la sexta muestra el porcentaje de variación de peso. De esta manera concluye el programa.

### 3.5 Validación y contrastación.

La validación se realizó al obtener los resultados de la experimentación y posteriormente se realizaba una corrida en el programa con las mismas condiciones y se contrastaban gráficamente, para verificar la desviación se aplicó un análisis de varianza con un error del 5% representado en las gráficas con barras de error.

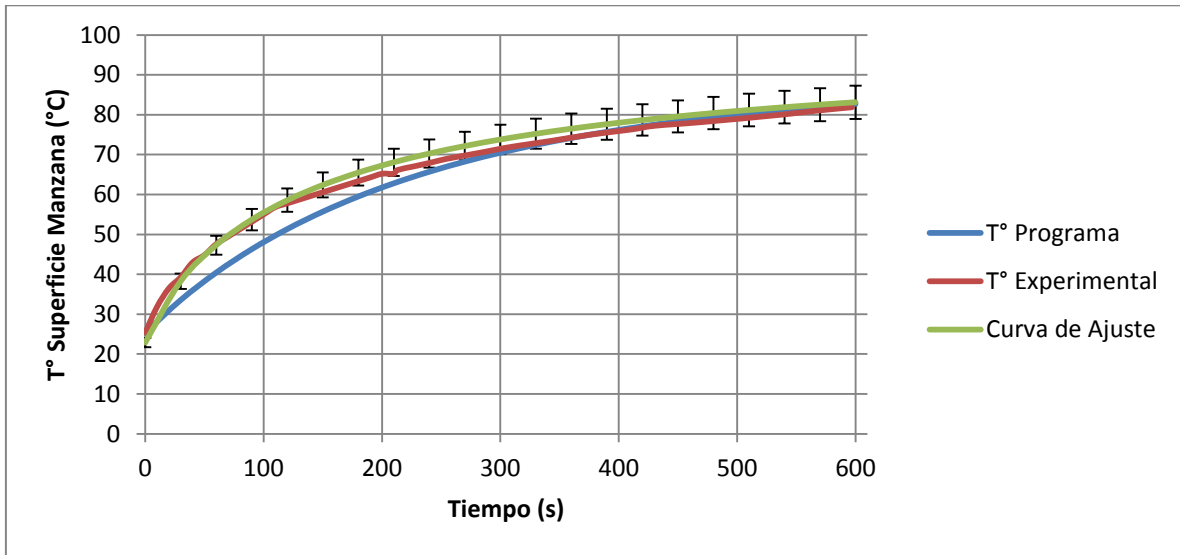


Figura 3.19 Curva de validación a 92.8 °C

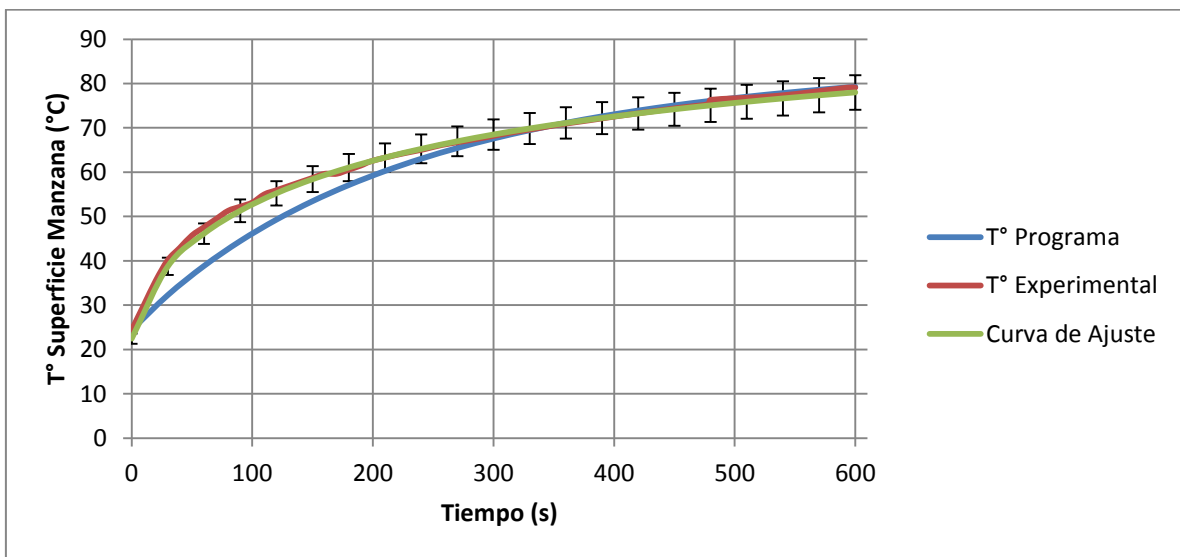


Figura 3.20 Curva de validación a 89 °C

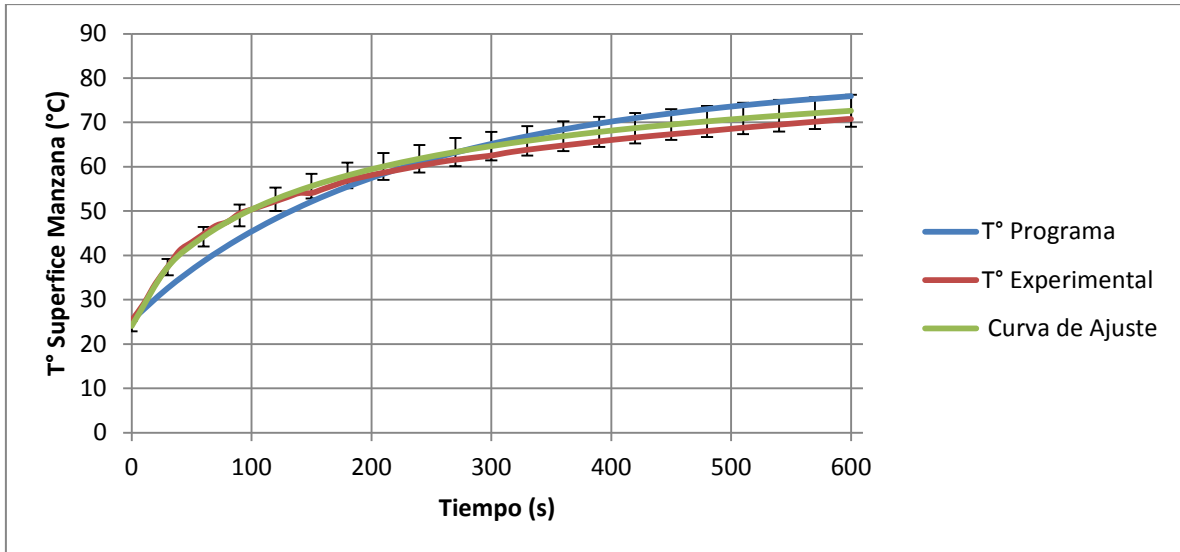


Figura 3.21 Curva de validación a 85 °C

En las Figuras 3.19, 3.20 y 3.21 se puede observar de manera general el ajuste de datos experimentales y los datos obtenidos por el programa, al principio del proceso se tienen una desviación pero a medida que el tiempo avanza se ajusta mejor, por lo que el resultado final es semejante y se tiene una mayor certeza.

Los mejores resultados se obtuvieron en las corridas o experimentos a 92.8 y 89 °C como se puede observar en la Figura 3.19 y 3.20 respectivamente, a diferencia de la experimentación a 85° (Figura 3.21) que presenta mayor diferencia en el ajuste y contrastación de curvas. Estas inconsistencias se pueden atribuir al control de las variables de proceso durante la experimentación, como la temperatura.

En cuanto a la variación de las propiedades mecánicas, estas se afectan en relación a la cantidad de calor suministrado ( $F_{92.8}$ ). Por lo que para no afectar las características de dureza y color no se recomienda tiempos largos o temperaturas altas.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

De acuerdo con el planteamiento en la metodología experimental; se realizó un diseño experimental factorial  $3^2$  para obtener las variaciones físicas y mecánicas en un proceso de escaldado de manzana Granny Smith, mediante la elaboración de programa de simulación donde se utilizó el método de diferencias finitas para la resolución de la ecuación de penetración de calor en una esfera en una dirección, ajustada al polinomio de Taylor.

Durante la determinación teórica de los cambios se encontró que tanto las propiedades físicas y mecánicas, como la composición de la manzana cambian debido a que hay variación de humedad y temperatura. La variación de la temperatura también afecta las propiedades térmicas y físicas como: la difusividad, conductividad térmica,  $C_p$ , densidad. Estas variaciones en las propiedades causadas por la  $T^\circ$  fueron considerados y se integraron al programa, por lo que el programa es capaz de considerar los pequeños cambios en estas propiedades.

La validación del programa se realizó con los resultados obtenidos de la experimentación y los obtenidos por el programa con las mismas condiciones de proceso, se utilizó el análisis de varianza para determinar cómo se ajustan los datos de la simulación con los experimentales con un 5% de variación, determinándose que el ajuste es mejor en la parte final del proceso.

Los resultados obtenidos en el programa nos dieron un acercamiento a la variaciones en la estructura de la manzana basándose en la penetración de calor por lo cual estos resultados también podrían ser contrastados con diagramas termográficos que nos ayudarían a tener otra alternativa en la validación.

Esta investigación es para un caso particular de escaldado de manzana Granny Smith pero las bases, fundamentos y ecuaciones que rigen la transferencia de calor en otro tipo alimentos y proceso de tratamiento térmico son similares, por lo que el programa puede servir de apoyo para futuras investigaciones de procesos térmicos en alimentos, modificando algunos parámetros en su estructura.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Brennan, J. G. (2006). *Manual de procesamiento de los alimentos*. Zaragoza, España: ACRIBA.
- 2) Casp Vanaclocha, A. (2003). *Procesos de Conservación de Alimentos*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- 3) Chapra, S. C. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. México: McGraw-Hill.
- 4) Coss Bu, R. (2003). *Simulación: Un enfoque Práctico*. México: LIMUSA.
- 5) Espinoza, M. (1994). Aspectos De Validación. *Tesis de Ingeniería en Alimentos: Calibración y Validación de Instrumentos de Medición*, 81-129. Cuautitlán, México, México: FES-Cuautitlán UNAM.
- 6) Fuentes, J. (2005). Ingeniería de Software, Análisis y Diseño. *Tesis De Ingeniería de Software, Análisis y Diseño*.
- 7) Geankoplis, C. J. (1998). *Porcesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Continetal.
- 8) Gonçalves, E. M., & Pinheiro, J. (2007). Modelling the kinetics of peroxidase inactivation, color and texture changes of pumpkin during blanching. *Journal of Food Engineering*, 81(4), 693-701.
- 9) Grotte, M., Duprat, F., Piétri, E., & Loonis, D. (2002). Young's Modulus, Poisson's Ratio, And Lamé's Coefficients Of Golden Delicious Apple. *International Journal of Food Properties*, 333-349.
- 10) Hernandez, M. A., & Dominguez, G. C. (1984). *Apuntes de simulación matemática de yacimientos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería.
- 11) Holman, J. P. (1998). *Tranferencia de Calor* (Octava ed.). Madrid, España: Mc Graw Hill.
- 12) Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (Cuarta ed.). México, México: Prentice Hall.
- 13) Lespinard, A. R., Goñi, S. M., Salgado, P. R., & Mascheroni, R. H. (2009). Experimental determination and modeling of size variation, heat transfer and quality index during mushroom blanching. *Journal of Food Engineering*, 92(1), 8-17.
- 14) Lewis, M. J. (1993). *Propiedades físicas de los alimetos y de los sistemas de proceso*. Zaragoza, España: ACRIBA.
- 15) Liu, E. Z., & Scanlon, M. G. (2007). Modeling the effect of blanching condition on the texture of potato strip. *Journal of Food Engineering*, 82(2), 292-297.
- 16) Mafart, P. (1994). *Ingeniería Industrial Alimentaria*. Zaragoza: ACRIBA.

- 17) Perros, H. (2009). *Computer Simulation Techniques: The definitive introduction!* Raleigh: NC State University.
- 18) Potter, N. N. (1970). *La ciencia de los alimentos*. México, México: EDUTEX.
- 19) Rodriguez, F. (2002). *Ingeniería de la Industria Alimentaria, Volumen III: Operaciones de Conservación de Alimentos*. Madrid: Sintesis.
- 20) Rosenthal, A. J. (2001). *Textura de los alimentos. Medida y percepción*. Zaragoza, España: ACRIBA.
- 21) Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. (2007). *INGENIERIA DE ALIMENTOS Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México: LIMUSA WILEY.
- 22) Singh, R. P., & Heldman, D. R. (1998). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza, España: ACRIBA.