

17  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**“ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS FACTORES DE  
TRANSFERENCIA DE CALOR QUE SE PRESENTAN  
DURANTE EL PROCESO DE ESTERILIZACION  
DE CHAMPIÑONES EN ESCABECHE.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A :  
ANDRES VAZQUEZ JIMENEZ**

**ASESOR: DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN.**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

266385  
1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVANZADA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Estudio y análisis de los factores de transferencia de calor que se presentan durante el proceso de esterilización de champiñones en escabeche.

que presenta el pasante: Andrés Vázquez Jiménez  
con número de cuenta: B857467-1 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 15 de Junio de 199 8

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| PRESIDENTE       | <u>I.B.Q.J. Jaime Flores Minutti</u>        |  |
| VOCAL            | <u>Dr. José Luis Arjona Román</u>           |  |
| SECRETARIO       | <u>M. en C. Ricardo P. Hernández García</u> |  |
| PRIMER SUPLENTE  | <u>I.A. Ediltrudis Estrada Lucas</u>        |  |
| SEGUNDO SUPLENTE | <u>I.Q. Ma. Elena Quiroz Macías</u>         |  |

## **DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo al imborrable recuerdo  
De mí amadísima y siempre adorada **SANDY(Q.S.F)**  
Por haber estado a mí lado durante la mejor  
Época de mí vida. (17-FEB-1987/28-JUN-1996)  
Con todo...y...por todo:**ANDRES**

Una dedicatoria especial a mí amiga y  
Compañera de la UAM-Azcapotzalco, futura  
Lic. Hortensia Madrigal Zanté.  
Por su invaluable amistad y compañerismo.

A mis abuelitos: Natalia, Erasmo y Otilio (Q.E.P.D)  
Por su gran cariño y comprensión

**AVJ. JULIO DE 1998.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor José Luis Arjona Román por  
Su excelente asesoría para la elaboración  
De este trabajo.

A mis padres y mi hermano por su  
Incondicional apoyo para cursar  
Y concluir ésta carrera.

A mis hermanas, sobrinos, primas y tíos  
Por su comprensión durante todos estos años.

A Juanito por su amistad, comprensión  
Y paciencia que me ha tenido siempre.  
Por qué siempre sé que cuento con él  
Y viceversa.

A Felipe Jiménez Cruz (CHARRITAS)  
Por aguantarme y comprenderme durante  
Los últimos 14 años y por qué me siga  
Aguantando algunos años más.

## **INDICE GENERAL**

|                                    | Página |
|------------------------------------|--------|
| <b>INDICE GENERAL</b> .....        | 1      |
| <b>INDICE DE TABLAS</b> .....      | 4      |
| <b>INDICE DE FIGURAS</b> .....     | 4      |
| <b>RESUMEN</b> .....               | 5      |
| <b>INTRODUCCION</b> .....          | 7      |
| <b>OBJETIVOS DEL TRABAJO</b> ..... | 8      |
| A).- Objetivo general              |        |
| B).- Objetivos particulares        |        |

### **CAPITULO I ANALISIS BIBLIOGRAFICO**

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Antecedentes .....  | 9  |
| 1.2. Mecanismos de transferencia de calor .....                        | 11 |
| 1.2.1. Conducción .....  | 12 |
| 1.2.2. Conductividad térmica .....                                     | 14 |
| 1.2.3. Convección .....  | 15 |
| 1.2.4. Radiación térmica .....   | 19 |
| 1.3. Termopares .....  | 20 |
| 1.4. Métodos para la solución de problemas de transferencia de calor.. | 21 |
| 1.5. Método de las diferencias finitas .....                           | 22 |
| 1.6. Aplicación de esterilización en salmueras .....                   | 27 |
| 1.7. Proceso de esterilización .....                                   | 31 |
| 1.7.1. Diagrama de bloques y condiciones de trabajo .....              | 32 |
| 1.7.2. Descripción del equipo y del proceso .....                      | 33 |

## CAPITULO II METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Página

|   |    |
|---|----|
| 2.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....   | 38 |
| <i>ETAPA EXPERIMENTAL 1. VALIDACIÓN DE TERMOPARES Y CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE.</i>                      |    |
| 2.1.1. EXPERIMENTO 1. Validación de termopares.....   | 38 |
| A). En agua.  |    |
| B). En aceite.  |    |
| ANÁLISIS ESTADÍSTICOS: - Precisión (Análisis de varianza).  |    |
| - Exactitud (Prueba de hipótesis).  |    |
| - Repetibilidad (Bloques aleatorios).   |    |
| - Reproducibilidad (covarianza).  |    |
| - Linealidad (Mínimos cuadrados).   |    |
| - Reproducibilidad (Covarianza).  |    |
| 2.1.2. EXPERIMENTO 2. Caracterización del autoclave.....  | 40 |
| Análisis estadísticos: Números aleatorios.  |    |
| <i>ETAPA EXPERIMENTAL 2. OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA FORMULACIÓN DEL SISTEMA CHAMPIÑONES EN ESCABECHE.</i> |    |
| 2.2. EXPERIMENTO 3. Obtención experimental de la formulación del sistema: Champiñones en escabeche.....     | 41 |
| A).- Variando las cantidades de los ingredientes.   |    |
| B).- Utilizando aditivos.   |    |
| C).- Esterilización para cada formulación propuesta, construcción de historias térmicas (t vs T).           |    |
| D).- Realización de pruebas físicas y organolépticas para cada formulación.                                 |    |
| <i>ETAPA EXPERIMENTAL 3. LOCALIZACIÓN DEL PUNTO FRÍO DENTRO DE LA LATA.</i>                                 |    |
| 2.3. EXPERIMENTO 4. Localización del punto frío dentro de lata.....   | 43 |
| 2.3.1. Evaluación de la difusividad térmica .....   | 45 |
| 2.4. Cuadro Metodológico.....   | 47 |

## CAPITULO III ANALISIS DE RESULTADOS

|   | Página    |
|---|-----------|
| 3.1. Validación de termopares.....  | 48        |
| 3.1.1. Precisión.....   | 49        |
| 3.1.2. Repetibilidad.....   | 50        |
| 3.1.3. Linealidad.....  | 51        |
| 3.1.4. Exactitud.....   | 52        |
| 3.1.5. Reproducibilidad.....  | 52        |
| 3.2. Caracterización del autoclave.....   | 53        |
| 3.2.1. Formulación definitiva y proceso de elaboración.....   | 56        |
| 3.2.2. Localización del punto frío dentro de la lata.....   | 57        |
| 3.2.3. Análisis de las historias térmicas. (t vs T).....  | 61        |
| 3.3. Evaluación de la difusividad térmica ( $\alpha$ ).....   | 63        |
| 3.4. Determinación de la densidad ( $\rho$ ) y calor específico ( $C_p$ ) del sistema.....                  | 67        |
| 3.5. Determinación del valor de la conductividad térmica (K) a partir<br>del valor de ( $\alpha$ ).....     | 68        |
| 3.6. Establecimiento del tiempo de esterilización para champiñones en<br>escabeche a nivel laboratorio..... | 69        |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>NOMENCLATURA.....</b>  | <b>73</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>  | <b>74</b> |



## INDICE DE TABLAS

|  | Página |
|--|--------|
| <b>Tabla 1</b> Coeficiente convectivo de transferencia de calor ( h )..... | 17     |
| <b>Tabla 2</b> Coeficiente de variación de los termopares.....             | 49     |
| <b>Tabla 3</b> Prueba de análisis de varianza.....                         | 50     |
| <b>Tabla 4</b> Regresión lineal de termopares.....                         | 51     |
| <b>Tabla 5</b> Caracterización del autoclave a diferentes presiones.....   | 54     |
| <b>Tabla 6</b> Formulación definitiva.....                                 | 56     |
| <b>Tabla 7</b> Resultados experimentales de $\alpha$ .....                 | 67     |
| <b>Tabla 8</b> Propiedades termofísicas promedio.....                      | 70     |
| <b>Tabla 9</b> Tiempos de esterilización promedio a nivel laboratorio..... | 71     |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Transferencia de calor por convección.....                                     | 18 |
| <b>Figura 2</b> Diferencias finitas en coordenadas cilíndricas.....                            | 22 |
| <b>Figura 3</b> Coordenadas de posición (i,j) alrededor del punto (P) en posición axial.....   | 23 |
| <b>Figura 4</b> Coordenadas de posición (i,j) alrededor del punto (P), en posición radial..... | 24 |
| <b>Figura 5</b> Gráfica resultante de la aplicación del método de las diferencias finitas..... | 26 |
| <b>Figura 6</b> Penetración de calor por convección.....                                       | 28 |
| <b>Figura 7</b> Penetración de calor por conducción.....                                       | 29 |
| <b>Figura 8</b> Diagrama del proceso de elaboración.....                                       | 32 |
| <b>Figura 9</b> Diagrama de las operaciones del enlatado de champiñones.....                   | 37 |
| <b>Figura 10</b> Ubicación de los termopares dentro de la cámara del autoclave.....            | 40 |
| <b>Figura 11</b> Posición de los termopares dentro de la lata.....                             | 43 |
| <b>Figura 12</b> Gráfica resultante para obtener el valor de la difusividad térmica.....       | 46 |
| <b>Figura 13</b> Corrección de temperaturas.....   | 48 |
| <b>Figura 14</b> Caracterización del autoclave.....  | 55 |
| <b>Figura 15</b> Localización del punto frío (Arreglo 1).....                                  | 58 |
| <b>Figura 16</b> Localización del punto frío ( Arreglo 2 ).....                                | 58 |
| <b>Figura 17</b> Localización del punto frío ( Arreglo 3 ).....                                | 59 |
| <b>Figura 18</b> Análisis de historias térmicas (Réplica 1).....                               | 61 |
| <b>Figura 19</b> Análisis de historias térmicas (Réplica 2).....                               | 61 |
| <b>Figura 20</b> Análisis de historias térmicas (Réplica 3).....                               | 62 |
| <b>Figura 21</b> Evaluación de la difusividad térmica (Réplica 1).....                         | 64 |
| <b>Figura 22</b> Evaluación de la difusividad térmica (Réplica 2).....                         | 65 |
| <b>Figura 23</b> Evaluación de la difusividad térmica (Réplica 3).....                         | 66 |

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se realizó el estudio y análisis de la transferencia de calor que se presenta en el enlatado de vegetales frescos en salmuera. En este caso en particular se obtuvo también la formulación para la elaboración de champiñones en escabeche; para las mediciones de temperatura se utilizaron termopares de CROMEL-ALUMEL previamente validados y para las mediciones del tiempo se utilizaron relojes digitales. La esterilización del producto se llevó a cabo en un autoclave que utiliza como medio de calentamiento vapor de agua. Las latas utilizadas para envasar el producto son latas cilíndricas de 10.0 cm. de diámetro y 11.5 cm de altura.

Mediante una serie de experimentos y actividades se determinó el punto térmico (frío) dentro de la lata el cual se ubicó aproximadamente a 3.5 cm. de la base inferior de la lata, se construyeron historias térmicas y se determinó mediante el uso de la técnica de las diferencias finitas y a partir de la segunda ecuación de FOURIER el valor del coeficiente de difusividad térmica ( $\alpha$ ). A partir de éste valor se obtuvo el valor de la conductividad térmica ( $K$ ) del producto, con lo cual se establecieron los tiempos mínimos necesarios para la esterilización de champiñones preparados en escabeche; paralelamente se realizaron pruebas físicas y organolépticas del producto esterilizado, estableciendo la formulación definitiva del producto que reunió la mayor cantidad de características deseables para el consumo.

De los resultados obtenidos experimentalmente se concluye que las condiciones que aseguran tanto el proceso térmico como la calidad del producto son las siguientes: “ Es necesario someter el producto a un proceso de esterilización de 107 °C durante 15 min., además es recomendable tomar en consideración las siguientes recomendaciones en lo que se refiere al tratamiento previo al que hay que someter la materia prima que se va a emplear en la formulación del producto final: Es recomendable someter los champiñones a un escaldado a una temperatura de aproximadamente 83 grados centígrados para obtener un producto de buen color, también se recomienda que los chiles jalapeños que se van a emplear hayan sido previamente tratados con una

solución de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}$ ) al 0.02%, esto con el fin de minimizar los daños por altas temperaturas”.

En el presente trabajo, se obtuvo experimentalmente una formulación para preparar champiñones en escabeche, así mismo se realizó el estudio de los fenómenos de transferencia de calor que se ven involucrados durante el proceso

de esterilización, haciendo principal énfasis en la conducción del calor que se presenta durante el proceso. Fué mediante la aplicación del método de las diferencias finitas por medio del cual se lograron evaluar y finalmente determinar los valores de las constantes térmicas del sistema : champiñones en escabeche.

## INTRODUCCION

El objeto del presente trabajo consiste principalmente en dar una opción más en lo que se refiere a la conservación de champiñones destinados para el consumo humano mediante el enlatado de los mismos, ya que como se sabe los champiñones frescos debido a su composición química son altamente perecederos y su período de vida útil en frasco se reduce solamente a unos cuantos días utilizando el método de refrigeración para su conservación. Es por ésta razón que el enlatado de champiñones ya sea solos o acompañados de algunos otros ingredientes resulta ser una buena opción para prolongar la vida útil y/o comercial de los champiñones que han de ser destinados para el consumo de la población general.<sup>(11)</sup>

En éste trabajo de tipo experimental se presenta el estudio completo de la conservación de champiñones preparados en escabeche enlatados, partiendo desde la obtención de la formulación, el enlatado, la esterilización y la realización de las pruebas físicas y microbiológicas necesarias que garanticen la calidad y la seguridad de la salud en el consumo del producto enlatado.<sup>(17)</sup>

Es mediante la experimentación a nivel laboratorio de la cual se obtienen los resultados que posteriormente son analizados y mediante los cuales se va estableciendo paso a paso el proceso definitivo del enlatado (esterilización) de los champiñones en escabeche a nivel laboratorio, para finalmente llegar al establecimiento del proceso del enlatado de champiñones en escabeche a nivel industrial.<sup>(25)</sup>

Se realizó el estudio de los factores de transferencia de calor que se presentan en la esterilización de champiñones en latas cilíndricas, evaluándose los valores de la difusividad térmica ( $\alpha$ ) y el valor de la conductividad térmica (K) de nuestro alimento, estableciéndose así mismo el tiempo necesario requerido para esterilizar champiñones preparados en escabeche.

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO**

### **Objetivo general**

Establecer los tiempos requeridos para la esterilización de champiñones en escabeche, mediante el análisis de los factores de transferencia de calor que se involucran durante el proceso.

### **Objetivo particular 1:**

Analizar los factores de transferencia de calor que se involucran en la esterilización por medio de la experimentación, con el fin de determinar las condiciones óptimas del proceso.

### **Objetivo particular 2:**

Evaluar experimentalmente el valor de la difusividad térmica ( $\alpha$ ) para champiñones esterilizados en latas, con el fin de obtener el valor de la conductividad térmica ( $K$ ).

### **Objetivo particular 3:**

Establecer el tiempo necesario para esterilizar champiñones en escabeche en latas cilíndricas.

# C A P I T U L O I

## ANALISIS BIBLIOGRAFICO

### 1.1. ANTECEDENTES

Numerosos estudios de todos los tiempos nos hablan de las propiedades comestibles de algunos hongos, las venenosas de otros y de su gran exquisitez.

En el siglo XVI ya empiezan a ser estudiados dando paso a la micología, cuyo iniciador fue el botánico francés Charles de L'Ecluse. Sin embargo, los progresos más importantes se vienen realizando desde finales del siglo XIX hasta nuestros días.<sup>(27)</sup>

Los hongos, como vemos nunca han sido ignorados y hoy día, gracias al mejor conocimiento que se tiene de los mismos, se plantea la posibilidad del uso de diferentes especies como alimento, alcanzando por ello su mercado en todo el mundo, pero especialmente en las grandes ciudades europeas y del oriente a precios elevados.<sup>(11)</sup>

La fama que tienen se la deben a los ricos sabores y aromas, capaces de satisfacer al más exigente, sin embargo, a las sustancias nitrogenadas, que entran a formar parte de sus composición a las que se debe su principal valor alimenticio que, entre los vegetales, es el más elevado que el de las legumbres por lo que se le denomina "carne de bosque o carne vegetal". Dada la importancia que están alcanzando en la alimentación actual, se han realizado diversos estudios con el fin de determinar su contenido en macro y micronutrientes, así mismo, se han buscado diversas maneras de conservarlos entre las cuales destacan el enlatado (esterilización) y la desecación (deshidratación).<sup>(25)</sup>

En general, el hongo de mayor consumo en la población es el champiñón (*agaricus bisporus*), ya que por ser un hongo cultivado (controlado), no presenta ningún peligro y se consume ampliamente. Sin embargo, no hay que olvidar que

existen otros tipos de hongos aparte del champiñón que se consumen ampliamente como es el caso de las setas.<sup>(17)</sup>

Los hongos comestibles han tenido siempre una gran aceptación y actualmente el consumo de ellos es tan elevado que es preciso llevar grandes cantidades de producto desde lugares de cultivo hasta los lugares de consumo, lo que trae consigo el reto de conservar el producto durante varios días lo que representa elevados costos y en muchas ocasiones ni aún así se logra salvar la totalidad del producto lo que se traduce en muchas ocasiones en grandes pérdidas económicas por lo que es necesario y plenamente justificado el buscar nuevas y mejores opciones para prolongar la vida comercial de los champiñones tan preciados en amplios sectores de la población.<sup>(11)</sup>

## **1.2. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Mecanismos de transferencia de calor existentes (conducción, convección y radiación).

Para comprender la naturaleza de los intercambios de calor entre diferentes tipos de cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos es necesario tener una idea clara de algunos fenómenos asociados al intercambio de energía y a la naturaleza misma de los cuerpos involucrados en dicho intercambio energético.<sup>(18)</sup>

En la fase sólida los átomos o moléculas de una sustancia están muy cercanos dando su característica rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase gaseosa la presencia de energía térmica adicional trae como resultado una separación casi total de los átomos o moléculas del gas, de manera que puedan permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.<sup>(23)</sup>

En los casos en que cualquier cuerpo gane o pierda calor, deben tenerse especiales consideraciones respecto a si el intercambio de calor es latente, sensible o de ambos tipos.<sup>(15)</sup>

Se puede definir la relación de transferencia de calor como el producto de una fuerza motriz por una conductancia térmica. Las fuerzas motrices y las conductancias térmicas resultan ser pues los recíprocos de las resultantes térmicas.<sup>(24)</sup>

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de un cuerpo (fuente) al otro (recibidor), aunque en muchos casos se combinan dos o las tres formas del intercambio calorífico.<sup>(30)</sup>

Las formas de transferencia de calor son las siguientes: Conducción, convección y radiación.



### 1.2.1. CONDUCCION

La transferencia de calor por medio de la conducción se logra a través de dos mecanismos. El primero es la interacción molecular, en la cual las moléculas de niveles energéticos mayores (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes que se encuentran en niveles energéticos inferiores, éste tipo de transferencia sucede en los sistemas que tienen moléculas de sólidos, líquidos o gases y en los que hay un gradiente de temperatura. El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es el de electrones “libres”, los cuales se presentan principalmente en los sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales. La facilidad que tienen los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; por lo tanto, se espera que los metales puros sean los mejores conductores del calor, como así lo confirma la experiencia.<sup>(31)</sup>

Se ha mencionado que la conducción es principalmente un fenómeno molecular que requiere de un gradiente de temperatura como fuerza motriz.

Se atribuye a Fourier una expresión cuantitativa que relaciona el gradiente de temperatura con la naturaleza del medio conductor y la razón de la transferencia del calor; en 1882 presentó la relación

$$q_x = \frac{-K dT}{A dx} \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde:  $q_x$  = Razón de flujo de calor en la dirección de las "x" en (Kcal/hr ó BTU/hr)  
 $A$  = Área normal a la dirección del flujo de calor. En  $m^2$ .  
 $dT/dx$  = Gradiente de temperatura en la dirección de las "x", en  $^{\circ}C/m$  ó  $^{\circ}F/pie$ .  
 $K$  = Conductividad térmica, que tiene unidades de  $Cal/hr.m.^{\circ}C$ . ó  $Btu/hr.pie.^{\circ}F$ . A la relación  $q_x/A$  se le llama flujo de calor direccional en x y esta dada en  $Cal/hr.m^2$  ó  $Btu/hr.pie^2$

La expresión completa para el flujo de calor es  $q/A = -KV_T$  Ec. (2)  
 Donde:  $q$  = Vector de flujo de calor.  
 $V_T$  = Gradiente de temperatura en forma vectorial.

El signo negativo es debido a que el flujo de calor por conducción sucede en la dirección de un gradiente de temperatura decreciente. Estas ecuaciones son respectivamente las formas escalar y vectorial de la ecuación de la relación de Fourier, conocida en ocasiones como la primera ley de Fourier de la conducción del calor.<sup>(24)</sup>

De acuerdo con la ecuación de la relación de Fourier, el flujo de calor es proporcional el gradiente de temperatura, dicha proporcionalidad se representa mediante la conductividad térmica (K). La conductividad térmica es una propiedad de un medio dado, la conductividad térmica es una propiedad muy importante de un material o un medio determinado ya que su conductividad térmica determina su adaptabilidad y conveniencia para un uso determinado. El valor de K para diferentes materiales se evalúa experimentalmente.<sup>(31)</sup>

### 1.2.2. CONDUCTIVIDAD TERMICA

La conductividad térmica es una propiedad termofísica que presenta una interrelación con las propiedades fisicoquímicas de materiales biológicos como son: pérdida de peso y sólidos solubles, las que son determinantes en la calidad final de un producto.<sup>(51)</sup>

Por definición, la conductividad térmica (K) es la facilidad con que el calor es conducido en una sustancia debido al mecanismo de transferencia de calor por conducción, cuyo valor depende básicamente de la composición química, la estructura física, el estado de la sustancia y la temperatura. En el caso de materiales biológicos, la conductividad térmica depende más de la estructura celular, la densidad y la humedad, que del efecto de la temperatura, ya que cuando existe migración de humedad, la conductividad térmica se modifica continuamente.<sup>(23)</sup>

Puesto que no existe una teoría molecular adecuada para los líquidos, la mayoría de las correlaciones para predecir sus conductividades son de tipo empírico. La conductividad térmica de los líquidos varía moderadamente con la temperatura y es esencialmente independiente de la presión.<sup>(8)</sup>

En los sólidos, la conducción del calor se verifica de dos maneras:

- 1). El calor al igual que la electricidad, es conducido por los electrones libres que se mueven en la red estructural del sólido o metal.
- 2). El calor es conducido por la transmisión de energía de vibración entre átomos adyacentes.<sup>(23)</sup>

### 1.2.3. CONVECCION

La segunda forma de transferencia de calor es por convección, la cual involucra el intercambio de energía entre un fluido y una superficie o interfase. Hay dos clases de procesos convectivos, que son la convección forzada en que se fuerza el movimiento de un fluido por una superficie debido al efecto de un agente externo tal como un ventilador o bomba y la convección natural o libre en que los cambios de densidad en el fluido a consecuencia del intercambio de energía provocan un movimiento natural del fluido.<sup>(30)</sup>

En 1701 Sir Isaac Newton expresó por primera vez la ecuación básica de la relación para la transferencia convectiva del calor. Esta expresión muy sencilla, conocida como la razón o “ley de enfriamiento de Newton” es la siguiente:

$$q = hA(\text{Temp. Superficie} - \text{Temp. Fluido}).$$

Donde:  $q$  = Relación de la transferencia convectiva del calor en cal/hr ó Btu/hr.

$A$  = Area normal a la dirección del flujo de calor, en m<sup>2</sup> ó pie<sup>2</sup>.

$(\text{Temp. Superficie} - \text{Temp. Fluido})$  = Fuerza motriz de la temperatura, en °C ó °F.

$h$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor, en cal/hr.m<sup>2</sup> °C. ó Btu/hr.pie<sup>2</sup> °F.

La diferencia de la temperatura se puede escribir  $(T^{\circ} \text{ sup.} - T^{\circ} \text{ fluido})$  o como  $(T^{\circ} \text{ fluido} - T^{\circ} \text{ sup.})$ . Esta fuerza motriz de temperatura determina si la

transferencia de calor es hacia o desde una superficie dada. Se necesita considerar los efectos del momentum descritos por la segunda ley del movimiento de Newton además de los conceptos básicos de transferencia de calor y de la primera ley.

Sin considerar el fenómeno del flujo involucrado, se sabe que la conducción es el mecanismo de transferencia de energía directamente adyacente a una superficie, estas capas conductivas superficiales del fluido o "película" del fluido son las que controlan la razón de la transferencia de calor, con lo que determinan un valor dado para  $(h)$ . Por esta razón se denomina con frecuencia el coeficiente  $(h)$  como el "coeficiente de película".<sup>(18)</sup>

La dificultad para describir los fenómenos convectivos radica en la evaluación del coeficiente de la película.

La ecuación también evalúa la transferencia de energía asociada con los cambios de fase, en especial entre las fases líquida y de vapor. Tanto el proceso de ebullición como el de condensación están asociados con valores de  $(h)$  relativamente altos.<sup>(30)</sup>

Las conductancias para la convección-conducción a través de la pared cilíndrica hueca y conducción a través de una pared plana son:

$K_{\text{convección}} = hA$ , en Cal/hr. °C ó Btu/hr. °F.

$K_{\text{conducción}}$

cilindro hueco =  $2 \quad KL / \ln(ro/ri)$ , en Cal/hr. °C ó Btu/hr. °F.

$K_{\text{conducción}}$

pared plana =  $KA/L$ , en Cal/hr. °C ó Btu/hr. °F.

Se puede decir que los recíprocos de estas cantidades son las resistencias térmicas que ofrece cada mecanismo o geometría.<sup>(16)</sup>

A continuación se presentan algunos valores para  $(h)$  en distintas situaciones convectivas:

**TABLA 1**

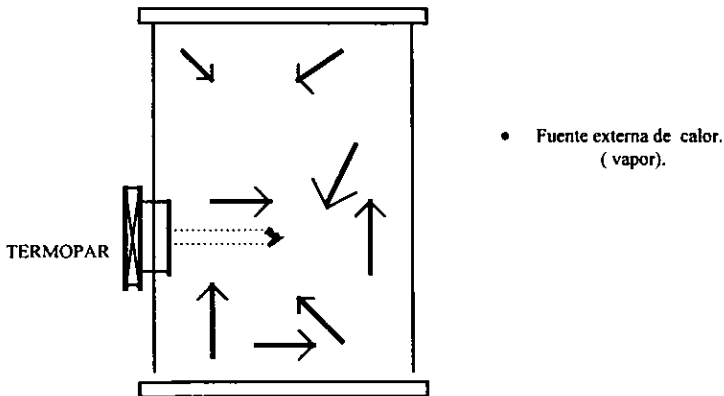
**COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

| Mecanismo                      | h (Btu/hr.pie <sup>2</sup> ° F) ( W/m <sup>2</sup> ° K) |
|--------------------------------|---|
| Vapor de agua en condensación. | 1000 - 20 000 ---- 5000 - 100000                        |
| Agua hirviendo                 | 500 - 5 000 ---- 2500 - 25000                           |
| Convección forzada. (agua)     | 50 - 3 000 ---- 100 - 15000                             |
| Convección forzada. (aire)     | 5 - 100 ---- 10 - 500                                   |
| Convección libre. (aire)       | 1 - 10 ---- 5 - 25                                      |

*Referencia: Procesos de transporte y operaciones unitarias. Geankoplis (1992).*

Considérese a manera de explicación una placa cuya superficie se mantiene a una temperatura ( $T_s$ ) como se muestra en la fig. 1, la cual disipa el calor hacia un fluido cuya temperatura es ( $T_\infty$ ). La experiencia indica que el sistema disipa más calor cuando se le hace pasar aire proveniente de un ventilador, que cuando se encuentra expuesto al aire ambiente simplemente. Deduciéndose que la velocidad del fluido tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor a lo largo de la superficie. De manera análoga, la experiencia indica que el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua o aceite en lugar de aire.<sup>(24)</sup>

**FIGURA 1**  
**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN**



De aquí que las propiedades del fluido deben tener también un efecto importante sobre la transferencia de calor puesto que la velocidad relativa del fluido con respecto a la placa es igual a cero, en la interfase sólido- fluido, el calor se transfiere por conducción solamente en éste plano del fluido. Por consiguiente se calcula el flujo de calor disipado de la siguiente manera:  
 $q' = h(T_s - T_\infty)$ .<sup>(31)</sup> Ec. (3)

Que corresponde a la ley de enfriamiento de Newton.

Donde:  $q'$  = Coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de película, en  $W/m^2 \cdot K$ .

El coeficiente convectivo de transferencia de calor en algunas geometrias sencillas se determina de la siguiente manera:

$$h = \frac{-K (dT/dy) / y = 0}{T_s - T_\infty} \quad \text{Ec. (4)}$$

En el caso de geometrías complejas, el coeficiente de transferencia de calor puede evaluarse mediante el uso de correlaciones empíricas o recurriendo a la experimentación. El proceso de transferencia de calor por convección es muy complejo ya que el coeficiente ( h ) depende de muchos factores, entre otros depende de la geometría del sistema, además de las propiedades físicas y características del flujo del fluido.<sup>(24)(31)</sup>

#### 1.2.4. RADIACION TERMICA

La transferencia de calor por radiación no requiere de un medio para propagarse. De hecho, el intercambio radiante entre las superficies es máximo cuando no hay material que ocupa el espacio intermedio. La transferencia de energía por radiación es un fenómeno electromagnético cuya naturaleza exacta no se conoce. Sin embargo, es posible tratar este tema tan complejo con razonable exactitud.<sup>(18)</sup>

Se llama “cuerpo negro” a un cuerpo perfectamente emisor o absorbente. La razón a la que emite energía radiante el cuerpo negro esta dada por

$$q/A = \sigma T^4. \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: q = Emisión radiante, en cal/hr ó Btu/hr.

A = Area de la superficie de emisión, en m<sup>2</sup> ó pie<sup>2</sup>.

T = Temperatura absoluta, en °K ó °R.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann que numéricamente es igual a 5.67 x 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>.

La ecuación anterior es la ecuación básica de la relación para la emisión de energía radiante y se conoce como la ecuación de la relación de Stefan-Boltzmann o como la ley de Stefan-Boltzmann de la radiación térmica. Stefan postuló dicha ecuación en 1879 en forma empírica y Boltzmann la obtuvo de los principios termodinámicos en 1884.<sup>(24)</sup>



La ecuación de la relación de Stefan-Boltzmann en la forma presentada es una de las más sencillas ya que no se toma en cuenta la geometría, la interacción entre la superficie de emisión y otras superficies o medios que enfrenta, o el comportamiento de cualquier superficie no negra.<sup>(31)</sup>

La radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos. A esta energía se le llama energía radiante y se encuentra en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz y se transmiten a través del vacío, lo mismo lo hacen a través del aire<sup>(10)</sup>

### **1.3. TERMOPARES**

Si producimos una diferencia de temperatura en una varilla, los niveles de energía de los electrones serán diferentes, hay más electrones de alta energía en la región más caliente. Los electrones de alta energía fluirán hacia el extremo frío, produciendo una diferencia en la carga. Si ahora conectamos un voltímetro con alambres de contacto del mismo material, el medidor no mostrará diferencia alguna, pero si los alambres son de un material diferente al de la varilla, habrá un voltaje diferente inducido y el voltaje neto aparecerá en el medidor. Este voltaje es el potencial SEE-BEAC utilizado en los termopares. Los termopares más comunes son:

CROMEL (90% Ni, 10%Cr) Vs ALUMEL (94% Ni, 2% Al, 3% Mn, 1% Si)<sup>(19)</sup>

La definición de un termopar es la siguiente:

Par de materiales unidos que desarrollan una fuerza eléctrica (FEM) cuando una unión está a una temperatura diferente de la otra.<sup>(18)</sup>

Si hacemos una investigación de los metales empleados para termopares vemos que muchos son metales de transición., esto se debe a que la distribución de los electrones en diversos niveles de energía muestra la mayor diferencia con la temperatura en metales con capas 3d y 4f sin llenar<sup>(24)</sup>

Existen gran variedad de situaciones de transferencia de calor por conducción en estado estable en donde la transferencia de calor se lleva a efecto en dos y hasta en tres dimensiones, es decir, la temperatura depende de dos o tres coordenadas direccionales.(24)

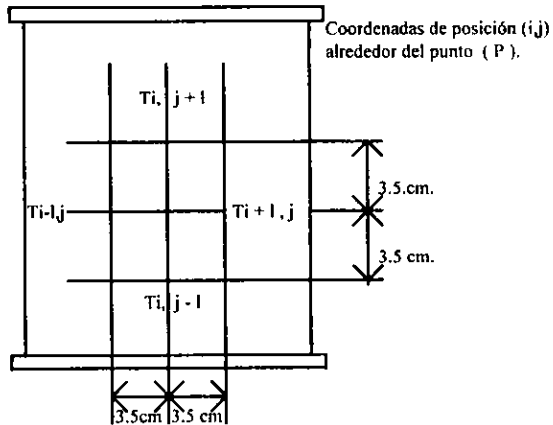
En la actualidad existen varias técnicas o métodos de solución para resolver problemas de transferencia de calor por conducción en dos o tres coordenadas. Generalmente estos métodos de solución se clasifican de acuerdo a su naturaleza en: Analíticos, gráficos, analógicos y numéricos, dentro de esta clasificación, los métodos numéricos son los de más amplia aplicación debido a su relativa facilidad y al gran avance en el campo de la computación digital que hace más rápida la obtención de resultados de una gran cantidad de datos y operaciones matemáticas.(30)

### **1.5. METODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS**

En el análisis de diferencias finitas se considera que el sistema en cuestión está constituido por elementos de volumen muy pequeño pero finitos. Al hacer el tamaño de estos elementos cada vez más pequeño, la diferencia en los resultados obtenidos usando el modelo de diferencias finitas y el modelo diferencial disminuye. En el análisis de conducción bidimensional por diferencias finitas, el principio de conservación de energía se aplica a un elemento de profundidad unitaria, de ancho "x" y altura "y". El conjunto de todos estos elementos constituye una red.(18) (23)

El centro de cada volumen finito se conoce como nodo y se supone que el análisis que la temperatura de éste representa la temperatura de todo elemento. (18)

**FIGURA 2**  
**COORDENADAS DE POSICIÓN (i,j)**



Diferencias finitas en coordenadas cilíndricas.

De acuerdo a la segunda ecuación de Fourier para conducción de calor en coordenadas cilíndricas.

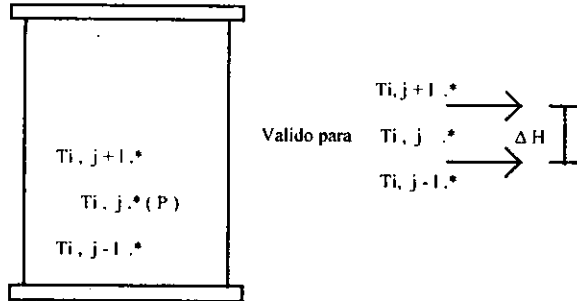
$$1/r (\partial T / \partial r) + \partial^2 T / \partial r^2 + \partial^2 T / \partial z^2 = 1/\alpha (\partial T / \partial t) \text{ o bien} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\partial T / \partial t = \alpha (1/r \partial / \partial r + \partial^2 T / \partial r^2 + \partial^2 T / \partial z^2) \quad \text{Ec. (7)}$$

Como la técnica numérica de las diferencias finitas consiste en transformar los diferenciales en incrementos, se tiene:

**FIGURA 3**  
**COORDENADAS DE POSICIÓN (i,j)**

A).- En dirección axial ( Z ).



Por lo tanto se tiene:

$$(\partial T / \partial z)_{\text{intervalo superior}} = \Delta T / \Delta z = \frac{(T_{i,j+1}) - (T_{i,j})}{\Delta H} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$(\partial T / \partial z)_{\text{intervalo inferior}} = \Delta T / \Delta z = \frac{(T_{i,j}) - (T_{i,j-1})}{\Delta H} \quad \text{Ec. (9)}$$

Sacando segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{(\partial T / \partial z)_{\text{intervalo superior}} - (\partial T / \partial z)_{\text{intervalo inferior}}}{\Delta H} \quad \text{Ec. (10)}$$

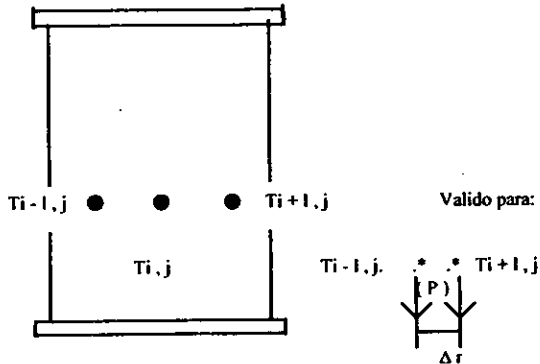
Sustituyendo:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{(T_{i,j+1}) / \Delta H - (T_{i,j} - T_{i,j-1}) / \Delta H}{\Delta H} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j} - T_{i,j} + T_{i,j-1}}{(\Delta H) / (\Delta H)} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{(\Delta H)^2} \quad \text{Ec. (12)}$$

**FIGURA 4**  
**COORDENADAS DE POSICIÓN (i,j)**

B).- En dirección radial ( r )



Hacia la derecha del punto ( P ) se tiene:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\Delta T}{\Delta r} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta r} \quad \text{en } r = \Delta r / 2 \quad \text{Ec. (13)}$$

Hacia la izquierda se tiene:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\Delta T}{\Delta r} = \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{(\Delta r)^2} \quad \text{en } r = \Delta r / 2 \quad \text{Ec. (14)}$$

Sustituyendo:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j} + T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta r} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta r} \quad \text{Ec. (15)}$$

Sacando segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j} + T_{i-1,j} - T_{i,j}}{(\Delta r)(\Delta r)} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta r)^2} \quad \text{Ec. (16)}$$

La ecuación resultante para las dos direcciones es:

$$\begin{aligned} \frac{(\Delta T / \Delta t)_{i,j}}{\alpha} &= \frac{(T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j})}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{i+1,i} - 2T_{i,j} + T_{i-1,i}}{(\Delta r)^2} \\ &+ \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{(\Delta H)^2} \end{aligned} \quad \text{Ec. (17)}$$

Si a este resultado lo llamamos ( \* ) tendremos la siguiente expresión:

$$(\Delta T / \Delta t)_{i,j} = \alpha *$$

Si al término (  $\Delta T / \Delta t$  )<sub>i,j</sub> ahora lo llamamos ( y ), tenemos la siguiente expresión:

$$y = \alpha * \quad \text{ó bien:} \quad \Delta T / * \alpha = \Delta t \quad \text{Ec. (18)}$$

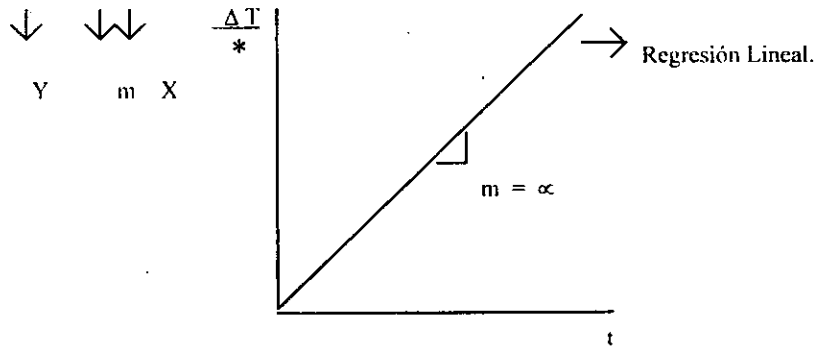
- Donde:  $T = T - T_0$   
 $t = t - t_0$  como tiempo inicial igual a cero,  $t_0 = 0$ ,  $t = t$   
 $\alpha =$  Difusividad térmica.  
 $K =$  Conductividad térmica.  
 $\rho =$  Densidad  
 $C_p =$  Calor específico.

De acuerdo con estos datos, la ecuación resultante y con datos experimentales se construye una gráfica del siguiente tipo:(31)

**FIGURA 5**  
**GRÁFICA RESULTANTE**

$$\Delta T / * = \alpha t$$

Ec. (19)



De la cual mediante regresión lineal se obtiene el valor de la pendiente ( m ) que es igual a (  $\alpha$  ).

## **1.6. APLICACION DE ESTERILIZACION EN SALMUERAS**

La esterilización por calor es aquella operación unitaria en la que los alimentos son calentados a una temperatura suficientemente elevada y durante un tiempo suficientemente largo, como para destruir en los mismos la actividad microbiana y enzimática. Los alimentos estabilizados por este sistema poseen una vida útil superior a seis meses.<sup>(28)</sup>

El tiempo de esterilización de un alimento depende de:

- 1). La termoresistencia de los microorganismos y enzimas eventualmente presentes.
- 2). El PH del alimento.
- 3). El tamaño y geometría del envase.
- 4). El estado físico del alimento.

De entre los microorganismos patógenos esporulados eventualmente presentes en los alimentos de baja acidez (PH>4.5) EL CLOSTRIDIUM BOTULINUM es el más peligroso. Este microorganismo que es capaz de crecer en condiciones de anaerobiosis en envases cerrados, elimina al medio una exotoxina muy potente que es mortal para el ser humano. Por eso los procesos de esterilización se diseñan para que como mínimo sean capaces de su destrucción.<sup>(6)</sup>

El objetivo de la esterilización en los alimentos ácidos (PH 3.7) consiste en inactivar las encimas que han sido liberadas por los microorganismos.<sup>(28)</sup> Para que este proceso produzca los resultados deseados, la carga microbiana inicial debe mantenerse lo más baja posible y esto se puede lograr escaldando los alimentos a una temperatura mínima de 80° C.<sup>(11)</sup>

En la actualidad se ha generalizado el uso de la temperatura digital en el análisis, con el propósito de hacer estimaciones de la penetración de calor que se realiza en la esterilización de alimentos enlatados.<sup>(4)</sup>



En el análisis de la penetración de calor se pretende saber cual es la cantidad de calor mínima necesaria para que el sistema alimenticio alcance el grado de “esterilidad comercial” que es la destrucción de todo microorganismo que resulte ser patógeno y que ponga en riesgo la salud del consumidor.<sup>(13)</sup>

Siempre que se desea esterilizar un sistema alimenticio, se busca causar el menor daño posible a las propiedades físicas y nutricionales del alimento, sobre todo de aquellos alimentos que son susceptibles a las altas temperaturas.<sup>(14)</sup>

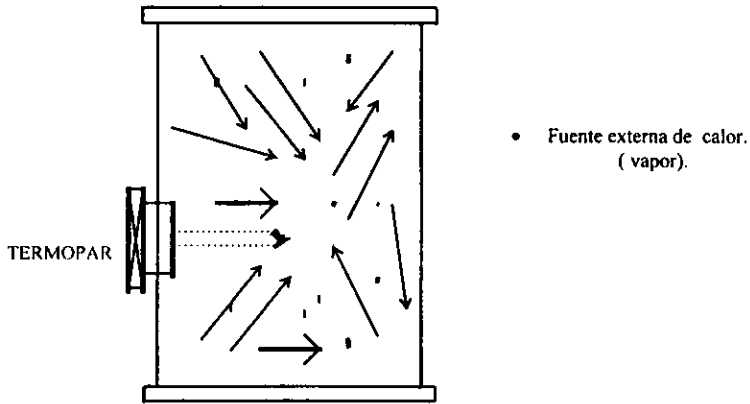
Si el sistema alimenticio es líquido o contiene en mayor proporción un líquido de baja viscosidad, la distribución del calor dentro de la lata será por convección. ( Fig. 6).

Si se trata de un sistema sólido como carne o pescado por ejemplo, o un sistema de alta viscosidad como crema de elote, la penetración de calor será por conducción. ( Fig. 7).<sup>(4)</sup>

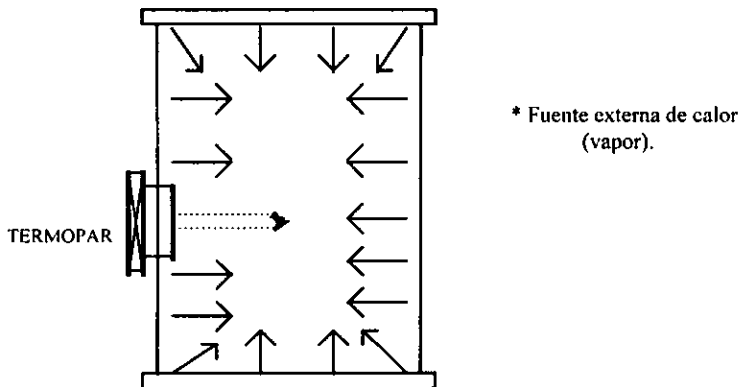
En sistemas alimenticios compuestos por sólidos en mayor proporción respecto a otra proporción líquida y en los cuales no existe agitación, el mecanismo por el que se transfiere el calor es por conducción, ya que el calor se transfiere de molécula a molécula.<sup>(28)</sup>

La agitación durante la esterilización de alimentos enlatados, efectivamente reduce el tiempo y la temperatura de esterilización, pero éste procedimiento sólo se puede aplicar en alimentos que no sufren daños físicos durante la agitación.<sup>(28)</sup>

**FIGURA 6**  
**PENETRACIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN**



**FIGURA 7**  
**PENETRACIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN**



En los procesos que se realizan a elevadas temperaturas y en períodos cortos de tiempo, se corre el riesgo de causar daños considerables a la calidad del alimento que esta siendo procesado.<sup>(4)</sup>

La intensidad del tratamiento térmico y el grado de prolongación de su vida útil se hallan determinados principalmente por el PH del alimento. El objetivo principal de los alimentos de baja acidez ( $\text{PH} > 4.5$ ) consiste en la destrucción de las bacterias patógenas, mientras que en los alimentos de PH inferior a 4.5 suele ser más importante la destrucción de los microorganismos causantes de su alteración y la inactivación de las enzimas que producen.<sup>(28)</sup>

Para poder determinar el tiempo de tratamiento necesario para alcanzar la "Esterilidad comercial" es necesario disponer de los datos de penetración de calor en el envase durante el tratamiento térmico así como de la naturaleza propia del alimento.<sup>(28)</sup>

Los productos líquidos o particulados (por ejemplo: guisantes o vegetales en salmuera) en los que se pueden presentar corrientes de convección natural, se calientan más rápidamente que los alimentos sólidos como pastas a base de carne, en los que el calor se transmite solamente por conducción.<sup>(4)</sup>

En los alimentos cuya composición es mayormente sólidos que líquidos, la penetración del calor es principalmente por conducción. En los alimentos que se calientan por conducción, el factor más importante de penetración del calor lo presenta su conductividad térmica.<sup>(28)</sup>

La velocidad de penetración de calor se mide colocando un termopar en el centro térmico (punto más frío) del envase y registrando la temperatura a lo largo del proceso, se asume que en el resto de los puntos del envase reciben más calor y que por lo tanto, el proceso es suficiente.<sup>(10)</sup>

En envases cilíndricos, por lo general el centro térmico (punto frío) de aquellos alimentos que se calientan por conducción se encuentra aproximadamente en el centro geométrico y en los que se calientan por convección, en un punto situado en el eje geométrico longitudinal.<sup>(28)</sup>

## **1.7. PROCESO DE ESTERILIZACION**

Durante el proceso de esterilización de productos alimenticios enlatados, es importante considerar desde el punto de vista de transferencia de calor, los factores que limitan o propician dicha transferencia. Dentro de los factores más importantes, se cuentan los siguientes:

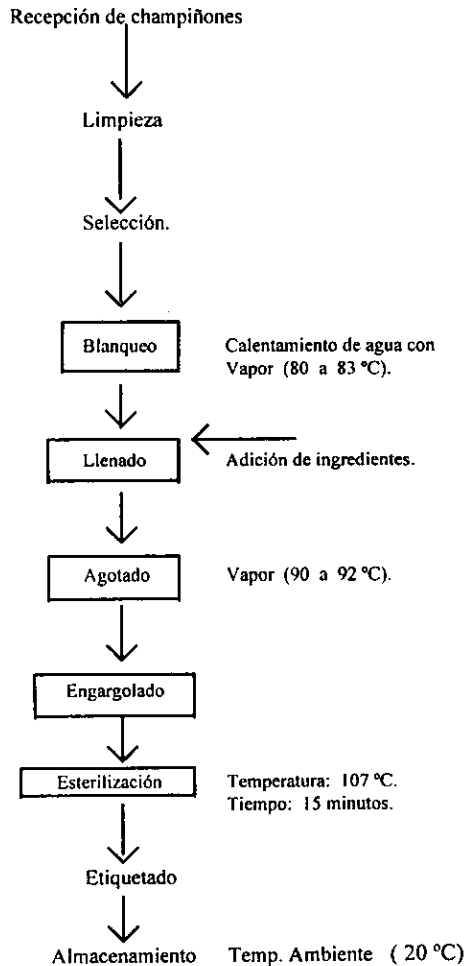
- 1) Tipo de producto: En los productos líquidos se presentan corrientes convectivas naturales (debido a diferencia de densidades por efecto de la temperatura), lo que propicia un calentamiento más rápido que en los alimentos sólidos o semisólidos, los cuales se calientan principalmente por conducción.
- 2) Tamaño del envase: La penetración de calor hasta el centro del envase es más rápida cuanto más pequeño sea el envase.
- 3) Agitación del envase: Para alimentos viscosos o semisólidos, la agitación del envase ayuda a que el calentamiento sea más rápido.
- 4) Temperatura del autoclave: Un mayor salto térmico entre el alimento y el medio de calentamiento hace que la penetración del calor sea más rápida.
- 5) Tipo de envase: La conductividad térmica de los materiales es muy distinta, la de los envases metálicos es más elevada que la de los de vidrio o plástico.

La vida útil de los alimentos esterilizados depende de la capacidad del envase para aislar por completo el alimento de su entorno. Los principales tipos de envases esterilizables son: Latas, botellas de vidrio y bolsas flexibles.

La condensación del vapor en la cara externa del envase transfiere al alimento el calor latente de condensación. Una vez finalizada la esterilización, los envases se enfrían (dentro del autoclave) con agua fría. En esta operación, el vapor que éste contiene se condensa rápidamente, pero el contenido de las latas se enfría más lentamente. Una vez que el contenido de las latas ha alcanzado la temperatura de aproximadamente 100 grados centígrados, la sobrepresión de aire se elimina y el enfriamiento continúa hasta que el contenido alcanza unos 40 grados centígrados, a esta temperatura, los envases mojados se secan rápidamente con lo que el riesgo de corrosión desaparece y los adhesivos de las etiquetas se secan rápidamente. Con esto, la vida útil del producto es como mínimo de seis meses, sin que sea preciso mantenerlos en refrigeración.

**1.7.1. DIAGRAMA DE BLOQUES Y CONDICIONES DE TRABAJO PARA EL ENLATADO DE CHAMPIÑONES A NIVEL INDUSTRIAL**

**FIGURA 8**  
**DIAGRAMA DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE CHAMPIÑONES EN ESCABECHE**



### **1.7.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y DEL PROCESO**

#### **RECEPCIÓN:**

La recepción se realiza vertiendo el producto fresco en tinas llenas de agua.<sup>(4)</sup>

#### **LIMPIEZA:**

Se eliminan todas las materias extrañas al producto ya sea en seco o en húmedo.<sup>(4)</sup>

#### **SELECCIÓN:**

Se seleccionan por tamaño y calidades el producto que va a ser sometido a proceso. Y separando aquel que no reúne las características deseadas.<sup>(14)</sup>

#### **BLANQUEO:**

Los champiñones ya seleccionados son sometidos a un blanqueo (escalado) con vapor de agua hasta alcanzar una temperatura de 83 °C, esto con el propósito de destruir aquellas enzimas que causan oscurecimiento o pigmentaciones en el producto y además para dar una mejor coloración blanca al producto.<sup>(27)</sup>

#### **ENVASADO:**

Se realiza la adición de todos los ingredientes que acompañan a los champiñones dentro de la lata sólidos y líquidos, todos los ingredientes han sido pesados y medidos previamente.<sup>(4)</sup>

#### **AGOTADO:**

El agotado consiste en elevar la temperatura de los ingredientes contenidos dentro de la lata con el fin de provocar el desplazamiento del aire presente en la parte superior de la lata y con ello lograr el vacío interno en las latas al momento de ser engargoladas ( tapadas).<sup>(4)</sup>

### ENGARGOLADO:

El engargolado o tapado de las latas, se realiza inmediatamente después de alcanzar la temperatura establecida para el agotado ( 93 °C ). El engargolado es muy importante, ya que es en éste momento donde se podría perder el vacío dentro de las latas, lo cual se manifiesta en la esterilización con el esponjamiento de las mismas.<sup>(13)</sup>

### ESTERILIZACIÓN:

La esterilización se puede dividir en tres partes:

- a) La etapa de calentamiento.
- b) La etapa de sostenimiento.
- c) La etapa de enfriamiento.

a) La etapa de calentamiento se considera desde el momento en que se cierra el autoclave lleno de latas hasta el momento en que se alcanza la temperatura de esterilización ( 107 °C ).<sup>(4)</sup>

b) La etapa de sostenimiento es el tiempo en el que se mantiene la temperatura de esterilización ( 107 °C ) necesario para asegurar la destrucción de todos los microorganismos patógenos, para champiñones en escabeche es de 15 minutos.<sup>(4)</sup>

c) La etapa de enfriamiento se considera como el tiempo que tarda en descender la temperatura interna de la lata de 107 °C hasta aproximadamente 40 °C. Esto sirve para provocar un choque térmico en aquellos microorganismos resistentes al calor, por lo que el enfriamiento debe ser lo más rápido posible.<sup>(4)</sup>

### ALMACENAMIENTO:

Una vez concluido el proceso, las latas esterilizadas son almacenadas a temperatura ambiente.<sup>(11)</sup>

## EQUIPO PARA LA ESTERILIZACIÓN DE CHAMPIÑONES EN ESCABECHE

Para el enlatado de champiñones en escabeche es necesario contar con el siguiente equipo:

- **TINAS DE RECEPCIÓN**

Es donde se reciben los champiñones frescos ya sea de los centros de cultivo o de cámaras de refrigeración, las tinas pueden contener agua o en seco.

Posteriormente los champiñones pasan a las bandas transportadoras donde se realiza simultáneamente la limpieza y la selección de los mismos.<sup>(4)</sup>

- **TUNEL DE BLANQUEO**

Por medio de las bandas transportadoras se pasan los champiñones a través de un túnel de inmersión de agua la cual es calentada mediante vapor hasta alcanzar 83 °C, con lo cual se realiza el blanqueo (escaldado) de los champiñones.<sup>(4)</sup>

- **BALANZAS Y MEZCLADORA DE INGREDIENTES**

Los champiñones blanqueados y el resto de los ingredientes son pesados y medidos, para posteriormente ser mezclados y envasados en las latas.<sup>(4)</sup>

- **TÚNEL DE AGOTAMIENTO**

Las latas llenas con todos los ingredientes se hacen pasar por medio de bandas transportadoras por un túnel donde se les inyecta directamente vapor de agua hasta alcanzar la temperatura de agotado que es de 93 °C.<sup>(14)</sup>



- **ENGARGOLADO O ENLATADORA**

Las latas calentadas a 93 °C y aún abiertas son pasadas a la engargoladora donde son tapadas (selladas) al vacío.<sup>(27)</sup>

- **AUTOCLAVE**

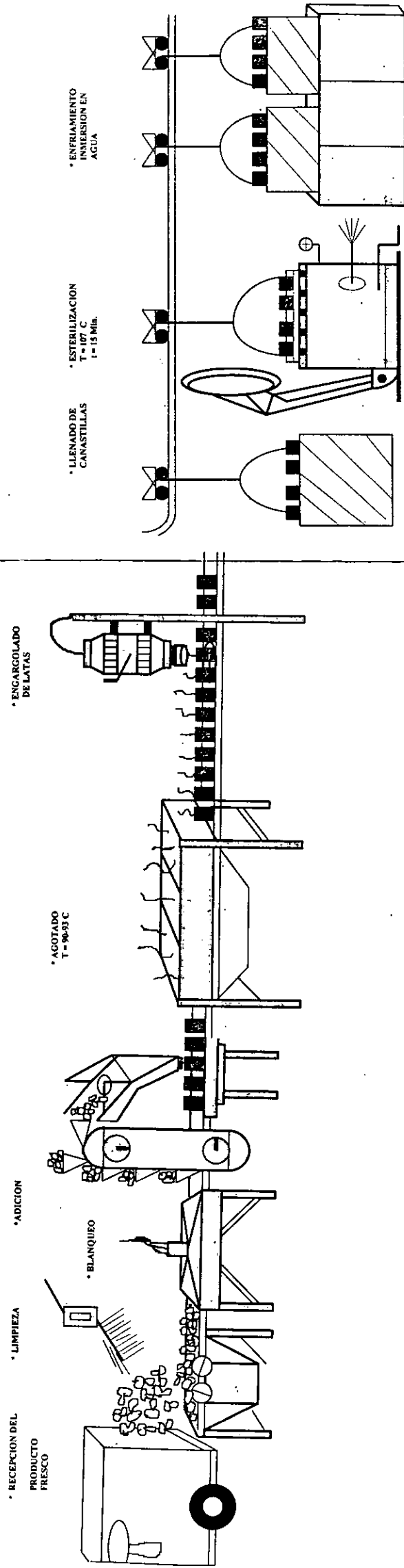
Las latas ya cerradas son acomodadas dentro de canastillas que a su vez son introducidas al autoclave y se inicia el proceso de esterilización inyectando directamente vapor de agua a la cámara del autoclave durante el tiempo y temperatura establecidas.<sup>(4)</sup>

- **TINAS DE INMERSIÓN**

Una vez concluido el proceso de esterilización la canastilla contenedora de las latas es inmediatamente conducida e introducida en tinas que contienen agua a temperatura ambiente ( 20 °C) con lo que se realiza un enfriamiento rápido de las latas.<sup>(6)</sup>

Una vez concluidas todas las fases del proceso, las latas son etiquetadas y almacenadas a condiciones de temperatura y humedad ambientales.<sup>(11)</sup>

FIGURA 9  
 DIAGRAMA DE LAS OPERACIONES DEL ENLATADO (4)



## C A P I T U L O    I I

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 2.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental se dividió en varias etapas con el fin de cumplir con cada uno de los objetivos planteados, para ello se diseñaron los experimentos que a continuación se presentan.

#### **ETAPA EXPERIMENTAL 1**

##### **VALIDACIÓN DE TERMOPARES Y CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE.**

En esta etapa experimental se validaron los instrumentos de medición de temperatura que fueron utilizados en todas las etapas de experimentación.

Los instrumentos que se validaron fueron: termopares de cromel - alumel tipo aguja de 2 mm. de diámetro y 10 cm. de largo. La validación se realizó utilizando dos medios físicos diferentes que fueron agua y aceite comestible. En la validación en agua se tomó como referencia el punto de ebullición de la misma 96° C (para Cuautitlán, Edo. de México) y en la validación en aceite se tomó como referencia la temperatura de esterilización ( 107 °C).

##### 2.1.1. EXPERIMENTO 1    VALIDACIÓN DE TERMOPARES

Variable Independiente: Tiempo ( t ). [ Min]

Nivel de Variación: 3 Min.

Variable Dependiente: Temperatura ( T ). [°C]

Variable de Respuesta:

Las pruebas de validación a que se sometieron los resultados obtenidos fueron:

##### a) *PRECISIÓN*

Se realizaron 16 mediciones de temperatura con cada termopar, cada 3 min. midiendo directamente los datos de temperatura que marcaban los termopares introducidos en el agua y el aceite contenidos en los vasos de precipitado.

El análisis estadístico al que se sometieron los datos obtenidos fue el de la técnica de coeficiente de variación.<sup>(6)</sup>

b) *REPETIBILIDAD*

Se realizaron 16 mediciones de temperatura con cada termopar cada 3 min. directamente de los termopares introducidos en el agua y el aceite.

El análisis estadístico al que se sometieron los resultados obtenidos fue el análisis de varianza<sup>(6)</sup>

c) *LINEALIDAD*

Se calentó el agua hasta alcanzar el punto de ebullición (96°C) y el aceite se calentó hasta 107°C y posteriormente se fue midiendo el enfriamiento a periodos constantes de tiempo.

Se realizó un análisis de regresión lineal a los datos de tomas de lectura de cada termopar por triplicado.<sup>(6)</sup>

d) *EXACTITUD*

A los datos obtenidos experimentalmente se les practicó el coeficiente de variación.<sup>(6)</sup>

e) *REPRODUCTIBILIDAD*

Se hicieron tomas de lecturas de termopares con los termopares introducidos directamente en el agua y aceite, manteniendo constantes todas las condiciones de trabajo. Se tomaron 16 mediciones de temperatura en 4 lapsos diferentes de tiempo.

A los resultados obtenidos se les hizo un análisis de covarianza.<sup>(6)</sup>

A partir de todas las pruebas y análisis estadísticos se eligió el termopar que reunió la mayor cantidad de atributos, el cual nos sirvió como termopar patrón y todos los demás termopares se ajustaron a él mediante una ecuación de la forma

$$y = mx + b$$

NOTA: Después de la elección del termopar patrón y del ajuste de corrección de temperatura de todos los demás termopares, los datos de temperaturas de aquí en adelante son valores de temperatura corregidos.

### 2.1.2. EXPERIMENTO 2 CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE

Variable independiente: Presión ( P ) [Kg/Cm<sup>2</sup>]

Variable dependiente: Temperatura ( T ) [°C]

Variable de respuesta: Presión a manejar. [Kg/Cm<sup>2</sup>]

Nivel de variación: 0.2 Kg/Cm<sup>2</sup>.

La caracterización del autoclave, se realizó con la finalidad de determinar si había homogeneidad en la distribución de la temperatura en la cámara de la misma.

Para la ubicación de los termopares dentro del autoclave, la cámara de ésta se dividió en 50 partes y cada una de las 5 posiciones para cada termopar se obtuvo mediante la utilización de números aleatorios.<sup>(2)(3)</sup>

La colocación de los termopares dentro de la cámara del autoclave fué la siguiente:

**FIGURA 10**

#### UBICACIÓN DE LOS TERMOPARES DENTRO DE LA CÁMARA DEL AUTOCLAVE.

|  |    |    |    |  |
|--|----|----|----|--|
|  |    | 3  |    |  |
|  | 12 |    |    |  |
|  |    | 23 |    |  |
|  |    |    | 39 |  |
|  |    | 43 |    |  |
|  |    |    |    |  |
|  |    |    |    |  |
|  |    |    |    |  |
|  |    |    |    |  |
|  |    |    |    |  |

Se manejaron 3 diferentes presiones del vapor de alimentación que fueron 1.0, 1.2 y 1.4 kg/cm<sup>2</sup>. para la caracterización del autoclave con el propósito de elegir aquella presión que nos diera la temperatura de esterilización que en este caso es de 107 °C en el menor tiempo posible.

## ETAPA EXPERIMENTAL 2

OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA FORMULACIÓN DEL SISTEMA "CHAMPIÑONES EN ESCABECHE" Y LOCALIZACIÓN DEL PUNTO FRÍO DENTRO DE UNA LATA.

### 2.2. EXPERIMENTO 3 OBTENCIÓN DE LA FORMULACIÓN DEL SISTEMA " CHAMPIÑONES EN ESCABECHE "

#### PRIMERA FORMULACIÓN.

|             |  |
|-------------|--|
| Champiñones | 217.0 g (escalados con agua a 80°C por 3 min). |
| Chiles      | 43.0 g   |
| Zanahoria   | 50.0 g   |
| Cebolla     | 39.5 g   |
| Vinagre     | 100.0 ml.                                      |
| Agua        | 300.0 ml.                                      |
| Aceite      | 7.0 ml.  |

#### SEGUNDA FORMULACIÓN.

|             |  |
|-------------|--|
| Champiñones | 321.6 g (escalados con agua a 80°C por 3 min). |
| Chiles      | 48.7 g   |
| Zanahoria   | 88.6 g   |
| Cebolla     | 40.0 g   |
| Vinagre     | 130.0 ml.                                      |
| Agua        | 260.0 ml.                                      |
| Aceite      | 7.0 ml.  |
| Sal         | 5.0 g.   |

Con esta formulación se obtuvo un producto de sabor muy ácido y de fuerte olor, además de que los chiles siguen presentando mucha dureza al tacto.

#### TERCERA FORMULACIÓN.

|                  |   |
|------------------|---|
| Champiñones      | 321.6 g (escalados con agua a 83°C por 3 min).    |
| Chiles jalapeños | 48.7 g (tratados con cloruro de calcio al 0.02 %) |
| Zanahoria        | 88.5 g  |
| Cebolla          | 39.5 g  |
| Sal (NaCl)       | 5.0 g   |
| Vinagre          | 130.0 ml.   |
| Agua             | 260.0 ml.   |
| Aceite           | 7.0 ml.   |

En esta formulación se obtuvo un producto de buen sabor, olor agradable y la dureza tanto de los chiles como de los champiñones ha desaparecido, por lo que bajo estas condiciones de proceso se obtiene un producto final de buenas condiciones físicas, organolépticas y con un valor de PH dentro de la norma establecida.

Con éste experimento se logró obtener una formulación adecuada y satisfactoria en términos de un producto agradable a los sentidos y que reuniera las características necesarias para ser comercializado.

Los experimentos que se realizaron fueron del tipo de prueba-error, hasta que se obtuvo el sistema que satisficiera todas las condiciones que exige un producto que va a ser comerciable.

Se realizaron pruebas de esterilización con las siguientes variantes:

- a) Esterilización del sistema variando las cantidades de los ingredientes hasta llegar a las proporciones de los ingredientes definitiva.
- b) Esterilización del sistema con ingredientes previamente escaldados a 83°C. Los ingredientes que se escaldaron fueron los champiñones y la zanahoria.
- c) Se variaron los tiempos de sostenimiento de la temperatura de esterilización con el fin de determinar el efecto de la temperatura sobre el producto, los tiempos manejados fueron: 22 min., 20 min., 18 min. Y 15 min.

A partir de esta prueba se eligió el tiempo de esterilización definitivo a manejar y que nos diera como resultado un producto de buenas características físicas y organolépticas.

La temperatura de esterilización manejada fue de 107 -110 °C.

- d) Esterilización del sistema con la utilización de aditivos químicos para mejorar las características físicas y organolépticas del producto. En éste caso se utilizó cloruro de calcio a diferentes concentraciones.

### ETAPA EXPERIMENTAL 3

#### 2.3. EXPERIMENTO 4. LOCALIZACIÓN DEL PUNTO FRÍO DENTRO DE LA LATA CONTENEDORA DEL SISTEMA (GEOMETRÍA CILÍNDRICA)

Este experimento tuvo como propósito el determinar si existía un punto dentro de la lata, llena de producto en el cual se registrara una temperatura mínima con respecto al resto de la lata, en otras palabras, el punto o región en la cual se tarda más tiempo en alcanzar la temperatura de esterilización.

Variable Independiente: Tiempo ( t ) [Min].

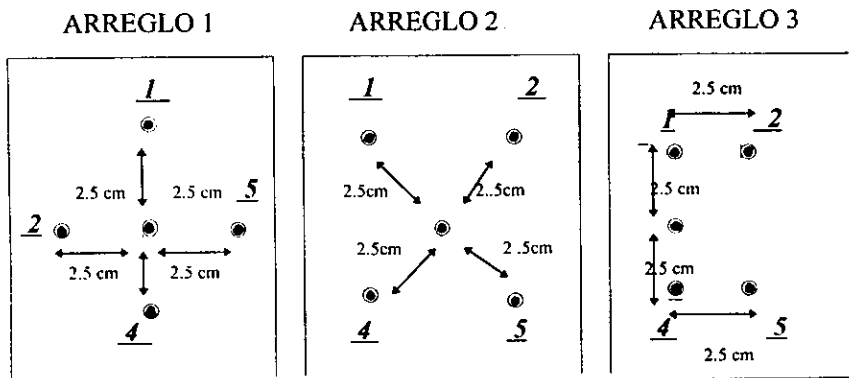
Niveles de Variación: 1 Min.

Variable Dependiente: Temperatura ( T ) [°C].

Para la realización de éste experimento, se realizaron mediciones de temperatura con respecto al tiempo y considerando 3 arreglos diferentes de 5 termopares en cada lata, teniendo 15 posiciones diferentes de los termopares en la lata.

**FIGURA 11**

#### POSICION DE TERMOPARES



Los números grandes representan el número de termopar introducido en la lata.



En cada uno de los arreglos propuestos se hicieron pruebas por triplicado, tomando 2 cifras significativas; en cada toma de lectura. En todos los casos la presión que se manejó fue de  $1.4 \text{ kg/cm}^2$  . Los datos de temperatura se graficaron con respecto al tiempo y se analizaron para concluir si existía o no un punto frío dentro de la lata.

### 2.3.1. EVALUACIÓN DE LA DIFUSIDAD TÉRMICA ( $\alpha$ ) PARA EL SISTEMA “CHAMPIÑONES EN ESCABECHE”

Una vez localizado el punto frío dentro de la lata, se realizaron pruebas de esterilización tomando lecturas de temperatura alrededor del punto frío colocando los termopares en coordenadas de posición ( i , j ) a distancias fijas y conocidas.

Con los datos de las lecturas tomadas, se construyeron historias térmicas graficando el tiempo ( t ) en el eje de las “ x “ contra la temperatura ( T ) en el eje de las “ y “.

Mediante la aplicación del método de las diferencias finitas y utilizando la segunda ecuación de Fourier para la conducción de calor en coordenadas cilíndricas, se obtuvo una ecuación particular para este caso la cual tiene la forma:

$$y = mx \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

**y** = Término resultante de la aplicación de la técnica de las diferencias finitas en coordenadas ( i , j ) a la 2ª ecuación de Fourier para la conducción del calor.

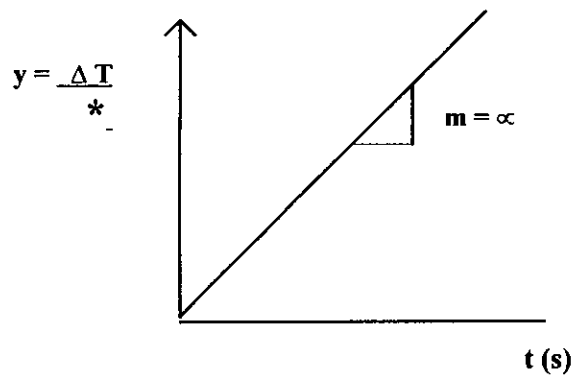
**x** = Tiempo de esterilización.

**m** = Difusidad térmica.

**FIGURA 12**

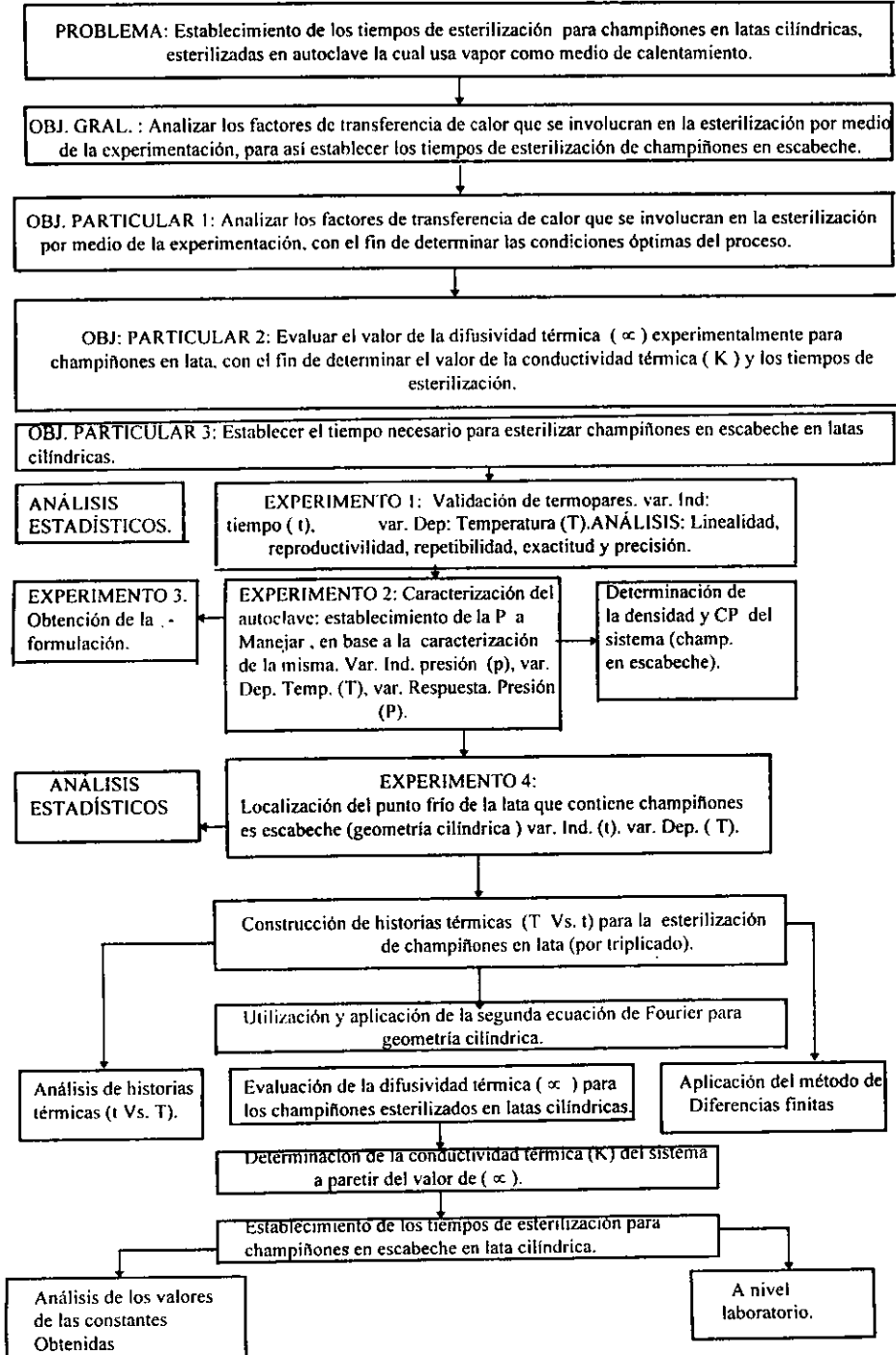
GRÁFICA RESULTANTE PARA HALLAR EL VALOR DE  $\alpha$

Por lo tanto se construyó una gráfica de la forma:



Donde:  $\frac{\Delta T}{*}$  = Término particular para éste caso obtenido a través del método de las diferencias finitas.  
t = Tiempo de esterilización.  
m = Difusividad térmica ( $\alpha$ ).

## 2.4. CUADRO METODOLÓGICO



# CAPITULO III

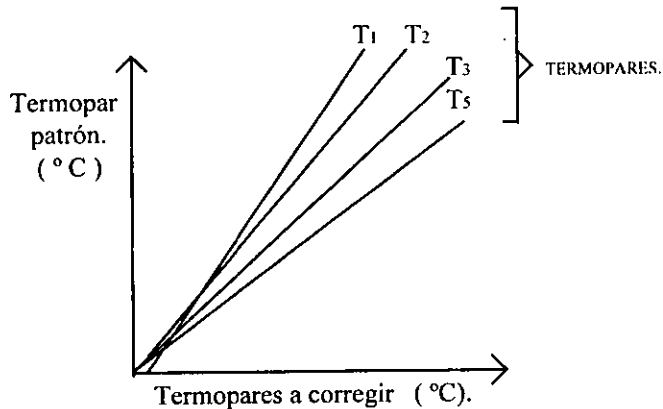
## ANALISIS DE RESULTADOS

### 3.1. VALIDACIÓN DE TERMOPARES

En la figura 13 se presenta la gráfica de resultados obtenidos en las pruebas realizadas en la validación de los termopares, una vez elegido el termopar patrón.

Los termopares a corregir presentan una relación lineal y proporcional con respecto al termopar patrón.

**FIGURA 13**  
GRÁFICA DE CORRECCIÓN DE TEMPERATURAS



A partir de ésta gráfica se obtuvieron las ecuaciones de corrección de temperaturas para cada termopar, siendo las siguientes:

$$T_{c1} = 1.09 ( T_1 ) - 3.41 \text{ ----- Ec. 21}$$

$$T_{c2} = 0.97 ( T_2 ) + 1.04 \text{ ----- Ec. 22.}$$

$$T_{c3} = 0.94 ( T_3 ) + 1.95 \text{ ----- Ec. 23}$$

$$T_{c5} = 1.00 ( T_5 ) + 0.83 \text{ ----- Ec. 24}$$

La obtención de las ecuaciones de corrección se realizó mediante regresión directa con calculadora.

La temperatura inicial e referencia que se utilizó en éste experimento fue de 30 °C y la temperatura final fue la de ebullición del agua que es de aproximadamente 96 °C en Cuautitlán Estado de México.

### **PRECISION**

Los resultados del coeficiente de variación obtenidos en el análisis estadístico de cada termopar se presentan en la tabla 2.

La toma de datos de temperatura se realizó con termopares introducidos en los recipientes que contenían los dos fluidos.

**TABLA 2**

**COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS TERMOPARES**

|                 | <b>Termopares en agua</b>            | <b>Termopares en aceite.</b>         |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Termopar</b> | <b>Coeficiente de variación (%).</b> | <b>Coeficiente de Variación (%).</b> |
| 1               | 0.312                                | 0.329                                |
| 2               | 0.316                                | 0.362                                |
| 3               | 0.396                                | 0.303                                |
| 4               | 0.283                                | 0.298                                |
| 5               | 0.319                                | 0.322                                |

En la tabla anterior se observa que el termopar con el coeficiente de variación más bajo en los dos medios es el termopar No.4 por lo que se elige a este termopar como el más preciso.<sup>(6)</sup>

### **3.1.2. REPETIBILIDAD**

Se hicieron mediciones de temperatura con los termopares en 4 diferentes lapsos de tiempo, tomando como referencia el punto de ebullición del agua.

Los resultados de esta prueba de análisis de varianza se presentan en la tabla 3.

**TABLA 3**  
**PRUEBA DE ANALISIS DE VARIANZA PARA LOS TERMOPARES (NIVEL 0.05)**

| Termopar | Termopar en agua |       | Termopar en aceite. |       |
|----------|------------------|-------|---------------------|-------|
|          | Fexp.            | Ftab. | Fexp.               | Ftab. |
| 1        | 0.02             | 3.21  | 0.001               | 3.21  |
| 2        | 0.02             | 3.21  | 0.003               | 3.21  |
| 3        | 0.07             | 3.21  | 0.003               | 3.21  |
| 4        | 0.03             | 3.21  | 0.0019              | 3.21  |
| 5        | 0.02             | 3.21  | 0.006               | 3.21  |

En la tabla 3 se observa que para todos los termopares y en los dos medios, el Fexp. Es menor que el Ftab. Por lo que se concluye que todos los termopares son repetibles.

Los valores de Ftab. Fueron sacados de la tabla VII de la referencia bibliográfica.<sup>(3)</sup>

### **3.1.3. LINEALIDAD**

Esta prueba se realizó calentando el agua hasta 96°C y el aceite hasta 110°C y se fue midiendo el enfriamiento de ambos a intervalos de tiempo constantes.

Los resultados de regresión lineal practicados a todos los termopares se presentan en la tabla 4.

**TABLA 4**  
**REGRESIÓN LINEAL DE TERMOPARES**

| <b>Termopar</b> | <b>Regresión lineal promedio (agua)</b> | <b>Regresión lineal promedio (aceite)</b> |
|-----------------|---|---|
| 1               | a = 34.114<br>b = 1.687<br>r = 0.989    | a = 31.686<br>b = 4.481<br>r = 0.998      |
| 2               | a = 33.05<br>b = 1.940<br>r = 0.985     | a = 32.097<br>b = 4.598<br>r = 0.998      |
| 3               | a = 33.54<br>b = 1.993<br>r = 0.986     | a = 32.591<br>b = 4.632<br>r = 0.998      |
| 4               | a = 33.241<br>b = 1.849<br>r = 0.989    | a = 32.408<br>b = 4.582<br>r = 0.998      |
| 5               | a = 33.495<br>b = 1.921<br>r = 0.989    | a = 32.064<br>b = 4.545<br>r = 0.989      |

De la tabla anterior se observa que todos los termopares cumplen con el atributo de linealidad. Donde: a = Ordenada al origen, b = Pendiente y r = Coeficiente de regresión.



### **3.1.4. EXACTITUD**

En esta prueba se tomaron lecturas en el momento en el que comenzaba a ebullición el agua (96°C).

En esta prueba se realizó el análisis estadístico de prueba de hipótesis (t student) en todos los casos se obtuvo como resultado que para un intervalo de confianza con  $\alpha=0.05$  todos los termopares son exactos para realizar mediciones de temperatura tanto en agua como en aceite.

### **3.1.5. REPRODUCTIBILIDAD**

En esta prueba se mantuvieron todas las condiciones de trabajo constantes y se tomaron lecturas a diferentes periodos de tiempo. Esta prueba se realizó introduciendo los termopares directamente en el agua y el aceite.

Los resultados que se obtuvieron en esta prueba y después de realizar un análisis estadístico de coeficiente de variación se concluye que los termopares con mayor grado de reproductibilidad en los dos medios son los termopares 2,4 y 5.

Una vez concluidos los análisis estadísticos se eligió al termopar No. 4 como el termopar patrón, ya que fue este termopar el que reunió la mayor cantidad de atributos después de todas las pruebas realizadas.

### **3.2. CARACTERIZACION DEL AUTOCLAVE**

Con la realización de éste experimento se comprobó que la distribución de la temperatura dentro del autoclave es homogénea.

La ubicación de los termopares dentro de la cámara del autoclave fue mediante el uso de números aleatorios.<sup>(2)</sup>

En éste experimento se manejaron 3 diferentes presiones ( 1.0, 1.2 y 1.4 kg/cm ) y en todos los casos el resultado fué que la distribución de temperatura es homogénea, para comprobar esto se efectuó un análisis de varianza.<sup>(3)</sup>

Con éste experimento se encontró también que utilizando la mayor presión manejada ( 1.4 kg/ cm ), se obtiene el más rápido calentamiento del autoclave y por lo tanto el menor tiempo requerido para alcanzar la temperatura de esterilización.

**TABLA 5**  
**CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE A DIFERENTES PRESIONES**

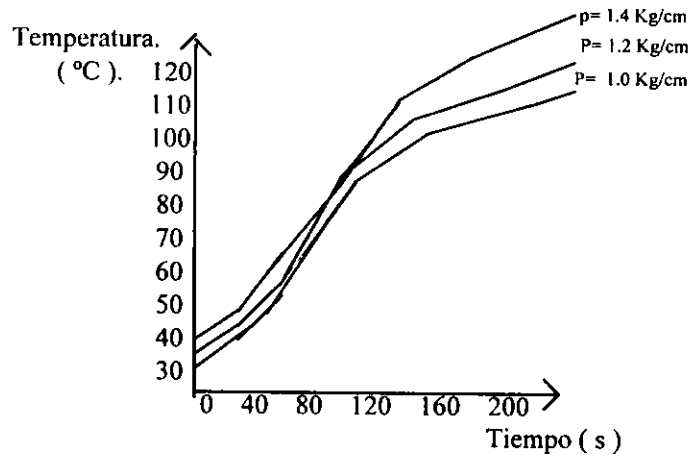
| <b>TIEMPO<br/>(Seg.)</b> | <b>PRESIÓN<br/>1.0 Kg/cm</b> | <b>PRESIÓN<br/>1.2 Kg/cm</b> | <b>PRESIÓN<br/>1.4 Kg/cm<sup>2</sup></b> |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| 0                        | 30.9 °C                      | 30.7 °C                      | 30.5 °C                                  |
| 20                       | 35.0                         | 36.3                         | 37.6                                     |
| 40                       | 46.9                         | 56.0                         | 60.5                                     |
| 60                       | 70.9                         | 74.2                         | 76.6                                     |
| 80                       | 77.7                         | 87.0                         | 89.3                                     |
| 100                      | 84.8                         | 97.8                         | 99.9                                     |
| 120                      | 97.5                         | 103.4                        | 106.7                                    |
| 140                      | 103.7                        | 111.7                        | 113.4                                    |
| 160                      | 107.8                        | 114.5                        | 116.4                                    |
| 180                      | 112.9                        | 116.7                        | 119.8                                    |

En el manejo de las presiones, la elevación o disminución de las mismas se realizó abriendo o cerrando la válvula de alimentación de vapor.

A continuación se presenta la gráfica del resultado de la caracterización del autoclave a 3 diferentes presiones:

Este experimento se realizó introduciendo los termopares directamente en la cámara del autoclave y colocándolos en los sitios previamente seleccionados se utilizó vapor directamente inyectado a la cámara del autoclave.

**FIGURA 14**  
**CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE**



En la fig. (14) se observa que a mayor presión de vapor utilizada es menor el tiempo que se requiere para alcanzar la temperatura de esterilización (110°C).

por lo que de aquí en adelante se usará una presión de 1.4 Kg./cm<sup>2</sup>

### 3.2.1. FORMULACION DEFINITIVA Y PROCESO DE ELABORACIÓN DE CHAMPIÑONES EN ESCABECHE

La formulación definitiva se obtuvo mediante la realización de una serie de pruebas en las que se fueron modificando las cantidades de los ingredientes hasta obtener un producto que reunió todas las características de peso, color y calidad requeridas para poder ser un producto comercial.

**TABLA 6**

FORMULACION DEFINITIVA PARA ELABORAR CHAMPIÑONES EN ESCABECHE

| INGREDIENTES         | CANTIDAD<br>( g ) | %     | FRACCIÓN<br>( x ) |
|----------------------|-------------------|-------|-------------------|
| Champiñones frescos. | 321.6             | 35.76 | 0.3576            |
| Chiles jalapeños.    | 48.7              | 5.40  | 0.0540            |
| Zanahoria.           | 88.5              | 9.83  | 0.0983            |
| Cebolla.             | 39.5              | 4.38  | 0.0438            |
| Sal ( NaCl).         | 5.0               | 0.55  | 0.0055            |
| Vinagre.             | 130.0 ml.         | 14.43 | 0.1443            |
| Agua.                | 260.0 ml.         | 28.87 | 0.2887            |
| Aceite comestible.   | 7.0 ml.           | 0.77  | 0.0077            |

Los champiñones fueron previamente escalados a 83°C.

Los chiles fueron tratados con cloruro de calcio (CaCl) al =0.02 %.

Con la presente formulación se procedió a realizar pruebas de esterilización del producto enlatado en latas cilíndricas.

### **3.2.2. LOCALIZACION DEL PUNTO FRIO DENTRO DE LA LATA**

Para determinar la ubicación del punto frío dentro de la lata, se construyeron 5 arreglos de termopares introducidos en la lata, con los cual se obtuvieron 15 posiciones diferentes dentro de la lata.

los datos de temperatura se midieron directamente de cada termopar introducido dentro de la lata que contenía champiñones en escabeche que estaban siendo esterilizados.

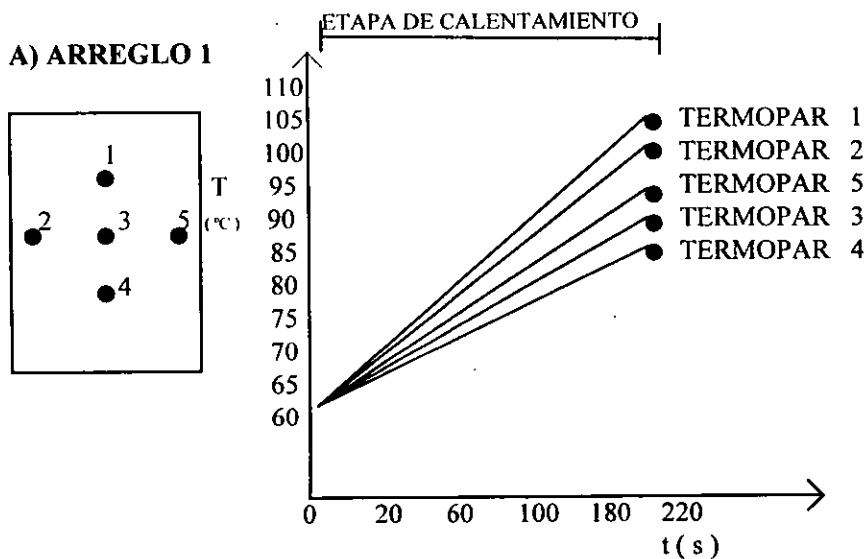
Las tomas de temperaturas se hicieron cada 30 ser. Para que cada uno de los termopares y para cada uno de los arreglos propuestos.

Para todos los arreglos, se hicieron pruebas por triplicado y en todas las pruebas se analizaron las características físicas y organolépticas del producto.

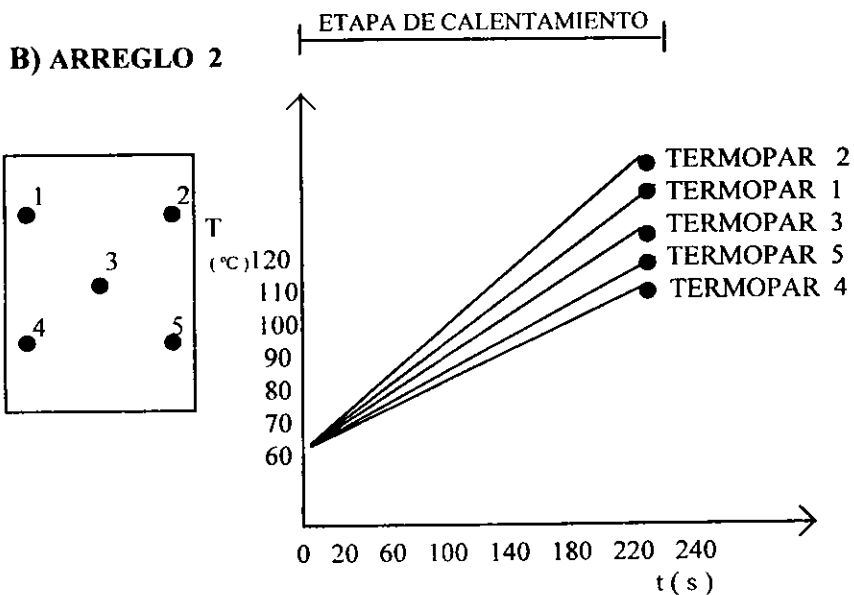
En todos los casos se utilizaron latas cilíndricas de 10 cm. de diámetro y 11.5 cm. de altura.

de las gráficas de  $t$  vs  $t$  construidas para éste experimento, se obtuvieron los siguientes resultados:

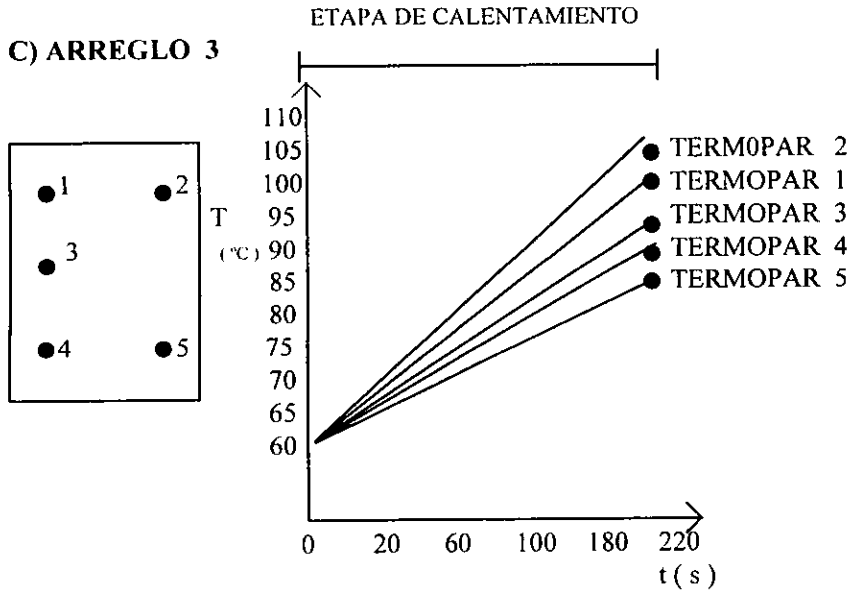
**FIGURA 15**  
**HISTORIAS TÉRMICAS DEL PRODUCTO CONSTRUIDAS PARA LA LOCALIZACIÓN**  
**DEL PUNTO FRÍO DENTRO DE LA LATA**



**FIGURA 16**



**FIGURA 17**



Como se observa en las figuras el calentamiento dentro de la lata es rápido aunque existen puntos donde se tarda más tiempo en alcanzar la temperatura de esterilización.



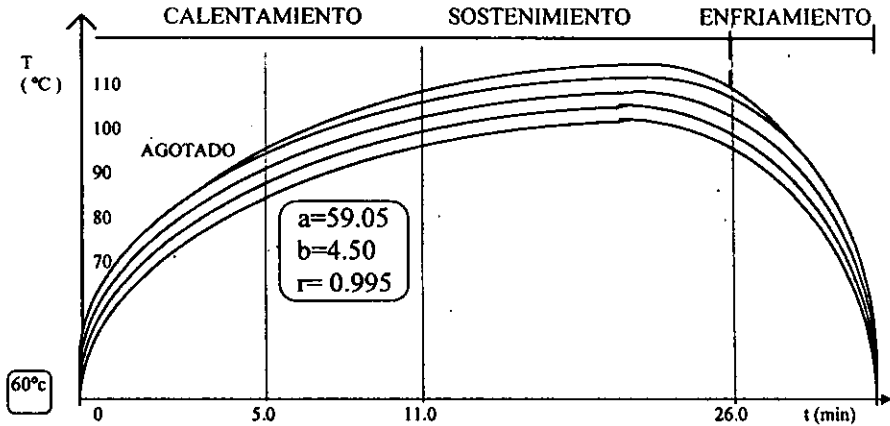
Como se observa en las figuras 15, 16 Y 17 la región que tarda más tiempo en alcanzar la temperatura de esterilización dentro de la lata es la parte inferior de la misma, más específicamente donde se ubican los termopares 4 y 5.

Como conclusión final y dados los resultados se tomó como punto frío dentro de la lata al punto situado a 3.25 cm. a partir de la base inferior de la misma. Por ésta razón fue éste punto el tomado como referencia para ubicar el punto inicial en coordenadas  $(i, j)$ .

### 3.2.3. ANALISIS DE HISTORIAS TERMICAS

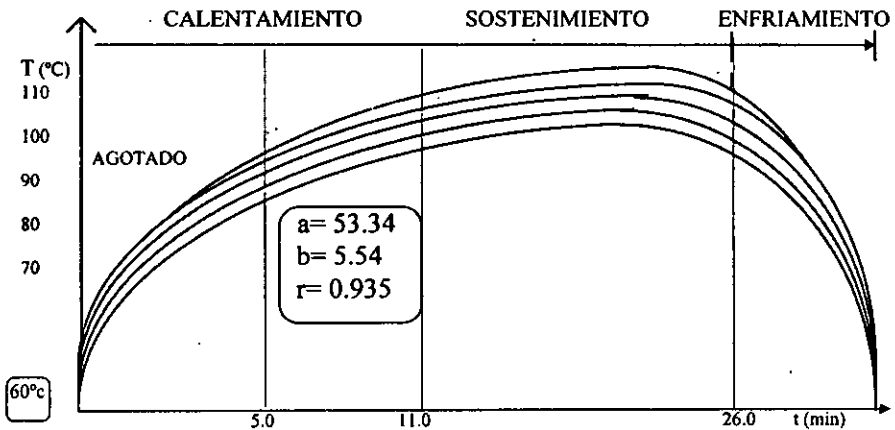
Las siguientes gráficas se construyeron a partir de la esterilización del producto e incluyen el tiempo total empleado en todo el proceso, dividido en 3 etapas.

**FIGURA 18**  
**REPLICA 1**



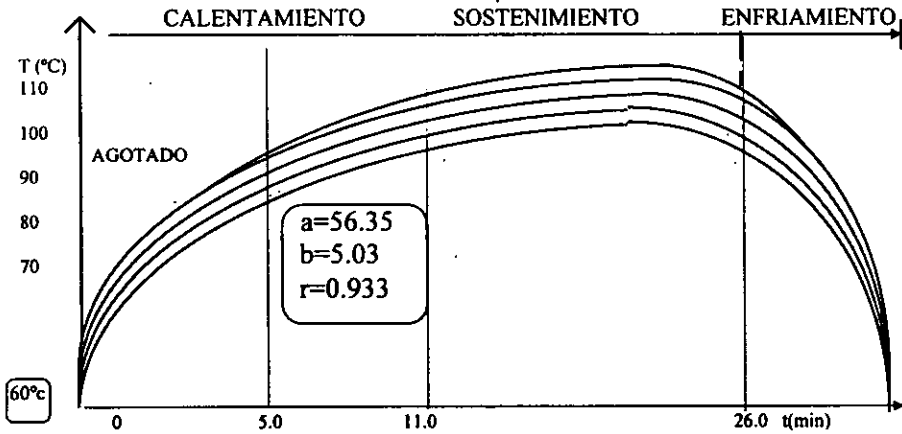
**FIGURA 19**

**REPLICA 2**



**FIGURA 20**

**REPLICA 3**



En las figuras se observa que la velocidad de penetración de calor es constante, ya que se tarda prácticamente el mismo tiempo en alcanzar la misma temperatura para un mismo punto. Durante la etapa de calentamiento se obtiene un valor de velocidad de penetración de calor de alrededor de  $5.0\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ .

### 3.3. EVALUACION DE LA DIFUSIVIDAD TEMICA ( $\alpha$ )

Mediante la aplicación del método de las diferencias finitas para geometría cilíndrica y usando la 2ª ecuación de Fourier se obtuvo la ecuación final en coordenadas de posición (i,j) alrededor del punto (p), que corresponde a los 5 termopares introducidos en la lata y es la siguiente:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{2(TR2 - 2TR3 + TR1)}{(\Delta r)^2} + \frac{TR5 - 2TR3 + TR4}{(\Delta H)^2} \quad \text{Ec. (25)}$$

Donde: TR1 = Termopar 1  
 TR2 = Termopar 2  
 TR3 = Termopar 3  
 TR4 = Termopar 4  
 TR5 = Termopar 5

$\Delta r = 2.5 \text{ cm.}$   
 $\Delta H = 2.5 \text{ cm.}$

Si a esta ecuación la llamamos \*

$$\text{Tenemos: } \frac{\Delta T}{*} = \alpha (\Delta t) \quad \text{Ec. (26)}$$

Donde:  $\Delta T = (T - T_0) = (T - 60^\circ\text{C})$   
 $\Delta t = (t - t_0)$  Como  $t_0 = 0$  entonces  $\Delta t = t$   
 $T_0 = 60^\circ\text{C}$   
 $t_0 = 0 \text{ min.}$   
 $\Delta H = 0.025 \text{ m.}$   
 $\Delta r = 0.025 \text{ m.}$

Por lo que la difusividad térmica ( $\alpha$ ) se obtuvo al graficar el término  $\frac{\Delta T}{*} \times 10^{-4}$  contra el tiempo durante la etapa de calentamiento, es decir hasta

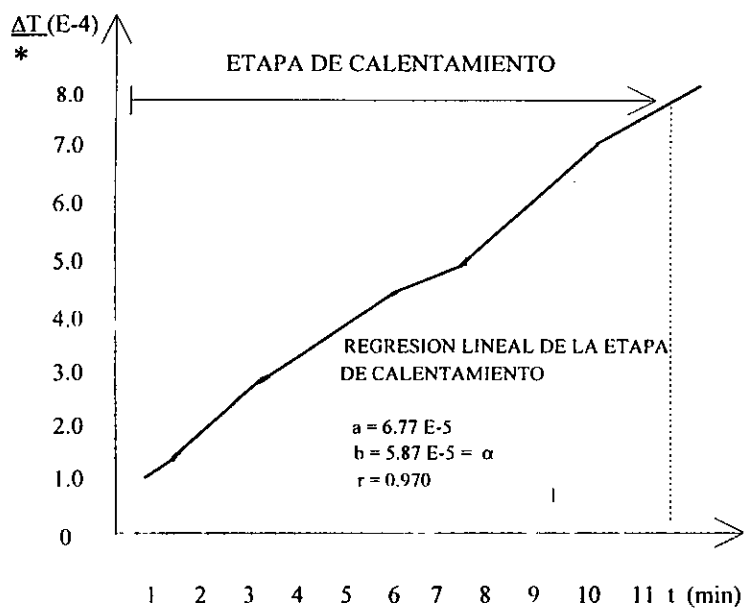
\*

alcanzar la temperatura de esterilización ( $107^\circ\text{C}$ ).

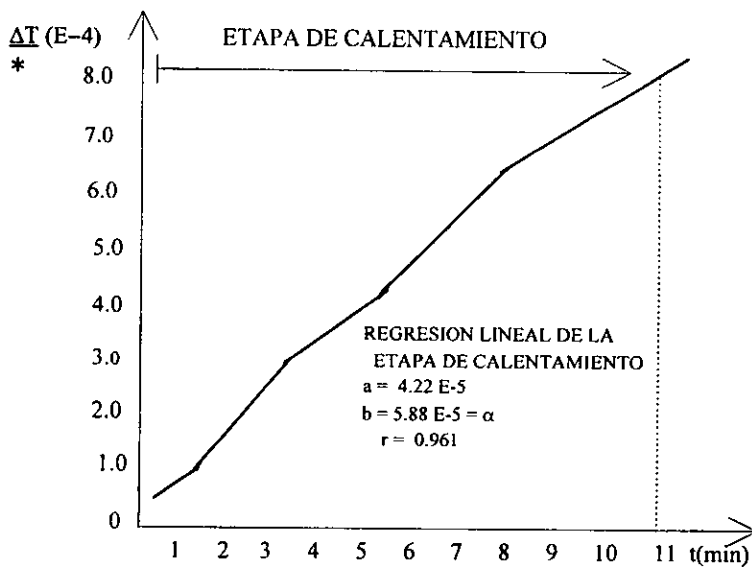
**FIGURA 21**

**EVALUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA**

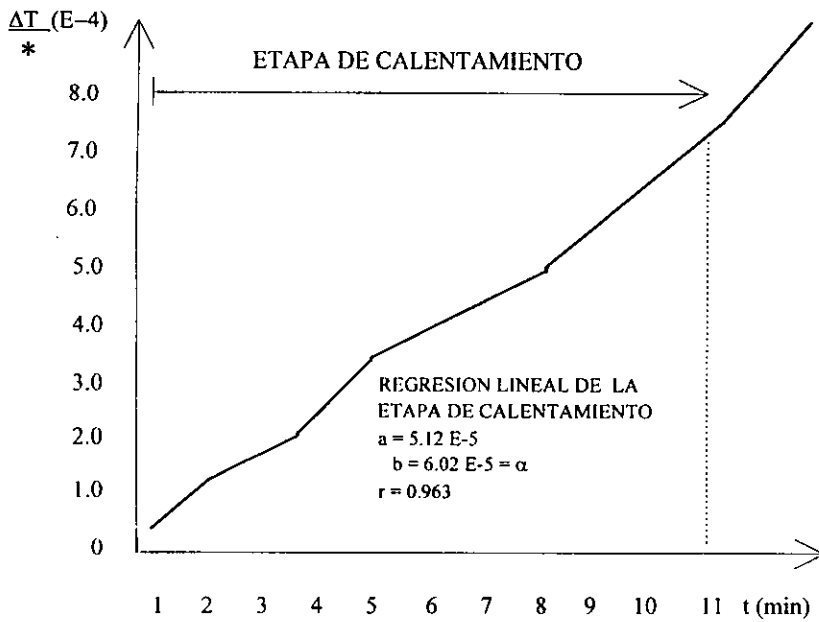
**REPLICA 1**



**FIGURA 22**  
**EVALUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA**  
**REPLICA 2**



**FIGURA 23**  
**EVALUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA.**  
**RÉPLICA 3**



A partir de las gráficas anteriores se obtuvo el valor experimental de la difusividad térmica ( $\alpha$ ) para champiñones en escabeche.

Los resultados experimentales de ( $\alpha$ ) se presentan en la tabla 7.

El valor de la difusividad térmica  $\alpha$  que se obtuvo a partir de las gráficas anteriores nos dice que tan rápido se difunde o propaga el calor a través de nuestro sistema en particular (champiñones en escabeche).

A partir del valor de difusividad térmica ( $\alpha$ ) obtenemos el valor de la conductividad térmica (K) de nuestro alimento, lo cual es un dato muy importante desde el punto de vista de ingeniería.

**TABLA 7**  
**RESULTADOS EXPERIMENTALES DE  $\alpha$**

| REPLICA | DIFUS. TÉRMICA.<br>( $\alpha$ ) (m <sup>2</sup> /min.) | DIFUS. TÉRMICA<br>( $\alpha$ ) (m <sup>2</sup> /seg.) |
|---------|--|---|
| 1       | 5.87 X 10 <sup>-5</sup> .                              | 9.783 X 10 <sup>-7</sup>                              |
| 2       | 5.88 X 10 <sup>-5</sup> .                              | 9.800 X 10 <sup>-7</sup>                              |
| 3       | 6.02 X 10 <sup>-5</sup> .                              | 1.003 X 10 <sup>-6</sup>                              |

$$\alpha \text{ PROMEDIO} = 9.871 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s.}$$



### 3.4. DETERMINACION DE LA DENSIDAD ( $\rho$ ) Y CALOR ESPECIFICO ( $C_p$ ) DEL SISTEMA

#### DENSIDAD

La densidad del sistema se determinó para una lata completamente llena de producto ( champiñones en escabeche ).

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Masa del producto drenado = 8.331 g = 0.8331 Kg..
- Volumen del cilindro ( lata ) =  $9.032 \times 10^{-4} \text{ E-4 m}^3 = 9.032 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
- .Densidad = Masa / Volumen.

$$= 0.8331 \text{ Kg} / 9.032 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$= 922.38 \text{ Kg} / \text{m}^3 \text{ ( a } T = 50 \text{ }^\circ\text{C )}$$

#### CALOR ESPECIFICO

El calor específico del sistema "CHAMPIÑONES EN ESCABECHE" se calculó mediante el uso de la siguiente ecuación empírica:  $C_p = 2.094 (X \text{ grasa}) + 1.256 (X \text{ sólido}) + 4.187 (X \text{ agua})$ .  
Ec. (27)

Ya que no se encontró un valor bibliográfico.

El valor que se obtuvo fue  $C_p = 2.5308 \text{ Kj/Kg}^\circ\text{C}$ .

**3.5. DETERMINACION DEL VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD  
TERMICA ( K ) A PARTIR DEL VALOR DE LA DIFUSIVIDAD  
TERMICA (  $\alpha$  )**

La Conductividad térmica ( K ) se obtuvo por despeje de la siguiente expresión  $\alpha = K / \rho C_p$ , de donde se obtiene que:

$$K = \alpha \rho C_p$$

Ec. (28)

$$K = (9.871 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}) (922.38 \text{ Kg/m}^3) (2.5308 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}).$$

$$K = 2.304 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$$

**RESULTADOS FINALES**

Condiciones de proceso:

- Esterilización de champiñones en escabeche.
- $P = 1.4 \text{ Kg/cm}^2$ .
- Temperatura de esterilización :  $107 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- Tiempo de sostenimiento de la temperatura :  $15.0 \text{ min}$ .
- Latas cilíndricas (  $D = 10.0 \text{ cm}$  ,  $H = 11.5 \text{ cm}$  ).
- Espacio vacío dentro de las latas : Aprox.  $1.0 \text{ cm}$ .
- Blanqueo o escaldado: hasta alcanzar  $82 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- Agotado: en autoclave, hasta alcanzar  $93 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- Vaciado y engargolado: manual.

**3.6. ESTABLECIMIENTO DEL TIEMPO DE ESTERILIZACION PARA CHAMPIÑONES EN ESCABECHE A NIVEL LABORATORIO**

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente de las pruebas de esterilización aplicadas al sistema champiñones en escabeche.

**TABLA 8**  
**PROPIEDADES TERMOFÍSICAS PROMEDIO**

| $\rho$                 | $C_p$           | $\alpha$  | $\bar{K}$    |
|------------------------|-----------------|---|--------------|
| ( Kg/ m <sup>3</sup> ) | KJ/Kg °C        | ( m <sup>2</sup> / min )  | W/m °C       |
| 922.38                 | 2.5308 KJ/Kg °C | 5.923 X 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /min.<br>9.871 X 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s | 2.304 W/m °C |

Después de finalizar con toda la fase experimental y de realizar el análisis de los resultados obtenidos, se concluye que los tiempos de proceso requeridos para la esterilización de champiñones en latas cilíndricas son los siguientes:

**TABLA 2**

**TIEMPOS DE ESTERILIZACIÓN PROMEDIO**

| t Agotado<br>(min) | t Etapa.<br>Calentam.<br>(min) | t Etapa<br>Sostenim.<br>(min) | t Enfriam.<br>( min ) | t Proceso<br>( min ) |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 5.0                | 8.0                            | 15.0                          | 1.7                   | 29.7                 |

## CONCLUSIONES:

En el presente trabajo se logró obtener la formulación para la preparación de champiñones en escabeche después de realizar varias pruebas preliminares variando las cantidades de los ingredientes utilizados.

Mediante la experimentación en el laboratorio se identificaron y analizaron los factores de transferencia de calor que se presentan durante la esterilización de champiñones en escabeche, considerando que el producto está compuesto por sólidos inmersos en una solución líquida (salmuera).

Los valores de las constantes térmicas obtenidos experimentalmente como fue la difusividad térmica ( $\alpha$ ) y la conductividad térmica (K) se obtuvieron, luego de haber sometido los resultados preliminares de cada prueba a un análisis estadístico que nos garantiza que los resultados definitivos fueran confiables.

El valor de la difusividad térmica ( $\alpha$ ) se evaluó empleando el método de las diferencias finitas y el valor de la conductividad térmica (K) se obtuvo a partir del valor de ( $\alpha$ ).

El establecimiento de corrientes convectivas dentro de la lata se suponen pequeñas, debido a que la lata permaneció inmóvil durante el proceso y el calentamiento de la lata es homogéneo en todos los puntos. Asimismo, la variación en la densidad por efecto de la temperatura es poco significativo ya que el calentamiento de la lata es homogéneo y el tamaño pequeño de la lata no da suficiente espacio para que éstas diferencias de densidad sean considerables.

Se establecieron las condiciones de proceso y los tiempos requeridos para efectuar cada una de las etapas del mismo, así como el tiempo total del proceso de esterilización de champiñones en escabeche.

Se realizaron pruebas físicas y organolépticas al producto final después del proceso y se llegó a la conclusión de que el producto reunió las características suficientes para ser un producto susceptible de ser comercializado.

## NOMENCLATURA

A = ÁREA DE FLUJO [=] m<sup>2</sup>

C = CONSTANTE DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACIO  
[=] 299,792,458 [=] m/s.

C<sub>p</sub> = CALOR ESPECÍFICO [=] Kal/Kg °C.

E = INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO [=].

H = COEFICIENTE CONVECTIVO [=] Kal/m<sup>2</sup> °Ch.

K = CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [=] Kal/m °Ch.

Q = FLUJO DE CALOR [=] Kal/m<sup>3</sup>

t = TIEMPO [=] S

T = TEMPERATURA [=] °C

T<sub>c</sub> = TEMPERATURA CORREGIDA [=] °C

X = FRACCIÓN [=] ADIMENSIONAL

## ADIMENSIONALES

a = ORDENADA AL ORIGEN.

b = PENDIENTE (EN ALGUNOS CASOS PENDIENTE = m)

r = COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

F<sub>o</sub> = NÚMERO DE FOURIER

## GRIEGAS

α = DIFUSIVIDAD TÉRMICA [=] m<sup>2</sup>/h.

∂ = DIFERENCIAL

Δ = INTERVALO

ρ = DENSIDAD

σ = CONSTANTE DE STEFAN-BOLTZMAN= 5.67 x 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>°K.

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1) Badui Dergal, S. (1984), *Química de los alimentos*, Alhambra S.A. México. Pp. 46-68, 72-86.
- 2) Bor S. Luh - Jasper Guy. (1982), *Commercial vegetable processing*, AVI Publishing, Connecticut, USA. Pp. 36-78, 106-134.
- 3) Bracewell, R.N. (1986), *The Fourier transform and applications*, McGraw-Hill, Singapore. Pp. 6-17.
- 4) Bueche, Frederick. (1987), *Física superior*, McGraw-Hill, México. Pp. 165-169.
- 5) Chang, S.P. (1980), *Determinación simultánea de la difusividad térmica y del coeficiente de transferencia de calor durante la esterilización de zanahoria en cubos*, Tecnología de alimentos, Vol. 7, No. 16. España. Pp. 38-45.
- 6) Chapra, S.C. *Métodos numéricos para ingenieros con aplicaciones a computadoras personales*, McGraw-Hill, México. Pp. 86-95, 282-290.
- 7) Czechoslov Chemical Collection, (1970), *Scale-Up in mixing Processing*, USA. Pp. 9-12.
- 8) Daniels, F. (1972), *Experimental physical chemistry*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 120-127.
- 9) Edge, Worth. (1957), *Pilots plant and models*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 66-87.
- 10) Everson, G.J. (1964), *Aseptic canning of foods, part. 2*, Food technology, USA. Pp. 84-88.

- 11) Felliciotti, E. (1969), *Effects of high temperature in processing foods*, Dairy Research, vol. II. USA. Pp. 447-454.
- 12) Fellows, P. (1994), *Tecnología del procesado de los alimentos*, Acribia, España. Pp. 319.
- 13) Fittings, P. (1968), *Flow of fluids through valves*, Crane Co. Chicago Illinois, USA. Pp. 180-187.
- 14) Flin, P. K. (1987), *Materiales de ingeniería y sus aplicaciones*, McGraw-Hill, Bogotá, Colombia. Pp. 23-26, 154-165.
- 15) Geankoplis, C.J. (1992), *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, Continental, México. Pp. 70-73, 178-194, 267-272.
- 16) Heldman, J.P. (1985), *Foods process engineering*, McGraw-Hill, USA. Pp. 45-78.
- 17) Hersom, A. & Hulland, E. (1980), *Canned foods*, 7th. Edition, Churchill Livingstone, Edimburgh. Pp. 122-158.
- 18) Holman, J.P. (1990), *Heat transfer*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 365-403.
- 19) Jacob, M. (1967), *Heat transfer Vol. II*, Wiley & Sons, New York, USA. Pp. 132-139.
- 20) Jones, Lee. (1980), *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*, Limusa, México. Pp. 61-69.
- 21) Kern, D.Q. (1991), *Procesos de transferencia de calor*, Cecsca, México. Pp. 45-102.
- 22) Keyes, F.G. (1952), *Transfer of heat*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 130.
- 23) Lamb, F.C. (1982), *Effect of processing on nutritive value of food: Canning*, Handbook of processed foods, vol. Y. Florida, USA. Pp. 11-30.



- 24) Lebowitz, S.F. (1985), *Efecto de los coeficientes de transferencia de calor en diversos materiales en los diferentes periodos de los procesos térmicos*, Acibia, España. Pp. 36-47.
- 25) López, S. (1982), *Canning process operations*, McGraw-Hill, USA. Pp. 1-45, 97-125.
- 26) Manrique, J.A. (1983), *Transferencia de calor*, Harla, México. Pp. 34-96.
- 27) McAdams, W.H. (1954), *Heat transmission*, 3a. Edition, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 134-143.
- 28) Nair, J.H. (1964), *Hydrostatic sterilizers*, *Food engineering*, USA. Pp. 37-46
- 29) Perry, J. (1981), *Manual del ingeniero químico tomo I y II*, Uteha, México. Pp. 136-142, 367-401, 742-765.
- 30) Perry, R.H. (1973), *Chemical enginners handbook*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 136-141.
- 31) Potter, N. (1987), *La ciencia de los alimentos*, Edutex, México. Pp. 246-276, 501-539.
- 32) Rose, D. (1986), *Aseptics: The problem with low acids*, Food manufactures, USA. Pp. 51-64.
- 33) Sears, M. (1985), *Física universitaria*, Iberoamericana, España. Pp. 368-400.
- 34) Shefler, W.S. (1981), *Bioestadística*, Fondo Educativo Interamericano, México. Pp. 60-113, 137-145.
- 35) Sieder, E.N. (1972), *Enginering chemical*, USA. Pp. 47-68
- 36) Sisler, H. (1969), *Food chemistry*, Nostrans Reinolds Co. New York, USA. Pp.337-346.
- 37) Skelland, A.H.P. (1962), *Chemical enginering*, Wiley & Sons, USA. Pp. 364.
- 38) Skelland, S. (1967), *Non-Newtonian flow and heat transfer*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 26-42.

- 39) Sweta, T. (1987), *Evaluación de la conducción del calor*, Food technology, New York, USA. Pp. 24-39.
- 40) Tucker, G.S. (1987), *Transferencia de calor*, McGraw-Hill, New York, USA. Pp. 48-62.
- 41) Tyson, W.M. (1968), *Esterilización de productos enlatados*, McGraw-Hill, USA. Pp. 96-107.
- 42) Uhl, V.W.(1962), *Chemical engineering progress symp.* Brit Co. USA. Pp. 93-102.
- 43) Wayne, D. (1985), *Bioestadística*, Limusa, México. Pp. 82-123.
- 44) Welty, J.R. (1969), *Fundamentals heat and mass transfer*, Wiley & Sons, New York, USA. Pp. 143-151.
- 45) Welty, R. (1981), *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*, Limusa, México. Pp. 45-93.