

14  
22



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**“METODO DE EVALUACION Y ANALISIS DE DATOS  
PARA PROBLEMAS DE PENETRACION DE CALOR  
DURANTE LA ESTERILIZACION ”**

**T E S I S**

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

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

**GERARDO SEDEÑO CEA**

**DIRECTOR :**

**DR. SANTIAGO FLORES Y DE HOYOS**



**CUAUTITLAN, IZCALLI, EDO. DE MEXICO.**

**1990**

**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 está 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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

# INDICE

	Página
Capítulo 1	Introducción..... 3
Capítulo 2	Generalidades
2.1	La transferencia de calor en la ingeniería en alimentos..... 8
2.2	Microbiología en el procesamiento térmico..... 12
2.3	Equipo y técnicas de esterilización..... 17
2.4	Modelos matemáticos existentes para análisis de datos de esterilización..... 21
2.4.1	Método general..... 21
2.4.2	Método por fórmulas..... 28
2.5	Importancia y utilidad de la computación..... 51
Capítulo 3	
3.1	Descripción del desarrollo del trabajo..... 56
Capítulo 4	Resultados y discusión..... 77
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones..... 108
	Apéndice..... 111
	Bibliografía..... 124

## RESUMEN

El propósito de este trabajo fue desarrollar dos programas para computadora que realicen el análisis matemático de una manera confiable de los datos tiempo-temperatura (historia térmica) obtenidos a partir de procesos de esterilización. Este análisis se utiliza para conocer la letalidad impuesta por el proceso al alimento en un tiempo dado, o el tiempo de proceso necesario para alcanzar una letalidad dada. Para la parte matemática, se utilizaron los siguientes métodos de análisis: El método general desarrollado por Bigelow y el método por fórmulas desarrollado por Ball y colaboradores. Para la realización del programa para cada método de análisis, se utilizó el paquete de programación lotus 1-2-3. El procedimiento matemático utilizado para elaborar los dos programas está explicado detalladamente en el capítulo 3, de manera que cualquier persona que esté interesada en estos programas, con sólo saber utilizar el paquete lotus 1-2-3 podrá elaborar los dos programas que se desarrollaron en este trabajo.

Algunos de los proyectos que se realizaron en la planta piloto de los Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI), se utilizaron para probar el funcionamiento de los programas. Dichos proyectos fueron realizados por investigadores de LANFI y son proyectos de investigación sobre esterilización. Se realizó el análisis de los datos utilizando los programas para computadora desarrollados en este trabajo, y se compararon con los resultados obtenidos al hacer el mismo análisis en forma convencional, esto es, sin utilizar el programa de computadora. Las variaciones en los resultados fueron de menos de un minuto,

haciendo bastante confiable la utilización del programa. Se obtuvo un ahorro promedio del 70% en el tiempo utilizado para realizar el análisis con el programa sobre el tiempo utilizado para realizar el análisis sin la computadora.

## 1. Introducción

Como una respuesta a la necesidad de mantener en buenas condiciones sus alimentos durante diversos lapsos de tiempo, el hombre ha desarrollado diferentes métodos para su almacenamiento y preservación.

Los alimentos, industrializados o no, se mantienen en constante actividad biológica manifestada por alteraciones de naturaleza química, física, microbiológica o enzimática, que los llevan a la pérdida de su calidad. Esto se caracteriza por la inacceptabilidad de los productos para el consumo humano, como resultado de la existencia de contaminación microbiana, de la alteración de ciertos atributos específicos como color, sabor, textura y viscosidad o de la presencia de ciertos contaminantes químicos. El tiempo durante el cual un alimento puede ser consumido sin provocar problemas de salud al consumidor se le da comúnmente el nombre de vida útil o vida de anaquel. (7)

Para la conservación de los alimentos se hace uso de varios tipos de procesos. Algunos de ellos consisten en la aplicación de algún tratamiento térmico. Los objetivos de la transmisión de calor involucrada en estos tratamientos pueden ser varios:

-Que el alimento ceda su calor, provocando un descenso en su temperatura; esto provoca una disminución en los procesos biológicos del alimento.

-Que el alimento aumente su temperatura a un punto en que se destruyan los microorganismos que estén presentes y que son responsables de alteraciones del mismo o que sean patógenos.

Algunos de los procesos que utilizan la transmisión de calor son: esterilización, pasteurización, escaldado y secado. Paralelamente a la aplicación de estos procesos a los alimentos, se ha desarrollado el enlatado, y en forma más amplia, el envasado de los alimentos. En general, cualquier forma de aislar el alimento del medio ambiente junto con un tratamiento térmico, constituyen un método de conservación.

En 1810, Peter Durand (6) introduce en Inglaterra los envases metálicos, precursores de los actuales envases de hojalata. Luis Pasteur (19), demostró la existencia de microorganismos capaces de producir fermentaciones y putrefacción de los alimentos. Este descubrimiento es la base sobre la cual descansan los fundamentos científicos para la conservación de los alimentos por medio del calor.

Normalmente, no es necesario que los productos alimenticios se encuentren totalmente estériles después del tratamiento térmico porque para esto se requeriría un tiempo excesivo de exposición al calor, y se obtendría un producto de baja calidad organoléptica y con pérdida parcial o total de su valor nutricional (6). Se tiene entonces la necesidad de destruir los microorganismos patógenos o



alterantes pero al mismo tiempo conservar al máximo las características nutricionales del producto original. A esto se le conoce como esterilidad comercial (7).

El cálculo del proceso térmico que nos da la esterilidad comercial se basa en la determinación de la resistencia al calor de un microorganismo de prueba y en la penetración de calor en el alimento envasado. Obteniendo la medición de la penetración de calor se tiene la historia térmica del proceso que consiste en series de datos de tiempo y su respectiva temperatura.

Los métodos de cálculo existentes requieren de datos de penetración de calor y de tiempo de muerte térmica; dichos métodos son: el método general o gráfico y el método por fórmulas (16).

En estos métodos, el punto de partida son los valores obtenidos en la aplicación del proceso, esto es, valores de tiempo y temperatura. Dado que el objetivo de la experimentación es analizar y seguir paso a paso la transmisión de calor, es lógico pensar que mientras más pequeños sean los intervalos de tiempo en los que se registren las temperaturas, mayor será la confiabilidad que se obtenga en el cálculo final. Entonces, la cantidad de datos es muy grande, aunado esto a que el proceso utiliza mucho tiempo, y, como en el caso del método de fórmula, se requiere de numerosa información, la posibilidad de introducir uno o varios errores aumenta.

Por otro lado, uno de los objetivos de toda industria es optimizar sus procesos, y en el caso de los alimentos, obtener el producto de mejor calidad, lo más agradable posible al consumidor y al menor costo.

La realización del presente trabajo tiene como finalidad lograr que el análisis de datos sea sencillo, fácil y sobre todo, rápido de ejecutar, de manera que el industrial, el investigador o cualquier persona interesada en el tema, tenga un instrumento de análisis que le ayude a tomar decisiones de control de su proceso, lo que necesariamente determinará el costo y la calidad de su producto esterilizado. También se pretende minimizar la posibilidad de error en los cálculos y tener la seguridad de que el proceso de esterilización para cada producto sea aquél que utilice el tiempo mínimo necesario para producir un alimento comercialmente estéril.

## OBJETIVOS

Por tanto, los objetivos de esta tesis son los siguientes:

-Elaborar un programa de fácil manejo para computadora, que realice el tratamiento de datos de penetración de calor, para obtener a partir de la historia térmica de un proceso de esterilización, ya sea la letalidad total de un proceso o el tiempo de proceso.

-Reducir el tiempo utilizado en realizar el análisis matemático de datos de procesos de esterilización.

-Reducir a un mínimo los errores en que se puede incurrir al realizar un análisis matemático a un gran número de datos y con un método de análisis laborioso y complicado como el método fórmula.

-Proporcionar la posibilidad de usar dos métodos de análisis (método general y método por fórmulas) de datos de pruebas de penetración de calor en forma rápida y sencilla.

## 2 Generalidades

### 2.1 La transferencia de calor en la ingeniería en alimentos

La transferencia de calor, en forma de calentamiento o enfriamiento, se presenta en casi todos los procesos que se aplican a los alimentos.

Existe solo un pequeño porcentaje de productos alimenticios elaborados que no reciben algún tipo de procesamiento térmico (calentamiento o enfriamiento) en algún punto entre su entrada a la planta procesadora y su llegada al punto de consumo (11).

Debe tenerse en cuenta que con productos alimenticios- la temperatura a que se somete el producto durante un proceso térmico debe ser rigurosamente controlada, pues el alimento tolerará solo una cantidad limitada de calor antes de que presente un deterioro en su calidad.

En la esterilización mediante tratamientos térmicos, para establecer la transferencia de calor hacia el alimento, se utiliza algún medio de calentamiento, el cual puede ser agua, vapor o una mezcla de ambos. El vapor ha sido comúnmente usado como medio de calentamiento para esterilizar, y se utiliza en forma de vapor bajo presión debido a que de esta manera se alcanzan altas temperaturas, además de que posee las características de rápida

penetración de calor y destrucción de un mayor número de esporas bacterianas en un tiempo de exposición más corto, respecto a otros medios de calentamiento.

Aparte del vapor saturado, también se puede utilizar agua caliente a presión para realizar la esterilización, esto tiene la característica de evitar que quede aire atrapado entre los envases que se van a esterilizar y, por tanto, se tiene una distribución homogénea de calor.

La transferencia de calor, de la cual depende la esterilización, involucra un intercambio de energía entre el agente esterilizante y el objeto receptor del calor. El proceso de transferencia de calor de un cuerpo a otro puede ser efectuado por conducción, convección o radiación. El proceso de transferencia de calor por radiación involucra el transporte de calor de un objeto a otro sin calentamiento del espacio existente entre los dos objetos, en otras palabras, el calor es transportado por medio de un movimiento ondular similar al de la luz. En un estricto sentido, el calentamiento radiante no es usado para esterilización de alimentos, aunque se ha usado para esterilizar líquidos de fermentación (3).

Si la transferencia de calor de un cuerpo a otro en íntimo contacto ocurre por impacto molecular, el proceso está ocurriendo por conducción.

La transferencia de calor por convección se produce sólo en líquidos y gases e implica una transferencia de calor de un punto a otro mediante la circulación del mismo líquido o gas.

Mediante el procesamiento térmico se destruyen los microorganismos contaminantes que casi siempre existen en los alimentos y que causan su descomposición y problemas de salud al consumidor. Esto permite periodos más duraderos en el almacenamiento de alimentos (7).

El calor que recibe el alimento al producirse la transferencia de calor durante la esterilización, puede producir la muerte o inactivación de todos o algunos de los microorganismos presentes en el alimento.

Con la aplicación del calor es posible alcanzar la esterilidad comercial. Según la National Canners Association, "La esterilidad comercial para alimentos de baja acidez (pH igual a 4.5 o mayor) se define como las condiciones a las cuales todas las esporas de Clostridium botulinum y todas las bacterias patógenas han sido destruidas o inactivadas y también los microorganismos resistentes al calor, los cuales pueden producir deterioro bajo condiciones normales de almacenaje y distribución". (16, 25)

El grado de calentamiento y el tipo de microorganismo determinan la velocidad de destrucción, por ejemplo hay algunas bacterias que pueden existir en estado vegetativo en forma de esporas, las cuales son mucho mas resistentes al calor que en estado normal.

Las esporas de Clostridium botulinum no sobreviven a un tratamiento térmico de 2.78 min a 250 °F (20).

Debido a que los microorganismos carecen de un mecanismo de regulación de temperatura, el efecto que tiene la temperatura sobre ellos es bastante determinante. Cada microorganismo tiene un cierto intervalo de temperatura óptima en el cual se desarrolla y reproduce mejor, si tenemos un medio de cultivo que contiene un cierto microorganismo y lo calentamos a una temperatura superior a la temperatura óptima de crecimiento de ese microorganismo, el resultado es que se destruyen o se vuelven estériles.

## 2.2 Microbiología en el procesamiento térmico.

Las causas por las que se presenta deterioro microbiano en alimentos sometidos a un procesamiento térmico, son principalmente las dos siguientes: por los microorganismos que se introducen a través de posibles fugas del envase o por los microorganismos que sobreviven al proceso térmico. En ambos casos es necesario tomar medidas para evitar esta contaminación (25).

Las bacterias que tienen la capacidad de esporular, son los microorganismos de principal interés en todos los procesos de esterilización. Por lo tanto, el conocimiento de las esporas es de gran importancia en alimentos enlatados. La habilidad de las bacterias formadoras de esporas para sobrevivir al calor, descomponer los alimentos enlatados y, en algunos casos, producir envenenamiento en los alimentos, es la razón básica por la que se debe asegurar una cuidadosa atención a la determinación y uso de un proceso térmico adecuado en tiempo y temperatura (26).

Para establecer la intensidad del proceso de esterilización necesaria para un producto, deben conocerse los microorganismos que lo contaminan y determinar la resistencia térmica del más termoresistente de ellos. En alimentos poco ácidos (pH mayor de 4.5) se recurre a elegir especies representativas. Durante mucho tiempo se han tomado como base las esporas del Clostridium botulinum, uno de los microorganismos anaerobios esporulados más termorresistentes y productor de una toxina de efectos letales.



Los productos ácidos, no tienen contaminación de microorganismos anaerobios esporulados termorresistentes, pues éstos no se desarrollan en productos ácidos, por lo que no pueden ser representativos de este tipo de alimentos, entonces se eligen normalmente los microorganismos anaerobios butíricos tales como el Clostridium butyricum, Clostridium pasteurianum, o el microorganismo aerobio Bacillus coagulans, dependiendo de la naturaleza y características del producto que se considere.

El calor es una forma de energía y si se suministra en cantidad suficiente puede iniciar una serie de reacciones que causan la muerte de bacterias y esporas. El mecanismo por el cual el agente esterilizante provoca la muerte de las bacterias y sus esporas no se conoce actualmente, existen varias versiones. Se cree que en algunos casos ocurre una ruptura de la pared celular debido al resultado de fuerzas osmóticas. En otros casos, las bacterias soportadas al calor permanecen en el alimento sólo que son incapaces de reproducirse. También se cree que la causa primaria de la muerte de bacterias por calor es alguna forma de procesos de oxidación. El calor húmedo causa la muerte bacteriana como resultado de la coagulación o algún otro tipo de desactivación de proteínas dentro del microorganismo. La aproximación de los procesos de muerte térmica a una cinética de primer orden respecto al número de microorganismos vivos, condujo a suponer que durante la transferencia de calor ocurre un descenso del poder reproductivo de los microorganismos, como resultado de la desnaturalización de uno o más genes; la mutación que sufre dicho

gene provoca la incapacidad para reproducirse por una mutación nuclear o citoplasmática. Otra teoría es aquella que dice: "los microorganismos en condiciones normales son capaces de sintetizar muchos y muy variados nutrientes necesarios para su desarrollo, y debido a la mutación que sufre por la aplicación de calor, su habilidad de sintetizar nutrientes puede desaparecer, y sobreviene la muerte" (21).

Debido a que el tipo de deterioro microbiano y la resistencia de las bacterias al calor se relacionan principalmente con la acidez del producto, por conveniencia los alimentos se agrupan normalmente en diferentes clases en función de su pH.

Se han propuesto varias clasificaciones. Cameron y Esty (1940), sugirieron la siguiente:

- |                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1.- Alimentos de baja acidez  | pH igual a cinco o más alto |
| 2.- Alimentos de acidez media | pH entre 5 y 4.5.           |
| 3.- Alimentos ácidos          | pH entre 4.5 y 3.7          |
| 4.- Alimentos de alta acidez  | pH igual a 3.7 o más bajo.  |

(25)

Otros investigadores (25) han visto en la práctica que un pH de 4 es una división más realista entre los alimentos ácidos y los altamente ácidos, pues raramente se podrán desarrollar bacterias

formadoras de esporas en alimentos procesados térmicamente y con valores de pH de 4 o más bajo y reconocen sólo tres clases de alimentos según su acidez:

- 1.- Alimentos de baja acidez                      pH arriba de 4.5
- 2.- Alimentos ácidos                                pH entre 4.0 y 4.5
- 3.- Alimentos de alta acidez                     pH abajo de 4.0

(25)

En la tabla 1 se presentan los microorganismos que deterioran los alimentos en diferentes rangos de pH.

MICROORGANISMOS QUE DETERIORAN ALIMENTOS  
DE DIFERENTES VALORES DE pH

-Alimentos de baja acidez y semiácidos pH > 4.5

Termófilos (esporulados)

Productor de agriado (B. *estearothermophilus*)

Productor de gases (C. *thermosaccharoliticum*)

Olor sulfuroso (C. *nitrificans*)

Mesófilos (esporulados)

Anaerobios putrefactivos (C. *botulinum*)

(C. *sporobienes*)

-Alimentos ácidos pH 4-4.5

Termófilos (esporulados)

(B. *coagulans*)

Mesófilos (esporulados)

(B. *polymixa*, B. *macerans*)

(C. *pasteurianum*)

-Alimentos de alta acidez pH 4 o menor

Mesófilos (no esporulados)

(lactobacilos )

(leucostoc)

Tabla 1

### 2.3 Equipo y técnicas de esterilización.

De todos los equipos usados para realizar el proceso de esterilización, el esterilizador autoclave es el más común (figura 1). Las partes esenciales de un autoclave son un armazón de acero diseñado para una presión de trabajo normal de 20 a 25 psig., con una puerta o tapa que es generalmente del tamaño de una de las caras laterales del esterilizador horizontal o de la tapa superior en un esterilizador vertical. Una chaqueta rodea al autoclave por todos lados. Tanto el armazón principal como la chaqueta son alimentados independientemente con vapor y ambos están equipados con indicadores de presión. En la parte inferior del equipo se encuentran los puntos de extracción de aire y de condensados conectados al armazón y a la chaqueta, un indicador de temperatura se coloca en el punto de extracción de condensados del armazón principal. Generalmente, el vapor se suministra por medio de una fuente externa, aunque hay un tipo de autoclave que genera su propio vapor (21).

De manera general, los autoclaves pueden ser divididos en dos clases: los que eliminan el aire con el mismo vapor y los que eliminan el aire por medio de vacío.

Debido a los problemas de extracción del aire y de penetración de vapor, no se puede tener la seguridad de poder alcanzar la temperatura de proceso en todos los puntos del autoclave. Idealmente, la temperatura debe ser medida en varios puntos de la cámara

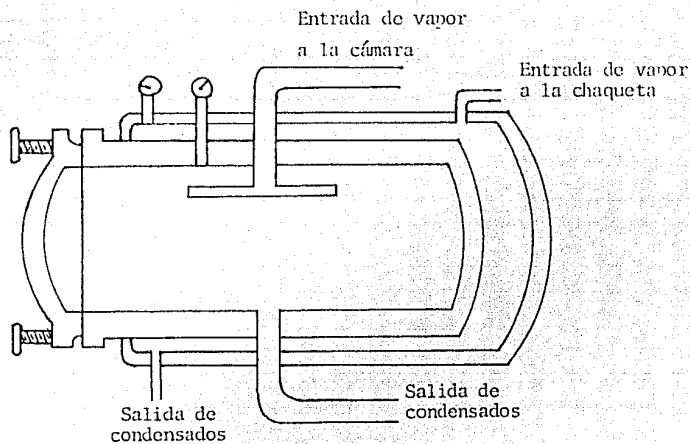


Figura 1 ESTERILIZADOR AUTOCLAVE

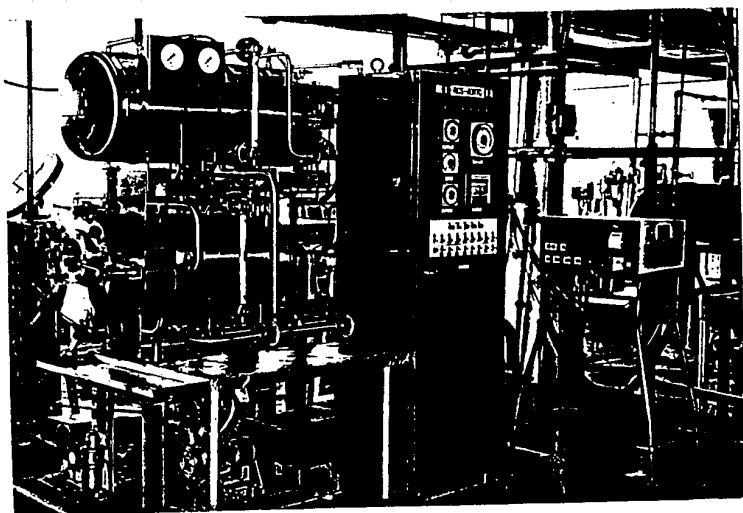


Figura 2 ESTERILIZADOR CON MEZCLA AGUA-VAPOR

2 autoclaves

ra, incluyendo los lugares que se consideran más inaccesibles. de esta manera podría evitarse que sólo una parte de la carga reciba un tratamiento suficiente y también que una parte de la carga reciba un tratamiento excesivo. Es recomendable realizar un experimento en el esterilizador que nos indique la distribución de calor dentro del mismo y, a partir de esta información, el mejor arreglo de la carga para que toda la carga reciba la misma cantidad de calor.

El proceso se inicia abriendo la válvula de vapor para que entre en contacto con el alimento envasado colocado dentro del autoclave. Se realiza un purgado del equipo para extraer el aire, que será desplazado por el vapor. Al terminar el purgado se inicia el tiempo de proceso.

Después de transcurrido el tiempo de proceso se inicia el proceso de enfriamiento; existen varios métodos para realizarlo:

Enfriamiento en un canal

Enfriamiento en el mismo esterilizador

Enfriamiento con vapor y agua a presión

Enfriamiento con aire y agua a presión

La cantidad y grado de enfriamiento dependerá del producto y de la manipulación que sufrirán los envases después del enfriamiento. En general, los envases deben enfriarse a una temperatura de 100°F porque se tiene la ventaja de que el calor



que queda en el envase sirve para que la superficie externa del mismo evapore la humedad residual del enfriamiento, facilitando de esta manera, la manipulación posterior al enfriamiento. Si los envases son almacenados apilados o en cajas a temperaturas superiores a 100°F, el producto puede sufrir quemaduras y alterar su calidad (1).

Los productos procesados en envases de vidrio y cerrados con tapas selladas al vacío son sometidos a un tratamiento con agua a presión de aire; esta presión sirve para mantener la circulación de agua y para igualar las presiones interna y externa del envase, pues en el interior del envase se produce un aumento de la presión debido al aumento de la temperatura, y el procesamiento con agua previene la formación de espacios de aire alrededor de los frascos. Si se hace circular el agua continuamente entre los frascos, se obtiene una distribución de calor uniforme. Es aconsejable que el equipo disponga de un suministrador de agua caliente para el llenado de agua en esterilizadores horizontales (figura 2), con el objeto de reducir el tiempo de levante y para evitar choques térmicos en los envases. Puede utilizarse un tanque de almacenamiento de agua caliente de preferencia cerrado. El agua caliente también se utiliza para formar una corriente junto con agua fría para prevenir un enfriamiento brusco que puede dañar los envases.

2.4 Modelos matemáticos existentes para análisis de datos de esterilización.

2.4.1 Método general

Originalmente, este método fue descrito por Bigelow y colaboradores en 1920 (25).

El método toma como base la ecuación de cinética de primer orden, pues se ha observado experimentalmente que la degradación térmica de los microorganismos obedece a una cinética de dicho orden, y al graficar el logaritmo de la concentración en función del tiempo, se obtiene una línea recta.

El método consiste en la elaboración de una gráfica en la que se integra el efecto letal que recibe el alimento durante todo el tiempo de proceso de esterilización (9).

De las relaciones tiempo-temperatura observadas en una curva de penetración de calor, es posible asignar una velocidad letal para cada temperatura representada por un punto en las curvas que describen el calentamiento o enfriamiento de un producto durante su procesamiento. El valor letal (L) asignado a cada temperatura es numéricamente igual al recíproco del número de minutos requeridos para destruir un porcentaje dado de esporas a esta temperatura. Ball en 1928 expresó lo anterior matemáticamente de la siguiente manera:

$$L = \frac{1}{\log^{-1} \left( \frac{250-TC}{z} \right)} \quad (1)$$

o también:

$$L = 10 \frac{(10-350)}{z} \quad (2)$$

donde:

L = velocidad letal a la temperatura T

T = una temperatura letal

z = el número de °Fahrenheit requeridos para que la curva TD atraviese un ciclo logarítmico. Se puede decir que z caracteriza a un microorganismo con respecto a su resistencia relativa a diferentes temperaturas. Numéricamente es igual al recíproco del valor de la pendiente de la curva TD. Representa la diferencia de temperatura característica de cada especie de microorganismos necesaria para disminuir en un 90% el valor (D). Las definiciones de los términos empleados se encuentran en las páginas 40 y la simbología en la página 51.

Este método ha sido modificado con las contribuciones de Ball (1928) y Schultz & Olson (1940) (15).

La más importante contribución de Ball fue la construcción de una curva de muerte térmica hipotética, que pasa a través del punto 1 minuto y 250 °Fahrenheit. Al graficar las velocidades letales encontradas en esta curva en función del tiempo, se obtiene una curva de letalidad, cuya área bajo la curva es proporcional al equivalente de el proceso total en minutos a 250° Fahrenheit.

El símbolo (F) (introducido por Ball en 1923) se usa para designar el equivalente -en minutos a 250 °F- de la letalidad combinada de todos los pares de valores tiempo-temperatura en el punto de más bajo calentamiento (llamado punto frío), dicha letalidad es representada por las curvas de calentamiento y enfriamiento de un producto durante su procesamiento. Este concepto (F), permite una comparación directa de la capacidad relativa de esterilización de diferentes procesos térmicos, esto indica que 2 procesos con igual valor de (F) serán equivalentes en cuanto a su capacidad esterilizante.

Para determinar la letalidad total de un proceso mediante el método general, primero se calcula el valor "z" a través de determinaciones de tiempo de muerte térmica para el microorganismo en cuestión. Para calcular el valor "z", se traza una gráfica en papel semilogarítmico colocando el número de microorganismos (en la escala logarítmica) existentes en un cultivo a una temperatura determinada previamente, en función del tiempo en el que se cuan-

tifica: en dichos microorganismos, obteniendo una gráfica de velocidad de muerte. Se calcula la pendiente de la línea así obtenida y el recíproco de esta es el valor conocido como "D" (velocidad de muerte de un microorganismo a una temperatura dada) (Figura 3). Es el tiempo necesario en minutos a una temperatura constante para que destruya el 90% de los microorganismos presentes. Un subíndice indica a que temperatura se calculó "D". En papel semilogarítmico, se traza una gráfica con el número de microorganismos sobrevivientes en la escala logarítmica en función del tiempo en minutos en la escala lineal, después se ajusta una línea recta a través de todos los puntos. El valor "D" será el tiempo en minutos requerido para que la curva atraviese un ciclo logarítmico. Matemáticamente se puede expresar como:

$$C = C_0(10)^{-Fp/D_r} \quad (3)$$

donde:

R coeficiente de intercepción de la curva de microorganismos presentes

C<sub>0</sub> concentración inicial de microorganismos

Fp valor de esterilización del proceso térmico

D<sub>r</sub> valor D a la temperatura de referencia (Tr)

Se repite el cálculo de "D" a diferentes temperaturas. De esta manera, se obtienen varios pares de datos "D" con su respectiva temperatura. Con estos datos, se puede elaborar otra gráfica en papel semilogarítmico, con los valores "D" en la escala logarítmica y las temperaturas en la escala lineal. De la recta

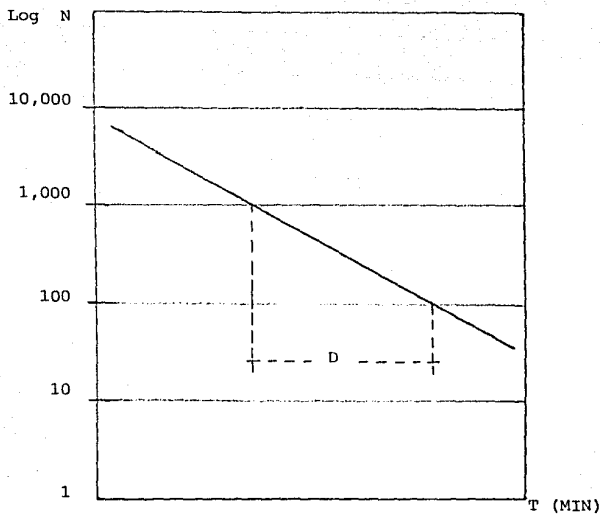


FIG. 3 CALCULO GRAFICO DE D

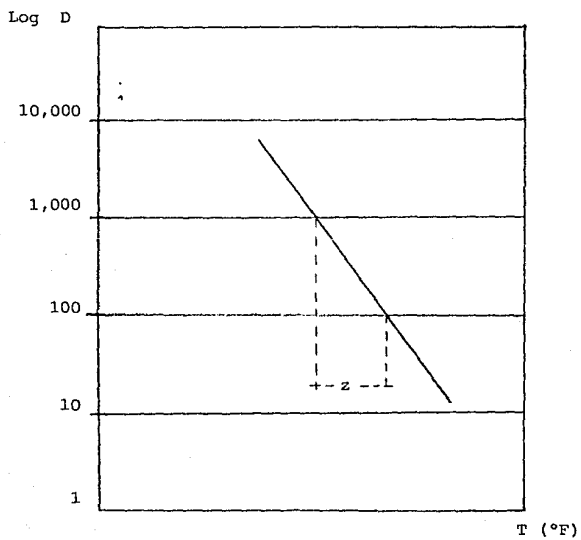


FIG. 4 CALCULO GRAFICO DE z

2 cuadros representando  $^2D$  y  $^2z$   
grafica 3 calculo grafico de  $D$  fig. 4 calculo grafico de  $z$

resultante se obtiene "z", que es el número de grados Fahrenheit necesarios para que la recta atraviese un ciclo logarítmico. Numéricamente es igual al recíproco de la pendiente (Figura 4). El valor "z" caracteriza a un microorganismo con respecto a su resistencia relativa a diferentes temperaturas. Mide el cambio en el tiempo de muerte térmica o la velocidad de muerte con cambios en la temperatura (12).

En algunos casos, no será necesario calcular el valor de "z" pues comúnmente se toma al Clostridium botulinum como el microorganismo que se ha de destruir térmicamente en alimentos de baja acidez; este microorganismo ha sido extensamente analizado y se sabe que tiene un valor de "z" igual a 18°F.

Con el valor de "z" y el de la temperatura de referencia (Tr) se puede calcular la letalidad del proceso arreglando los datos en las siguientes columnas:

1	2	3	4	5
Tiempo (min)	Temperatura (°F)	Vel. total (1/min)	$\Sigma (F/L)$	Letalidad total (min)

En la columna 4 se realiza la sumatoria de todos los valores de velocidad total.

Si se multiplica el valor de la columna 4 por el intervalo de tiempo en que se tomaron las temperaturas, se determina el valor de la columna 5.

Si las mediciones de temperatura no son tomadas a intervalos



de tiempo iguales, se puede calcular la letalidad por medio de una gráfica de velocidad total en función de el tiempo. El área bajo la curva representa la letalidad total (F) en minutos a la temperatura de referencia. Para calcular el área se puede usar el método trapezoidal para cálculo de áreas (24).

Debe hacerse notar que para la evaluación de procesos térmicos, sólo se necesita comparar el valor (F)proc. calculado del proceso contra un valor recomendado para el alimento que se esté considerando (F)req. (10).

Para realizar este cálculo se utiliza la ecuación que describe la muerte de bacterias, la cual obedece a una cinética de reacción de primer orden, y haciendo la suposición de que todas las regiones del producto reciben un proceso térmicamente igual:

$$(F)_{req.} = D_r(\log a - \log b) \quad (4)$$

donde:

- (a) concentración inicial de esporas
- (b) concentración final deseada de esporas
- (Dr) velocidad de muerte del microorganismo a temperatura constante de referencia.

Esta ecuación se obtiene de una gráfica de sobrevivencia logarítmica, en donde se tiene una línea recta al graficar el número de microorganismos sobrevivientes en la escala logarítmica en función del tiempo. La línea recta esta dada por la ecuación general:  $y = mx$ . En la gráfica de sobrevivencia logarítmica los términos de la recta son:

$$y = (\log a - \log b)$$

$$m = (1/D)$$

$$x = t$$

Hayakawa (9), usó una fórmula de integración gaussiana para estimar el valor de esterilización; de acuerdo al cálculo de un gran número de pruebas, son suficientes 6 temperaturas del alimento, obtenidas de puntos espaciados en una curva tiempo-temperatura para la estimación correcta del valor de esterilización.

#### 2.4.2 Método por fórmulas

Utiliza una fórmula para predecir la curva de temperaturas del alimento que es procesado. Dicha fórmula no tiene ninguna suposición restrictiva del tipo de alimento, de la forma y tamaño del contenedor o del método de calentamiento:

$$(Dr/D) = 10^{(T-Tr/z)}$$

rearrreglando

$$D = Dr 10^{(Tr-T/z)} \quad (5)$$

Se ha encontrado experimentalmente que la velocidad de muerte de un microorganismo está dada por:

$$-(dn/dt) = K(n)$$

que es equivalente a:

$$-(d \log n)/dt = (1/DT) \quad (6)$$

donde:

$$DT = (2.303/K)$$

K constante de velocidad de primer orden

combinando (5) y (6):

$$-\int_{na}^{nb} d(\log n) = \left(-\frac{1}{D_{Tref}}\right) \int_{ta}^{tb} \frac{dt}{10^{(Tr-T)/z}} \quad (7)$$

evaluando el lado izquierdo de la ecuación 7 encontramos (F)req.:

$$(F)_{req.} = D_{Tref.} * (\log a - \log b) = \int_{ta}^{tb} \frac{dt}{10^{(Tr-T)/z}} \quad (8)$$

El término a la izquierda de la igualdad en la ecuación 8 nos da la relación entre (F)req. y el cambio en concentración de esporas. (a) es la concentración inicial y es dato. Si (b) es una concentración de esporas que proporcione seguridad desde el punto de vista de salud pública, entonces podemos hablar de un valor (F)req.

El término a la derecha de la igualdad de la ecuación (8), relaciona (F) con el tiempo y con la temperatura de proceso en que el proceso térmico actúa sobre las esporas (entre el tiempo  $t_a$  y el tiempo  $t_b$ ), y podemos hablar de un tiempo de proceso (F)proc.:

$$(F)_{proc.} = \int_{ta}^{tb} \frac{dt}{10^{(Tr-T)/z}} \quad (9)$$

La letalidad de un proceso es la relación del valor (F)proc. con el valor de (F)req. para una esterilidad comercial.

$$\text{Letalidad} = \frac{(F)\text{proc.}}{(F)\text{req.}} \quad (10)$$

El proceso de esterilización se considera en dos partes: calentamiento y enfriamiento, y la letalidad del proceso se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Letalidad} = \left[ \frac{1}{F_{\text{req.}}} \right] \left[ \int_0^{\theta_g} \frac{d\theta}{10^{(Tr-T(\theta))/z}} + \int_{\theta_g}^{\theta_b} \frac{d\theta}{10^{(Tr-T(\theta))/z}} \right] \quad (11)$$

calentamiento                      enfriamiento

Ball transformó estas integrales en integrales de temperatura con la siguiente ecuación:

$$d\theta = (-f/2.303)(d(Tr-T)/Tr-t) \quad (12)$$

con las condiciones:

$$T = 0 \quad TR - T = TR - T_i$$

$$\theta = \theta_g \quad TR - T = TR - T_g$$

Para usar (Tr - T) como variable es conveniente modificar la función exponencial como:

$$\begin{aligned} \frac{(T_{\text{ref.}} - T)/z}{10} &= \frac{(T_{\text{ref.}} - TR + TR - T)/z}{10} \\ &= \frac{(T_{\text{ref.}} - TR)/z}{10} + \frac{(TR - T)/z}{10} \end{aligned}$$

$$= 10 \frac{(T_{ref} - TR)/z}{e} \quad 2.303((TR - T)/z) \quad (13)$$

De esta manera, se definen dos nuevas cantidades :

$$U = (F)_{req.} \cdot 10^{(Tr-T)/z} \quad (14)$$

y

$$X = 2.303((TR-T)/z) \quad (15)$$

La parte de calentamiento de la ecuación 11 queda, sustituyendo las ecuaciones 12,13,14 y 15, de la siguiente manera:

$$(Letalidad)_{cal.} = (1/Freq.) \int_0^{\theta g} \frac{d\theta}{10^{(Tr - T)/z}} \quad (16)$$

$$(Letalidad)_{cal.} = \left[ \frac{1}{2.303} \right] \left[ \frac{f}{U} \right] \int_{x_i}^{x_g} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (17)$$

La integral del lado derecho de la ecuación 17 se puede comparar con la fórmula de integral exponencial de la siguiente manera:

$$Ei(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (18)$$

resolviendo queda:

$$Ei(x) = Ei(x_g) - Ei(x_i)$$

y que corresponde a una curva que empieza en  $T_g$ , y tiene un valor de  $j$  de 1.41 e interseca la curva logarítmica de enfriamiento en  $Tic = T_g - 0.343(T_g - T_{cw})$ . Sin embargo con estas

simplificaciones empíricas, la evaluación de la letalidad para esta porción de la curva se vuelve difícil.

Para  $g < 0 < k$

$$\begin{aligned}
 \text{(Letalidad)} &= \frac{\left(\frac{f}{U}\right)}{2.303} \exp\left[-\frac{2.303 (TR-Tg)}{z}\right] \left\{ 0.332 \exp. * \right. \\
 \text{retardo de} & \\
 \text{enfriamiento} & \\
 \left. \left[\frac{-0.789 (Tg-Tcw)}{z}\right] + 0.253 \frac{z E}{Tg-Tcw} \exp. \left[\frac{0.692 (Tg - Tcw)}{z}\right] \right\} & \quad (19)
 \end{aligned}$$

donde E es evaluada numéricamente con la siguiente integral.

$$E = p^2 \int_1^{2.14} \exp^{-px} (x^2 - 1)^{1/2} dx \quad (20)$$

$$\text{con } p = 22.303 * 0.3 * (Tg - Tcw)/z \quad (21)$$

Para la porción logarítmica de la curva de enfriamiento, desde  $Tc1 = Tg - 0.343(Tg - Tcw)$  a  $Tb$ , se asume que  $f$  de la curva de enfriamiento es igual a la curva de calentamiento.

Se tiene para la parte logarítmica lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{(Letalidad)} &= \frac{\left(\frac{f}{U}\right)}{2.303} \exp\left[-\frac{2.303 (TR-Tcw)}{z}\right] \left\{ Ei * \right. \\
 \text{parte logarítmica} & \\
 \text{enfriamiento} & \\
 \left. \left[\frac{2.303}{z} (Tic - Tcw)\right] Ei \left[\frac{2.303}{z} (Tb-Tcw)\right] \right\} & \quad (22)
 \end{aligned}$$

donde  $Ei(x)$  es una integral exponencial que se define como:

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{\exp^u}{u} du \quad \text{con } x > 0$$

Los valores de  $Ei(x)$  se pueden obtener también de la siguiente ecuación:

$$Ei(x) = \theta + \ln x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n(n!)^2} \quad \text{con } x > 0$$

Después del desarrollo de todas estas fórmulas tenemos que la letalidad del proceso completo está dado por la siguiente fórmula:

Letalidad del proceso completo:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{f/U}{2.303} \right) \left\{ Ei \left[ (2.303/z)(TR-Tg) \right] - Ei \left[ (2.303/z)(TR-Ti) \right] \right\} + \\ & (f/U) 2.303 \exp \left[ -(2.303/z)(TR-Tg) \right] \left\{ 0.332 \exp \left[ -0.789/z(Tg-Tcw) \right] + \right. \\ & 0.253 (E/(Tg-Tcw)) \exp \left[ 0.692/z(Tg-Tcw) \right] \left. \right\} + (f/U) 2.303 * \exp \left[ \right. \\ & \left. -(2.303/z)(Tr-Tcw) \right] \left\{ Ei \left[ 2.303/z(Tc1-Tcw) \right] - Ei \left[ (2.303/z)(Tb-Tcw) \right] \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

Debido a las suposiciones que se tienen en la curva de enfriamiento, varias partes de la ecuación 23 tienen una relación

directa unas con otras. Esto es en la curva de enfriamiento empieza en  $T_g$  con un valor de  $j$  de 1.41 y la pendiente de la fase logaritmica ( $f_h$  cal.) igual a ( $f_h$  enf.). Por lo tanto, una vez que fijemos el valor de  $T_g$  o el tiempo  $t_g$  al final del proceso de calentamiento el valor de las letalidades en la ecuación 23 es determinado fácilmente.

Para un valor dado de  $f_h/U$ ,  $z$ ,  $TR$  y  $T_{ow}$ , solo con un valor de  $T_g$  la suma de las letalidades es igual a la unidad. Para estos valores de  $T_g$  se presentan gráficas de ( $f_h/U$ ) como función de ( $g$ ) ( $g=TR-T_g$ ). Puesto que  $T_g$  o  $g$  es la variable principal usada en las tablas, correspondientes a  $t$  al final de la porción de calentamiento durante el proceso, la "fórmula" en el método de Ball es justo la ecuación de calentamiento:

$$\theta g = f \log(j(TR - T_i)) - f \log g \quad (24)$$

Para encontrar el tiempo de calentamiento para un ( $F$ ) requerido se calculan ( $U$ ) y ( $f_h/U$ ), se encuentra ( $g$ ) de tablas y se calcula ( $\theta g$ ) de la ecuación 24.

Es importante enfatizar que las letalidades relacionadas en las tablas de ( $f_h/U$ ) en función de ( $g$ ), son las letalidades del ciclo completo de calentamiento y enfriamiento.

Para calcular los procesos por el método de fórmula se traza



una gráfica con los datos tiempo-temperatura sobre papel semilogarítmico, el tiempo en el eje de las abscisas y la temperatura en el eje logarítmico de las ordenadas. El tiempo cero se toma en el momento en que se abre el vapor. Al momento en que el esterilizador alcanza la temperatura de proceso se le conoce como el tiempo de levante de la temperatura.

En realidad, las temperaturas que se anotan al trazar la gráfica son las temperaturas de esterilización menos la temperatura en el centro del envase. En lugar de hacer estas sustracciones para cada valor de temperatura, es más práctico darle un giro de  $180^\circ$  al papel semilogarítmico y marcar las temperaturas del envase directamente. En la línea superior del papel ya girado, se marca la temperatura de la retorta menos un grado. En la línea superior del segundo ciclo logarítmico, la temperatura es  $10^\circ$  más baja que la temperatura de la retorta y en la línea inferior del tercer ciclo es  $100^\circ$  por debajo de la temperatura de retorta. La razón de girar el papel semilogarítmico es para visualizar mejor el proceso y para graficar las temperaturas del envase directamente.

Al realizar esta gráfica, se pueden presentar dos tipos de curvas: curva de calentamiento simple y curva de calentamiento quebrada.

Una curva de calentamiento simple se presenta en alimentos de consistencia viscosa, los cuales se calientan por conducción. Prácticamente no hay movimiento del producto dentro del envase.

También se presenta este tipo de curva en alimentos envasados líquidos, los cuales se calientan solamente por convección; durante el calentamiento y el enfriamiento, el producto dentro del envase se encuentra en continuo movimiento provocado por la diferencia de temperatura entre el producto y el medio de calentamiento.

Una curva de calentamiento quebrada se presenta en productos que se calientan inicialmente por convección y después, debido a algún agente espesante, el calentamiento se produce por conducción. También se presenta en productos que inicialmente se calientan por conducción y posteriormente por convección; este caso se presenta generalmente en alimentos con un medio líquido conteniendo piezas sólidas, las cuales están localizadas de tal manera que sólo permiten el calentamiento por conducción, pero después de cierto tiempo, las fuerzas convectivas son lo suficientemente poderosas para dispersar las piezas sólidas del alimento e iniciar el movimiento del producto provocando el calentamiento por convección.

Una vez marcados los puntos obtenidos de la penetración de calor, se traza una o dos líneas rectas (curva térmica simple y curva térmica quebrada, respectivamente), a través de los puntos que estén en el rango letal (por encima de 210°F). Una vez dibujadas las líneas en la gráfica, hay que determinar los factores que describen su posición. A continuación, se muestran los cálculos para los dos tipos de curvas:

## CURVA DE CALENTAMIENTO SIMPLE

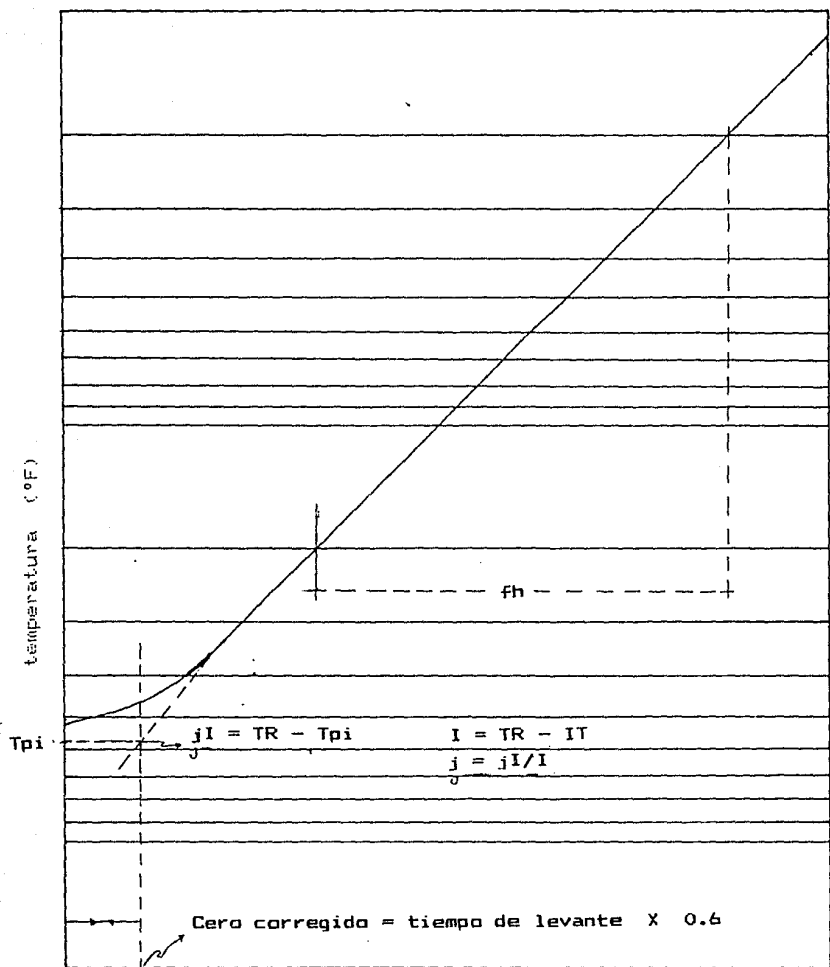
En la figura 1 se muestra una curva térmica simple, de esta gráfica se obtienen dos factores que se usan en el cálculo de los procesos. Estos factores son:  $j$  (factor de rezago) y  $f_h$  (recíproco de la pendiente).

El valor " $j$ " representa el tiempo de rezago antes de que la curva tome la forma de una línea recta en papel semilogarítmico. Matemáticamente está dada por:

$$(j) = (jI/I) = (TR-T_{ip})/(TR-T_i) \quad (25)$$

Se obtiene dividiendo la diferencia entre la temperatura de autoclave menos la temperatura pseudoinicial de calentamiento, entre la diferencia de temperatura entre la temperatura de autoclave menos la temperatura inicial real.

Este rezago provoca que la gráfica muestre una porción inicial curva y después se observa una línea recta. Esto se explica porque al iniciar el experimento se comienza a alimentar vapor al esterilizador y después de un tiempo, el equipo alcanza la temperatura de proceso. A ese tiempo que transcurre desde que se alimenta vapor hasta que el equipo alcanza la temperatura de



(tiempo (minutos))

grafica No. 1

Curva térmica simple

curva termica simple

proceso se le llama tiempo de levante (CUT). Es obvio que durante el tiempo de levante el producto no recibe la misma totalidad que recibe cuando el equipo ha alcanzado la temperatura de proceso, sino que recibe una cantidad menor de calor. Ball (1928), estableció experimentalmente el efecto de ese periodo sobre el proceso térmico y llegó a la conclusión de que era equivalente a considerar que el producto estaba sometido a la temperatura final durante un 40% del tiempo de levante (4).

Para tener en cuenta este efecto en los cálculos matemáticos, se define la temperatura pseudo inicial, que se calcula gráficamente de la siguiente manera: En la curva de calentamiento se prolonga la línea recta hasta su intersección con una línea vertical, que representa el tiempo cero corregido; esta vertical se traza por el punto del eje de las abscisas que corresponde al 50% del tiempo de levante. La temperatura correspondiente al punto de intersección con la recta de calentamiento es la temperatura pseudo inicial.

El segundo factor de penetración de calor que se obtiene de la gráfica de una curva térmica simple es "fh". Este factor es el tiempo en minutos que toma la línea, trazada por los puntos de la historia térmica, en pasar a través de un ciclo logarítmico. Con los valores de "j" y de "fh" obtenidos de la gráfica de datos térmicos puede determinarse el valor de esterilización (F) de un proceso dado, o bien el tiempo de proceso (t), en minutos, necesario para que un proceso térmico proporcione un valor de letalidad fijada.

Para hacer más comprensible este capítulo, se darán las definiciones de algunos términos que son de gran utilidad en el estudio de los métodos de análisis de datos de procesos de esterilización:

(D) Es la velocidad de muerte de un microorganismo a una temperatura dada, también se le conoce como la reducción decimal del tiempo. Es el tiempo en minutos necesario a una temperatura constante para que destruya el 90% de microorganismos presentes.

Curva de tiempo de muerte térmica (D<sub>T</sub>) En papel semilogarítmico, se grafican los tiempos de sobrevivencia y destrucción en minutos en la escala logarítmica en función de la temperatura en °F en la escala lineal. Una vez que se haya realizado esto, se traza la línea que mejor se ajuste a los datos.

Curva de tiempo de muerte térmica "fantasma". En papel semilogarítmico, los valores de "D" se grafican en la escala logarítmica en función de la temperatura en la escala lineal en °F y se traza la línea recta que mejor se ajuste a todos los valores.

(z) Es la pendiente de la curva de tiempo de muerte térmica o de la curva de tiempo de muerte térmica "fantasma". El valor de "z" representa el número de grados fahrenheit requeridos para que la curva atraviese un ciclo logarítmico, y mide el tiempo de muerte térmica o la velocidad de muerte con respecto al cambio de temperatura.

(F) Es el número de minutos requeridos para destruir un número de microorganismos a una temperatura dada. El valor de "F" es

usado para comparar el valor de esterilización de diferentes procesos. Sin embargo, el valor de "F" para dos procesos no deben compararse si no tienen el mismo valor de "z".

(Fo) Es el número de minutos requeridos para destruir un número específico de microorganismos a 250 °F cuando "z" = 18. El valor de "z" = 18 es usualmente asumido para el *C. botulinum*, cuando las determinaciones de tiempo de muerte no han sido realizadas sobre el producto en consideración.

(Ti) Es la temperatura inicial del alimento procesado

(Tr) Es la temperatura del esterilizador (del proceso).

(CUT) Es el llamado tiempo de levante. Es el tiempo desde que se suministra vapor hasta que se alcanza la temperatura final de operación.

(ji) Es la temperatura pseudo inicial

Cero corregido. Es el tiempo de levante multiplicado por 0.6. Ball experimento y concluyó que durante el tiempo de levante, el producto recibe el 40% de valor letal de un mismo periodo de tiempo, pero a la temperatura de proceso.

(j) Se le conoce como tiempo de rezago y es igual a  $(ji/I)$

(I) Diferencia de temperatura entre la temperatura de proceso y la temperatura inicial.  $(Tr - Ti)$

(fh) Es la pendiente de la porción recta de la curva de



calentamiento. La pendiente de la curva es expresada como el número de minutos requeridos para que la curva trazada en papel logarítmico atraviese un ciclo. Cuando se presenta una ruptura en la curva de calentamiento, "fh" es la pendiente de la porción lineal de la curva de calentamiento antes de la ruptura.

(f2) Se presenta sólo para curvas de calentamiento quebradas. Es la pendiente de la porción lineal de la curva de calentamiento después de la ruptura.

(Fc) Es la pendiente de la porción recta de la curva semilogarítmica de enfriamiento.

(Xbh) Es el tiempo en minutos desde el cero corregido del proceso hasta la ruptura de la curva de calentamiento.

Para calcular (F) se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\log g = \log j_i - \frac{B}{f_h} \quad (26)$$

$$F = \frac{f_h}{(f_h/U)F_0} \quad (27)$$

Para resolver la ecuación (26) los valores de (j<sub>i</sub>) y de (f<sub>h</sub>) ya han sido determinados, el tiempo de proceso (B) es conocido. Estos valores se sustituyen esta ecuación (26) y así se calcula el valor de (log g). El valor (g) es el número de grados por debajo de la temperatura de esterilización en el punto de más lento calentamiento en el envase, al final del proceso. Con el fin de simplificar el cálculo se usa (log g) en las ecuaciones en lugar

de (g). Para cada valor de  $g$  ( $\log g$ ) hay un valor correspondiente del término  $(fh/U)$ . Esta relación aparece en las gráficas 3, 4 y 5 del apéndice. El valor  $(fh/U)$  es un factor que está relacionado con  $(\log g)$  y que fue calculado originalmente mediante un método computarizado elaborado por Teixeira y colaboradores. De los resultados obtenidos mediante este método, elaboraron unas gráficas de  $(fh/U)$  en función de  $(\log g)$ . Para consultar estas gráficas ver apéndice.

El término " $F_i$ " está relacionado con la temperatura del esterilizador y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$F_i = \text{Log} \frac{-1 + (250 - RT)}{18} \quad (26)$$

donde: 18 es el valor de  $z$

250 es la temperatura de referencia comúnmente usada para alimentos poco ácidos.

Se calcula el valor adecuado de  $(F_i)$  para la temperatura de referencia y se sustituye en la ecuación (27) junto con  $(fh/U)$  (obtenido de la gráfica 3, 4 ó 5 del apéndice para el valor correspondiente de  $(\log g)$  y  $(fh)$ ). El valor  $(F)$  obtenido es el valor de esterilización del proceso.

Para calcular  $B$  se usan las siguientes ecuaciones:

$$fh/U = \frac{fh}{(F)(E_i)} \quad (29)$$

$$B = fh (\log jI - \log g) \quad (30)$$

En la ecuación (29),  $(fh)$  es calculado de la curva de penetración de calor,  $(F)$  es el valor de esterilización deseado y  $(Fi)$  se obtiene de la ecuación 28 para la temperatura de referencia que se esté considerando.

De la relación gráfica de  $(fh/U)$  y  $(\log g)$ , puede obtenerse el valor  $(\log g)$  que corresponde al valor de  $(fh/U)$  calculado por medio de la ecuación (29). En la gráfica, el valor  $(fh/U)$  está colocado en el eje de las ordenadas y el valor  $(\log g)$  se encuentra en el eje de las abscisas. Este valor de  $(\log g)$  se sustituye en la ecuación (30). Los valores de  $(jI)$  y  $(fh)$  se obtienen directamente de la curva de penetración de calor (23).

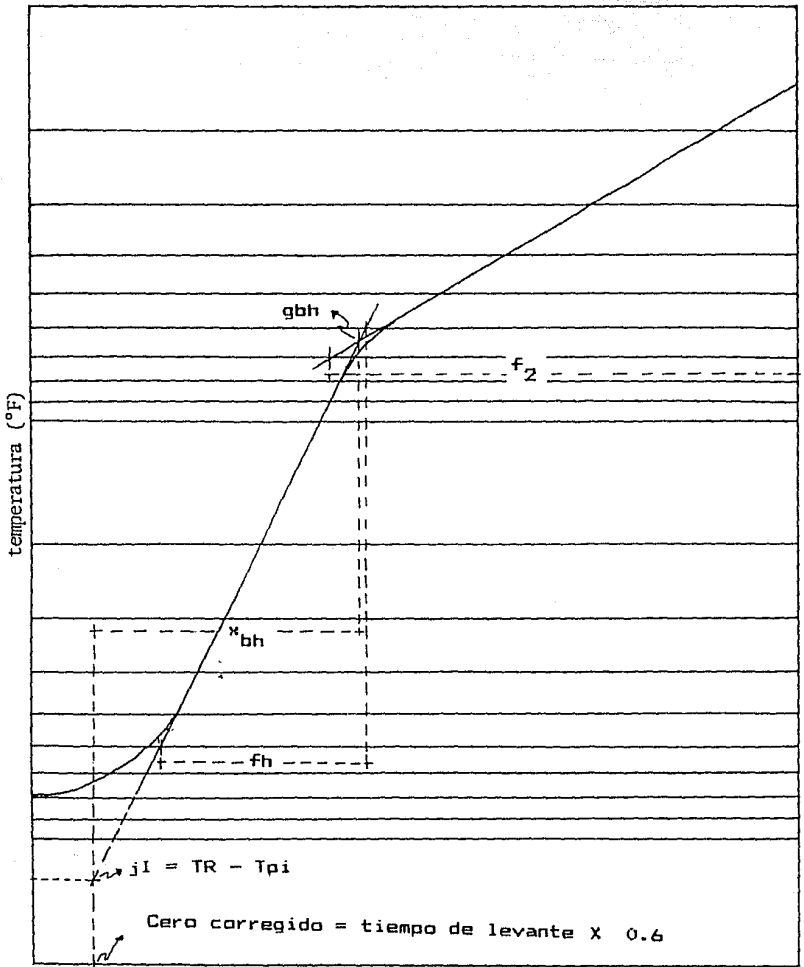
El valor calculado de  $B$  es el tiempo de proceso en minutos.

#### CURVA DE CALENTAMIENTO QUEBRADA.

De la gráfica de una curva quebrada de calentamiento (página 45) necesitamos obtener cuatro factores:

- $jI$  (Temperatura pseudoinicial)
- $fh$  (Pendiente de la primera curva de calentamiento)
- $f2$  (Pendiente de la segunda curva de calentamiento)
- $Xbh$  (Tiempo para llegar desde el cero corregido hasta el cruce de las dos rectas)

Los valores de  $(jI)$  y de  $(fh)$  se determinan en la misma forma descrita para el procedimiento de la curva simple. El valor  $(f2)$



tiempo (minutos)  
 gráfica No. 2  
 Curva térmica quebrada

curva termica quebrada

es el tiempo requerido para que la segunda porción recta de la curva de calentamiento atraviese un ciclo logaritmico. El valor ( $X_{bh}$ ) es en la gráfica el tiempo desde el cero corregido hasta el punto en que se cruzan las dos líneas rectas ( $f_1$ ) y ( $f_2$ ). Con estos cuatro factores, puede calcularse el valor de esterilización ( $F$ ) o el tiempo de proceso ( $B$ ).

Para determinar  $F$  se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\log q_{bh} = \log j_1 - \frac{X_{bh}}{f_1} \quad (31)$$

$$\log q_{h2} = \frac{f_1(\log j_1) + (f_2 - f_1)\log q_{bh} - B}{f_2} \quad (32)$$

$$F = \frac{f_2}{(f_1/U)F_1} - \frac{r_{bh}(f_2 - f_1)}{F_1(f_1/U_{bh})} \quad (33)$$

Usando los valores ( $j_1$ ), ( $f_1$ ) y ( $X_{bh}$ ) obtenidos de las curvas de calentamiento y dado que  $j = j_1 - 17$ , se calcula  $\log q_{bh}$ .  $q_{bh}$  es el número de grados por debajo de la temperatura de retorta en el punto donde se quiebra la curva y está relacionado con  $(f_1/U_{bh})$  en la misma forma en que ( $q$ ) está relacionado con  $(f_1/U)$ , ( $t$ ) y como se expuso al tratar las curvas térmicas simples. El valor de  $(f_1/U_{bh})$  se obtiene de la misma figura donde se obtiene  $(f_1/U)$  para su correspondiente valor de  $(\log q_{bh})$  (gráficas 3, 4 y 5 del apéndice). Este valor se usa en la ecuación 33. La última incógnita en la ecuación 33 es ( $r_{bh}$ ), un factor de proporcionalidad que está relacionado con  $(\log q_{bh})$  de acuerdo a la gráfica 6 del apéndice. El valor ( $F_1$ ) se obtiene de la ecuación

28 y corresponde a la temperatura de referencia utilizada. Con este, ya se conocen todos los términos de la ecuación 33, y puede resolverse para obtener (F1).

Para determinar (R) cuando la curva de calentamiento es quebrada se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\log q_{bh} = \log j_1 - \frac{x_{bh}}{f_h} \quad (34)$$

$$f_h/U = \frac{F_2}{r_{bh}(12-f_h) + F_1(F_1) + \frac{F_2}{f_h/U_{bh}}} \quad (35)$$

$$R = f_h(\log j_1) + (12-f_h)\log q_{bh} - F_2(\log q_{h2}) \quad (36)$$

El valor de  $\log q_{bh}$  se calcula fácilmente mediante la ecuación 34, ya que ( $j_1$ ), ( $f_h$ ) y ( $x_{bh}$ ) se conocen de la gráfica de la curva de penetración de calor. Con este valor de ( $\log q_{bh}$ ) puede encontrarse el valor de ( $f_h/U_{bh}$ ) en la gráfica 3, 4 o 5 que se encuentran en el apéndice al final del libro y el valor de ( $r_{bh}$ ) se encuentra en la gráfica 6 del apéndice. Estos valores se sustituyen en la ecuación 35. En esta ecuación, ( $F_1$ ) es el valor de esterilidad requerido, ( $F_1$ ) se determina con la ecuación 28 para la temperatura de referencia utilizada, y ( $F_2$ ) y ( $f_h$ ) se obtienen de la curva de penetración de calor. Con estos valores ya se tienen los datos necesarios para calcular ( $f_h/U$ ). El valor de ( $\log q$ ) se calcula en las mismas gráficas que se usan para obtener ( $f_h/U$ ).

En el método por fórmula no se ha hecho mención de las condiciones tiempo-temperatura durante el enfriamiento. La letalidad durante el ciclo de enfriamiento ha sido tomada en cuenta en la fórmula asumiendo que la pendiente de la curva de enfriamiento mantiene una relación constante con los factores de la curva de calentamiento. En el caso de las curvas térmicas simples, la pendiente de la curva de enfriamiento, ( $f_c$ ), se ha considerado equivalente a la de la curva de calentamiento ( $f_h$ ) y en general, esta suposición es verdadera (10).

En las fórmulas dadas para calcular los procesos cuando la curva de calentamiento es quebrada, se asume que el valor de la pendiente de la curva de enfriamiento es equivalente al valor de la segunda pendiente ( $f_2$ ), y generalmente esto es cierto. Los productos que inicialmente se calientan por convección rápida y después cambian a un calentamiento, por convección, más lento, se enfrían al principio por convección rápida. Por lo tanto, en este caso, el valor de la pendiente de enfriamiento puede aproximarse más exactamente al valor de la pendiente ( $f_1$ ) que al valor de la pendiente ( $f_2$ ). Se ha desarrollado una fórmula empírica para hacer la corrección en los problemas de curva de calentamiento quebrada, de forma que el tiempo de proceso o el valor de esterilidad estén basados en la mayor rapidez de enfriamiento; esta fórmula es:

$$0.7 \left( 1 - \frac{f_c}{f_2} \right) \quad (37)$$



En esta ecuación (fc) generalmente es igual a (fh). El valor (log g) se corrige mediante el valor de este término. Al calcular (F), el valor de la ecuación 37 se suma al valor de (log g) calculado con la ecuación 32.

Al calcular (E), el valor de la ecuación 37 se resta del valor (log g), encontrado en la gráfica 3, 4 ó 5 del apéndice. También se ha hecho la suposición del valor (j), al cual se le ha dado el valor de 1.41. Este valor se obtuvo a través de datos experimentales (15).

## SIMBOLOGIA

a,b	Límites de integración, representan el inicio y final de esterilización respectivamente.
D	Velocidad de muerte de un microorganismo.
F	Letalidad total de un proceso (min).
L	Velocidad letal.
n	Número de microorganismos.
T	Temperatura del alimento (°F).
TC	Temperatura en el centro del envase (°F).
Tcw	Temperatura del agua de enfriamiento (°F).
Tg	Temperatura correspondiente al punto de rompimiento en una curva térmica quebrada (°F).
TR	Temperatura de esterilización (°F).
Tr	Temperatura de referencia (°F).

## 2.5 Importancia y utilidad de la computación

Dado que el objetivo de este trabajo es elaborar un programa para computadora, se mencionarán algunos aspectos básicos sobre la computación.

El uso de las computadoras ha tenido un crecimiento explosivo. Considerando que en 1742 fue construida la primera máquina de este tipo, para 1950 se habían fabricado 60 de ellas, todas diferentes entre sí; en ese mismo año fue producida en serie la UNIVAC I, con un total de 45 unidades. Para 1970 existían ya 80,000 computadoras en operación en todo el mundo y para 1984 se calcula esta cifra en más de un millón de unidades (22).

En sus primeras versiones, la computadora es vista como un gigantesco procesador numérico y, por la época en que surge, sus aplicaciones son exclusivamente científicas y militares.

Inicialmente, la computadora fue utilizada como una máquina sumadora, obteniéndose con ella una gran velocidad y exactitud en los cálculos numéricos. En los Estados Unidos, el alto costo de las primeras computadoras (cientos de miles de dólares) limitó su uso a las grandes corporaciones científicas y militares, siendo éstas las que desarrollaron las primeras aplicaciones (22).

En el campo científico las computadoras ofrecieron, desde un principio, varias y muy valiosas aplicaciones. Por ejemplo, para dar solución a problemas planteados con ecuaciones diferenciales cuya solución analítica no se podía dar.

Otra de las aplicaciones importantes del uso de las computadoras se encuentra en la investigación experimental a nivel laboratorio. El trabajo experimental requiere tanto del control del experimento como de los dispositivos de adquisición y análisis de grandes cantidades de datos. Las minicomputadoras, las cuales cuestan menos de 50 mil dólares, resultan ideales para estos propósitos. Estas computadoras se utilizan en proyectos de ingeniería, física y química, sustituyendo parcial o totalmente a otros instrumentos científicos. Además, brindan al científico la oportunidad de verificar sus resultados, retroalimentando nueva información al sistema, lo que permite efectuar cambios de las condiciones de operación y obtener resultados por simulación.

Como se ha mostrado, la computadora ha servido como una potente fuerza que ha impulsado el desarrollo de la ciencia y la tecnología, estableciéndose como una herramienta que hace más fácil y más eficiente el trabajo del hombre.

Una computadora digital es una máquina sumamente compleja y sofisticada, pensar que es una máquina maravillosa que con sólo apretar un botón resolverá nuestros problemas es estar lejos de la realidad. La computadora requiere de una descripción altamente detallada sobre la solución de un problema para que pueda emitir res

puestas válidas y confiables. Por lo tanto, si se desea que resuelva un problema, es necesario conocer su funcionamiento general, el método de solución del problema en cuestión y un lenguaje especial que permita comunicarle dicho método sin ningún problema. Sólo de esta manera, será capaz de proporcionar los resultados solicitados.

Existen varios lenguajes de alto nivel, son los que permiten establecer una comunicación directa entre el usuario y la máquina. Algunos de estos lenguajes son: basic, fortran, cobol, algol y pascal.

Existen otros recursos de programación, tales como los programas de biblioteca y programas de aplicación, los cuales son programas elaborados para hacer aun mas sencillo el uso de una computadora, para personas que no tengan estudios de computación o programación; en este grupo se encuentran los denominados "paquetes", que son aquellos que sirven para la resolución de problemas de un tema en particular (matemáticas, estadística, construcción, etc.) y que están accesibles para cualquier usuario. Utilizando un "paquete" es posible procesar información sin necesidad de programar un sistema, basta tan sólo con introducir los datos y manejar el paquete de manera correcta, lo cual se facilita por la existencia de manuales y por la interacción del "paquete" con el usuario.

Algunos ejemplos de "paquetes" son: SPSS (estadística), Tempo (programación lineal), paquetes de contabilidad, procesadores de palabras (editores de textos) y el paquete que se va a utilizar para la realización de esta tesis: Lotus 1-2-3. Existen varias versiones de este paquete con nombres tales como Visicalc, Multiplan supercalc II, III y IV, perfect calc. El primero que se desarrolló fue visicalc. Su creador fue Dan Bricklin, entre los años 1979-1980, trabajando para la empresa norteamericana distribuidora de programas "Personal Software".

Lotus 1-2-3 es un programa que funciona como una hoja electrónica de trabajo, sustituyendo en forma eficiente a una pila de hojas en blanco, un lápiz, un borrador y una calculadora. El origen de su nombre surge de sus 3 funciones principales: funciona como hoja de cálculo, tiene una función de graficación y funciona como una base de datos. El sistema permite al usuario introducir información alfabética y numérica (incluso fórmulas) en un formato matricial ( renglones y columnas) y establecer relaciones entre coordenadas que forman los renglones con las columnas de la hoja de cálculo. Esta interdependencia puede ser establecida entre los 8192 renglones y las 256 columnas con que cuenta lotus en su versión II (en su versión I cuenta con 2084 renglones y 256 columnas) para producir una hoja de trabajo bastante grande, lo cual agiliza cualquier tipo de cálculo. Originalmente, este paquete fue creado para aplicaciones administrativas, pero dada su gran versatilidad, puede utilizarse para muchos otros procesos. Lotus acepta valores numéricos, alfanuméricos (etiquetas) y fórmulas. Acepta operadores

aritméticos (/,+,- etc.), de relación (=, >, <,etc.) y lógicos (not, or, and), tiene funciones implícitas: funciones matemáticas, estadísticas y financieras (2).

### 3.1 Descripción del desarrollo del trabajo.

Para cumplir con los objetivos planteados por esta tesis, se realizaron las siguientes actividades:

1.- Elaboración de diagramas de flujo de los programas para computadora basados en los métodos de análisis general y por fórmulas.

2.- Introducción de los pasos matemáticos de los métodos en la computadora.

3.- Realización de varios cálculos de letalidad y de tiempo de proceso por dos procedimientos distintos: en forma manual y utilizando el programa elaborado para computadora.

4.- Comparación de los resultados.

Para realizar estos cálculos, se utilizaron los resultados de algunas corridas experimentales efectuadas en los Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial por algunos de sus investigadores.

5.- Realización de un análisis estadístico de los resultados obtenidos.



DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL  
MÉTODO GENERAL

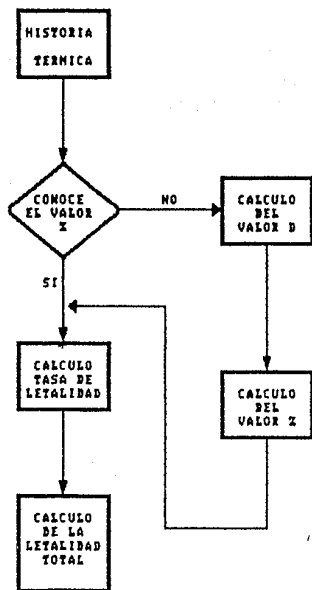


diagrama de flujo del metodo general

•

## 1.- Diagramas de flujo de los programas para computador.

Se elaboraron a partir de los métodos de análisis de datos de procesos de esterilización, dichos métodos están explicados en el capítulo de generalidades.

### - Cálculo del valor D (velocidad de muerte)

El valor (D) es el recíproco de la tectá generada por los datos de tiempo de sobrevivencia. Para obtener el valor de la pendiente mediante la computadora se realiza un análisis de regresión lineal de los datos de un experimento de tiempo de sobrevivencia, y se toma al tiempo como la variable independiente y al logaritmo del número de microorganismos vivos como la variable dependiente.

### - Cálculo del valor (z)

A través de la computadora, este valor se obtiene de manera similar a la obtención del valor (D), pero en este caso se realiza un análisis de regresión lineal sobre los datos de un experimento de tiempo de destrucción térmica, siendo los valores (D) la variable dependiente y la temperatura la variable independiente. El valor (z) es igual al recíproco de la pendiente.

### - Cálculo del valor (L) (velocidad letal)

Se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$L = \frac{1}{\text{Log} \frac{TR-TC}{\dots}}$$

Esta fórmula se almacena en el programa de tal manera que al introducir los valores de temperatura, la fórmula va captando uno a uno los valores de temperatura, busca dentro del programa los valores de (C) y de (TR) y calcula la tasa de letalidad para cada temperatura registrada en la historia letal.

#### - Cálculo de la letalidad (F)

En la computadora, este cálculo se realiza calculando el área bajo la curva generada al graficar los valores de tasa de letalidad en función del tiempo. Para calcular el área se utilizó el método trapezoidal para cálculo de áreas. El valor del área obtenida es la letalidad total.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL  
METODO POR FORMULAS

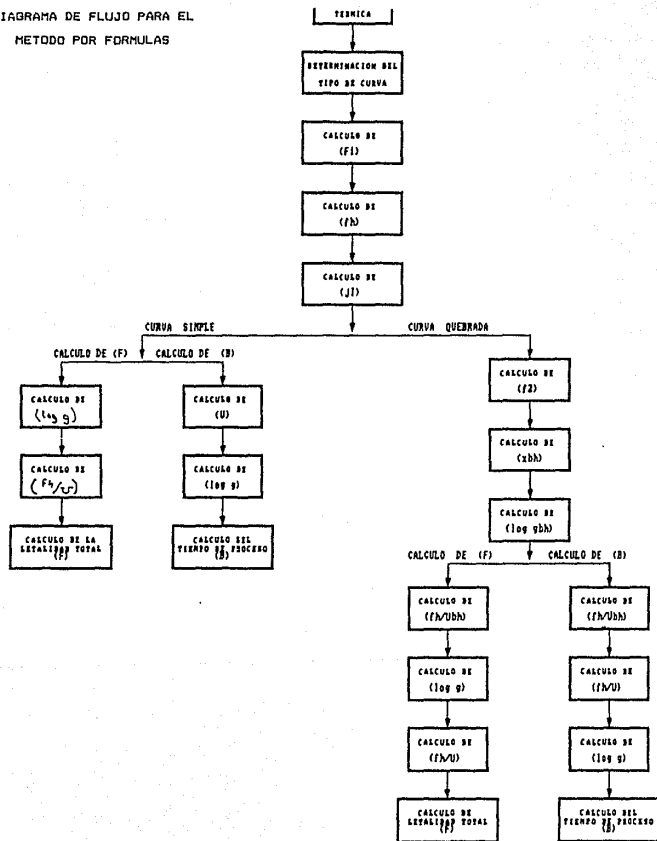


diagrama de flujo para el metodo por formulas

## - Graficación de los pares de datos tiempo-temperatura.

Esto se realiza para determinar que tipo de curva se presenta. En forma manual, esto es, realizando los cálculos sin ayuda del programa elaborado en este trabajo, el método indica trazar una gráfica en papel semilogarítmico las diferencias entre la temperatura de esterilización y la temperatura del alimento registrada por el termopar y propone una simplificación que consiste en dar un giro de  $180^\circ$  al papel semilogarítmico y trazar en la gráfica directamente las temperaturas del alimento. Al usar el programa, se calcula primero el logaritmo de cada valor de la diferencia de temperaturas para simular la misma gráfica.

Para que el programa realice el cálculo de las variables que se obtienen de la gráfica, es necesario visualizar dicha gráfica generada por el paquete lotus 1-2-3; este programa genera gráficas a partir de datos introducidos en 2 columnas adyacentes de su hoja de cálculo, en la primera columna, estarán los datos del logaritmo de la diferencia de temperatura entre la temperatura de proceso y la del alimento y en la otra columna los valores de tiempo correspondientes a cada valor de la columna anterior. Al mostrar la gráfica en pantalla, se observará que está invertida  $180^\circ$  con respecto a la que se obtendría al elaborar manualmente la gráfica, la curva tiene una inclinación hacia abajo; esto se debe a que lotus 1-2-3 no muestra gráficas semilogarítmicas en las cuales el papel es semilogarítmico y en él se grafican los datos originales (sin obtener primero su logaritmo). De manera que, aunque las

gráficas de la computadora y las del papel semilogarítmico no parezcan a simple vista iguales, los valores que de ellas se obtienen sí son los mismos. Cuando se trate de una curva quebrada, generalmente, la zona de rompimiento no se apreciará tan claramente como lo hubiera sido si se hubiera graficado manualmente en papel semilogarítmico, aunque sí será lo bastante apreciable para ubicarla (Figuras 4 y 4a).

A continuación se realiza el cálculo deseado, dependiendo del tipo de curva encontrada tendremos uno de los 4 cálculos siguientes:

- 1.- Cálculo de letalidad de un proceso cuya gráfica muestra una curva simple
- 2.- Cálculo de letalidad de un proceso cuya gráfica muestra una curva quebrada
- 3.- Cálculo del tiempo de proceso para cuando se presenta una curva simple
- 4.- Cálculo del tiempo de proceso para cuando se presenta una curva quebrada



graficas de computadora y manual)

1.- Cálculo de letalidad de un proceso cuya gráfica presenta una -  
curva simple.

El programa requiere que se almacenen los siguientes datos:

Temperatura de referencia	(°F)
Temperatura de autoclave	(°F)
Temperatura de agua de enfriamiento	(°F)
Temperatura inicial del alimento	(°F)
Temperatura máxima alcanzada por el producto durante la experimentación	(°F)
Valor " $\tau$ "	(°F)
Tiempo de levante	(min)
Tiempo de proceso (E)	(min)

A partir de la gráfica obtenida con los datos de la historia  
térmica se obtienen los siguientes valores:

-El valor ( $\tau$ )

Es el valor absoluto del inverso de la pendiente de la  
porción recta de la curva de penetración de calor. Al observar en  
pantalla la gráfica generada por la historia térmica, se visualiza  
la porción recta subsecuente al periodo de levante, se registra el  
intervalo de valores correspondientes a dicha porción; se regresa

después al modo ready en la computadora y se le indica entonces que realice un análisis de regresión lineal; con ayuda del programa lotus esto es muy sencillo, pues solo es necesario indicarle el intervalo de los pares de datos que se van a analizar y el lugar donde queremos que aparezcan los resultados. Teniendo el valor de la pendiente de este intervalo, el programa obtiene el valor de  $(\theta h)$  calculando el valor absoluto del recíproco de la pendiente:

#### -Tiempo cero corregido

El programa lo calcula con la siguiente fórmula:

$$(\text{tiempo de levante})/0.18$$

#### -El valor $(jI)$

Es la temperatura pseudoinicial, es la temperatura que le corresponde en la gráfica al tiempo cero corregido. El programa lo calcula realizando una regresión lineal con los datos que representan la parte recta de la gráfica y mediante extrapolación calcula el valor de la temperatura correspondiente al tiempo cero.

Con los valores  $(\theta h)$ ,  $(jI)$  y los datos del proceso de penetración de calor se calculan los siguientes valores que llevan finalmente al cálculo de la letalidad.

-El valor (log q)

Para calcular este valor, el programa tiene almacenada la siguiente fórmula:

$$\log q = \log j_i - (R/fh)$$

-El valor (fh/U)

Para la realización de este programa, se analizaron las gráficas que relacionan (fh/U) con (log q) y se encontró que pueden ser representadas por una ecuación polinomial de cuarto grado. Tomando los datos de las gráficas elaboradas por Teixeira en 1967 (27), se plantearon y resolvieron las ecuaciones normales de la ecuación general polinomial para encontrar los coeficientes de cada ecuación correspondiente a los valores de (fh/U) en función de diferentes valores (log q). (Ver apéndice al final del libro).

-El valor Fi

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_i = \log \frac{T_r - TR}{z}$$

donde:

T<sub>r</sub> Temperatura de referencia

T<sub>R</sub> Temperatura de proceso.

- Finalmente se calcula el valor (F) con la siguiente fórmula:

$$F = \frac{fh}{(fh/U)(F_i)}$$

2.- Cálculo de letalidad de un proceso cuya gráfica muestra una curva quebrada.

El programa requiere que se almacenen los siguientes datos:

Temperatura de referencia (°F)

Temperatura de autoclave (°F)

Temperatura de agua de enfriamiento (°F)

Temperatura inicial del alimento (°F)

Temperatura máxima alcanzada por el producto durante la experimentación (°F)

Valor "z" (°F)

Tiempo de levante (min.)

Tiempo de proceso (E) (min.)

Se calculan los valores  $(F_i)$ ,  $(f_h)$  y  $(j_i)$  de la misma manera en que se ilustra en el cálculo anterior. Además se calculan los siguientes valores:

-El valor  $(f_2)$

Este valor tiene la misma interpretación que el valor  $(f_h)$ , con la diferencia de que está referido a la porción recta subsiguiente al periodo de rompimiento de la curva de calentamiento, por lo tanto, el programa lo calcula de la misma manera que se realizó el cálculo de  $(f_h)$  en el caso anterior.

-El valor  $X_{hh}$

Para calcular este valor primero encontramos el valor  $(x)$ :

La gráfica de una curva térmica "quebrada" muestra dos zonas rectas separadas por una porción curva que llamamos zona de rompimiento. El punto de rompimiento es aquel donde se cruzan las prolongaciones de ambas curvas. El valor  $(x)$  es el valor en el eje de las abscisas correspondiente al punto de rompimiento de la curva de penetración de calor. Se calcula a partir de la ecuación punto-pendiente de ambas rectas.

$$(x) = \frac{(y_{1b}) - m_b(x_{1b}) + m_a(x_{1a}) - (y_{1a})}{m_a - m_b}$$

donde:

$m_a$  es la pendiente de la primera recta en la gráfica

$m_b$  es la pendiente de la segunda recta en la gráfica

$(x_{1b}, y_{1b})$  es un punto de la segunda recta en la gráfica

$(x_{1a}, y_{1a})$  es un punto de la primera recta en la gráfica

con el valor de  $(x)$  calcula el valor de  $x_{bh}$ :

$$x_{bh} = (x) - (\text{cero corregido}) = (x) - (\text{tiempo de levante} \cdot 0.6)$$

Con estos valores y los datos del proceso, se puede calcular el valor de letalidad a través de los siguientes valores:

-El valor  $(\log q_{bh})$

Para calcular este valor, el programa tiene almacenada la siguiente fórmula:

$$\log q_{bh} = \log j_l - (x_{bh}/f_h)$$

#### -El valor (rbh)

Este valor fue calculado mediante un método computarizado por Teixeira y colaboradores. Este programa analiza los datos de las gráficas reportadas, encontrando que se ajustan a una ecuación polinomial de cuarto grado. Con estos datos, se plantearon y resolvieron las ecuaciones normales de la ecuación general polinomial para encontrar los coeficientes de la ecuaciones correspondientes a los valores de (rbh) en función de (log gbh). (Ver apéndice para esta deducción).

#### -El valor (fh/Ugh)

Dado que se dispone de el valor (log gbh) podemos calcular este valor a partir de las ecuaciones polinomiales que se mencionan en el caso 2, y que se explican en el apéndice.

#### El valor (log q)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\log q = \frac{f_1(\log j_1) + (f_2 - f_1)(\log gbh) - B}{f_2}$$

f<sub>2</sub>



La fórmula para la corrección del valor de  $(\log g)$  es:

$$0.07(1-(f_c/f_2))$$

Comúnmente  $(f_c)$  es igual a  $(f_h)$ . Al valor calculado de  $(\log g)$  se le suma esta corrección.

-El valor  $(f_h/U)$

Se calcula a partir del valor  $(\log g)$ . La computadora realiza este cálculo de la misma manera que realiza el de  $(f_h/Ubh)$ .

- Finalmente se calcula el valor  $(F)$  con la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\frac{f_2}{f_h/U} - \frac{rbh(f_2-f_h)}{f_h/Ubh}}{F_1}$$

3.- Cálculo del tiempo de proceso para cuando se presenta una curva simple.

El programa requiere que se almacenen los siguientes datos:

Temperatura de referencia	(°F)
Temperatura inicial del alimento	(°F)
Temperatura del agua de enfriamiento	(°F)
Temperatura de autoclave	(°F)
Letalidad total que se desea alcanzar	(min.)
Valor "z"	(°F)
Temperatura máxima alcanzada por el producto durante la experimentación	(°F)
Tiempo de levante (CUT)	(min.)

De la gráfica obtenemos los siguientes valores:  $(F_0)$  y  $(j)$ . Estos valores son los mismos que se mencionaron en los cálculos anteriores. Con estos valores y los datos del proceso, se calculan los siguientes valores que finalmente llevan a obtener el valor  $(B)$ .

-El valor  $F_i$

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_i = \log (T_r - TR)/z$$

-El valor (U)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$U = (F)(F_i)$$

Con el resultado de la división entre (f<sub>0</sub>) y (U), se calcula el valor (log q). Este valor también se calcula con las ecuaciones polinomiales de cuarto grado mencionadas en los cálculos anteriores.

- Finalmente se calcula el valor tiempo de proceso (R) con la siguiente fórmula:

$$R = fh(\log jf - \log q)$$

4.- Cálculo de tiempo de proceso para cuando se presenta una curva quebrada.

El programa requiere que se almacenen los siguientes datos:

Temperatura inicial del alimento	(°F)
Temperatura de autoclavo	(°F)
Temperatura del agua de enfriamiento	(°F)
Temperatura máxima alcanzada por el alimento en la experimentación.	(°F)
Tiempo de levante	(min)
Valor "z"	(°F)
Letalidad total que se desea alcanzar	(min.)

De la gráfica de calentamiento se obtienen los valores (fh), (f2), (xbh), y (ji) de la misma manera que en los cálculos anteriores. Con estos y los datos relativos al proceso, se calculan los siguientes valores que llevan a obtener el valor tiempo de proceso:

-El valor (log gbh)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\log gbh = \log ji - (xbh/fh)$$

-Los valores (rbh) y (fh/Ubh)

Estos valores dependen del valor (log gbh). la computadora realiza estos cálculos de la misma manera como se muestra en el cálculo 2.

-El valor (fh/U)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$fh/U = \frac{f2}{rbh(f2+fh) + F(Fi) + fh/Ubh}$$

-El valor (Log g)

Lo calculamos a partir del valor (fh/U) con un análisis matemático similar al usado para encontrar el valor de (fh/U) a partir de valores de (log g), con la diferencia de que en este análisis la variable dependiente es (log g) y la independiente es (fh/U).

- Se realiza la corrección del valor (log g), para incluir el efecto de esterilidad de la etapa de enfriamiento con la siguiente fórmula:

$$0.07(1-(fc/f2))$$

Al valor calculado de  $(\log q)$  se le resta el valor de esta corrección.

- Finalmente se calcula el valor tiempo de proceso ( $B$ ) necesario para proporcionar una letalidad dada ( $F$ ), con la siguiente fórmula:

$$B = Xbh + F^2(\log gbh - \log q)$$

En el presente trabajo de tesis, se desarrollaron dos programas, uno para aplicar el método general y otro para aplicar el método por fórmulas; ambos programas se almacenaron en un disco tamaño 5 $\frac{1}{4}$ , y las claves de cada uno de ellos son: "Met\_gral" y "Fórmula" respectivamente.

#### 4 Resultados

Se realizaron los análisis de resultados utilizando el programa para computadora desarrollado en este trabajo de tesis con el objeto de comprobar su funcionamiento, para lo cual se utilizaron los resultados de algunas corridas experimentales que se realizan en los Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial. El análisis así obtenido se comparó con los resultados obtenidos al realizar otro análisis efectuado sin el programa para computadora. Al análisis que se realiza en forma tradicional, esto es, sin el programa para computadora, se le distingue de aquí en adelante nombrándolo "análisis en forma manual".

Los experimentos que se utilizaron, y sus condiciones de proceso, fueron los siguientes:

Para el método general

Esterilización de chile tipo chilaca enlatado

Esterilización de salsa mexicana enlatada

Esterilización de atún en envase de vidrio y en tres presentaciones

Para el método por fórmulas:

Esterilización de ejotitos tiernos enlatados

Esterilización de pollo con mole en lata

Esterilización de carne de puerco con calabacitas en lata

Esterilización de cortadilla de res enlatado.

Los experimentos de chile tipo chiliza y de elotitos tiernos se realizaron en un esterilizador horizontal que usa como medio de calentamiento vapor húmedo. Sus características son:

Marca	DELMEX
Modelo	SPARKLER
Material de construcción	ACERO INOXIDABLE
Presión máxima de prueba	10.54 kg/cm <sup>2</sup>
Presión normal de trabajo	7 kg/cm <sup>2</sup>

Todos los experimentos restantes se realizaron en un esterilizador horizontal que usa como medio de calentamiento vapor húmedo o una mezcla de vapor y agua caliente. Sus características son:

Marca	HISAKA-WORKS
Modelo	RCS-40RTB
Material de construcción	ACERO INOXIDABLE
Capacidad del tanque	0.11 metros cúbicos
Presión máxima de prueba	10.8 kg/cm <sup>2</sup>
Presión normal de trabajo	6 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura máxima	164°C



Las condiciones de proceso para cada uno de los experimentos fueron las siguientes:

ESTA TESIS NO  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Experimento No. 1

Producto Chile tipo chilaca  
Envase Lata cilíndrica No. 10  
Tiempo de proceso 30 min  
Temperatura de proceso 100°C  
Temperatura inicial 50°C

Experimento No. 2

Producto Salsa mexicana  
Envase Lata cilíndrica No. 10  
Tiempo de proceso 50 min  
Temperatura de proceso 100°C  
Temperatura inicial 45°C

Experimento No. 3

Producto Atún con vegetales  
Envase Cilindro de vidrio 200 grs.  
Tiempo de proceso 90 min  
Temperatura de proceso 121.1°C  
Temperatura inicial 50°C

Experimento No. 4

Producto Atún al natural  
Envase Cilindro de vidrio 200 grs.

Tiempo de proceso 110 min  
Temperatura de proceso 121.1°C  
Temperatura inicial 50°C

Experimento No. 5

Producto Atún en aceite  
Envase Cilindro de vidrio 200 grs.  
Tiempo de proceso 80 min  
Temperatura de proceso 121.1°C  
Temperatura inicial 50°C

Experimento No. 6

Producto Elotitos tiernos  
Envase Lata cilíndrica No. 10  
Tiempo de proceso 45 min  
Temperatura de proceso:  
en las corridas 1,2,3,5 y 6: 121.1°C  
en la corrida 4: 100°C  
Temperatura inicial 48°C

Experimento No. 7

Producto Pollo en mole  
Envase Lata cilíndrica No. 10  
Tiempo de proceso:  
en las corridas 2,3 y 6: 50 min  
en las corridas 1,4 y 5: 30 min  
Temperatura de proceso 100°C

Temperatura inicial	40°C
Experimento No. 8	
Producto	Carnes de puerco con calabacitas
Envase	Lata cilíndrica No. 10
Tiempo de proceso:	
en la corrida 1:	30 min
en las corridas 2,3,4 y 6:	40 min
en la corrida 5:	50 min
Temperatura de proceso	121°C
Temperatura inicial	40°C

Experimento No. 9	
Producto	Cortadillo de res
Envase	Lata cilíndrica No. 10
Tiempo de proceso:	
en las corridas 1 y 4:	30 min
en las corridas 2,3,5 y 6:	50 min
Temperatura de proceso	121.1°C
Temperatura inicial	40°C

La razón por la cual unos experimentos se destinaron para aplicar el método general y otros el método por fórmula, fue la tendencia de las curvas de penetración de calor. Al graficar en papel semilogarítmico la temperatura en función del tiempo, se obtiene una curva simple, una curva quebrada o una curva que no puede ser representada por una ni por dos porciones rectas; los

productos cuyas gráficas pudieron representarse mediante una curva quebrada o simple, se destinaron para el análisis mediante el método por fórmulas; y los productos que no pudieron ser representados por alguna de estas dos curvas, se utilizaron para aplicar el método general. Lo anterior está fundamentado en la definición del método general y del método por fórmulas. El método general es útil para determinar la letalidad de un proceso, incluyendo el tiempo de levanto y el tiempo de enfriamiento. Es especialmente valioso cuando la curva de penetración de calor no puede ser representada por una o dos líneas rectas. El método por fórmulas es útil cuando la curva de penetración de calor puede ser representada por una o dos líneas rectas (16).

Se realizó el análisis a cada uno de los experimentos seleccionados utilizando dos procedimientos distintos: 1) utilizando el programa para computadora y 2) realizando el análisis en forma manual.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestran los resultados de los dos procedimientos de análisis de los experimentos seleccionados para utilizar el método general.

Corrida No.	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
1	3.19	3.10
2	2.10	2.01
3	2.04	2.74
4	1.63	1.53
5	2.26	2.23
6	1.55	1.46
7	1.80	1.80
8	1.68	1.39
9	3.21	3.11
10	2.45	2.36

Tabla 1

Valores de letalidad obtenidos mediante el método general en forma manual y utilizando un programa para computadora.  
Producto: Chile tipo chilaca en lata.

Corrida No.	Letalidad	Letalidad
	calculada en	calculada con
	forma manual	el programa
	(min)	(min)
1	28.80	28.17
2	21.30	20.84
3	21.15	20.10
4	21.20	21.25
5	27.50	27.10
6	28	27.60
7	22.30	21.90
8	21.70	21.50
9	30.20	30
10	29.50	29.15

Tabla 2

Valores de letalidad obtenidos mediante el método general en forma manual y utilizando un programa para computadora.

Producto: Salsa mexicana.

Producto	Corrida No.	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
Atún con vegetales	1	50.88	50.80
	2	52.39	52.15
	3	50.16	50
	4	53.45	53.20
	5	56.94	56.50
	6	54.81	54.25
Atún al natural	1	71.48	71.30
	2	63.24	63.05
	3	62.38	62.22
	4	68.30	68.12
	5	61.13	60.96
	6	59.71	59.43
Atún en aceite	1	44.10	44
	2	38.19	37.90
	3	41.17	40.85
	4	36.40	36.20
	5	38.37	38.30
	6	39.72	39.64

Tabla 3

Valores de letalidad obtenidos mediante el método general en forma manual y utilizando un programa para computadora. Producto: Atún en tres presentaciones (con vegetales, al natural y en aceite).

Se realizó un análisis de muestras independientes (con un nivel de significancia de 0.05 y 0.01) para cada producto (24). En el caso de stón se realizó un análisis para cada presentación. Este método se realiza con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por ambos procedimientos.

Para realizar el análisis de muestras independientes se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Se proponen las hipótesis:

$H_0: \mu_a - \mu_b = 0$  hipótesis nula. Indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos

$H_1: \mu_a - \mu_b$  diferente de 0

Se calcula la variabilidad del estimador y del parámetro, por tanto es necesario calcular el valor "t" de student:

$$s_i^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / n = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n$$

$$S^2_{pool} = (\sum s_1^2 + \sum s_2^2) / ((n_1 - 1) + (n_2 - 1))$$

$$s_{x_1 \text{ medio} - x_2 \text{ medio}} = \sqrt{S^2_{pool} (1/n_1 + 1/n_2)}$$

$$t = (x_1 \text{ medio} - x_2 \text{ medio}) / (s_{x_1 \text{ medio} - x_2 \text{ medio}})$$



Después se obtiene un valor "t" de student de tablas con grados de libertad de  $(n_1-1) + (n_2-1)$  y un cierto nivel de significancia ( $\alpha$ ) y se comparan ambos valores .

Si el valor "t" calculado es menor que el valor "t" de tablas, entonces se acepta la hipótesis nula, y se dice que no hay diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Si el valor "t" calculado es mayor que el valor "t" de tablas, entonces se rechaza la hipótesis nula, y se dice que si hay diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Los resultados de este análisis para todos los productos se muestran en la siguiente tabla:

Producto	t calc.	t tablas(0.95)	t tablas(0.99)
Chile tipo			
Chilaca	0.3060	1.73	2.55
Salsa			
mexicana	0.2297	1.73	2.55
Atún con			
vegetales	0.1697	1.81	2.76
Atún al			
natural	0.0728	1.81	2.76
Atún en			
aceite	0.1129	1.81	2.76

Tabla 4

Como se puede apreciar en la tabla 4, en todos los casos encontramos que "t" calc. < "t" tablas, por lo tanto, se demuestra que no hay diferencias significativas entre ambas maneras de obtener el valor de letalidad usando el método general.

Los resultados de los análisis de los experimentos que se utilizaron para comprobar el funcionamiento del programa para computadora que contiene el método por fórmulas se muestran en las tablas 5, 6, 7 y 8.

Corrida No.	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
1	7.32	7.96
2	6.10	7.80
3	7.56	10
4	5.60	3.93
5	6.40	9
6	7.40	7

Tabla 5

Valores de letalidad obtenidos mediante el método por fórmulas en forma manual y utilizando un programa para computadora.

Producto: Elotitos tiernos.

Corrida No.	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
1	8.75	9.21
2	20.10	20.51
3	19.60	18.50
4	4.85	5.38
5	12.90	12.10
6	16	14.40

Tabla 6

Valores de letalidad obtenidos mediante el método por fórmulas en forma manual y utilizando un programa para computadora.

Producto: Pollo en mole.

Corrida No.	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
1	4.60	3.80
2	8.25	9.86
3	6	9.50
4	7.90	8.50
5	18.75	18.16
6	8.60	9.20

Tabla 7

Valores de letalidad obtenidos mediante el método por fórmulas en forma manual y utilizando un programa para computadora.

Producto: Carne de puerco con calabacitas.

Corrida	Letalidad calculada en forma manual (min)	Letalidad calculada con el programa (min)
No. 1	4.10	4.72
2	13.80	13
3	11.20	10.50
4	4.03	4
5	9.70	7.76
6	9	9.80

Tabla B

Valores de letalidad obtenidos mediante el método por fórmulas en forma manual y utilizando un programa para computadora.  
Producto: Cortadillo de res.

Los valores que se muestran para el método por fórmulas, no pueden ser sometidos al mismo análisis que se utilizó para los experimentos que se usaron para el método general debido a que, dentro de cada cuadro correspondiente a un producto, hay diferentes condiciones de proceso; por ejemplo, en el experimento de elotitos tiernos varía la temperatura de proceso, se manejan dos diferentes temperaturas: para las corridas 1, 2, 3, 5 y 6 se usó una temperatura de 250°F, mientras que en la corrida 4 se usó una temperatura de 212°F. Para los experimentos restantes, lo que

varia de corrida a corrida es el tiempo de proceso. Para analizar estos datos se utilizó un análisis de bloques (5). Este análisis es un caso especial del análisis de variancia en el cual se "bloquean" todas las variables que pueden hacer que haya diferencias significativas en los resultados, excepto una que es la que nos interesa determinar. De esta manera se puede concluir si las diferencias (si las hay) se deben a esa variable específica.

Para realizar el análisis por bloques primero se proponen las hipótesis:

$H_0: \tau_j = 0$  hipótesis nula. Indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos.  $\tau_j$  expresa el efecto de tratamiento.

$H_1$ : no todas las  $\tau_j$  son iguales a 0

Después se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C = T^2/n*k$$

$$SC_{total} = \sum \sum (x_{ij})^2 - (T^2/n*k), \text{ con } g_1 = (k*n)-1$$

$$SC_{bloque} = \sum \sum (x_{ij})^2 - \sum ((T_j)^2/n_j) \text{ con } g_1 = k(n-1)$$

$$SC_{tratam.} = \sum (t_j^2/n_j) - (T^2/nk) \quad \text{con } g_1 = (k-1)$$

$$CM_{tratam.} = SC_{tratam.}/(k-1)$$

$$CM_{bloque} = SB_{bloque}/(K(n-1))$$

$$RV = CM_{tratam.}/CM_{bloque}$$

Después se elabora una tabla de resultados:

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (g <sub>1</sub> )	Cuadrado medio (CM)	Razón de varianza (RV)
Tratamiento				
Bloques				
<u>Total.</u>				

El valor (RV) se compara con un valor "F" de tablas, el cual se obtiene a partir de (k-1) grados de libertad en el numerador y k(n-1) grados de libertad en el denominador y un cierto nivel de significancia (α).

Si (RV) es menor que "F" de tablas, entonces se acepta la hipótesis nula, y se dice que no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

Si (RV) es mayor que "F" de tablas, entonces se rechaza la hipótesis nula, y se dice que sí hay diferencias significativas entre los tratamientos.

Los resultados de este análisis para todos los productos se muestran en la siguiente tabla:

Producto	RV calc.	F tablas(0.95)	F tablas(0.99)
Elotitos			
Tiernos	1.3595	4.96	10.04
Pollo en mole			
mole	0.0106	4.96	10.04
Carne de puerco con calabazas			
con calabazas	0.0496	4.96	10.04
Cortadillo de res			
de res	0.02554	4.96	10.04

Tabla 7



De un análisis de la tabla 9, se puede observar que en todos los casos el valor  $FV$  es menor de 1; en estos casos no es necesario calcular  $F$  de tablas, pues cuando  $FV$  es menor o igual a 1 se acepta inmediatamente la hipótesis nula, y a medida que se aleje de 1, se rechaza. Por lo tanto, se concluye que no hay diferencias significativas entre los tratamientos cuando se calcula la letalidad con el método por fórmulas; esto quiere decir que los valores de letalidad obtenidos mediante ambos tratamientos, no variarían significativamente entre sí.

Aunque no hubo diferencia significativa entre tratamientos del método por fórmula, los valores encontrados mediante ambos tratamientos no fueron exactamente los mismos. Se realizó una corrida experimental para determinar en que etapas del proceso matemático se encuentran las fuentes de variación existentes.

Se eligió un experimento de eictitos tiernos cuya historia térmica había sido analizada por un investigador que regularmente realiza este tipo de análisis. A partir de la historia térmica se hizo el análisis correspondiente para obtener el valor de letalidad utilizando el programa para computadora desarrollado en este trabajo de tesis y utilizando también el método en forma manual; se siguió paso a paso el método realizado por las dos formas utilizadas para encontrar los puntos en donde no coinciden los valores.

Para el experimento en cuestión se cuenta con los siguientes datos:

Características del equipo:

Marca	HISAKA WORKS
Modelo	RDS-400TB
Material de construcción	ACERO INOXIDABLE
Capacidad del tanque	0.11 metros cúbicos
Presión máxima de prueba	10.2 kg/cm <sup>2</sup>
Presión normal de trabajo	6 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura máxima	164°C

Producto	elotitos tiernos sin escaudar	
Envase	lata No. 10	
Tiempo de proceso deseado (B)	30 min.	
Temperatura de referencia (Tr)	121.1°C	
Temperatura inicial del alimento	(Ti)	48°C
Temperatura de proceso	(TR)	121.1°C
valor z	18	
Tiempo de levante	(CUT)	5 min.

Al trazar la gráfica de la historia térmica en papel semi-logarítmico se observó que el periodo de calentamiento podía representarse por medio de 2 rectas, por lo que se utilizaron las ecuaciones correspondientes a una curva quebrada.

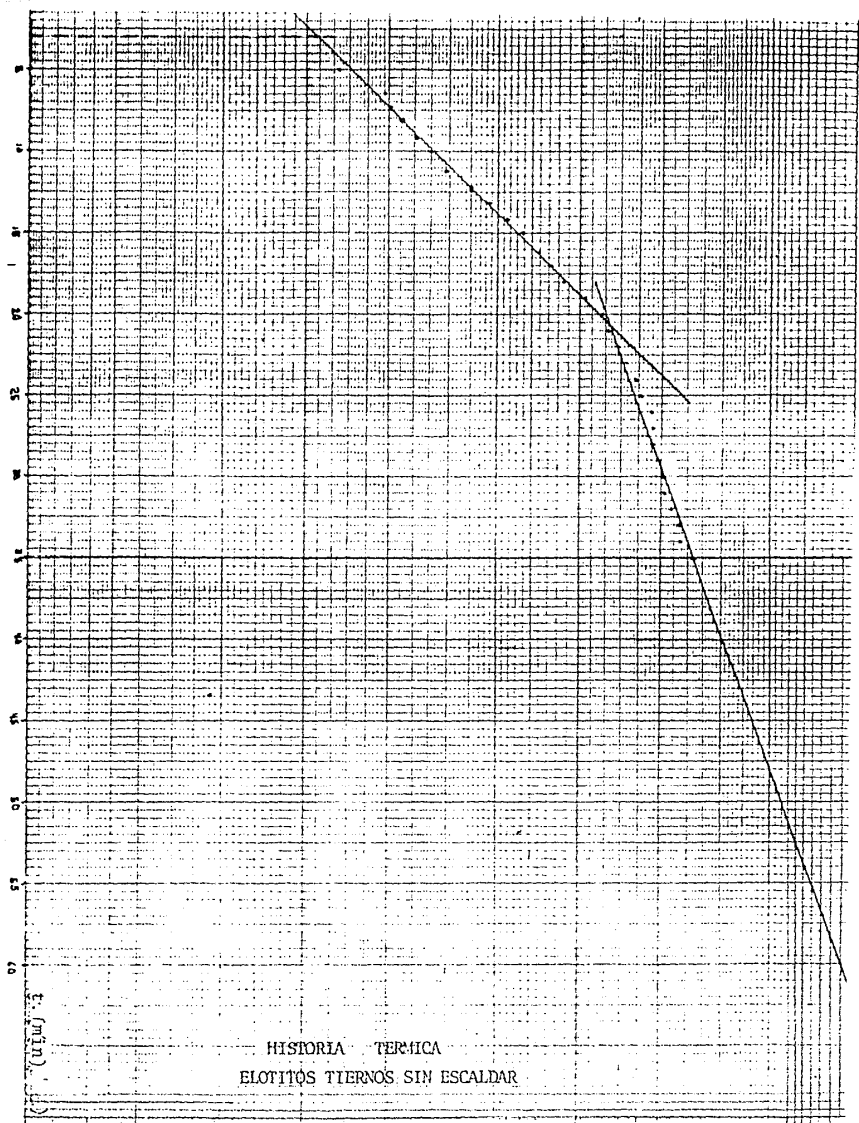
La gráfica correspondiente se puede ver en la figura que se encuentra en la página 98.

Para la resolución manual, se obtienen los valores  $f_h$ ,  $f_2$ ,  $j_1$  y  $x_{bh}$  de la gráfica de la historia térmica en papel semilogarítmico; para la resolución por medio del programa, éste los calcula a partir de la historia térmica como se describe en la sección de descripción del desarrollo del trabajo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Variable	valor calculado en forma manual (min.)	valor calculado con el programa (min)
$f_h$	16.70	16.84
$f_2$	47.46	45.59
$j_1$	87	85.87
$x_{bh}$	17.80	17.77

Tabla 10.

Aunque las variaciones son pequeñas, la diferencia en estos valores empieza a determinar la discrepancia en los valores finales. Para determinar la exactitud de los valores obtenidos en forma manual, se elaboró la gráfica de la historia térmica para encontrar de nuevo los factores  $f_h$ ,  $f_2$ ,  $j_1$  y  $x_{bh}$ ; esto se realizó



HISTORIA TERMICA  
 ELOTITOS TIERNOS SIN ESCALDAR

Historia tèrmica. Flotitos tiernos sin escaldar

con el objeto de comparar los valores encontrados con los valores que reportó el investigador y que se encuentran en la tabla 10. Se encontraron los siguientes valores:

$$f_h = 16.5$$

$$f_2 = 46.5$$

$$j_1 = 90$$

$$x_{bh} = 17.6$$

Comparando estos valores con los reportados por el investigador, se puede observar que no son los mismos, a pesar de que se obtienen de la misma historia térmica:

Después se calcula  $(\log g_{bh})$ . El valor obtenido utilizando los valores del procedimiento en forma manual es 0.8059 y el obtenido mediante el programa es 0.8786. Se obtienen diferentes resultados debido a que la fórmula con la que se calcula  $(\log g)$  en forma manual involucra a los factores obtenidos a partir de la gráfica, los cuales fueron diferentes de los obtenidos mediante el programa. Con este valor, en la forma manual se revisan unas gráficas que relacionan a  $(f_h/U)$  con  $(\log g)$  y se obtiene el valor  $(f_h/U_{bh})$ ; asimismo, se revisa la gráfica que relaciona un factor de proporcionalidad  $(r)$  con  $(\log g)$  y se obtiene  $(r_{bh})$ . Por su parte el programa tiene almacenadas ecuaciones que representan a las mismas gráficas de las cuales se obtienen los valores  $(f_h/U)$  y  $(r)$  a partir de valores de  $(\log g)$ , el programa

toma el valor de  $(\log qbh)$  y resuelve las ecuaciones correspondientes para obtener los valores de  $(fh/Ubh)$  y  $(rbh)$ . Los valores obtenidos son:

Variable	valor	valor
	calculado en forma manual (min)	calculado con el programa (min)
$(fh/Ubh)$	7.7807	7.4774
$(rbh)$	0.76	0.7646

Como vemos, se siguen acumulando diferencias entre ambos procedimientos de resolver el método de análisis. La razón de estas diferencias es que al trabajar en las gráficas y buscar un valor en la curva, obtenemos un valor que depende de la apreciación personal. Para comprobar la exactitud de la obtención de valores en forma manual se les dió a 5 personas diferentes una copia de la gráfica que relaciona  $(fh/U)$  con  $(\log q)$  y se les pidió que obtuvieran el valor de  $(fh/U)$  para el valor de  $(\log q)$  de 0.8809, el cual es el valor que se obtuvo en el procedimiento en forma manual. Los resultados fueron:

persona No.	(fh/Ubh)
1	7.78
2	7.655
3	7.4575
4	7.4090
5	7.608

Como puede apreciarse del cuadro anterior, ninguna de las personas encontró el mismo valor encontrado anteriormente, que fue de 7.7808, ni entre las cinco personas se encontraron valores iguales. Esto nos dice que al utilizar una gráfica para la obtención de valores, se corre el riesgo de reportar valores erróneos.

Después, se calcula el valor  $(\log g)$  con la fórmula:

$$(\log g = (fh \cdot \log jf + (f2 - fh)(\log qbh) - B/f2)$$

y se encontraron los siguientes valores:



Variable	valor calculado en forma manual	valor calculado con el programa
(log g)	0.6324	0.6105

y al hacer la corrección por el enfriamiento:

Variable	valor calculado en forma manual	valor calculado con el programa
(log g)corr.	0.6984	0.6765

En el procedimiento en forma manual con el valor de (log g) se busca el valor (fh/U) utilizando nuevamente la gráfica que relaciona (fh/U) con (log g), mientras que el programa lo calcula con las ecuaciones que representan las curvas de dichas gráficas. Los valores obtenidos son los siguientes:

Variable	valor calculado en forma manual	valor calculado con el programa
(fh/U)	4.45	3.52

Finalmente vemos la diferencia final al calcular la letalidad total con la siguiente fórmula:

$$F = (f2/((fh/U)*(F1)))-(rbh(f2-fh)/((fh/U)*(f1)))$$

Variable	valor calculado en forma manual (min.)	valor calculado con el programa (min.)
(F)	7.65	10.04

A partir de este seguimiento del método, se puede apreciar que los puntos en donde se puede incurrir en errores son: en la obtención de los valores (fh), (f2), (f1) y (rbh) así como en la obtención del valor (fh/U) y del factor de proporcionalidad (r). También cabe hacer notar que el programa calcula dichos valores a partir de ecuaciones, mientras que en el procedimiento en forma manual se obtiene a partir de curvas en gráficas. Debido a lo anterior podemos decir que, de haber un error en la obtención de cualquier valor de los mencionados como susceptibles de error, dicho error se cometió al hacer el cálculo mediante el procedimiento en forma manual, y por lo tanto, el valor obtenido mediante el programa es más correcto. También es conveniente hacer notar que al obtener un valor de una curva graficada en papel semilogarítmico, es muy probable que el valor obtenido sea

incorrecto, debido a que el intervalo entre cada división es de diferente magnitud, lo que complica una adecuada apreciación de el valor buscado.

Para cuantificar la ventaja que -en ahorro de tiempo- representa el usar el programa para computadora con respecto a realizar el método mediante el procedimiento en forma manual, se midió el tiempo utilizado por ambos procedimientos de análisis, esto se hizo tanto para el método general como para el método por fórmulas. Se utilizaron las historias térmicas de 10 experimentos para cada uno de los dos métodos. Cada una de las historias térmicas constan de igual número de pares de datos de tiempo-temperatura. Los análisis se hicieron uno cada día.

Los resultados para el método general se muestran en la tabla 11 que se encuentra en la siguiente página:

Experimento No	Tiempo utilizado al realizar el análisis en forma manual (min)	Tiempo utilizado al realizar el análisis usando el programa (min)
1	57.45	18
2	50.50	16
3	55	17
4	59	18.50
5	52.30	19
6	51	17.55
7	55	18.20
8	57.20	16.80
9	54.80	17.30
10	52	18.20

Tabla 11

Para el tiempo utilizado al realizar el análisis en forma manual se obtuvo un valor máximo de 59 minutos y uno mínimo de 50.5 minutos con una media de 54.42 minutos (54 min. 25 seg.). Para el tiempo utilizado al realizar el análisis mediante el programa se obtuvo un valor máximo de 19 minutos y un valor mínimo de 16 minutos con una media de 16.658 minutos (16 min. 39 seg.). Se tiene una diferencia de 37.7 minutos entre ambas formas de aplicar el método; el tiempo utilizado por el programa representa el 30.61% del tiempo utilizado al realizar el método en forma manual. Esto significa un ahorro de 69.38% en tiempo.

Para el método por fórmulas los resultados fueron los siguientes:

Experimento No	Tiempo utilizado al realizar el análisis en forma manual (min)	Tiempo utilizado al realizar el análisis usando el programa (min)
1	88	20
2	94	22
3	85	20.50
4	90	21.50
5	87	19.80
6	84	23
7	96	23.40
8	85	19.50
9	91	19.20
10	92	20.50

Tabla 12

Para el análisis de datos usando el método por fórmula mediante el procedimiento en forma manual se obtuvo un valor máximo de 96 minutos y un valor mínimo de 84 minutos con una media de 89.2, mientras que para el análisis de datos usando el programa para computadora se encontró un valor máximo de 23

minutos y un mínimo de 19.3 minutos con una media de 20.92 minutos. Utilizando los valores de las medias se observa que el tiempo consumido por el programa es menor por 66.28 minutos con respecto al tiempo consumido al realizar el análisis con el procedimiento en forma manual: esto representa un ahorro de 76.54% en tiempo.

-Los objetivos se cumplieron satisfactoriamente. El cálculo se realiza de una manera sencilla y en un tiempo corto se obtienen los resultados que servirán para tomar decisiones acerca de las condiciones de procesos de esterilización.

-Con el programa se elimina la posibilidad de error en la obtención de valores intermedios que influyen en el valor final.

-Los valores finales numéricos que se obtienen a través del programa para computadora son más exactos, lo que permite que se tenga un mejor control sobre los procesos de esterilización.

-En forma manual, existe una mayor probabilidad de error al aplicar el método por fórmulas que al aplicar el método general. Sin embargo al aplicar cualquiera de los dos métodos usando el programa se iguala dicha probabilidad de error, reduciéndose a un mínimo.

-El punto crítico en el método por fórmulas, se da cuando se obtienen los valores de la curva de penetración de calor:  $(f_1)$ ,  $(f_2)$ ,  $(j_1)$ ,  $(x_{0.01})$  y los valores  $(f_1/D)$  y  $(r)$ . La exactitud del resultado alcanzado al aplicar este método con el procedimiento en forma tradicional, dependerá en gran medida de la correcta estimación de dichos valores

-La aplicación del programa para computadora, reduce el tiempo necesario para el análisis en alrededor de 70% con respecto al tiempo que se emplea para realizar el análisis con el procedimiento en forma manual.

#### Recomendaciones.

-Dentro del campo de la esterilización, existen sofisticados equipos para la determinación de las temperaturas que presenta un alimento en el transcurso de un proceso de esterilización. Específicamente se trata de ciertas computadoras, las cuales cuentan con conexiones para los cables de los termopares que se colocan dentro del alimento que se está esterilizando. A ciertos intervalos de tiempo, la computadora va registrando la temperatura de cada uno de los termopares y las va mostrando en pantalla o imprimiendo en papel. Algunos de estos equipos son: El microprocesador marca Hisaka modelo FVAC, que trabaja hasta con 5 termopares y detecta la temperatura a intervalos de 1 minuto, el registrador de temperatura marca DATA LOGGER modelo 3020, este equipo detecta la temperatura hasta de 2 termopares, e incluso se puede escoger el intervalo de tiempo que se desee. Recientemente se desarrolló un sistema llamado DATA-TRACE, el cual presenta aun más ventajas que los anteriores equipos mencionados.

-Se recomienda desarrollar un sistema de computo que permita transferir datos de un archivo -o de la memoria de una computadora- hacia otra computadora que previamente haya sido



cargada con el programa desarrollado en este trabajo de tesis. Esto permitiría reducir el tiempo requerido para el análisis de datos de un proceso de esterilización.

-Se recomienda desarrollar una subrutina que realice el análisis de los datos de la historia térmica y que determine si la curva generada puede o no ser representada por una o dos porciones rectas y, en caso de ser así, que realice inmediatamente después el cálculo de los factores correspondientes a la gráfica de penetración de calor ( $F_0$ ,  $F_2$ , etc.). Actualmente, el programa realiza este análisis con ayuda del usuario. El programa muestra en pantalla la gráfica de penetración de calor (el logaritmo de la temperatura en función del tiempo), y el usuario determina visualmente el tipo de curva que se presenta. Con el desarrollo de la subrutina recomendada se reduciría aún más el tiempo empleado en el análisis.

## Apéndice

### Deducción matemática de la velocidad letal.

Tiene como base la unidad de letalidad, la cual sirve para comparar las capacidades de esterilización relativas de un proceso térmico y que, por conveniencia, se definió de la siguiente manera:

La unidad de letalidad es un minuto de calentamiento a 250°F.

Para obtener la velocidad letal, en un papel semilogarítmico se traza una recta que pasa por el punto de unidad letal (1,250) y que tenga una pendiente igual al recíproco de 18 (valor z). Matemáticamente lo representamos por medio de la ecuación de una línea recta:

$$\log y - \log y_1 = m(x-x_1)$$

donde:

$m = (1/z)$

$z$  = cambio en la velocidad de muerte

$x$  = cualquier temperatura durante el proceso (TC) (°F)

$y$  = tiempo correspondiente a la temperatura seleccionada (t) (min)

Conocemos un punto de esta recta, que es la unidad letal

$$y_1 = 1 \text{ min}$$

$$x_1 = 250 \text{ }^\circ\text{F}$$

Sustituyendo

$$\log t - \log 1 = -(1/18)(TC - 250)$$

$$\log 1 = 0$$

$$\log t = -(1/18)(TC - 250)$$

o también

$$\log t = (1/18)(250 - TC)$$

despejando t

$$t = \log^{-1} (250 - TC)/18$$

Por definición, el inverso del tiempo que se aplica a una temperatura, conocida su valor de z es la velocidad letal (L).

entonces

$$(L) = (1/t) = \frac{1}{\log^{-1} (250 - TC)/18}$$

Esta fórmula es para el caso particular en que se use una temperatura de referencia de 250°F. La fórmula se puede plantear en forma general, para cualquier temperatura de referencia y cualquier valor de "z".

$$(L) = (1/t) = \frac{1}{\log_{-1} (Tr - TC)/z}$$

donde Tr es la temperatura de referencia.

#### Obtención del factor (fh/U)

Para obtener este factor, se utilizan las gráficas obtenidas por Teixeira mediante métodos computarizados que no publicó. Dichas gráficas aparecen en casi todos los textos sobre esterilización; por ejemplo, el "Laboratory Manual for Foods Canners and Processors. Vol. 1. The AVI Publishing Company, Inc. pp. 234-238 (16).

Las gráficas están elaboradas en papel semi-logarítmico, en el eje logarítmico de las ordenadas aparecen valores de (fh/U) y en el eje lineal de las abscisas valores de (log g).

A partir de un análisis de estas curvas se encontró que pueden ser representadas por ecuaciones polinomiales. Se calcularon los coeficientes de dichas ecuaciones polinomiales utilizando el método de matrices inversas.

El valor de  $(fh/U)$  depende directamente de los valores  $(z)$ ,  $(m+g)$  y de  $(\log g)$ .

A continuación se muestran las ecuaciones polinomiales que después del análisis de matrices inversas, se encontró que representan las curvas encontradas por Teixeira:

Para valores de  $(m+g) = 180$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(fh/U) = \log^{-1}(Y)$ Y =	Coefficiente de correlación
10	$0.264+0.55X+0.511X^2 +0.42X^3$	1
12	$0.123+0.52X+0.441X^2 +0.34X^3$	0.9997
14	$0.164+0.407X+0.464X^2 +0.341X^3$	0.9979
16	$0.141+0.369X+0.326X^2 +0.379X^3$	0.9998
18	$0.113+0.361X+0.299X^2 +0.339X^3$	0.9999
20	$0.89+0.313X+0.258X^2 +0.347X^3$	0.9999
22	$0.069+0.287X+0.225X^2 +0.314X^3$	0.9998
24	$0.047+0.277X+0.206X^2 +0.323X^3$	0.9998

Para valores de  $(m+g) = 160$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(fh/U) = 10q^{-1}(Y)$ Y =	Coefficiente de correlación
10	$0.248+0.49X+0.511X^2 +0.994X^3$	0.9995
12	$0.201+0.473X+0.436X^2 +0.4X^3$	0.9999
14	$0.166+0.405X+0.37X^2 +0.389X^3$	0.9999
16	$0.134+0.372X+0.321X^2 +0.382X^3$	0.9999
18	$0.109+0.34X+0.286X^2 +0.359X^3$	0.9999
20	$0.086+0.302X+0.246X^2 +0.352X^3$	0.9997
22	$0.06+0.306X+0.24X^2 +0.316X^3$	0.9998
24	$0.041+0.267X+0.203X^2 +0.327X^3$	0.9997

Para valores de  $(m+g) = 130$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(fh/U) = \log^{-1}(Y)$ $Y =$	Coefficiente de correlación
10	$0.238+0.52X+0.509X^2 +0.439X^3$	0.9996
12	$0.194+0.457X+0.426X^2 +0.408X^3$	0.9999
14	$0.154+0.387X+0.367X^2 +0.406X^3$	0.9998
16	$0.125+0.376X+0.328X^2 +0.361X^3$	0.9999
18	$0.096+0.336X+0.29X^2 +0.349X^3$	0.9997
20	$0.075+0.305X+0.251X^2 +0.341X^3$	0.9999
22	$0.056+0.28X+0.223X^2 +0.334X^3$	0.9997
24	$0.038+0.253X+0.197X^2 +0.333X^3$	0.9998

Se realizó otro análisis a esas mismas curvas, con la variante de que se tomó al valor  $(\log g)$  como la variable dependiente y el valor de  $(fh/U)$  como la variable independiente. De esta manera se calcula el valor  $(\log g)$  a partir de valores de  $(fh/U)$ . Las ecuaciones encontradas fueron las siguientes:

Para valores de  $(m+g) = 180$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(\log g) =$	Coefficiente de correlación
10	$-0.582+2.432X-1.695X^2 +0.618X^3-0.08X^4$	0.9999
12	$-0.496+2.462X-1.757X^2 +0.653X^3-0.09X^4$	0.9998
14	$-0.389+2.447X-1.843X^2 +0.724X^3-0.105X^4$	0.9997
16	$-0.359+2.443X-1.69X^2 +0.61X^3-0.08X^4$	0.9999
18	$-0.299+2.48X-1.835X^2 +0.715X^3-0.105X^4$	0.9999
20	$-0.247+2.47X-1.76X^2 +0.647X^3-0.087X^4$	0.9998
22	$-0.194+2.47X-1.788X^2 +0.663X^3-0.09X^4$	0.9999
24	$-0.14+2.47X-1.827X^2 +0.701X^3-0.1X^4$	0.9999

Para valores de  $(m+g) = 160$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(\log g) =$	Coefficiente de correlación
10	$-0.555+2.365X-1.587X^2 +0.555X^3-0.07X^4$	0.9998
12	$-0.471+2.41X-1.692X^2 +0.62X^3-0.08X^4$	0.9997
14	$-0.413+2.461X-1.736X^2 +0.63X^3-0.08X^4$	0.9998
16	$-0.322+2.329X-1.9X^2 +0.826X^3-0.128X^4$	0.9998
18	$-0.289+2.44X-1.725X^2 +0.63X^3-0.08X^4$	0.9999
20	$-0.236+2.46X-1.769X^2 +0.658X^3-0.097X^4$	0.9997
22	$-0.18+2.5X-1.917X^2 +0.768X^3-0.114X^4$	0.9999
24	$-0.127+2.486X-1.865X^2 +0.727X^3-0.105X^4$	0.9998



Para valores de  $(m+g) = 130$  y  $(z)$  variable:

Valor z	$(\log g) =$	Coefficiente de correlación
10	$-0.54+2.395X-1.646X^2 +0.58X^3-0.076X^4$	0.9999
12	$-0.411+2.408X-1.879X^2 +0.78X^3-0.079X^4$	0.9998
14	$-0.389+2.434X-1.7X^2 +0.61X^3-0.081X^4$	0.9999
16	$-0.326+2.44X-1.75X^2 +0.651X^3-0.089X^4$	0.9998
18	$-0.267+2.48X-1.825X^2 +0.692X^3-0.097X^4$	0.9997
20	$-0.214+2.495X-1.872X^2 +0.73X^3-0.106X^4$	0.9999
22	$-0.198+2.72X-2.03X^2 +0.747X^3-0.1X^4$	0.9998
24	$-0.125+2.51X-1.859X^2 +0.713X^3-0.104X^4$	0.9999

También se desarrollaron ecuaciones polinomiales que describen matemáticamente las curvas que relacionan al factor de proporcionalidad  $(r)$  con valores de  $(\log g)$ . Estas curvas están graficadas en papel milimétrico. Las ecuaciones para varios valores de  $(z)$  son las siguientes:

Para valores de  $(m+g) = 180$  y  $(z)$  variables:

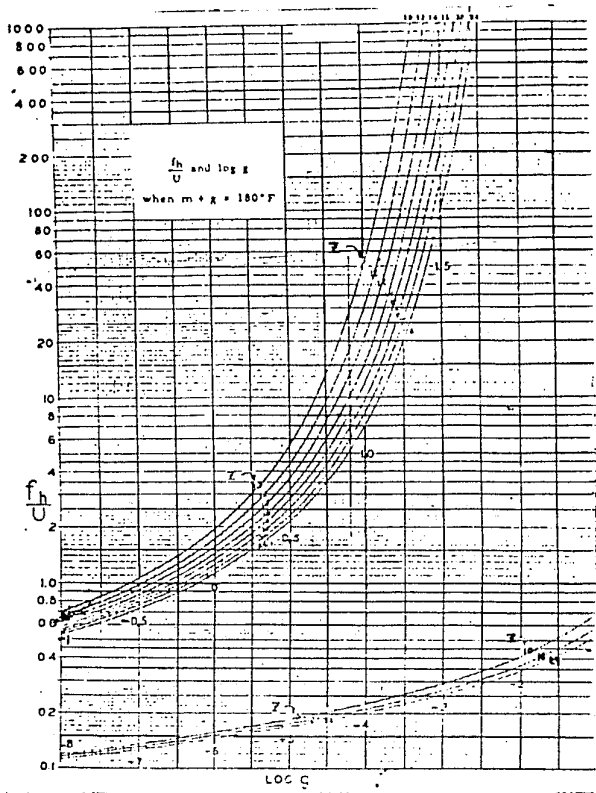
Valor z	$(r) =$	Coefficiente de correlación
10,12 y 14	$0.905-0.078X-0.05X^2 -0.027X^3-0.01X^4$	1
16,18 y 20	$0.899-0.079X-0.05X^2 -0.029X^3-0.01X^4$	0.9998
22 y 24	$0.897-0.081X-0.053X^2 -0.029X^3-0.009X^4$	0.9998

Para valores de  $(m+g) = 160$  y  $(z)$  variables:

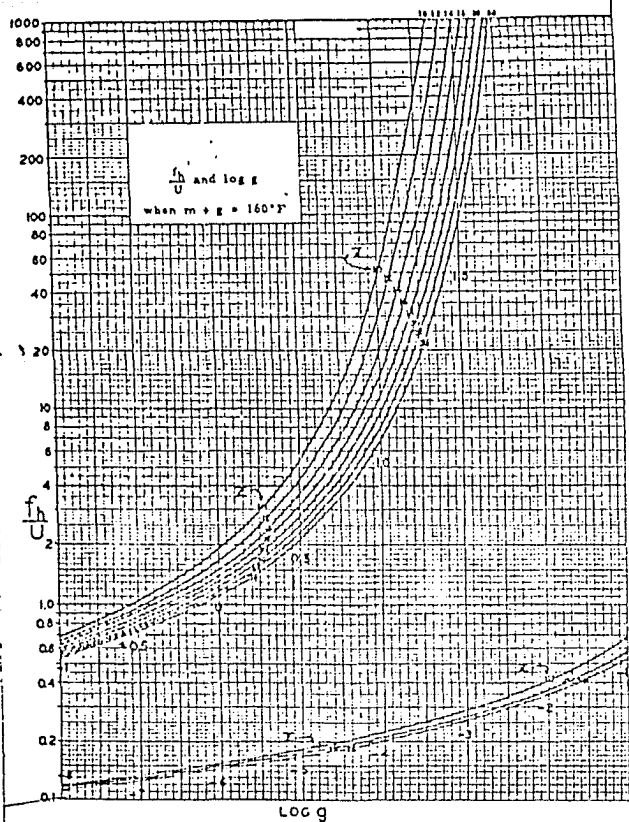
Valor z	$(r) =$	Coefficiente de correlación
10,12 y 14	$0.899-0.085X-0.057X^2 -0.032X^3-0.01X^4$	1
16,18 y 20	$0.894-0.088X-0.059X^2 -0.031X^3-0.01X^4$	0.999
22 y 24	$0.891-0.087X-0.061X^2 -0.033X^3-0.009X^4$	1

Para valores de  $(m+g) = 130$  y  $(z)$  variables:

Valor z	$(r) =$	Coefficiente de correlación
10,12 y 14	$0.890-0.102X-0.070X^2 -0.037X^3 -0.011X^4$	1
16,18 y 20	$0.885-0.104X-0.071X^2 -0.036X^3 -0.011X^4$	0.9997
22 y 24	$0.879-0.106X-0.074X^2 -0.037X^3 -0.010X^4$	0.9998

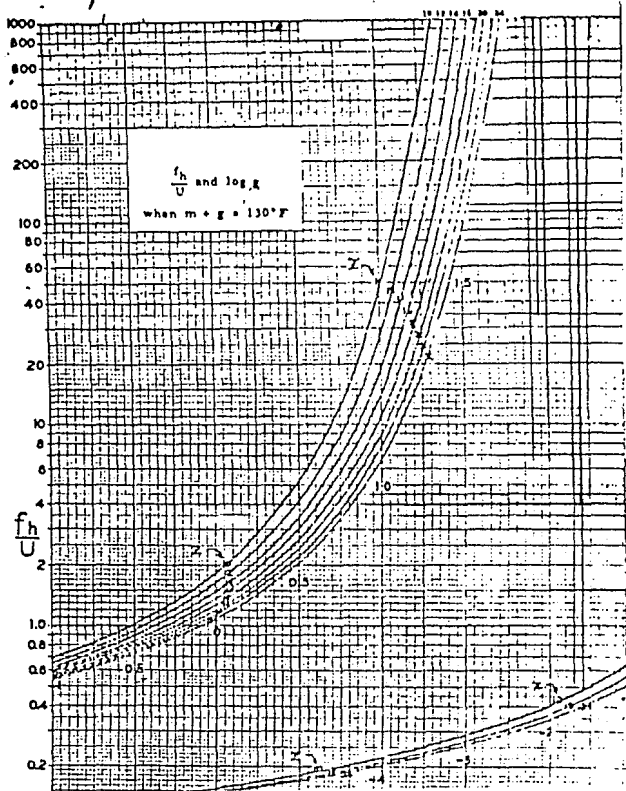


gráfica No. 3  
 ( $f_h/U$ ) vs ( $\log g$ )

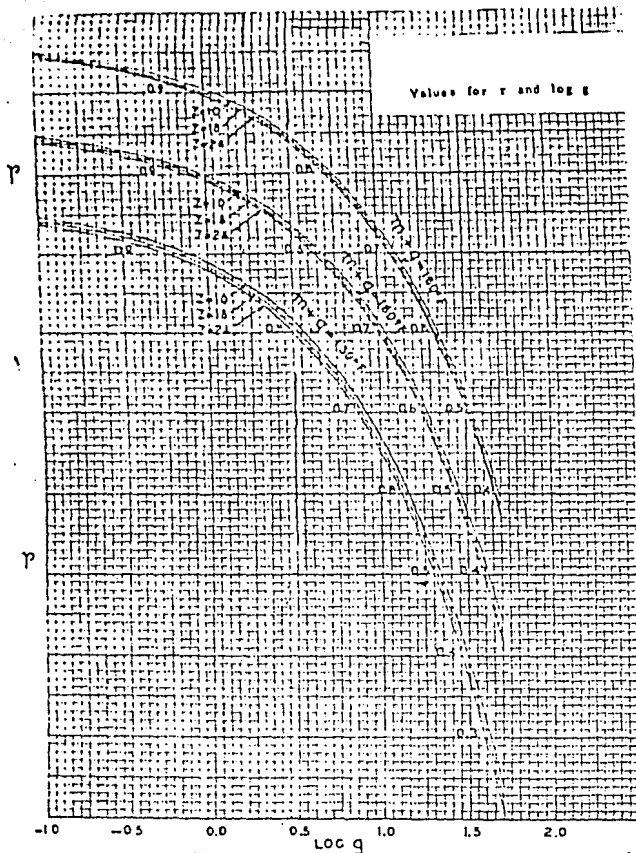


grafica No. 4

$(h/U)$  contra  $(\log g)$



gráfica No. 5  
 ( $f_h/U$ ) en función de ( $\log g$ )



gráfica No. 6  
 ( $r$ ) en función de ( $\log q$ )

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ball and Olson. 1957. Sterilization in food technology.  
Mc. Graw-Hill Book Company Inc. Toronto and London.
- 2.- Baras, E. N. 1980. Lotus 1-2-3. Guía del usuario.  
Mc. Graw-Hill Inc.
- 3.- Bungay, H. R. 1985. Computer Games and Simulation for  
Biochemical Engineering. A Wiley Interscience Publication  
New York and Toronto
- 4.- Clark, J. P. 1978. Mathematical modeling in sterilization  
processes. Food Technology. 3, 73-75
- 5.- Daniels, W. W. 1932. Biostatística, base para el análisis de  
las ciencias de la salud. Limusa
- 6.- Esterilización de conservas. Fundamentos teóricos y cálculos  
Edit. ATCV. 40 pp. (copia fotostática) sin-año.
- 7.- Geankopolis, Ch. J. 1975. Transport Processes and Unit  
Operations. CECOSA, de C.V., México
- 8.- Hayakawa, K. 1979. A critical review of mathematical  
procedures for determining proper heat sterilization pro-  
cesses. Food Technology. 3, 59-65

- 9.- Hayakawa, K. 1968. A procedure for calculating the sterilization value of a thermal process. Food technology, 22, 93-95
- 10.- Hayakawa, K. 1974. Response charts for estimating temperatures in cylindrical can of solid food subjected to time variable processing temperatures. J. of food Science, 39, 1090-1098.
- 11.- Heidman, D. R. 1975. Food Process Engineering. The AVI Publishing Company Inc. Connecticut.
- 12.- Hurley, D.; Aguilar, A. y Garibay, J. 1987. Técnicas de diseño experimental. primera edición. UNAM.
- 13.- Lekwauwa, A. N. and Hayakawa, K. 1986. Computerized model for the prediction of thermal responses of packaged solid-liquid food mixture undergoing thermal processes. J. of Food Science, 51, 1042-1049
- 14.- Lopez, A. 1975. A complete course in canning. Book 1 Basic information on canning. Revised y enlarged by Anthony Lopez. The canning trade. Baltimore, Maryland



- 15.- Morson, R. L.; Singh, R. P. and Carrood, P. A. 1978.  
An evaluation of Ball's formula methods of thermal process calculations. Food Technology, 3, 68-78
- 16.- National Canners Association. Research Laboratories. 1968  
Laboratory Manual For Food Canners and Processors. Vol. 1  
Microbiology and Processing. The AVI Publishing Company,  
Inc. Connecticut.
- 17.- Navankasattusas, S. and Lund, D.B. 1978. Monitoring and  
controlling thermal processes by on line measurement of  
accomplished lethality. Food technol. 3, 79-83
- 18.- Patino H. and Julianna R. H. 1985. A statistical approach  
to error analysis in thermal process calculations  
J. of Food Science. 50, 1110-1114
- 19.- Perkins, J. J. 1960. Principles and methods of steriliza-  
tion. Charles C. Thomas Publisher. Springfield, Illinois.
- 20.- Perkins, W. E.; Ashton, D. H. and Evancho, G. M. 1975. In-  
fluence of the z value of Clostridium botulinum on the  
accuracy of process calculations. J. of Food Science. 40.  
1189-1193
- 21.- Richards, J.W. 1968. Introduction to Industrial Steriliza-  
tion. Academic Press. New York and London.

- 22.- San Martín Ayala, 1966. Introducción a la computación.  
Dirección general de servicios de cómputo académico, UNAM.
- 23.- Shiga, I. 1976. A new method of estimating thermal  
process time for a given value  $J_c$  of Food Science, 41,  
461-462
- 24.- Spiegel, M. R. . 1965. Teoría y problemas de Estadística  
Mc. Graw-Hill, New York.
- 25.- Stumbo, C.R. 1965. Thermobacteriology in food processing  
Academic Press. New York and London
- 26.- Stumbo, C. R.; Purohit, K. S. and Ramakrishnan, T.V. 1975.  
Thermal process lethality guide for low-acid foods in  
metal containers. J. of Food Science, 40, 1316-1323
- 27.- Teixeira, A.; Dixon, J.R.; Schroeder, J. W. and Zinsmeister,  
G. E. 1969. Computer determination of spore survival  
distribution in thermally processed conduction-heated  
foods. Food Technol. 23, 78
- 28.- Western Research Laboratory. Principios para control del  
procesamiento térmico y evaluación de cierres de envases.  
(sin año). , Berkeley, Cal.