

2ej  
13



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

"CUAUTITLÁN"

## "PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION EN ALIMENTOS"

### T E S I S

Que para obtener el título de:

**INGENIERO QUIMICO**

P r e s e n t a :

**FRANCISCO GONZALEZ FRICH**

Director: **ING. HECTOR J. BECERRA RIOS**

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx. 1986



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.

## INDICE

OBJETIVOS

CAPITULO I	"GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION".....	1
CAPITULO II	"CONDUCCION EN PROCESOS DE ALIMENTOS".....	15
CAPITULO III	"MODELOS DE CONDUCCION EN ALIMENTOS".....	88
CAPITULO IV	"MODELOS PSRS PREDECIR PROPIEDADES FISICAS".....	115
CAPITULO V	"APENDICE DE PROPIEDADES FISICAS".....	130
CONCLUSIONES.....		146
BIBLIOGRAFIA.....		147

## OBJETIVOS

Con el presente trabajo se trata de visualizar los problemas que presentan los alimentos a la transferencia de calor por medio de la conducción. Los objetivos generales se presentan a continuación:

- Proporcionar modelos matemáticos que describan el fenómeno de conducción de calor en alimentos.
- Proporcionar al diseñador datos en los que pueda apoyar sus creaciones, diseños, etc.,.
- Que el investigador que se inicia en este tipo de estudios conozca los métodos para poder obtener datos e información sobre conducción en alimentos.

Este trabajo contribuye al conocimiento y fomenta la inquietud y la curiosidad de aquellos de que por alguna situación se dedican a cuestiones relacionadas con la industria alimenticia.

## CAPITULO 1

### GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

	PAGINA
I INTRODUCCION	1
i Conducción	1
ii Convección	1
iii Radiación	1
II CONDUCCION	1
III ECUACION DIFERENCIAL DE CALOR	3
IV ECUACION DE CONDUCCION DE CALOR EN DIFERENTES SISTEMAS DE COORDENADAS	5
V CONDICIONES DE FRONTERA Y CONDICIONES INICIALES	6
VI CONDUCCION DE CALOR EN ESTADO INESTABLE	7
VII CONDUCCION TRANSITORIA DE CALOR UNIDIRECCIONAL	8
i Módulo de BIOT	10
ii Número de FOURIER	10
VIII DIFERENTES SOLUCIONES DE LA ECUACION DE CALOR EN ESTADO INESTABLE	11
IX NOMENCIATURA	14

## GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

### I INTRODUCCION

En la mayoría de los casos concernientes a la ingeniería, cuando un cuerpo está a diferentes temperaturas, el calor fluirá de la parte que tiene una temperatura mayor a otra con una temperatura menor. Hay 3 diferentes mecanismos por los que se lleva a cabo esta transferencia de calor y que son:

- i) CONDUCCION
- ii) CONVECCION
- iii) RADIACION

#### i) CONDUCCION

Se lleva a cabo cuando el calor pasa a través de la substancia del cuerpo al cual se le está transfiriendo el calor.

#### ii) CONVECCION

Se lleva a cabo cuando el calor es transferido por movimientos relativos del medio que se está usando para la transferencia.

#### iii) RADIACION

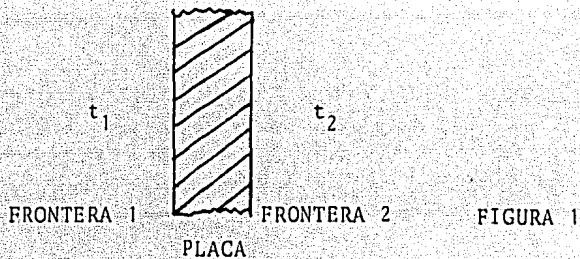
Es el mecanismo en el cual el calor es transferido por radiaciones electromagnéticas.

### II CONDUCCION

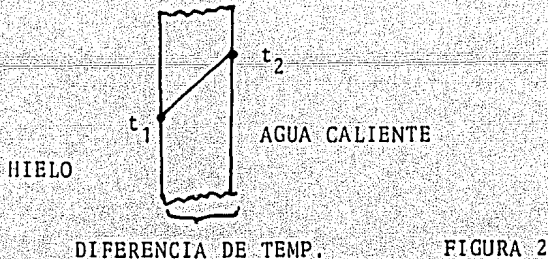
La teoría matemática de la transferencia de calor por conducción está basada en el siguiente experimento hipotético:

Una placa de un material homogéneo tiene dos superficies, cada superficie es una frontera, estas fronteras son paralelas entre sí e infinitas.

Como se muestra en la FIGURA 1.



Las dos fronteras son mantenidas a diferentes temperaturas  $t_1$  y  $t_2$ , de acuerdo a las características de la placa, las diferencias de temperaturas no deben de ser muy grandes para que no cause un cambio sensible en las propiedades del sólido. Por ejemplo en una de las superficies la mantenemos a la temperatura de fusión del hielo, por medio de este último, y la otra mantenerla fija por medio de una corriente de agua caliente que fluya continuamente. Cuando estas condiciones se hayan mantenido durante suficiente tiempo, la temperatura en diferentes puntos del sólido habrá alcanzado un estado estable. Esta diferencia de temperaturas se observa gráficamente en la FIGURA 2.



De la placa tenemos que  $t_2 > t_1$ , el área de transferencia lo llamamos  $A$  y el espesor de la placa  $x$ . El resultado de la experimentación sobre distintos tipos de materiales, supone que cuando el estado estable haya sido alcanzado, la cantidad de calor  $q$  que fluye a través de la placa en  $\theta$  segundos, está dada por la Ecuación 1:

$$q = -KA \frac{dt}{dx} \dots\dots Ec. 1-1$$

La Ecuación 1-1 es conocida como la LEY DE FOURIER, ésta nos relaciona los componentes de flujo de calor  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  con los gradientes de temperatura en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

$$q_x = -k \frac{\partial t}{\partial x} \qquad q_y = -k \frac{\partial t}{\partial y} \qquad q_z = -k \frac{\partial t}{\partial z}$$

Ecuación 1-2

De la Ecuación 1 encontramos una constante  $k$ , que es llamada: CONDUCTIVIDAD TERMICA, y es la propiedad que tiene un cuerpo de conducir el calor. Entre mayor sea ésta, será más fácil que se lleve a cabo la conducción y es una propiedad específica de cada material. Hablando más estrictamente en cada material "k" es función de la temperatura, y para la mayoría de los sólidos homogéneos es aproximadamente lineal sobre un rango moderado de temperaturas:

$$k = k_0 ( 1 + at )$$

donde:  $k$  = es el valor de  $k$  deseado  
 $k_0$  = es el valor de referencia

$$a = \frac{dk}{k_0 dt}$$

### III ECUACION DIFERENCIAL DE CALOR

En la FIGURA 2 se puede apreciar que hay una diferencia de temperaturas  $t_1$  y  $t_2$ , pero en el lapso de  $t_1$  a  $t_2$  hay una distribución de temperaturas. Esta distribución puede determinarse a partir de la ecuación diferencial de calor, cuando se somete a condiciones apropiados de frontera.



Para tener una expresión matemática de la conducción de calor se realiza el siguiente análisis, entendiéndose como elemento la placa:

$$\underbrace{\left( \text{Flujo neto de calor que entra por conducción al elemento} \right)}_I + \underbrace{\left( \text{Flujo de energía generada en el elemento} \right)}_{II} = \underbrace{\left( \text{Flujo de incremento de energía int. del elemento} \right)}_{III}$$

Ahora veremos a que es igual cada término.

= Flujo neto que entra por conducción

$$I = \left( - \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z$$

= Flujo de energía generada

$$II = g \Delta x \Delta y \Delta z$$

$g$  = fuente de energía que genera calor a una tasa  $g$ .

= Flujo de incremento de la energía interna

$$III = \rho C_p \frac{\partial t}{\partial \theta} \Delta x \Delta y \Delta z$$

En el caso de sólidos y líquidos  $C_p = C_v = C$ .

Sumando los 3 términos tenemos lo siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial t}{\partial z} \right) + g = \rho C_p \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{Ec. 1-3}$$

teniendo que  $t \equiv t(x, y, z, \theta)$  y  $g \equiv g(x, y, z, \theta)$

La Ecuación 1-3 es la ecuación diferencial parcial de la conducción de calor en coordenadas rectangulares.

Si utilizamos el Operador Laplaciano tenemos:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$$

Rearreglando la Ecuación 1-3 e introduciendo el Operador Laplaciano tenemos lo siguiente:

$$\nabla^2 t + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde:

$\nabla^2 t$  = Ganancia por conducción

$g/k$  = Ganancia por generación

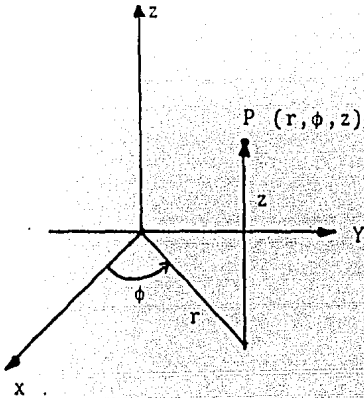
$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \theta}$  = Tasa de variación de la temperatura con el tiempo

De la Ecuación 1-4 tenemos otro término que es " $\alpha$ " o sea la DIFUSIVIDAD TERMICA. El significado físico de ésta, es asociado con la velocidad de propagación del calor en el sólido durante la variación de la temperatura con el tiempo. A mayor difusividad térmica, es mayor la velocidad de propagación de calor en el medio. De ahí su importancia en los procesos alimenticios. En donde

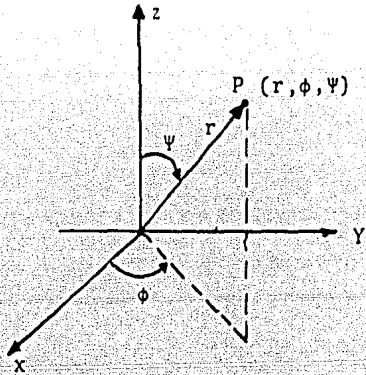
$$\alpha \equiv k/\rho C_p$$

#### IV ECUACION DE CONDUCCION DE CALOR EN DIFERENTES SISTEMAS DE COORDENADAS

El propósito de emplear diferentes sistemas de coordenadas es asegurar que las superficies coordenadas coincidan con la superficie que limitan la región.



SISTEMA DE COORDENADAS CILINDRICAS



SISTEMA DE COORDENADAS ESFERICAS

ECUACION DE CONDUCCION EN SISTEMA DE:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \theta}$$

COORDENADAS CILINDRICAS

$$t \equiv t(r, \phi, z, \theta)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \sin \psi \frac{\partial t}{\partial \psi}$$

COORDENADAS ESFERICAS

$$+ \frac{1}{r^2 \sin \psi} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \theta}$$

$$t \equiv t(r, \phi, \psi, \theta)$$

#### V CONDICIONES DE FRONTERA Y CONDICIONES INICIALES

Para poder resolver la ecuación diferencial de conducción de calor con el fin de determinar la distribución de la temperatura en un medio, se necesitan especificar condiciones de frontera y de condiciones iniciales.

CONDICION INICIAL: Especifica la distribución de temperatura en el medio, en el origen de la coordenada del tiempo, es decir, cuando  $\Theta = 0$  y solamente es necesaria en problemas dependientes del tiempo.

CONDICION DE FRONTERA: Especifican la temperatura o la situación de flujo de calor en los límites de la región y se tienen de 3 clases.

CONDICION DE FRONTERA 1a. CLASE: Es cuando se especifica la distribución o el valor de la temperatura de una superficie límite.

CONDICION DE FRONTERA 2a. CLASE: Es cuando se especifica el flujo de calor.

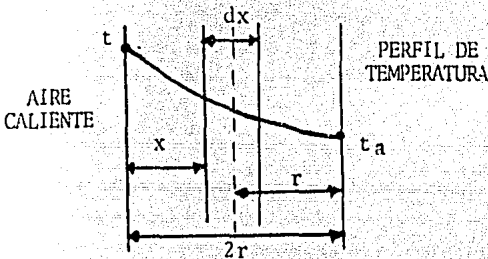
CONDICION DE FRONTERA 3a. CLASE: Es cuando se somete la superficie - límite a una transferencia de calor por convección con un medio de temperatura conocida.

## VI CONDUCCION DE CALOR EN ESTADO INESTABLE

Le llamamos a un proceso en "estado inestable" o "transitorio" cuando éste depende del tiempo. En muchos casos prácticos, la fase transitoria es una porción muy pequeña del tiempo total en el que ocurre un proceso de transferencia de calor, por lo que es relativamente de poca importancia. Este sería el caso de una planta de proceso en que se logran condiciones de estado estable y se opera bajo condiciones que no cambian en mucho tiempo, en algunos casos son semanas o meses. En procesos como los alimenticios, el estado inestable es de interés principal y puede ser que nunca llegue a estado estable.

VII CONDUCCION TRANSITORIA DE CALOR UNIDIRECCIONAL

Considérese el siguiente diagrama, el cual es una representación de una placa delgada de metal de un volumen  $V$ , una área  $A$  y un espesor  $2r$  a una temperatura  $t$  en contacto con una corriente de aire caliente con una temperatura  $t_a$  uniforme menor.



A cualquier tiempo  $\theta$  del inicio de calentamiento, la cantidad de calor  $dQ$  transferida en un tiempo corto  $d\theta$  depende de la superficie de área de la placa, de la diferencia en temperaturas entre el aire y la superficie del metal, y del factor  $h$  que comunmente es conocido como el coeficiente de transferencia de calor de los alrededores hacia la superficie, tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{d\theta} = hA (t_a - t)$$

Bajo estas condiciones el valor numérico de  $h$  debe de ser relativamente pequeño, y teniendo un valor razonable de la diferencia de temperaturas  $t_a - t$ , la correspondiente cantidad de transferencia de calor por unidad de área  $dQ/Ad\theta$  debe ser pequeño. Consecuentemente, por el alto valor de la conductividad térmica  $k$  del metal y su pequeño grosor, la temperatura del metal  $t$  debe ser substancialmente uniforme e igual a  $t_a$ . Entonces por un balance de calor en la placa, que tiene una densidad  $\rho$  y un calor específico  $C_p$  tenemos lo siguiente:

$$\frac{dQ}{d\theta} = hA (t_a - t) = V\rho C_p dt$$

$$dQ = hA (t_a - t) d\theta = V\rho C_p dt$$

$$hA (t_a - t) = V\rho C_p \frac{dt}{d\theta}$$

Si hacemos  $(t_a - t)$ , igual a  $\delta (t)$  en donde  $t_a$  es constante.

$$\rho V C_p \frac{d\delta}{d\theta} = hA\delta$$

Rearreglando los términos y separando las variables queda:

$$\frac{d\delta}{\delta} = \frac{hA}{\rho V C_p} d\theta$$

Que cuando se integra desde la condición inicial  $\delta(0) = \delta_0$  a la condición general en el tiempo  $\theta$  nos da:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{d\delta}{\delta} = \frac{hA}{\rho V C_p} \int_0^{\theta} d\theta$$

$$\ln \frac{\delta}{\delta_0} = \ln \frac{t_a - t}{t_a - t_0} = \frac{hA\theta}{\rho V C_p} \quad \text{Ec. 1-5}$$

Rearreglando el argumento de la Ec. 1-5 de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{hA}{\rho V C_p} \theta &= \frac{hV}{kS} \frac{\Lambda^2 k}{\rho V^2 C_p} \theta \\ &= \frac{hV/\Lambda}{k} \frac{\alpha\theta}{(V/\Lambda)^2} \quad \text{Ec. 1-5a} \end{aligned}$$

Cada uno de los términos entre paréntesis a la derecha de la ecuación 1-5a es adimensional, incluyendo éstos la razón  $V/S$ , que tiene unidades de longitud. Al primer término se le llama módulo de BIOT.

$$Bi \equiv \frac{hV/A}{k}$$

La magnitud del módulo de BIOT tiene significado físico al relacionar el lugar en que ocurre la mayor resistencia a la transferencia de calor. Un gran valor del número de BIOT indica que la resistencia conductiva controla, o sea, que hay mayor capacidad para la transferencia de calor a la superficie por conducción.

Un pequeño valor del número de BIOT representa el caso de resistencia interna despreciable, en que hay mayor capacidad para transferir calor por conducción que por convección. La evaluación del número de BIOT debe de ser el paso inicial en la resolución de los problemas de conducción de calor transitoria.

El segundo término entre paréntesis a la derecha de la ecuación 1-5a se denomina el módulo o número de Fourier que es abreviado Fo.

$$Fo \equiv \frac{\alpha \theta}{(V/A)^2}$$

La representación del número de Fourier dada es una forma común de "adimensionalizar" la variable tiempo. También se define como una medida de la tasa de conducción de calor en comparación con la tasa de calor almacenada en un volumen dado. Por lo tanto a mayor número de Fourier mayor será la distancia de penetración de calor en un sólido en un tiempo dado.

DIFERENTES SOLUCIONES DE LA ECUACION DIFERENCIAL DE CALOR EN ESTADO INESTABLE

Recordando la ecuación 1-3 tenemos lo siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad \text{Ec. 1-3}$$

En el caso de una placa infinita que la relación entre la superficie y el espesor sea muy grande, que el flujo de calor sea unidireccional en el eje de las X y que no se genere energía dentro de la placa tenemos lo siguiente:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

Resolviendo la ecuación anterior para el caso especial de una placa infinita que tiene un espesor  $2r$  y una resistencia superficial despreciable que corresponde a un coeficiente "h" de valor infinito, y por último la temperatura de la superficie cambia a la temperatura de los alrededores inmediatamente al tiempo cero.

Con las condiciones de frontera siguiente:

$$t = t_a \text{ en } x = 0 \quad \text{y} \quad X = 2r \quad t = t_b \text{ al } \theta = 0$$

$$t = t_a \text{ al } \theta = \infty$$

Una solución rápida es dada por la convergencia de series infinitas:

$$\frac{t_a - t}{t_a - t_b} = \frac{4}{\pi} \left( e^{-a_1 x} \sin \frac{\pi x}{2r} + \frac{1}{3} e^{-9a_1 x} \sin \frac{3\pi x}{2r} + \frac{1}{5} e^{-25a_1 x} \sin \frac{5\pi x}{2r} + \dots \right)$$



donde  $a_1$  es igual a  $(\pi/2)^2$  y  $x$  representa la proporción adimensional  $\alpha\theta/r^2$  o sea el número de FOURIER.

La Ecuación 1-6 puede quedar también de la siguiente forma:

$$\frac{t_a - t}{t_a - t_b} = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-a_1 x} + \frac{1}{9} e^{-9a_1 x} + \frac{1}{25} e^{-25a_1 x} + \dots \right) \quad \text{Ec. 1-7}$$

Para un cilindro infinito de radio  $r$  la temperatura  $t$  está dada por la ecuación:

$$\frac{t_a - t}{t_a - t_b} = 0.692 e^{-5.78x} + 0.131 e^{-30.4x} + 0.0534 e^{-74.8x} \quad \text{Ec. 1-8}$$

y para una esfera de radio  $r$  la ecuación correspondiente es:

$$\frac{t_a - t}{t_a - t_b} = 0.608 e^{-9.87x} + 0.152 e^{-39.5x} + 0.0676 e^{-88.8x} \quad \text{Ec. 1-9}$$

Cuando  $x$  es más grande que aprox. 0.1 solo el primer término de la Ec. 1-7, 1-8 y 1-9 tienen un significado y los otros términos pueden ser ignorados. Bajo estas condiciones el tiempo requerido para cambiar de la temperatura  $t_b$  a  $t$  puede encontrarse reorganizando la Ec. 1-7 y nos da para una placa:

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \frac{2A}{\pi}^2 \text{ en } 8 \frac{(t_a - t_b)}{(t_a - t)} \quad \text{Ec. 1-10}$$

$$\text{Cilindro Infinito } \theta_T = \frac{r^2}{5.78\alpha} \text{ en } 0.692 \frac{(t_a - t_b)}{(t_a - t)} \quad \text{Ec. 1-11}$$

$$\text{Para una esfera } \theta_T = \frac{r^2}{9.87\alpha} \text{ en } 0.608 \frac{(t_a - t_b)}{(t_a - t)} \quad \text{Ec. 1-12}$$

Las ecuaciones 1-7, 1-8 y 1-9 son aplicables cuando la temperatura de la superficie es constante, tal que  $t_a$  pueda ser igual a la temperatura del medio y la superficie del sólido son despreciables.

El calor total absorbido por la placa en el tiempo  $\theta$  es obtenido evaluando la integral  $dQ = (t-t_b) \rho C_p A dx$  desde 0 a  $2r$  dándonos:

$$\frac{Q}{2r A_p C_p (t_a - t_b)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-a_1 x} + \frac{1}{9} e^{-9a_1 x} + \frac{1}{25} e^{-25a_1 x} + \dots \right)$$

Ec. 1-13

Si observamos la Ec. 1-13 y la comparamos con la Ec. 1-7 obtenemos que:

$$1 - \frac{Q}{2r A_p C_p (t_a - t_b)} = \frac{t_a - t}{t_a - t_b}$$

Sustituyendo esta relación en la Ec. 1-8 y 1-9 tenemos lo siguiente:

Cilindro Infinito

$$\frac{Q}{2r A_p C_p (t_a - t_b)} = 1 - \left[ 0.692e^{-5.78x} + 0.131e^{-30.4x} + 0.0534e^{-74.8x} \dots \right]$$

Ec. 1-14

Esfera

$$\frac{Q}{2r A_p C_p (t_a - t_b)} = 1 - \left[ 0.608e^{-9.87x} + 0.152e^{-39.5x} + 0.0676e^{-88.8x} \dots \right]$$

Ec. 1-15

NOMENCLATURA

A	=	Area de Transferencia
Cp	=	Calor Especifico
g	=	Fuente de Energía que genera calor a una tasa g.
h	=	Coefficiente de Transferencia de calor
k	=	Conductividad Térmica
qx, qy, qz	=	Componentes de Flujo de Calor en las direcciones $X_1$ y $X_2$
r	=	Espesor
T, t	=	Temperatura
v	=	Volumen
X	=	Espesor
$\alpha$	=	Difusividad Térmica
$\rho$	=	Densidad
$\theta$	=	Tiempo
$\phi$	=	Coordenadas Cilíndricas
$\psi$	=	Esféricas

CAPITULO 2

CONDUCCION DE CALOR EN PROCESOS DE CONSERVACION DE ALIMENTOS

I	INTRODUCCION .....	17
II	MICROBIOLOGIA .....	17
	i Relación de las bacterias y el medio ambiente	
	ii Introducción a la bacteriología	
	iii Reproducción de las bacterias	
	iv Bacterias asociadas con la mayoría de los alimentos	
	v Bacterias y congelación	
III	ESTERILIZACION .....	23
	i Principios generales	
	ii Penetración de calor	
	iii Curvas de penetración de calor	
	iv Curva de tiempo de muerte térmica	
	v Curva fantasma de tiempo de muerte térmica	
	vi Curvas de velocidad de muerte de microorganismos	
	vii Curvas de velocidad de muerte térmica de microorganismos	
IV	MÉTODOS DE ESTERILIZACION .....	36
	i Introducción - Grupo I	
	Grupo II	
	ii Grupo Ia - Método General	
	* Interpretación N°1 Método por integración	
	** Interpretación N°2 Integración Gaussiana	
	*** Interpretación N°3 Método del papel de velocidad letal	

iii	Grupo Ib - Método Fórmula	
	* Fórmulas empíricas	
	** Método de Ball	
	*** Método de Hayakawa	
iv	Grupo II	
V	CONGELACION .....	81
	i Principios de congelación	
	ii Mecanismo de la transferencia de calor en el producto	
	iii Nucleación y crecimientos de cristales	
VI	NOMENCLATURA .....	86

## CAPITULO 2

### CONDUCCION DE CALOR EN PROCESOS DE CONSERVACION DE ALIMENTOS.

#### INTRODUCCION

La conducción de calor en los alimentos tiene dos fines principales que son los siguientes:

PROCESAMIENTO  
CONSERVACION

El procesamiento, es la función mediante la cual el alimento es acondicionado para que pueda ser envasado y puesto a la venta en condiciones aceptables por el consumidor.

La conservación es el resultado de un proceso que permite que el alimento envasado no se corrompa durante cierto tiempo y pueda llegar en condiciones aceptables y seguras al consumidor.

Debido a que el procesamiento es variable y específico para cada grupo de alimentos, nos enfocaremos en este estudio hacia la conservación mediante la conducción de calor en el que se obtienen dos tipos finales de conservación que son:

- a) POR ESTERILIZACION
- b) POR CONGELACION

Estos procesos están encaminados a evitar la procreación de los microorganismos, tema que será lo que trataremos a continuación brevemente.

#### MICROBIOLOGIA

##### RELACION DE LAS BACTERIAS Y EL MEDIO AMBIENTE.

La importancia de los microorganismos en nuestra vida cotidiana se puede reconocer a partir de los alimentos que consumimos en una sola semana.

¿Cuántos de estos alimentos se hacen realidad gracias a la actividad microbiana? La respuesta a esta pregunta podría asombrar a aquellos que han pensado poco o nada de este aspecto de la su pervivencia.

El sabor característico de ciertos alimentos es consecuencia de la fermentación, por ejemplo, el proceso de fermentación mediante la levadura le imparte al pan su sabor y también ayuda a su conservación. La producción de vinos y vinagres y su sabor es otro ejemplo de fermentación por medio de levaduras. Intervienen las bacterias en el procesamiento de productos lácteos, etc.

Las bacterias y hongos, ambas partes de los sistemas biológicos de la naturaleza son abundantes en el medio ambiente, pero cuando penetran al sistema biológico del hombre, en el lugar incorrecto o en un número fuera de lo normal, se convierten en un problema para él. El hombre mismo es un portador perfecto de microbios, ya que la temperatura de su cuerpo es ideal para el crecimiento microbiano.

## ii Introducción a la Bacteriología

Las bacterias son organismos microscópicos unicelulares del reino vegetal, los cuales se reproducen por fusión binaria. La posición taxonómica de las bacterias en el reino vegetal es la siguiente:

REINO:	VEGETAL
SUBREINO:	TALOFITA
FILUM:	EZQUIZOMICOFITA
CLASE:	EZQUIZOMICETOS
ORDEN:	EUBACTERIALES
	ACTINOMICETALES
	MIZOBACTERIALES

## iii Reproducción de las Bacterias

La reproducción de las bacterias es un resultado natural del metabolismo de la célula.

Las células bacterianas crecen, aumentando su protoplasma por una serie de reacciones complejas que no se discutirán en este momento. El crecimiento de la célula provoca el alargamiento o ensanchamiento de la célula, un aumento de citoplasma y la formación de material

nuclear suficiente para sostener dos células. Cada célula es capaz de dividirse en dos células hijas. Cuando una célula se deposita sobre un medio adecuado, en un ambiente propicio para su crecimiento, producirá descendencia por duplicado o una colonia aislada que consiste de billones de estas células.

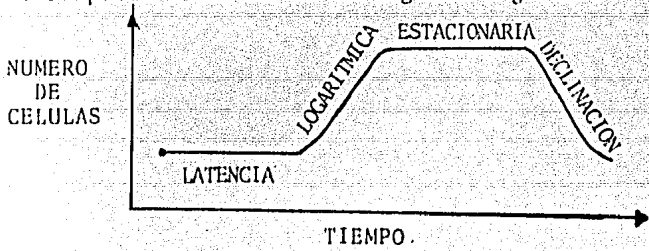
Las bacterias se reproducen mediante la división en los ángulos rectos a su eje más largo.

Este proceso se conoce como FISION BINARIA. El tiempo de generación, o sea el lapso entre la formación de la célula y la división, se decide por muchos factores, como son: el medio de cultivo, temperatura, edad del cultivo, el género, especie y cepa bacteriana.

El tiempo de generación promedio es de 15 a 30 minutos para algunos bacilos ENTERICOS (bacterias del interior del intestino) de las cuales E. Coli y la salmonella son ejemplos típicos. Otros microbios tienen tiempos de generación más largos, siendo de varias horas o varios días, aún bajo condiciones ideales. El objetivo en el procesado de alimentos es interrumpir la reproducción de las bacterias y/o el tiempo de generación de los mismos.

- La curva típica de crecimiento de todas las bacterias tiene cuatro fases:
- FASE LATENCIA
- FASE LOGARITMICA
- FASE ESTACIONARIA
- FASE DECLINACION

Esto se puede observar en la siguiente gráfica:





FASE LATENCIA: Esta fase empieza cuando la bacteria se inocula en el medio.

En la fase de latencia tiene lugar una serie de cambios químicos - dentro de la célula, a pesar de la ausencia de división celular. La reproducción empieza hacia el final de esta fase.

FASE LOGARITMICA: Las células se están reproduciendo rápidamente en esta fase, con tiempos de generación bastante constantes. Los tiempos de generación están gobernados por las condiciones ambientales y las fuentes de alimento.

FASE ESTACIONARIA: El tiempo de generación está en su punto máximo durante la fase estacionaria. Hacia el fin de la fase, el número de células vivientes se llega a estabilizar.

FASE DE DECLINACION: Como resultado de la presencia de sustancias tales como ácidos, que son excretados por las células, el medio llega a ser un factor de inhibición para el metabolismo y reproducción celular posterior y la proporción de células viables empieza a caer. Inicialmente este fenómeno es lento, pero es seguido por una rápida muerte de las células debido al medio adverso y/o a la falta de micronutrientos.

### CLASIFICACION

La clasificación de acuerdo a las propiedades fisiológicas está basada en los requerimientos de crecimiento y la necesidad de las bacterias de una fuente de carbono orgánico. Las bacterias AUTOTROFICAS, obtienen energía y crecen en medios inorgánicos, usando  $\text{CO}_2$  como su única fuente de carbono.

Las bacterias autotróficas comienzan utilizando  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$ , a partir de los cuales construyen una estructura protoplásmica completa de proteína, grasa y carbohidratos. La energía para otros procesos -

se deriva de la oxidación del amoníaco.

Las bacterias heterotróficas obtienen su energía de fuentes de carbono orgánico, tales como el azúcar. Las heterotróficas requieren la adición de azúcar, aminoácidos, purinas, pirimidinas y vitaminas a su medio de cultivo. La fermentación del azúcar provee su fuente de energía primaria.

Las bacterias patógenas asociadas con el procesamiento de alimentos, son heterotróficas que se han adaptado a un medio con muchas clases de materiales orgánicos. En muchos casos estos organismos no pueden sintetizar sustancias orgánicas complejas necesarias para su crecimiento, por lo que a menudo dependen de la materia orgánica viviente para obtener nutrimentos, dañando al organismo huésped.

#### BACTERIAS ASOCIADAS CON LA MAYORIA DE LOS ALIMENTOS

Los principales organismos patógenos que conciernen a los procesadores de alimentos son:

- (1) SALMONELLA
- (2) SHIGELLA
- (3) STAPHYLOCOCCUS AUREUS
- (4) CLORSTRIDIUM (principalmente en latas)
- (5) ESQUERQUIA COLI

Las bacterias patógenas no crecerán a temperaturas abajo de 4.4°C y son generalmente más sensibles a factores ambientales. Las bacterias patógenas pueden ser peligrosas en cualquiera de las siguientes condiciones:

- (1) Por su gran número, su presencia provoca una infección.
- (2) Un sub-producto intercelular del metabolismo (una toxina) es excretada dentro del alimento, al ser ingerido éste, se con-

vierte en un veneno muy potente.

Generalmente el crecimiento de las bacterias patógenas no representa problemas en productos congelados, excepto en un grupo de microbios que crecen a temperaturas tan bajas como  $-10^{\circ}\text{C}$  y pueden causar deterioros cuando los productos congelados se conservan a temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  y mayores.

Este grupo es el de las bacterias psicofílicas y contiene muchos géneros y especies.

Estas bacterias no causan envenenamiento al ser ingeridas con los alimentos, sino más bien son un problema de calidad, que en casos extremos se llama adulteración.

#### BACTERIAS Y CONGELACION

- (1) Las bacterias representan un problema potencial a temperaturas entre  $8^{\circ}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ .
- (2) En tanto que las bacterias patógenas no representan un problema abajo de  $4^{\circ}\text{C}$ , pueden serlo cuando crecen entre  $4^{\circ}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, las bacterias no patógenas pueden causar deterioro y sabores desagradables en el producto.
- (3) Las bacterias no son exterminadas por la congelación, solamente son inactivadas, aunque se puede esperar una cierta reducción en su número después de la congelación y almacenamiento.
- (4) Temperaturas de almacenamiento de  $-18^{\circ}\text{C}$  y menores se deben de implementar para asegurar la integridad del producto.

## ESTERILIZACION

### Principios Generales

La determinación matemática del proceso de calentamiento adecuado, está esencialmente basada en el uso de valores paramétricos, los cuales están relacionados con el efecto letal del proceso calorífico.

Para estimar estos valores paramétricos, las temperaturas de los alimentos se determina experimental o teóricamente y se combinan con las ecuaciones de reacciones cinéticas para la inactivación térmica del micro-organismo.

Gran cantidad de ecuaciones cinéticas se han usado para la estimación de los procesos térmicos. Estas ecuaciones representan la curva de organismos sobrevivientes y la curva fantasma del tiempo de muerte térmica de un factor de vulnerabilidad.

La curva de organismos sobrevivientes muestra una relación entre el tiempo de calentamiento isotérmico " $\theta$ " y una concentración de factores vulnerables " $C$ " y es matemáticamente aproximado por la siguiente ecuación:

$$C = R C_0 10^{-\theta/D} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

donde  $R$  es el coeficiente de intercepción de la curva de factores sobrevivientes,  $D$  es la reducción decimal de un factor térmicamente vulnerable a cualquier temperatura expresada en minutos y  $C_0$  es la concentración inicial de factores vulnerables.

La curva fantasma de tiempo de muerte térmica representa la influencia de la temperatura sobre la reducción decimal del tiempo,  $D$ , de un factor vulnerable. Esta curva es aproximadamente igual a:

$$D_r/D = 10^{(T - T_r)/Z} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Las incógnitas que aparecen en cada ecuación serán explicadas ampliamente más adelante.

La estimación de un proceso de calentamiento se basa en el cálculo del valor de esterilización,  $F_p$  que se muestra a continuación.

$$F_p = \int_0^{\theta_e} 10^{(T - T_r)/Z} dt \quad \text{Ecuación 2-3}$$

donde  $\theta_e$ , es el tiempo en el que se termina el proceso de calentamiento.

La integración de la ecuación 2-3 es usualmente llamada velocidad letal,  $L$ . El término  $Z$  en la ec. 2-3 enfatiza que sólo es considerado un sólo tipo de factor vulnerable.

El proceso de esterilización, se lleva a cabo en un autoclave en el cual se introduce el producto a esterilizar, y se le inyecta vapor para aumentar la temperatura de éste, y reducir los factores vulnerables. Cuando el producto a esterilizar ha alcanzado la temperatura de la autoclave se corta el vapor y empieza el proceso de enfriamiento; para el enfriamiento se utiliza regularmente agua a temperaturas bajas (aproximadamente 70°F).

La concentración del resto del factor térmico vulnerable,  $C$ , en el alimento procesado puede ser predicha por medio de la siguiente ecuación:

$$C = (C_0 R) \cdot 10^{-F_p/D_r} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Las temperaturas de referencia " $T_r$ " usadas regularmente para alimentos de baja acidez pH 3 a 5.3 es de 250°F.

Ahora para productos ácidos con pH 4.5 a 3.7 las temperaturas de referencia son de 212° y 220°F.

TABLA 1  
Clasificación de alimentos por pH

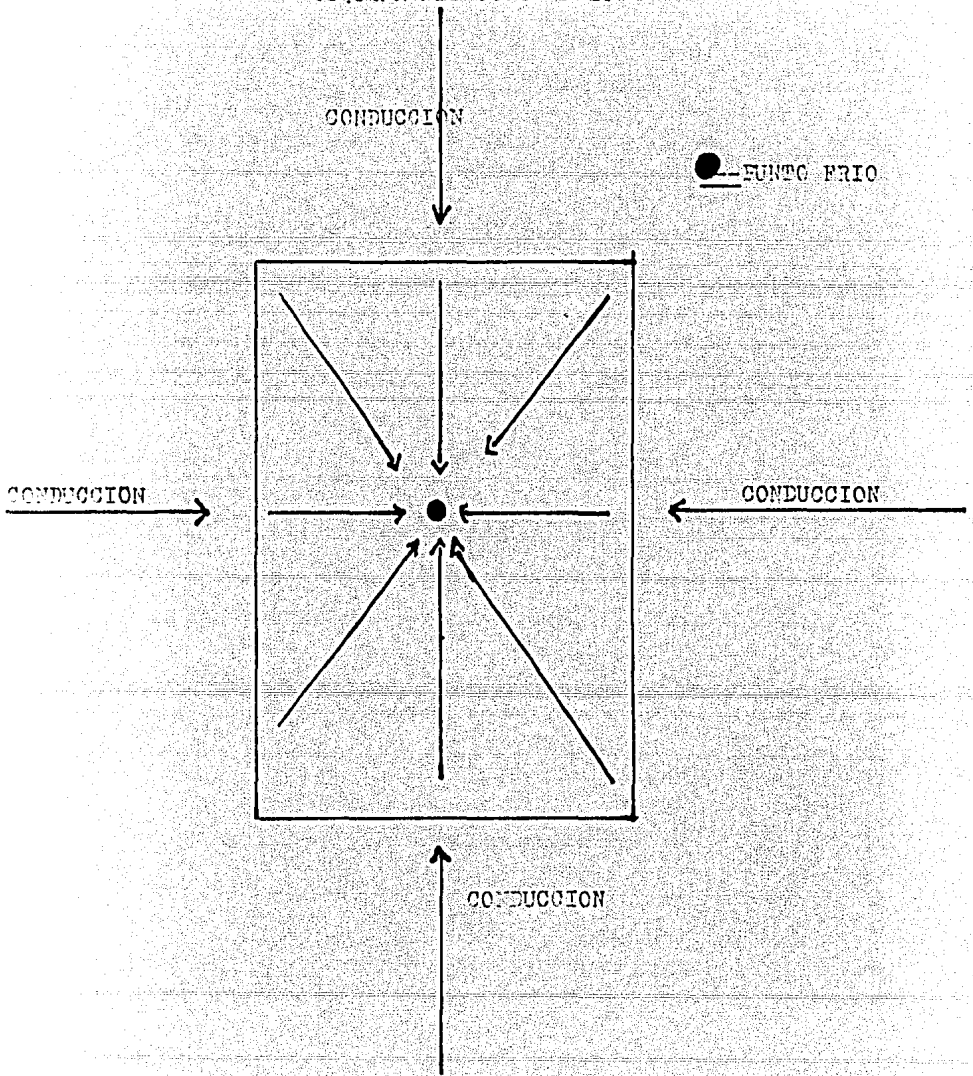
NO ACIDOS		ACIDOS	
ACIDEZ BAJA	ACIDEZ MEDIA	ACIDO	ACIDEZ ALTA
pH $\geq$ 5.5	pH 5.3 a 4.6	pH 4.5-3.7	pH $\leq$ 3.7
Carnes	Espinacas	Higos	Cerezas
Pescados	Sopas	Jitomates	Encurtidos
Leche	Spaghetti	Piñas	Col Agria
Vegetales	Espárragos	Peras	Cítricos

#### PENETRACION DE CALOR

Por medio de la penetración de calor podemos destruir todos los factores vulnerables que se encuentren en el alimento envasado, el calor deberá penetrar a todos los puntos del recipiente. Ahora en el momento de calcular el proceso térmico necesitamos conocer una relación muy importante que es la de tiempo-temperatura.

La región que recibe menor cantidad de calor durante el tiempo del proceso se le conoce comunmente con el nombre de punto frío. Esta región es crítica ya que es en la que más probablemente los microorganismos sobrevivan en el alimento.

GRAFICA DE PENETRACION DE CALOR  
ESQUEMA DEL PUNTO FRIO



## CURVAS DE PENETRACION DE CALOR

Los datos de penetración de calor se grafican en papel semilogarítmico. El tiempo se grafica en la escala lineal y la temperatura en la logarítmica. La temperatura graficada es la diferencia de temperaturas entre la autoclave y la de la lata o envase.

Las temperaturas se marcan en la gráfica de mayor a menor, la temperatura mayor debe ser un grado abajo de la temperatura del autoclave. La escala lineal de tiempo se comienza en 0 (cero) cuando se empieza a suministrar el vapor.

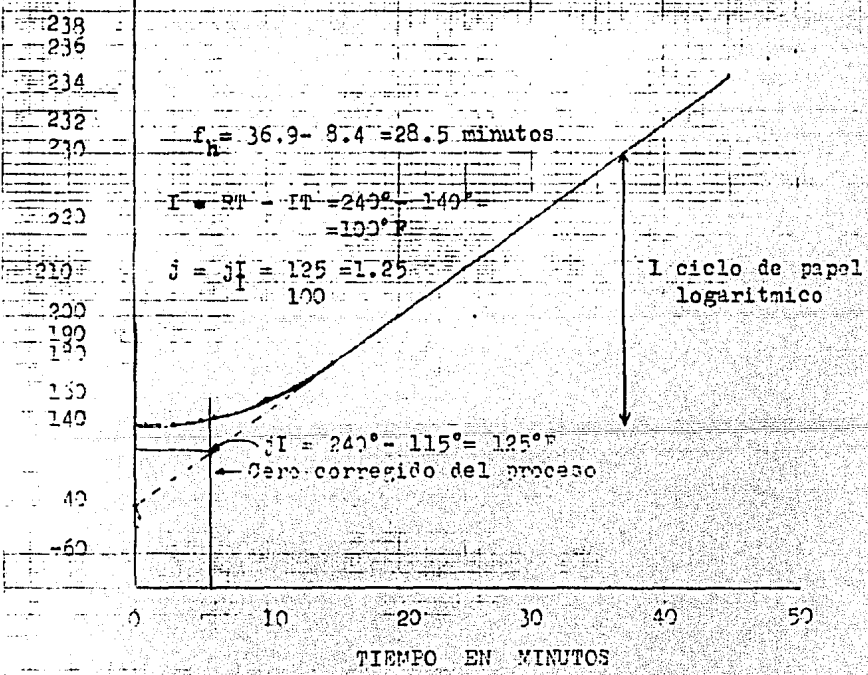
Cuando se grafica la curva de penetración de calor se observa que la gráfica no sigue el comportamiento de una recta sino de una curva y a esto se le ha dado en llamar "curva de calentamiento - rota".

Se muestran a continuación tres tipos de curvas de penetración de calor.



CURVAS DE PENETRACION DE CALOR  
CURVA DE CALENTAMIENTO

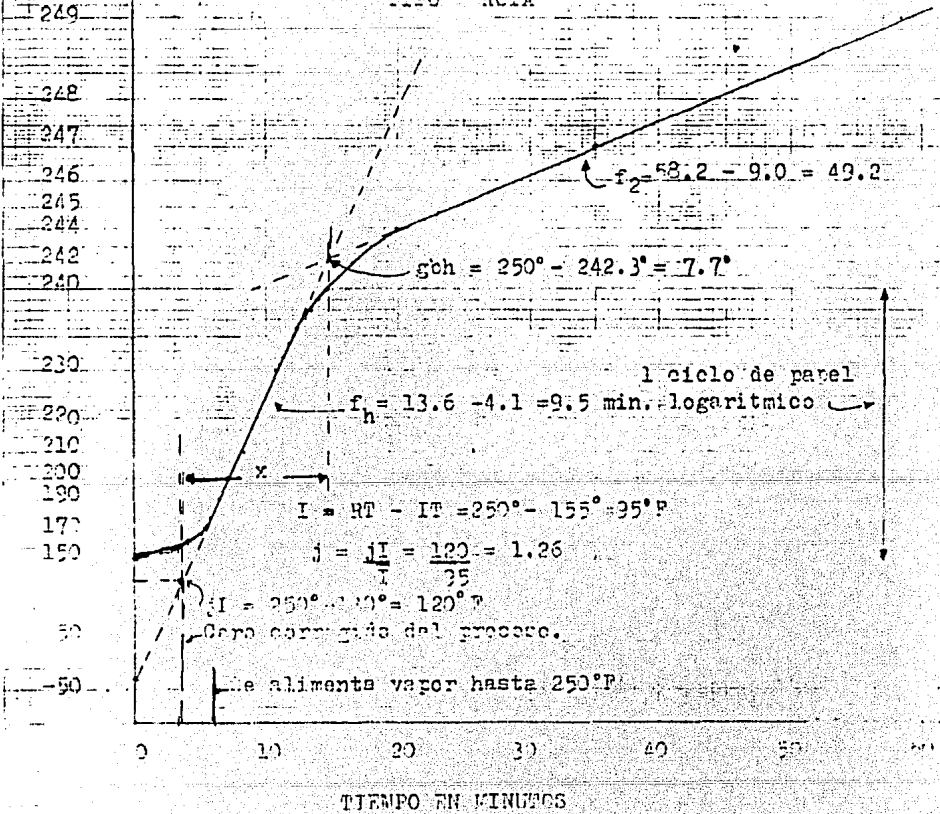
TEMPERATURA ° F TÍPO "LINEA RECTA"

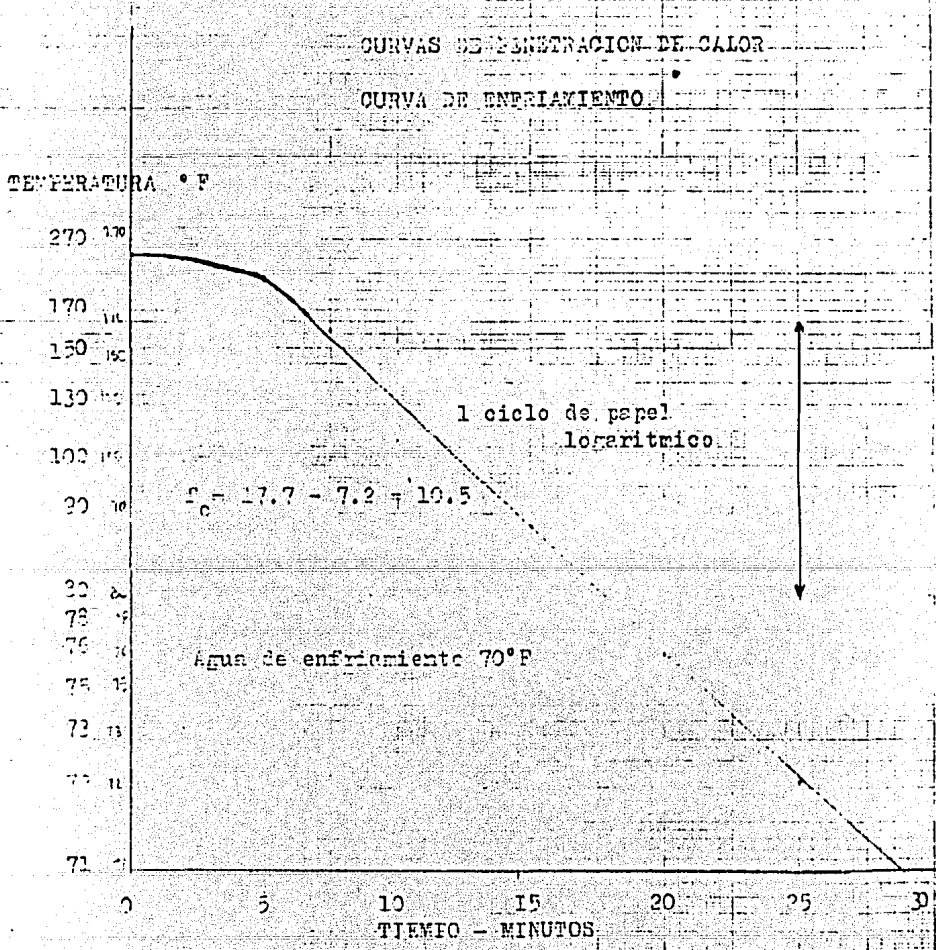


CURVAS DE PENETRACION DE CALOR

TEMPERATURA °F

CURVA DE CALENTAMIENTO  
TIPO " RECTA "





Ahora nos encargaremos de ciertas definiciones que nos serán de gran utilidad en el estudio de los métodos de esterilización.

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

En papel semilogarítmico, el número de microorganismos sobrevivientes es graficado en la escala logarítmica contra el tiempo en minutos, en la escala lineal, después se ajusta una línea recta a través de los puntos.

El valor de "D" será el tiempo en minutos requeridos para que la curva atraviese un ciclo logarítmico.

Un pequeño subíndice nos relata la temperatura a la cual se está tomando "D".

#### CURVA DE TIEMPO DE MUERTE TERMICA TDT - Sobre

Papel logarítmico, los tiempos de supervivencia y destrucción en minutos se grafican en la escala logarítmica contra la temperatura en °F (°C) en la escala lineal. Una vez que se haya realizado esto se traza la línea que mejor se ajuste y tendremos nuestra curva.

#### CURVA FANTASMA DE TIEMPO DE MUERTE TERMICA

En papel semilogarítmico, los valores de "D" se grafica en la escala logarítmica vs. la temperatura en la escala lineal en °F o °C, se traza la línea que mejor ajuste a todos los valores.

"Z" es la pendiente de la curva de tiempo de muerte térmica, o de la curva fantasma de tiempo de muerte. El valor de Z representa

el número de °F o °C requeridos para la curva atravesarse 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 microorganismos no debe de ser comparado si no tiene el mismo valor de Z.

El valor de "F" se denota como sigue  $F_{190}^{15}$ , representa un número de minutos requeridos para destruir un número específico de organismos a una temperatura de 190 °F y  $Z = 15$ .

"Fo" es el número de minutos requeridos para destruir un número especificado de microorganismos a 250 °F cuando  $Z = 18$   $F_{250}^{18}$ . El valor de Z igual a 18 es usualmente asumido para el C. botulinum, cuando las determinaciones de tiempo de muerte térmica no han sido realizadas sobre el producto en consideración.

"F/0" se le conoce como la proporción letal, y es la relación de tiempo en minutos (F) requerida para reducir un número de microorganismos a un nivel de seguridad de 250 °F o 121 °C a un tiempo en minutos (t) para alcanzar la misma reducción a cualquier otra temperatura (T).

"IT" Es la temperatura inicial del alimento procesado.

"RT" La temperatura del autoclave.

"CUT" es el tiempo desde que se suministra vapor hasta que se alcanza la temperatura final de operación y se inicia la esterilización.

"j<sub>1</sub>" es la pseudo temperatura inicial y se obtiene multiplicando CUT por 0.58, se marca con este valor, en la gráfica de penetración, en la escala de tiempo, se dibuja una línea vertical a través de este punto que intersecte la extensión inferior de la línea de calentamiento y se lee el valor en la escala de temperatura, a este valor se le resta la temperatura de la autoclave y esto es j<sub>1</sub>. La línea vertical se conoce como el cero corregido del proceso

$$I = RT - IT$$

J = Se le conoce como el factor de retardamiento y es igual a

$$J = \frac{JI}{I}$$

f<sub>h</sub> = Es la pendiente de la porción recta de la curva de calentamiento. La pendiente de la curva es expresada como el número de minutos requerido para que la curva atraviese un ciclo de papel logarítmico. Cuando se presenta una ruptura en la curva de calentamiento, la pendiente de la porción lineal de la curva de calentamiento antes de ésta es f<sub>h</sub>.

f<sub>2</sub> = Es la pendiente de la curva de calentamiento después del punto de ruptura en la curva de calentamiento.

f<sub>c</sub> = Es la pendiente de la porción recta de la curva semilogarítmica de enfriamiento.

x = Es el tiempo en minutos desde el cero corregido del proceso hasta la ruptura de la línea de calentamiento.

#### CURVAS DE VELOCIDAD DE MUERTE DE MICROORGANISMOS

Para realizar estas curvas es necesario muestrear durante el proceso de calentamiento y de esta forma contar la cantidad de organismos sobrevivientes.

Estas gráficas pueden ser de distintos tipos.

- (1) En papel semilogarítmico, graficar el tiempo en minutos en la escala lineal contra el número de organismos sobrevivientes

tes en la escala logarítmica.

- (2) En papel semilogarítmico, graficar el tiempo en minutos en la escala lineal contra el por ciento de organismos sobrevivientes en la escala logarítmica.

#### CURVA DE VELOCIDAD DE MUERTE TERMICA DE MICRORGANISMOS.

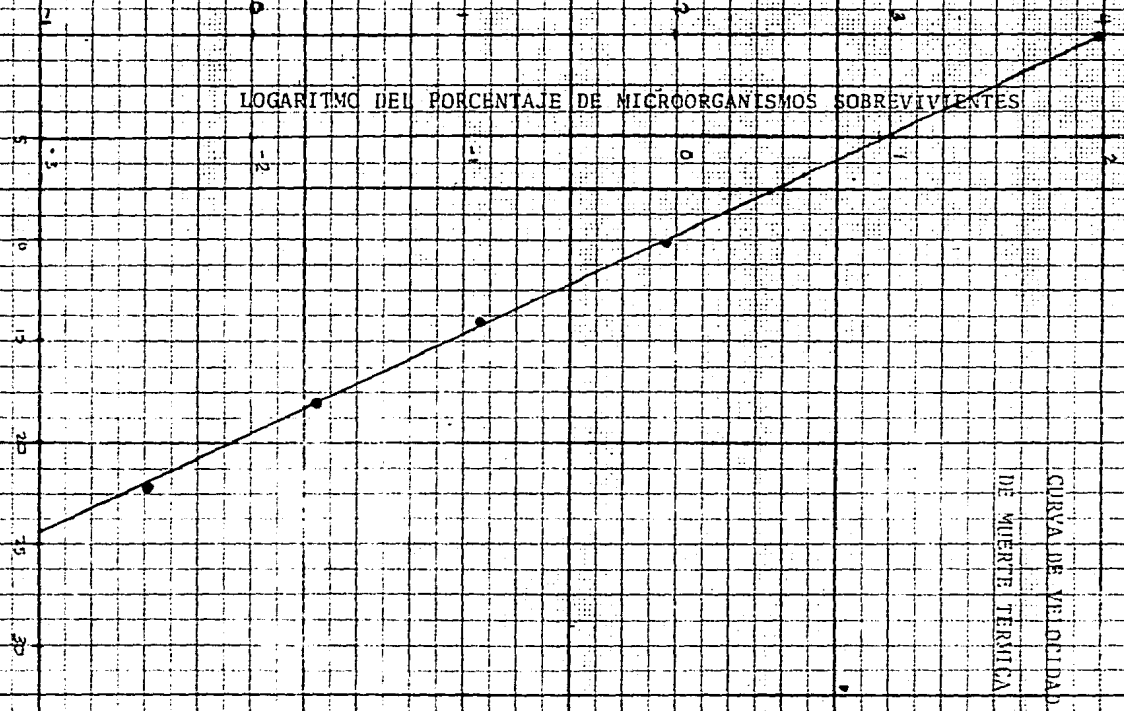
En papel semilogarítmico, se grafican los valores de D en la escala semilogarítmica vs. la temperatura en °F sobre la escala lineal, y se traza la línea que mejor ajuste a estos valores.

LOGARITMO DE MICROORGANISMOS SOBREVIVIENTES

LOGARITMO DEL PORCENTAJE DE MICROORGANISMOS SOBREVIVIENTES

2.1  
1.5  
0  
-0.5  
-1  
-1.5  
-2  
-2.5  
-3

CURVA DE VELOCIDAD  
DE MUERTE TÉRMICA





#### IV METODOS DE ESTERILIZACION

##### i Introducción

Para la correcta evaluación del proceso de esterilización se han desarrollado muchos métodos que se pueden clasificar principalmente en 2 grupos.

##### GRUPO I

Se basa principalmente en la evaluación de la letalidad en el punto de menor calentamiento del alimento.

##### GRUPO II

Se basa en la evaluación de la letalidad de la masa promedio del cuerpo entero del alimento.

Analizaremos cada grupo por separado e iremos desglosando cada método.

##### GRUPO I

A su vez este grupo está dividido en 2 subgrupos que son METODO GENERAL y METODO FORMULA

Ambos métodos los describiremos a continuación:

##### ii GRUPO I a

##### Método General

En el método general la velocidad letal  $L$  es calculada por medio de una curva experimental de temperaturas y el valor del proceso  $F_p$  es obtenido por medio de la integración de  $L$  con respecto al tiempo. Usualmente esta integración se hace aplicando la fórmula de integración de Simpson o por medio de un método gráfico. A continuación se describe el método general con diferentes interpretaciones.

A continuación se enuncian los distintos pasos para evaluar la letalidad de un proceso por medio del Método General.

- 1° Preparar una tabla de letalidades.
- 2° Para preparar la tabla se necesita tener tiempo y temperaturas del proceso y observar el siguiente procedimiento.
- 3° Utilizando papel semilogarítmico marcar el tiempo en minutos en la escala logarítmica.
- 4° Marcar las temperaturas en °F o °C en la escala lineal.
- 5° Determinar el valor de Z de la curva de tiempo de muerte térmica.
- 6° Usando Z dibujar una línea a través del punto 1° minuto a - 250 °F.
- 7° Escribir en una columna las temperaturas en orden descendente de magnitud.
- 8° En la columna opuesta escribir los tiempos correspondientes a cada temperatura.
- 9° Se pueden usar divisiones de 1/2 o 1/4° de grado para tomar los datos, pero 1 grado es suficiente.
- 10° Se calcula la velocidad letal o también se le conoce como relación letal,

$$F/O = \frac{1}{\log^{-1} \left( \frac{250 - T}{Z} \right)}$$

T es la temperatura en el punto frío del alimento y 250 °F es la temperatura de referencia.

- 11° Se toma un papel cuadrículado, se marca en la escala horizontal en minutos por pulgada.
- 12° La vertical en velocidades letales. Estas deben de corresponder a los minutos. Las velocidades se marcan también por pulgada.
- 13° Se debe de empezar a graficar desde el CUT con respecto a los minutos.

- 14° Deben graficarse los valores de calentamiento y enfriamiento.
- 15° Determinar el área bajo la curva que se forma.
- 16° Se multiplica el tiempo/pulgada por la letalidad/pulgada.

$$\frac{\text{min}}{\text{in}} * \frac{\text{letalidad}}{\text{in}} = \frac{\text{min}}{\text{in}^2}$$

- 17° Se multiplica el área por el resultado obtenido en 16 y se obtiene el valor de letalidad del proceso.

$$A (\text{in}^2) * \frac{\text{min}}{\text{in}^2} = Fp (\text{min})$$

De esta manera hemos obtenido el valor del proceo Fp.

Interpretación N° 1 METODO POR INTEGRACION

- 1° Durante la prueba de calor, las temperaturas leídas deberán ser tomadas en intervalos iguales de tiempo.
- 2° Se debe calcular el valor de la proporción letal con la ecuación 5.

$$F/\theta = \frac{1}{\log^{-1} \frac{250 - T}{Z}} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

- 3° Los datos deberán de irse arreglando en columnas de la siguiente manera.

1	2	3	4	5
TIEMPO	TEMPERATURA	RELACION LETAL	$\Sigma(F/\theta)$	VALOR DE PROCESO
(MIN.)	(°F)	(F/t)		°F MIN.

- 4° En la columna N° 4 se realiza la sumatoria de todos los valores de proporción o relación letal.
- 5° 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.

De esta manera tenemos el valor del proceso, ahora el proceso de esterilización consta de 2 partes; la primera que es el calentamiento y la segunda que es enfriamiento.

A continuación se muestra un ejemplo:

Calcular el número de minutos requeridos para reducir el nivel de microorganismos a un nivel seguro en el procesamiento de habas verdes o frascos. Se tienen los datos, de la columna 1 y 2. Completar las columnas 3,4 y 5.

TIEMPO (MIN)	TEMPERATURA (°F)	RELACION LETAL (F/θ)	(F/0)	VALOR DE PROCESO °F MIN
	RT			
- 15	194	0.00077		
- 10	203	0.00245		
- 5	211	0.00681		
0	222	0.02783		
5	234	0.12915		
10	237	0.18957		
15	239	0.24484		
20 *	240	0.27826		
25	237	0.18957		
30	236	0.16681		
35	233	0.11365		
40	228	0.05995		
45	225	0.04084		
50	222	0.02783		
55	220	0.02154		
60	211	0.00684		
65	204	0.00278		
70	194	0.00077		
75	187	0.00032		
80	181	0.00015	1.51 07	7.5535

\* Se corta suministro de vapor

Cálculo de relación letal: Utilizamos T = 250 y Z = 18

$$F/t = \frac{1}{\log^{-1} \left( \frac{T-RT}{Z} \right)}$$
 Por medio del siguiente pequeño programa calculamos los valores de F/θ

El programa es para una calculadora TI-58-59

2nd 1b1 A	2nd 1b1 D	=
STO 00.....T	C C	2nd INV LOG
R/S	RCL 00	1/X
2nd 1b1 B	-	R/S
STO 01 RT	RCL 01	RST F/t
RS/	)	
2nd 1b1 C	.	
STO 01 2	RCL 02	
	)	

Una vez que calculamos la relación letal, realizamos la sumatoria, esta se va a llevar a cabo en dos partes, la primera es donde se corta el vapor y la segunda al finalizar el proceso.

Dádonos un valor de	(F/θ)	Valor del Proceso
	0.87968	4.3984
	1.5107	7.5535

En este ejemplo nos damos cuenta que el proceso de esterilización consta de dos fases, de esta manera se tienen 3 valores del proceso, el valor de calentamiento  $F_n$ , el valor de proceso del enfriamiento que es  $F_c$  y el valor del proceso total que es  $F_p$ .

En el ejemplo  $F_n = 4.3984$  minutos,  $F_p = 7.5535$  minutos y  $F_c = (F_p - F_n)$ , que es igual  $F_c = 3.1551$  minutos.

El usar diferentes tamaños de intervalos no afecta de una forma muy grande el valor del proceso, en la siguiente tabla se muestran distintos valores para diferentes intervalos y se comparan con un intervalo de dos minutos. Primeramente se tiene la tabla de intervalos de dos minutos.

A continuación se presentan los datos de temperatura central y relación letal para el procesamiento de salmón en una lata de - - 301 X 411 durante 90 minutos a 242°F (116.7°C)

1	2	3	4	5
TIEMPO (MIN)	TEMPERATURA (°F)	RELACION LETAL (F/θ)	(F/θ)	VALOR DE PROCESO °F MIN
34	185	0.001		
36	189	0.001		
38	193	0.002		
40	197	0.003		
42	201	0.005		
44	204	0.006		
46	207.5	0.010		
48	210	0.012		
50	213	0.017		
52	215.5	0.022		
54	217.5	0.028		
56	219	0.033		
58	221	0.042		
60	223	0.052		
62	225	0.065		
64	226.5	0.076		
66	228	0.090		
68	229	0.100		
70	230	0.112		
72	231	0.125		
74	232.5	0.147		
76	233.5	0.164		
78	234	0.173		
80	234.5	0.183		
82	235.5	0.204		
84	235.8	0.210		
86	236	0.215		
88	236.5	0.227		
90 *	237	0.240	2.445	4.89 F <sub>H</sub>

\* Se corta vapor

Hasta el momento solo se ha mostrado la parte correspondiente a la fase de calentamiento a continuación se mostrara la fase correspondiente el enfriamiento

1	2	3	4	5
TIEMPO (MIN)	TEMPERATURA (°F)	RELACION LETAL (F/θ)	(F/θ)	VALOR DE PROCESO °F MIN
92	237.5	0.254		
94	237.5	0.254		
96	237.5	0.254		
98	237	0.240		
100	236	0.215		
102	234	0.173		
104	232	0.139		
106	230	0.112		
108	226.5	0.076		
110	224	0.058		
112	220.5	0.039		
114	218	0.030		
116	215	0.021		
118	212	0.015		
120	210	0.012		
122	208	0.010		
124	206	0.008		
126	203.5	0.006		
128	201	0.005		
130	198	0.003		
132	196.5	0.003		
134	194	0.002		
136	192.5	0.002		
138	191.5	0.002		
140	190	0.001		
142	189	0.001		
144	188	0.001		
146	187	0.001		
148	186	0.001		
150	185	0.001	4.504	9.01 F <sup>p</sup>

El C.U.T. usado para este proceso fue de 10 minutos. Ahora el efecto de usar diferentes valores para los intervalos de tiempo se muestran en la siguiente tabla:



INTERVALOS DE TIEMPO	VALOR DEL PROCESO $F_H$	% DE DESVIACION	VALOR DEL PROCESO $F_P$	% DE DESVIACION
2	4.89	0.0	9.01	0.0
4	4.92	+0.6	9.04	+0.3
6	4.90	+0.2	8.96	-0.6
8	5.01	+2.5	9.15	+1.6
10	4.87	-0.4	8.97	-0.4
20	4.98	+1.8	8.62	-4.3

Interpretación N° 2 INTEGRACION GAUSSIANA

Una fórmula de integración gaussiana se puede utilizar en esta parte para calcular el valor de esterilización  $F_p$  de un proceso de la curva de temperaturas de un proceso.

$$F_p = \int_{\theta_0}^{\theta_2} L(\theta) d\theta \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Si se compara la ecuación 2-1 y la ecuación 2-3

$$L(\theta) = 10^{(T - TR) / Z} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Ahora en la mayoría de los casos  $\theta_0 = 0$  y  $\theta_2$  representa el final del proceso de calentamiento.

Para aplicar la integración gaussiana se necesita una integral definida en la que su límite inferior y superior sean 1 y -1 respectivamente como en la ecuación 2-8.

$$f(x) dx \approx \sum_{k=1}^n A_k \cdot f(x_k) \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Donde  $A_k$  son factores de medición y  $x_k$  son valores de  $x$  a los cuales se van a calcular valores numéricos de  $f(x)$ , y  $n$  el número de valores de  $f(x)$  requeridos para calcular la integral. A continuación se presenta una tabla con estos valores.

<u>n</u>	<u>x<sub>k</sub></u>	<u>A<sub>k</sub></u>
2	+ 0.5774	1.0000
3	+ 0.7746	0.5556
	0.0000	0.8889
4	+ 0.8611	0.3479
	+ 0.3400	0.6521

A la ecuación 2-6, le realizamos un pequeño arreglo cambiando sus límites de integración de  $t_a$  y  $t_o$  a  $+1$  y  $-1$ .

Resolviendo las ecuaciones 2-8 y 2-6 nos quedan de la siguiente manera:

$$F_p = \frac{\theta_b - \theta_o}{2} Ak_1 \cdot 10 \frac{L - 250}{Z} + Ak_2 \cdot 10 \frac{T_2 - 250}{Z} + Ak_1 \cdot 10 \frac{T_3 - 250}{Z} \\ + \frac{\theta_a - \theta_b}{2} Ak_1 \cdot 10 \frac{T_4 - 250}{Z} + Ak_2 \cdot 10 \frac{T_5 - 250}{Z} + Ak_1 \cdot 10 \frac{T_6 - 250}{Z}$$

Ecuación 2-9

La primera parte de la ecuación 2-9, representa la fase de calentamiento del proceso y la segunda parte representa la fase de enfriamiento. Para lograr una correcta estimación con la integración gaussiana se deben de utilizar  $n = 3$  o  $n = 4$  y dentro de la fórmula anterior los valores de  $Ak$  quedarían de la siguiente manera:  $Ak_1 Ak_2 Ak_1$  para  $n = 3$ , para  $n = 4$   $Ak_1 Ak_2 Ak_1 Ak_2$ , dependiendo de lo anterior si se tiene una historia de una curva de temperaturas se podrán utilizar seis u ocho valores de  $L$ .

La ecuación 2-9 nos queda de la siguiente manera para  $n = 3$ .

$$F_p = \frac{\theta_b - \theta_o}{2} 0.5356 \cdot 10 \frac{(T_1 - 250)}{Z} + 0.8889 \cdot 10 \frac{(T_2 - 250)}{Z} + 0.5556 \cdot 10 \frac{(T_3 - 250)}{Z} \\ + \frac{\theta_a - \theta_b}{2} 0.5556 \cdot 10 \frac{(T_4 - 250)}{Z} + 0.8889 \cdot 10 \frac{(T_5 - 250)}{Z} + 0.5556 \cdot 10 \frac{(T_6 - 250)}{Z}$$

Ecuación 2-10

Para n = 4

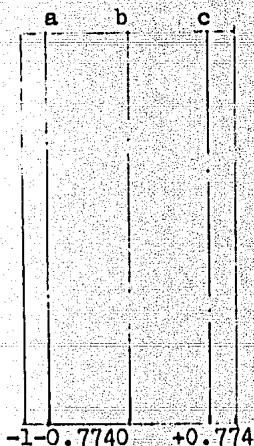
$$F_p = \frac{\theta_b - \theta_o}{2} + 0.3479 \frac{(T_1 - 250)}{Z} + 0.6521 \frac{(T_2 - 250)}{Z} + 0.3479 \frac{(T_3 - 250)}{Z} + 0.6521 \frac{(T_4 - 250)}{Z}$$

$$\frac{\theta_a - \theta_b}{2} + 0.3479 \frac{(T_5 - 250)}{Z} + 0.6521 \frac{(T_6 - 250)}{Z} + 0.3479 \frac{(T_7 - 250)}{Z} + 0.6521 \frac{(T_8 - 250)}{Z}$$

Ecuación 2-11

Este método de evaluar  $F_p$  se puede utilizar para el proceso tradicional o para el proceso de temperaturas altas, tiempos cortos. Es un poco difícil evaluar los tiempos correctos de la historia de la curva de temperaturas, por lo que se puede utilizar una regleta construida especialmente para esto y en especial para cada curva.

A Continuación se representan estas regletas que se deben construir en papel o plástico transparente para que se puedan utilizar sobre la gráfica de la historia de la curva de temperaturas.



Regleta para n= 3

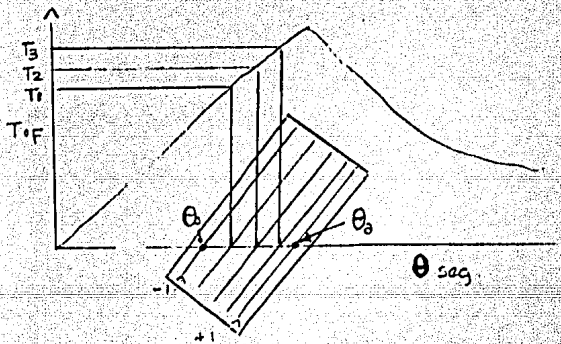


regleta para n= 4

El ancho de la regleta es arbitrario, pero debe de ser más corto que la curva de temperaturas. Cada regleta tiene 2 límites de  $-1$  a  $+1$  y dentro de estos límites se tienen los distintos valores de  $X_k$  representados por unas líneas rectas que son a, b, c, d.

Para usar la regleta, ésta se coloca el límite inferior sobre el tiempo  $t_0$  y el límite superior sobre  $t_a$ , los tiempos que buscamos los encontramos en la intersección de las líneas a, b, c, d, con el eje de las x en la gráfica de temperatura vs. tiempo.

En la figura se puede ver este ejemplo, para  $n = 3$

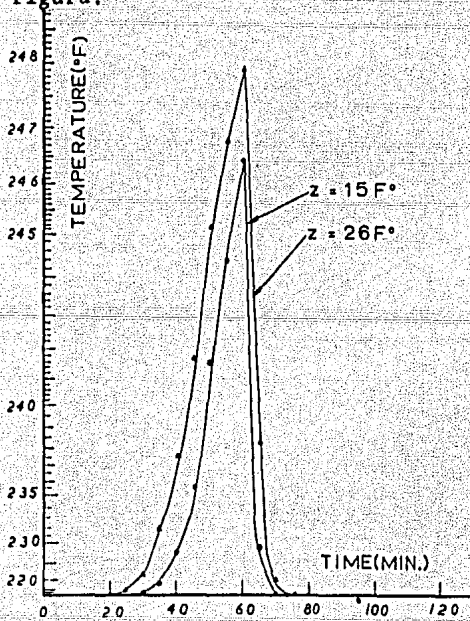


Las temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  se pueden sustituir en las ecuaciones 2-10 y 2-11 de esta manera obtener el valor de esterilización del proceso  $F_p$ . En las fórmulas 2-10 y 2-11 " $\theta_a$ " significa el tiempo cuando se acaba la fase de enfriamiento " $\theta_b$ " es el tiempo cuando termina la fase de calentamiento y " $\theta_c$ " es cuando comienza el tiempo de calentamiento efectivo en esta fase.

Interpretación N° 3

Para evaluar el valor de la esterilización, se puede usar también el método del papel de velocidad letal. Se prepara primeramente escalando la abscisa y ordenada respectivamente con el tiempo del proceso y los valores de la velocidad letal.

Sin embargo, las temperaturas correspondientes a los valores de la velocidad letal de una Z especificada se marcan en la ordenada en lugar de los valores de las velocidades letales quedando como la siguiente figura.



Curvas de velocidad letal para los datos de temperatura tiempo mostrados en la tabla interior.

Time	Temperature	Time	Temperature
0 (Min.)	88.0 (°F)	50 (Min.)	243.0 (°F)
5	95.0	55	245.3
10	100.0	60	247.0
15	128.0	65	233.0
20	167.0	70	207.0
25	193.0	75	174.0
30	211.0	80	147.0
35	223.5	85	124.0
40	232.0	90	108.0
45	239.0	95	95.0

Temperaturas al centro de una lata de 211 x 300 de puré de espinacas procesado a una temperatura de autoclave de 250°F y agua de enfriamiento de 55°F.

La velocidad letal fue definida por la ecuación,

$$L = 10 \frac{(T - 250)}{Z} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Ahora asumamos que  $Z_b$  representa un valor fijo de  $Z$  para el cual el papel es preparado y  $Z_a$  representa otro valor de esterilización.

De la ecuación 2-7 tenemos la ecuación 2-13 para calcular las velocidades letales cuando  $Z = Z_a$

$$\begin{aligned} L &= 10 \frac{(T - 250)/Z_a}{Z_b} \\ &= 10 \frac{(T - 250)/K_s}{Z_b} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

donde  $K_s = Z_a/Z_b$

Un valor de una velocidad letal estimada por la ecuación 2-13 debe de ser idéntico a otra velocidad letal de una temperatura modificada  $T_m$ , el cual es aplicable usando  $Z = Z_b$ , por lo tanto tenemos:

$$10 \frac{(T-250)/K_s}{Z_b} = 10 \frac{(T_m-250)/Z_b}{Z_b} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

$$T_m = (1/K_s) (T+250 (K_s-1)) \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Cuando se desea calcular el valor de esterilización para cualquier valor de  $Z$  para una  $Z$  fija igual a  $Z_a$  se utiliza la ecuación 2-15. Esta técnica es muy eficaz cuando se necesitan calcular 5 o menos valores de esterilización para cada valor de  $Z$  diferente.

El valor que normalmente se toma para  $Z_b$  es 18. A continuación se presenta un programa para la calculadora TI-59 para los valores de  $T_m$  para diferentes valores de  $Z_a$  y  $Z_b$ .

```
2nd 1b1 A
STO 00 ..... T
R/S
2nd 1b1 B
STO 01 ..... za
R/S
2nd 1b1 C
STO 02 ..... zb
R/S
2nd 1b1 D
RCL 01
+
RCL 02
=
STO 04 ..... Ks
((
RCL 04
1/x
) *(
RCL 00
+
( 250 * (
RCL 04
-
1
))))
=
R/S
RST.
```



A continuación se presenta una tabla con diferentes valores de  $Z_b$  y diferentes temperaturas de  $Z_a$  para encontrar  $T_m$ .

TEMPERATURA F / Z	TEMPERATURAS MODIFICADAS PARA LOS SI- GUIENTES VALORES DE " Z "			
	10	15	18	20
160	88	142	160	169
161	89.8	143.20	161	169.90
162	91.6	144.40	162	170.80
163	93.4	145.60	163	171.70
164	95.2	146.80	164	172.60
165	97	165	165	173.50
170	106	154	170	178
175	115	160	175	182.50
180	124	166	180	187.00
185	133	172	185	191.50
190	142	178	190	196.00
195	151	184	195	200.50
200	160	190	200	205.00
205	169	196	205	209.50
210	178	202	210	214.00
215	187	208	215	218.50
220	196	214	220	223.00
225	205	220	225	227.50
230	214	226	230	232.00
235	223	232	235	236.50
240	232	238	240	241.00
245	241	244	245	245.50
250	250	250	250	250.00

## GRUPO I B

### METODO FORMULA

El método fórmula se encuentra también dentro del grupo I, y tiene dos subdivisiones que dependen en la naturaleza de la fórmula usada para predecir la curva de temperaturas del alimento que es procesado y son las siguientes:

- 1) Basadas en fórmulas empíricas
- 2) Basadas en fórmulas teóricas

### FORMULAS EMPIRICAS

Estas fórmulas son obtenidas sin ninguna suposición restrictiva - del tipo de alimento, de la forma y tamaño del contenedor o del método de calentamiento. Por lo tanto estas fórmulas son aplicables a la mayoría de los procesos de calentamiento. Las temperaturas de los alimentos que han sido colectadas durante el proceso de calentamiento se grafican en papel semilogarítmico, en el cual en la escala logarítmica se representa la diferencia de temperaturas entre el alimento y el medio de calentamiento o enfriamiento, y en la escala lineal se representan los tiempos de calentamiento o enfriamiento.

Presentaremos varias interpretaciones o fórmulas empíricas usadas con base en la ecuación 2-2:

$$D_r/D = 10^{(T - T_r)/z}$$

La arreglaremos de la siguiente manera:

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/z}$$

Ecuación 2-16

Se ha encontrado experimentalmente que la velocidad de muerte de un factor vulnerable está dado por (Merson Etal Food Tech. Marzo 1978):

$$-\frac{dn}{dt} = K_T n \quad \text{Ecuación 2-17}$$

Que es equivalente en logaritmos comunes a

$$-\frac{d(\log_{10} n)}{dt} = \frac{1}{D_T} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

En donde  $D_T = \frac{2.303}{K_T}$  donde  $K_T$  es la constante de velocidad de

primer orden y  $D_T = D$

Combinando las ecuaciones 2-16 y 2-18

$$-\int_{n_a}^{n_b} d(\log_{10} n) = \frac{1}{D T_{ref}} \int_{t_a}^{t_b} \frac{dt}{10^{(T_{ref} - T)/z}} \quad \text{Ecuación 2-19}$$

Si evaluamos el lado izquierdo de la integral encontramos el valor de  $F_p$ .

$$F_p = D_R (\log n_a - \log n_b) = \int_{t_a}^{t_b} \frac{dt}{10^{(T_{ref} - T)/z}} \quad \text{Ecuación 2-20}$$

El lado izquierdo de la ecuación 2-20 nos da la relación entre  $F_p$  y el cambio en la concentración de factores vulnerables. El término "a" significa la concentración inicial de factores vulnerables, "b" es la concentración final segura, entonces podemos hablar de un valor de "F requerido".

$$(F^z T_{ref}) \text{ requerido} = T_{ref} (\log n_a - \log n_b)$$

El lado derecho de la ecuación 2-20 relaciona F con el tiempo y con la temperatura del proceso, como se tiene un F requerido, en este caso tenemos el F del proceso representado por la siguiente ecuación.

$$(F^2 \text{ Tref}) \text{ proceso} = \int_{t_a}^{t_b} \frac{1}{10^{(T_{\text{ref}} - T)/z}}$$

Ecuación 2-21

La ecuación 2-21 es igual que la ecuación 2-3, solo que se ha llegado a ella en forma diferente.

La letalidad de un proceso es la relación del valor de F proceso con el valor de F requerido para una esterilidad comercial.

$$\text{Letalidad} = \frac{(F^2 \text{ Tref}) \text{ proceso}}{(F^2 \text{ Tref}) \text{ requerido}}$$

$$\text{Letalidad} = \frac{1}{(F^2 \text{ Tref}) \text{ requerido}} \int_{t_a}^{t_b} \frac{1}{10^{(T_{\text{ref}} - T)/z}}$$

Ecuación 2-22

Como ya se mencionó en la parte de penetración de calor es importante conocer la relación, tiempo temperatura la cual será dada por un perfil de temperatura con relación al tiempo y es el siguiente:

$$Y = \frac{T_R - T}{T_R - T_i}$$

Ecuación 2-23

Donde T es temperatura del alimento, conforme va pasando el tiempo.  $T_R$ , temperatura de la autoclave  $T_i$  es la temperatura inicial. La forma de calcular este perfil se encuentra en el Capítulo 3.

El tiempo del proceso es calculado por la siguiente ecuación

$$\theta = f \log \left( j \frac{T_R - T_i}{T_R - T} \right) \quad \text{Ecuación 2-24}$$

El coeficiente  $j$  se definió anteriormente, y se puede interpretar también como un factor de transformación de coordenadas, debido a que la curva de calentamiento tiene una forma recta en la parte inicial. También se define por la siguiente ecuación.

$$j = \frac{T_R - T_A}{T_R - T_i}$$

Para una lata en la que solo se tiene conducción se tienen las siguientes ecuaciones.

$$\theta = \frac{2.303}{\left[ \frac{(2.405)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{l^2} \right] \frac{K}{\rho C}} \log \left( 2.04 \frac{T_R - T_i}{T_R - \text{centro}} \right) \quad \text{Ecuación 2-25}$$

$j_{\text{centro}} \approx 2.04$

$$f_h = \frac{2.303}{\left[ \frac{(2.405)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{l^2} \right] \frac{K}{\rho C}} \quad \text{Ecuación 2-26}$$

METODO DE BALL

El proceso de esterilización se considera en dos partes: calentamiento y enfriamiento y la letalidad del proceso se calcularía como sigue:

$$L = \frac{1}{(F^z T_{ref}) \text{ requerido}} \left[ \int_{\theta_g}^{\theta_b} \frac{d\theta}{10^{(T_{ref}-T(\theta))/Z}} + \int_{\theta_b}^{\theta_g} \frac{d\theta}{10^{(T_{ref}-T(\theta))/Z}} \right]$$

CALENTAMIENTO                      ENFRIAMIENTO

Ecuación 2-27

Ball transformó estas integrales en integrales de temperatura. Para el calentamiento de la Ecuación 2-24 (usando  $T_R - T$  como una variable de temperatura) tenemos:

$$d\theta = \frac{-f}{2.303} \cdot \frac{d(T_R - T)}{T_R - T}$$

Ecuación 2-28

con las siguientes condiciones

$$T = 0 \qquad T_R - T = T_R - T_i$$

$$\theta = \theta_g \qquad T_R - T = T_R - T_g$$

Ahora para usar  $(T_R - T)$  como variable es conveniente modificar la función exponencial como:

$$\frac{(T_{ref} - T)}{Z} = \frac{(T_{ref} - T_R + T_R - T)}{Z}$$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \frac{(T_{ref} - T_R)}{Z} \cdot 10 \frac{(T_R - T)}{Z} \\
 &= 10 \frac{(T_{ref} - T_R)}{Z} \cdot 2.303 \frac{(T_R - T)}{Z}
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-29

Ahora definiremos dos nuevas cantidades

$$U = (F^2 T_{ref}) \text{ requerido} \cdot 10 \frac{(T_{ref} - T_R)}{Z}$$

Ecuación 2-30

$$y \quad X = 2.303 \frac{(T_R - T)}{Z}$$

Ecuación 2-31

La parte de calentamiento de la ecuación 2-27 nos queda de la siguiente manera, sustituyendo en ella las ecs. 2-28 a 2-31.

$$\begin{aligned}
 (\text{Letalidad})_{\text{calent.}} &= \frac{1}{(F^2 T_{ref}) \text{ req.}} \int_0^{\theta_g} \frac{d\theta}{10 \frac{(T_{ref} - T)}{Z}} \\
 &= \frac{1}{2.303} \cdot \frac{f}{U} \int_{X_i}^{X_g} \frac{e^{-x} dx}{x}
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-32

La integral del lado derecho se puede comparar con la fórmula de integral exponencial de la siguiente manera.

$$E_1(X) = \int_X^{\infty} \frac{e^{-\mu} d\mu}{\mu}$$

Ecuación 2-33

Resolviendo esta ecuación nos queda:

$$E_1(X) = E_1(X_g) - E_1(X_i)$$

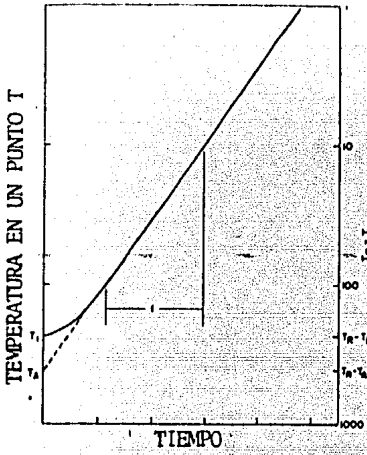


Fig 1 - Curva de calentamiento grafica-  
da en escala logarítmica inver-  
tida.

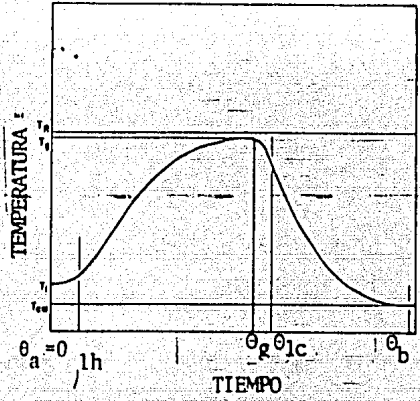


Fig 2 - Gráfica de tiempo temperatura.

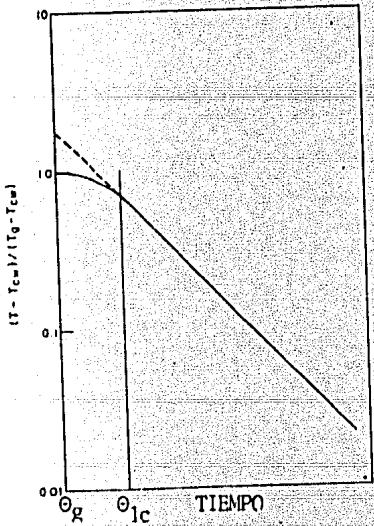


Fig 4 - Gráfica logarítmica de en-  
friamiento.

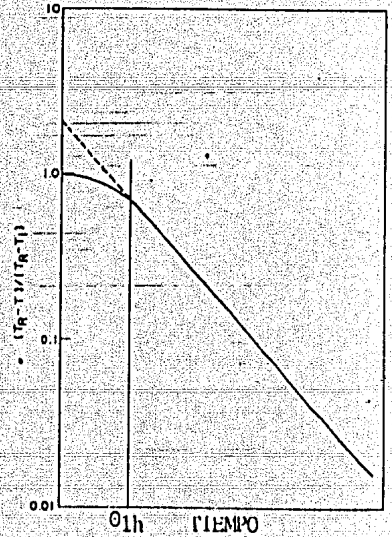


Fig 3 - Curva logarítmica de calenta-  
miento.



Y que corresponde a una curva que empieza en  $T_g$ , y tiene una  $j$  de 1.41 e interseca la curva logarítmica de enfriamiento en  $T_{ic} = T_g - 0.343 (T_g - T_{cw})$ . Sin embargo con estas simplificaciones empíricas, la evaluación de la letalidad integral para esta porción de la curva se vuelve difícil.

Para  $\theta_g < \theta < \theta_k$ .

$$\begin{aligned} \text{(letalidad)} &= \frac{f/U}{2.303} \exp \left[ \frac{-2.303 (T_R - T_g)}{Z} \right] \cdot \left\{ 0.332 \exp \left[ \frac{-0.789 (T_y T_{cm})}{Z} \right] \right. \\ \text{retardamiento de} & \\ \text{enfriamiento} & \left. + 0.253 \frac{Z E}{T_g - T_{cw}} \exp \left[ \frac{0.69Z (T_g - T_{cw})}{Z} \right] \right\} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2-38}$$

Donde  $E$  es evaluada numéricamente con la siguiente integral.

$$E = p^2 \int_1^{2.14} e^{-p x} (x^2 - 1)^{1/2} dx \quad \text{Ecuación 2-39}$$

$$\text{con } p = (2.303)(0.3) (T_g - T_{cw})/z \quad \text{Ecuación 2-40}$$

Para la porción logarítmica de la curva de enfriamiento, desde  $T_{c1} = T_g - 0.343 (T_g - T_{cw})$  a  $T_b$ , se asume que  $f$  de la curva de enfriamiento es igual a la curva del calentamiento.

Se tiene para la parte logarítmica lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{(letalidad)} &= \frac{f/U}{2.303} \exp \left[ \frac{-2.303 (T_R - T_{cw})}{Z} \right] \\ \text{parte logarítmica} & \\ \text{enfriamiento} & \left\{ Ei \left[ \frac{2.303 (T_{ic} - T_{cw})}{Z} \right] - Ei \left[ \frac{2.303 (T_b - T_{cw})}{Z} \right] \right\} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2-41}$$

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

$$Ei (X) = \int_{-\infty}^x \frac{e^{\mu}}{\mu} d\mu \quad \text{con } x > 0$$

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

$$Ei (x) = \gamma + \ln x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n \cdot n!} \quad x > 0$$

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

LETALIDAD DEL PROCESO COMPLETO:

$$\begin{aligned} & \frac{f/U}{2.303} \left\{ Ei \left[ \frac{2.303}{Z} (T_R - T_g) \right] - Ei \left[ \frac{2.303}{Z} (T_R - T_i) \right] \right\} + \\ & \frac{f/U}{2.303} \exp \left[ -\frac{2.303}{Z} (T_R - T_g) \right] \cdot \left\{ 0.332 \exp \left[ \frac{-0.789}{Z} (T_g - T_{cw}) \right] + \right. \\ & \left. 0.253 \frac{E}{T_g - T_{cw}} \exp \left[ \frac{0.692}{Z} (T_g - T_{cw}) \right] \right\} + \\ & \frac{f/U}{2.303} \cdot \exp \left[ -\frac{2.303}{Z} (T_R - T_{cw}) \right] \cdot \left\{ Ei \left[ \frac{2.303}{Z} (T_{c1} - T_{cw}) \right] - Ei \left[ \frac{2.303}{Z} (T_b - T_{cw}) \right] \right\} \end{aligned}$$

Ecuación 2-42

Debido a las suposiciones que se tienen en la curva de enfriamiento varias partes de la Ecuación 2-42 tienen una relación directa una con otra.

Esto es si la curva de enfriamiento empieza en  $T_g$  con una forma - definida  $j = 1.41$  y la pendiente de la fase logarítmica  $f$  calent = enfriamiento.

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 2-42 es determinado fácilmente.

Para un valor dado de  $f/U$ ,  $Z$ ,  $T_R$ , y  $T_{cw}$  sólo con un valor de  $T_g$  la suma de las letalidades de la ecuación 2-42 es igual a la unidad. Para estos valores de  $T_g$  se presentan tablas de  $f/U$  como función de  $g = T_R - T_g$  con parámetros  $m + g = t_e - T_{cw}$  y  $Z$ .

Puesto que  $T_g$  o  $g$  es la variable principal usada en las tablas, correspondientes a  $t$  al final de la porción de calentamiento en el ciclo de enlatado, la "FORMULA" en el método de Ball es justo la ecuación de la curva de calentamiento.

$$\theta g = f \log \left[ j (T_e - T_i) \right] - f \log g \quad \text{Ecuación 2-43}$$

Para encontrar el tiempo de calentamiento para un  $F$  requerido se calculan  $U$  y  $f/U$ , se encuentra  $g$  de tablas y se calcula  $\theta g$  de la ecuación 2-43.

Es importante enfatizar que las letalidades relacionadas en las tablas de  $f/U$  Vs.  $g$ , son las letalidades del ciclo completo de calentamiento y enfriamiento.

El método de fórmula presentado por Ball tiene aproximadamente 60 años de usarse desde 1923, y durante este tiempo se ha puesto en tela de juicio y se han encontrado ciertas inexactitudes de las que se discutirán a continuación, Son tres tipos de inexactitudes por aclarar.

El primer punto a aclarar sería Errores de Cálculo. De acuerdo con Flambert et al (1977) Ball y Olson (1957) usaron una forma errónea de la función exponencial usando  $-E_1(X)$  en lugar de  $-E_i(X)$  en la ecuación 2-41 para el cálculo de la parte logarítmica de enfriamiento del proceso, ésta fue la primera tentativa de corregir este error, posteriormente Steele y Board (1979) han vuelto a introducir correcciones a esta parte.

Parte de la confusión comienza con la notación usada para integrales exponenciales. Los textos modernos definen las integrales exponenciales en la siguiente forma:

$$E_1(X) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-Y)}{Y} dY \quad \text{Ecuación 2-44}$$

$$E_i(X) = \int_{-\infty}^X \frac{\exp(-Y)}{Y} dY \quad \text{Ecuación 2-45}$$

donde  $x > 0$ . En los textos más antiguos (Jahnke y Emde 1938) se tenía la siguiente definición:

$$-E_i(-X) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-Y)}{Y} dY \quad \text{Ecuación 2-46}$$

y Ball y Olson (1957) usaron esta notación en su derivación. Presentando un error cuando establecen que:

$$-E_i(-X) = \int_{-\infty}^{-X} \frac{\exp(-Y)}{Y} dY \quad \text{Ecuación 2-47}$$

y esto nos conduce a un error en el cálculo de la letalidad de la fase de calentamiento. A continuación se presenta la derivación que se tiene hasta el momento como correcta.

$$\theta_h = f_h \cdot \log_{10} \left( j_h \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T_0} \right) \quad \text{Ecuación 2-48}$$

que es la misma que ecuación 2-24, sólo que con diferentes subíndices porque es para la curva de calentamiento, derivando la ecuación 2-44 tenemos lo siguiente:

$$dt_h = f_h' \cdot \frac{dT}{T_1 - T} \quad \text{donde } f_h' = \frac{f_h}{2.303} \quad \text{de aquí}$$

$$F_h = -f_h' \cdot \frac{\exp(T_1 - T_R)}{z} \cdot \int_{X_0}^{X_g} \frac{\exp(-X)}{X} dX \quad \text{Ecuación 2-49}$$

donde  $X = \frac{(T_1 - T)}{z}$  y  $T_0$  y  $T_g$  son la temperatura inicial y final respectivamente en la sección recta de la curva de calentamiento. Hay que hacer notar que la expresión derivada por Flambert et al (1977) tiene el signo equivocado.

La integración de la ecuación 2-49 puede ser expresada en términos de la ecuación 2-44. El valor letal de la curva es:

$$F_h = f_h' \cdot \frac{\exp(T_1 - T_R)}{(z)} \cdot E_1 \left( \frac{T_1 - T_g}{(z)} \right) - E_1 \left( \frac{T_1 - T_0}{(z)} \right) \quad \text{Ecuación 2-50}$$

Donde  $T_1$  es la temperatura del medio de calentamiento o de la autoclave. La ecuación 2-46 difiere de las ecuaciones usadas por Ball y Olson nos da un valor negativo en la fase de calentamiento que no tiene significado físico.

La ecuación para calcular el valor letal en la fase de enfriamiento es la siguiente:

$$F_c = f_c' \cdot \exp \frac{(T_c - T_b)}{z} \cdot \left[ E_i \frac{(T_a - T_c)}{z} - E_i \frac{(T_v - T_c)}{z} \right]$$

Ecuación 2-52

Esta expresión es equivalente a la obtenida por Ball y Olson donde  $T_a = T_g - 0.343m$  y  $T_v = T_1 - 80$ , que son relaciones supuestas por estos autores en la fase de enfriamiento,  $T_g$  es la máxima temperatura alcanzada en el punto de medición en la lata y  $m = T_g - T_c$ .

El error al utilizar una integral en lugar de otra ha dado una ventaja al método de fórmula de Ball, debido a que sobrestima el proceso, incrementando con esto la seguridad de éste, y por supuesto la producción de un producto seguro es uno de los primeros criterios en un proceso térmico.

El segundo punto a aclarar sería las suposiciones hechas por Ball. Las restricciones originales son las siguientes:

- (a)  $j_c = 1.41$
- (b)  $f_c = f_h$  (la pendiente de la curva de calentamiento y de la curva de enfriamiento son iguales)
- (c)  $f_h = \text{constante}$  y  $f_c = \text{constante}$ , no hay ruptura en las curvas de calentamiento o enfriamiento
- (d) La desviación de la línea recta en la curva de calentamiento a bajas temperaturas no afecta grandemente el valor de esterilización del proceso completo.
- (e) No existe el C.U.T.

La suposición de  $j_c = 1.41$  es una conveniencia matemática, basada en curvas experimentales, y esto más que nada reduce el

trabajo de preparar tablas para diferentes valores.  
El efecto de no incluir el C.U.T., en el método de Ball se debe a que éste consideró un 42% del C.U.T. para ser letal, y el 58% restante no es letal.

\*\*\* METODO DE HAYAKAWA

Hayakawa desarrolló una serie de fórmulas experimentales para describir la porción completa de la historia de la curva de temperaturas transientes para un producto alimenticio durante el proceso de calentamiento o durante el paso inicial de refrigeración.

Para empezar las curvas de calentamiento y enfriamiento se obtienen respectivamente graficando  $\log_{10} (T_1 - T)$  contra  $\theta$  y graficando  $\log_{10} (T - T_w)$  contra  $\theta_c$ .

Como ya hemos visto anteriormente en la parte inicial de la gráfica de calentamiento muestra una forma curvilínea en la mayoría de los casos, a continuación se presentan las fórmulas para esta sección.

I.- PORCION CURVILINEA PARA LA GRAFICA DE CALENTAMIENTO

i.-  $0.4 \leq j < 1$  para;

$$T_1 - T = (T_1 - T_0)^{\cot(B\theta + \pi/4)} \quad \text{para } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{Ec. 2-53a}$$

donde  $B = \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[ \arctan \left[ \frac{\log_{10}(T_1 - T_0)}{\log_{10} \{j(T_1 - T_c)\} - \theta_1/f} \right] - \frac{\pi}{4} \right]$  Ec. 2-53b

y  $\theta_1 = 0.9 f (1 - j)$  Ec. 2-53c

ii.-  $1 < j \leq 3.0$  para:

$$T_1 - T = (T_1 - T_0)^{\cos Bt} \quad \text{para } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{Ec. 2-54a}$$

donde  $B = \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[ \arccos \left[ \frac{\log_{10} \{j(T_1 - T_0)\} - \theta_1/f}{\log_{10}(T_1 - T_0)} \right] \right]$  Ec. 2-54b

y  $\theta_1 = 0.7 f (j - 1)$  Ec. 2-54c



II.- PORCION CURVILINEA DE LA GRAFICA DE ENFRIAMIENTO

i.-  $0.4 \leq j_c < 1$  para:

$$T - T_w = (T_g - T_w) \cot(Bt_c + \pi/4) \text{ para } 0 \leq \theta_c \leq \theta_1 \text{ Ec. 2-55a}$$

donde  $B = \frac{1}{\theta_1} \arctan \left[ \frac{\log_{10}}{\log_{10}(j_c(T_g - T_w)) - \theta_1/f_c} \right] - \frac{\pi}{4}$  Ec. 2-55b

y  $\theta_1 = 0.9 f_c (1 - j_c)$  Ec. 2-55c

ii.-  $1 \leq j_c \leq 3.0$  para:

$$T - T_w = (T_g - T_w)^{\cos B} \theta_c \text{ para } 0 \leq \theta_c \leq \theta_1 \text{ Ec. 2-56a}$$

donde  $B = \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[ \arccos \left( \frac{\log_{10}(j(T_g - T_w)) - \theta_1/f_c}{\log_{10}(T_g - T_w)} \right) \right]$  Ec. 2-56b

y  $\theta_1 = 0.7 f_c (j_c - 1)$

Las fórmulas para la porción lineal de la curva de calentamiento o enfriamiento son las siguientes:

PORCION LINEAL DE LA CURVA DE CALENTAMIENTO

$$T_1 - T = j(T_1 - T_0) \cdot 10^{\theta/f} \text{ para } \theta_1 \leq \theta$$

PORCION LINEAL DE LA CURVA DE ENFRIAMIENTO

$$T - T_w = j_c (T_g - T_w) \cdot 10^{-\theta_c/f_c}$$

Con el desarrollo de las curvas anteriores Hayakawa propone dos teoremas para evaluar el proceso de esterilización.

TEOREMA \*A\*

Este teorema nos muestra que se puede evaluar el valor del proceso U, con cualquier valor de z que en este caso es  $z_b$ ; de un valor de U de una z de referencia que es  $z_a$ , aplicando las siguientes ecuaciones:

$$z_b/z_a = K_s$$
$$U = \int_0^{\theta} \frac{T - T_1}{z_b} d\theta \quad \text{Ec. 2-57a}$$

$$U = \int_0^{\theta} \frac{(T - T_1)/K_s}{z_a} d\theta \quad \text{Ec. 2-57b}$$

La ecuación 2-57b nos indica claramente que el valor de U para cualquier valor de z,  $z_b$ , puede ser obtenido de tablas o gráficas para un valor de U para una z especificada que es  $z_a$  por medio de modificar la siguiente diferencia de temperaturas,  $T - T_1$ , como  $(T - T_1)/K$ .

TEOREMA \*B\*

Este teorema es para la fase de enfriamiento y un valor de  $U_c$  se puede obtener por medio de la ecuación siguiente:

$$U = \int_0^{\theta_c} \frac{T - T_1}{z_b} dt_c$$

$$U_c = 10^{-8} g K_s / z_a \cdot \int_0^{\theta_c} \frac{(T - T_g) / K_s}{z_a} dt_c$$

$$U_c 10^{-8} g K_s / z_a = U_{gc} = \int_0^{\theta_c} \frac{(T - T_g) / K_s}{z_a} dt_c$$

Ec. 2-58

Para estimar el valor de  $U_c$  es suficiente considerar la variación de los valores para  $T_g - T_w$  y  $j_c$ .

Utilizando las fórmulas que anteriormente se presentaron se puede realizar de una forma más precisa la evaluación del proceso de transferencia de energía.

Analizando las ecuaciones 2-57a, 2-57b y 2-58 observamos lo siguiente:

- 1.- Los valores para el siguiente parámetro adimensional  $U_h/f$ , es independiente de los valores de  $f$  cuando  $j$  y  $g$  son fijados.
- 2.- Los valores para el parámetro adimensional  $U_{gc}/f_c$ , es independiente del valor de  $f_c$  cuando los valores para  $j_c$  y  $T_g - T_w$  son fijos.

Los valores dimensionales  $U_h/f$  y  $U_{gc}/f_c$  son calculados y tabulados.

Valores de  $Un/f$  cuando  $z = 20^\circ F$  y  $(T_1 - T_0)/Ks = 150^\circ F$  y  $J = 1$

$\frac{g}{K_s}$ ( $^\circ F$ )	$U_N/f$	$\frac{g}{K_s}$ ( $^\circ F$ )	$U_N/f$	$\frac{g}{K_s}$ ( $^\circ F$ )	$U_N/f$
100.0000	0.4165(-25)	33.0000	0.3095(-02)	0.35000	0.1161( 01)
98.0000	0.5152(-24)	32.0000	0.2413(-02)	0.30000	0.1226( 01)
96.0000	0.6420(-24)	31.0000	0.2780(-02)	0.25000	0.1303( 01)
94.0000	0.8051(-24)	30.0000	0.3295(-02)	0.20000	0.1397( 01)
92.0000	0.1015(-25)	29.0000	0.3639(-02)	0.15000	0.1517( 01)
90.0000	0.1284(-25)	28.0000	0.4272(-02)	0.10000	0.1693( 01)
88.0000	0.1632(-25)	27.0000	0.4937(-02)	0.09000	0.1730( 01)
86.0000	0.2079(-25)	26.0000	0.5715(-02)	0.08200	0.1789( 01)
84.0000	0.2655(-25)	25.0000	0.6620(-02)	0.07600	0.1846( 01)
82.0000	0.3398(-25)	24.0000	0.7677(-02)	0.05000	0.1933( 01)
80.0000	0.4356(-25)	23.0000	0.8914(-02)	0.35000	0.1992( 01)
78.0000	0.5573(-25)	22.0000	0.1036(-01)	0.24000	0.2098( 01)
76.0000	0.7191(-25)	21.0000	0.1154(-01)	0.01500	0.2146( 01)
74.0000	0.9256(-25)	20.0000	0.1471(-01)	0.03000	0.2212( 01)
72.0000	0.1193(-24)	19.0000	0.1643(-01)	0.02500	0.2291( 01)
70.0000	0.1530(-24)	18.0000	0.1922(-01)	0.02000	0.2380( 01)
68.0000	0.1986(-24)	17.0000	0.2254(-01)	0.01500	0.2511( 01)
66.0000	0.2567(-24)	16.0000	0.2643(-01)	0.01000	0.2688( 01)
64.0000	0.3321(-24)	15.0000	0.3119(-01)	0.00500	0.2774( 01)
62.0000	0.4300(-24)	14.0000	0.3684(-01)	0.00000	0.2865( 01)
60.0000	0.5573(-24)	13.0000	0.4365(-01)	0.00000	0.2843( 01)
58.0000	0.7229(-24)	12.0000	0.5191(-01)	0.00000	0.2909( 01)
56.0000	0.9385(-24)	11.0000	0.6198(-01)	0.00000	0.2989( 01)
54.0000	0.1220(-23)	10.0000	0.7435(-01)	0.00000	0.3085( 01)
52.0000	0.1589(-23)	9.0000	0.8970(-01)	0.00000	0.3143( 01)
50.0000	0.2070(-23)	8.0000	0.1030(-00)	0.00000	0.3250( 01)
49.0000	0.2264(-23)	7.0000	0.1335(-00)	0.00000	0.3290( 01)
48.0000	0.2731(-23)	6.0000	0.1652(-00)	0.00000	0.3384( 01)
47.0000	0.3087(-23)	5.0000	0.2073(-00)	0.00150	0.3505( 01)
46.0000	0.3529(-23)	4.0000	0.2622(-00)	0.00100	0.3645( 01)
45.0000	0.4035(-23)	3.0000	0.3329(-00)	0.00000	0.3774( 01)
44.0000	0.4613(-23)	2.0000	0.4490(-00)	0.00000	0.3900( 01)
43.0000	0.5286(-23)	2.5000	0.4907(-00)	0.00000	0.3847( 01)
42.0000	0.6053(-23)	2.0000	0.4836(-00)	0.00000	0.3903( 01)
41.0000	0.6914(-23)	1.5000	0.5039(-00)	0.00000	0.3986( 01)
40.0000	0.7941(-23)	1.0000	0.5367(-00)	0.00000	0.4074( 01)
39.0000	0.9111(-23)	0.5000	0.5777(-00)	0.00000	0.4171( 01)
38.0000	1.0445(-23)	0.0000	0.6245(-00)	0.00000	0.4274( 01)
37.0000	1.1907(-23)	0.0000	0.6773(-00)	0.00000	0.4374( 01)
36.0000	0.1379(-22)	0.0000	0.7375(-00)	0.00000	0.4458( 01)
35.0000	0.1534(-22)	0.0000	0.1014(-01)	0.00000	0.4505( 01)
34.0000	0.1721(-22)	0.0000	0.1105(-01)	0.00000	0.4659( 01)

TABLA II

En estas tablas se fijaron los siguientes valores:  $f = f_c = 30\text{min}$ ,  $j = 1.0$ ,  $T_1 - T_0 = 150\text{ F}$ ,  $z = 20^\circ\text{F}$ . Con estas suposiciones no se tiene ninguna restricción en usar las tablas preparadas porque los valores para  $U_h/f$  y  $U_c/f_c$  y que son respectivamente independientes de  $f$  y  $f_c$  porque el efecto de esterilización en la porción inicial de la fase de calentamiento en la mayoría de los casos es muy pequeña.

Ahora bien, en la mayoría de los cálculos de un proceso se puede clasificar en dos tipos:

- 1.- Tipo \*A\*.- Cálculo del valor de esterilización,  $F_p$ , para una curva histórica de temperaturas para un alimento enlatado durante un proceso de calentamiento.
- 2.- Tipo \*B\*.- Determinación correcta de un proceso de calentamiento cuyo valor de esterilización sea igual a otro obtenido anteriormente.

A continuación se mostrarán los diferentes pasos para calcular el valor de esterilización, cuando no hay un punto de ruptura en la curva de calentamiento.

- 1.- Paso.- Obtener de la curva los siguientes datos:  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_w$ ,  $f$ ,  $j$ ,  $f_c$ ,  $j_c$ ,  $\theta_b$ .
- 2.- Paso.- Encontrar el valor de  $g$  por medio de la ec. 2-59.  
$$g = j (T_1 - T_0) \cdot 10^{\theta_b/f} \quad \text{Ec. 2-59}$$
- 3.- Paso.- Calcular el valor de la siguiente relación  $z/20$  que es denotada  $K_s$
- 4.- Paso.- Calcule el valor para  $g/K_s$  y entre en la tabla 1 para encontrar el valor de  $h/U_f$ . Después estime  $U_h$  por medio de la ec. 2-60.
- 5.- Paso.- Encontrar el valor de  $(T_g - T_w)/K_s$  por medio de la ec. 2-61

$$U_h = r_d \cdot f \quad r_d = h/U_f \quad \text{Ec. 2-60}$$

$$\frac{(T_g - T_w)}{K_s} = \frac{(T_1 - g - T_w)}{K_s} \quad \text{Ec. 2-61}$$

6.- Paso.- Con el valor de  $(T_g - T_w)/K_s$  entra uno a la tabla 2 y se encuentra  $U_{gc}/f_c$ .

7.- Paso.- Se calcula el valor de  $U_c$  por medio de la ec. 2-62.

$$U_c = r_f \cdot f_c \cdot 10 \frac{(T_g - T_1)/K_s}{20} \quad \text{Ec. 2-62}$$

donde  $r_f = U_{gc}/f_c$

el valor de  $10 \frac{(T_g - T_1)/K_s}{20}$ , se obtiene de la tabla 3 entrando con  $(T_1 - T_g)/K_s$  en la columna correcta de  $\Delta T$ .

8.- Paso.- Finalmente, el valor de esterilización,  $F_p$ , puede ser calculada por medio de la ec. 2-63.

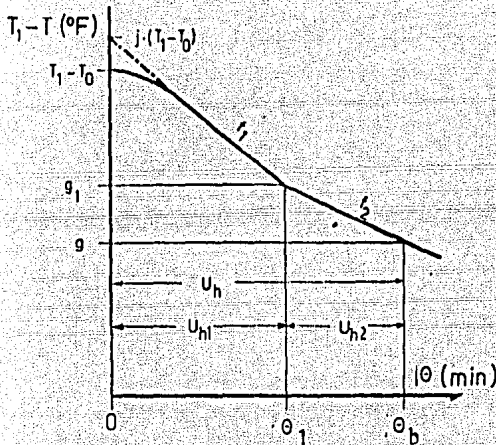
$$F_p = (U_h + U_c) \cdot 10 \frac{(T_1 - 250)/K_s}{20} \quad \text{Ec. 2-63}$$

Cuando hay un punto de ruptura en la curva de calentamiento, el valor de  $U_h$  se puede calcular con las ecs. 2-64a.b.c.

$$U_{h1} = f_1 \cdot (U_h/f) g_1/K_s \quad \text{Ec. 2-64a}$$

$$U_{h2} = f_2 \cdot (U_h/f) g/K_s \quad f_2 \cdot (U_h/f) g_1/K_s \quad \text{Ec. 2-64b}$$

$$U_h = U_{h1} + U_{h2} \quad \text{Ec. 2-64c}$$



Cálculo del valor de  $U_h$  cuando existe un punto de ruptura en la curva de calentamiento.

Por un procedimiento similar se puede estimar  $U_h$  cuando hay más puntos de ruptura en una curva.

Cuando se presenta un problema del Tipo B el proceso correcto de calentamiento es estimado por un procedimiento iterativo. Un tiempo o temperatura de proceso es supuesto y el valor de esterilización es calculado, el resultado es comparado con el valor que se está usando como referencia. Si no iguales hay que suponer otro valor hasta que el supuesto y el de referencia sean iguales.

A continuación se tiene un ejercicio para ejemplificar el cálculo del valor del proceso  $F_p$ .

Se tiene una lata de 303 X 406 con chicharos, en la gráfica de calentamiento experimental se tiene un punto de ruptura en la curva de calentamiento y se tiene los siguientes datos:

$$T_0 = 100^\circ\text{F}, T_1 = 250^\circ\text{F}, T_w = 50^\circ\text{F}, f_1 = 6.7 \text{ min.}, f_2 = 20 \text{ min.}, \\ j = 1.80, f_c = 7.5 \text{ min.}, j_c = 1.2, g_1 = 23.5^\circ\text{F}, g = 4.1^\circ\text{F}, = \\ z = 14.2^\circ\text{F}.$$

Los pasos 1 y 2 son dados directamente en el problema.

Paso 3.-  $K_s = z/20 = 14.2/20 = 0.710$

Paso 4.-  $g/K_s = 4.1/0.710 = 5.77^\circ\text{F}$

$$g_1/K_s = 23.5/0.71 = 33.1^\circ\text{F}$$

Con estos datos entras a la tabla 1 y obtenemos  $U_h/f$

$$g/K_s = 5.77^\circ\text{F} \rightarrow 0.175 = (U_h/f)_{5.77^\circ\text{F}}$$

$$g_1/K_s = 33.1^\circ\text{F} \rightarrow 0.00206 = (U_h/f)_{33.1^\circ\text{F}}$$

$$U_h = 6.7 \times 0.00206 + 20 \times 0.175 - 10 \times 0.00206$$

$$U_h = 3.47 \text{ min.}$$

Paso 5.-  $\frac{(T_g - T_w)}{K_s} = \frac{(250 - 4.1 - 50)}{0.71} = 275.9^\circ\text{F}$

Paso 6.- De la tabla 2 con el valor de  $(T_g - T_w)/K_s$  y  $j_c = 1.20$ , obtenemos:

$$r_f = U_{gc}/f_c = 0.05956$$

Paso 7.- Calcular  $U_c$

$$U_c = 0.05956 \times 7.5 \times 10 \frac{(250 - 250)/0.71}{20}$$

Paso 8.- Calcular  $F_p$

$$F_p = (3.47 + 0.23) \cdot 10 \frac{(250 - 250)/0.71}{20}$$

$$F_p = 3.7 \text{ min.}$$



El valor del proceso  $F_p = 3.7$  minutos.

Con este ejemplo queda aclarado el procedimiento para calcular el  $F_p$  mediante el método de HAYAKAWA.

En el ejemplo anterior se considera que la región curvilínea de la gráfica de calentamiento es despreciable. Cuando la temperatura inicial  $T_0$  es mayor de 200 °F o cuando los valores de  $z$  son del rango de 100 °F o mayores, la parte curvilínea de la gráfica de calentamiento se vuelven importantes.

A continuación se presentan una serie de pasos que toman en cuenta estas consideraciones:

Paso 1.- Calcular los siguientes valores:

$$\frac{T_0}{Ks}, jI_0/Ks, g/Ks, I_0 = T_1 - T_0 \text{ °F}$$

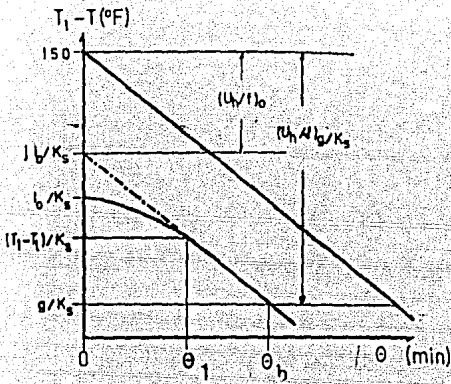
Paso 2.- Con  $I_0/Ks$  y  $j$  se entra en la tabla 5 y se encuentra el valor de  $(T_1 - T_1)/Ks$  si el valor de esterilización se debe calcular por el método de Ball que se mencionó anteriormente en este capítulo, sino se continúan con los siguientes pasos.

Paso 3.- Obtener  $(U_h/f)_{g/Ks}$  y  $(U_h/f)_o$  entrando en la tabla 1 con  $g/Ks$  y  $Io/Ks$  respectivamente.

Paso 4.- Encontrar el factor de corrección con  $Io/Ks$  y  $j$  en la tabla 4 los resultados como  $\Delta(U_h/f)_v$

Paso 5.- El valor de  $U_h$  se puede calcular como sigue:

$$U_h = f (U_h/f)_{g/Ks} - (U_h/f)_o + \Delta(U_h/f)_v \quad \text{Ec. 2-65}$$



Cálculo del valor de  $U_h$ , cuando la porción curvilínea de la gráfica de esterilización no es despreciable.

- 72 -  
Valores de Ugc/C cuando z = 20°F

Los valores de Ugc/C para los siguientes valores de Jc

m.°K. (°F)	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
70.00	0.4012(-2)	0.5134(-2)	0.5911(-2)	0.6511(-2)	0.7019(-1)	0.7463(-1)	0.7741(-1)	0.7921(-1)
75.00	0.5703(-2)	0.7116(-2)	0.8011(-2)	0.8711(-2)	0.9211(-1)	0.9668(-1)	0.9941(-1)	0.9991(-1)
76.00	0.4760(-2)	0.5816(-2)	0.6720(-2)	0.7416(-2)	0.7913(-1)	0.8270(-1)	0.8523(-1)	0.8677(-1)
78.00	0.4822(-2)	0.5853(-2)	0.6701(-2)	0.7316(-2)	0.7711(-1)	0.8071(-1)	0.8291(-1)	0.8421(-1)
78.00	0.1880(-2)	0.5622(-2)	0.6291(-2)	0.6711(-2)	0.7012(-1)	0.7291(-1)	0.7491(-1)	0.7611(-1)
77.50	0.4181(-2)	0.5270(-2)	0.6170(-2)	0.6710(-2)	0.7011(-1)	0.7291(-1)	0.7491(-1)	0.7611(-1)
77.00	0.5017(-2)	0.6160(-2)	0.7158(-2)	0.7917(-2)	0.8318(-1)	0.8684(-1)	0.8920(-1)	0.9021(-1)
76.50	0.5096(-2)	0.6266(-2)	0.7284(-2)	0.7918(-2)	0.8318(-1)	0.8684(-1)	0.8920(-1)	0.9021(-1)
75.50	0.5137(-2)	0.6310(-2)	0.7331(-2)	0.7914(-2)	0.8319(-1)	0.8690(-1)	0.8923(-1)	0.9022(-1)
75.00	0.5220(-2)	0.6403(-2)	0.7431(-2)	0.8003(-2)	0.8407(-1)	0.8780(-1)	0.9023(-1)	0.9022(-1)
74.50	0.5304(-2)	0.6497(-2)	0.7531(-2)	0.8103(-2)	0.8517(-1)	0.8890(-1)	0.9123(-1)	0.9122(-1)
74.00	0.5390(-2)	0.6593(-2)	0.7631(-2)	0.8203(-2)	0.8627(-1)	0.9000(-1)	0.9233(-1)	0.9232(-1)
73.50	0.5476(-2)	0.6680(-2)	0.7731(-2)	0.8303(-2)	0.8737(-1)	0.9110(-1)	0.9343(-1)	0.9342(-1)
73.00	0.5562(-2)	0.6767(-2)	0.7831(-2)	0.8403(-2)	0.8841(-1)	0.9213(-1)	0.9446(-1)	0.9445(-1)
72.50	0.5648(-2)	0.6853(-2)	0.7931(-2)	0.8503(-2)	0.8974(-1)	0.9346(-1)	0.9579(-1)	0.9578(-1)
72.00	0.5734(-2)	0.6938(-2)	0.8011(-2)	0.8583(-2)	0.9064(-1)	0.9499(-1)	0.9732(-1)	0.9731(-1)
71.50	0.5820(-2)	0.7023(-2)	0.8111(-2)	0.8683(-2)	0.9155(-1)	0.9590(-1)	0.9823(-1)	0.9822(-1)
71.00	0.5906(-2)	0.7108(-2)	0.8201(-2)	0.8773(-2)	0.9246(-1)	0.9685(-1)	0.9918(-1)	0.9917(-1)
70.50	0.5992(-2)	0.7193(-2)	0.8291(-2)	0.8863(-2)	0.9337(-1)	0.9790(-1)	1.0023(-1)	1.0022(-1)
70.00	0.6078(-2)	0.7278(-2)	0.8381(-2)	0.8973(-2)	0.9428(-1)	0.9895(-1)	1.0128(-1)	1.0127(-1)
69.50	0.6164(-2)	0.7363(-2)	0.8471(-2)	0.9073(-2)	0.9519(-1)	0.9990(-1)	1.0243(-1)	1.0242(-1)
69.00	0.6250(-2)	0.7448(-2)	0.8561(-2)	0.9173(-2)	0.9610(-1)	1.0085(-1)	1.0358(-1)	1.0357(-1)
68.50	0.6336(-2)	0.7533(-2)	0.8651(-2)	0.9273(-2)	0.9701(-1)	1.0180(-1)	1.0473(-1)	1.0472(-1)
68.00	0.6422(-2)	0.7618(-2)	0.8741(-2)	0.9373(-2)	0.9792(-1)	1.0275(-1)	1.0588(-1)	1.0587(-1)
67.50	0.6508(-2)	0.7703(-2)	0.8831(-2)	0.9473(-2)	0.9883(-1)	1.0370(-1)	1.0703(-1)	1.0702(-1)
67.00	0.6594(-2)	0.7788(-2)	0.8921(-2)	0.9573(-2)	0.9974(-1)	1.0465(-1)	1.0818(-1)	1.0817(-1)
66.50	0.6680(-2)	0.7873(-2)	0.9011(-2)	0.9673(-2)	1.0065(-1)	1.0560(-1)	1.0933(-1)	1.0932(-1)
66.00	0.6766(-2)	0.7958(-2)	0.9101(-2)	0.9773(-2)	1.0156(-1)	1.0655(-1)	1.1048(-1)	1.1047(-1)
65.50	0.6852(-2)	0.8043(-2)	0.9191(-2)	0.9873(-2)	1.0247(-1)	1.0750(-1)	1.1163(-1)	1.1162(-1)
65.00	0.6938(-2)	0.8128(-2)	0.9281(-2)	0.9973(-2)	1.0338(-1)	1.0845(-1)	1.1278(-1)	1.1277(-1)
64.50	0.7024(-2)	0.8213(-2)	0.9371(-2)	1.0073(-2)	1.0429(-1)	1.0940(-1)	1.1393(-1)	1.1392(-1)
64.00	0.7110(-2)	0.8298(-2)	0.9461(-2)	1.0173(-2)	1.0520(-1)	1.1035(-1)	1.1508(-1)	1.1507(-1)
63.50	0.7196(-2)	0.8383(-2)	0.9551(-2)	1.0273(-2)	1.0611(-1)	1.1130(-1)	1.1623(-1)	1.1622(-1)
63.00	0.7282(-2)	0.8468(-2)	0.9641(-2)	1.0373(-2)	1.0702(-1)	1.1225(-1)	1.1738(-1)	1.1737(-1)
62.50	0.7368(-2)	0.8553(-2)	0.9731(-2)	1.0473(-2)	1.0793(-1)	1.1320(-1)	1.1853(-1)	1.1852(-1)
62.00	0.7454(-2)	0.8638(-2)	0.9821(-2)	1.0573(-2)	1.0884(-1)	1.1415(-1)	1.1968(-1)	1.1967(-1)
61.50	0.7540(-2)	0.8723(-2)	0.9911(-2)	1.0673(-2)	1.0975(-1)	1.1510(-1)	1.2083(-1)	1.2082(-1)
61.00	0.7626(-2)	0.8808(-2)	1.0001(-2)	1.0773(-2)	1.1066(-1)	1.1605(-1)	1.2198(-1)	1.2197(-1)
60.50	0.7712(-2)	0.8893(-2)	1.0091(-2)	1.0873(-2)	1.1157(-1)	1.1700(-1)	1.2313(-1)	1.2312(-1)
60.00	0.7798(-2)	0.8978(-2)	1.0181(-2)	1.0973(-2)	1.1248(-1)	1.1795(-1)	1.2428(-1)	1.2427(-1)
59.50	0.7884(-2)	0.9063(-2)	1.0271(-2)	1.1073(-2)	1.1339(-1)	1.1890(-1)	1.2543(-1)	1.2542(-1)
59.00	0.7970(-2)	0.9148(-2)	1.0361(-2)	1.1173(-2)	1.1430(-1)	1.1985(-1)	1.2658(-1)	1.2657(-1)
58.50	0.8056(-2)	0.9233(-2)	1.0451(-2)	1.1273(-2)	1.1521(-1)	1.2080(-1)	1.2773(-1)	1.2772(-1)
58.00	0.8142(-2)	0.9318(-2)	1.0541(-2)	1.1373(-2)	1.1612(-1)	1.2175(-1)	1.2888(-1)	1.2887(-1)
57.50	0.8228(-2)	0.9403(-2)	1.0631(-2)	1.1473(-2)	1.1703(-1)	1.2270(-1)	1.3003(-1)	1.3002(-1)
57.00	0.8314(-2)	0.9488(-2)	1.0721(-2)	1.1573(-2)	1.1794(-1)	1.2365(-1)	1.3118(-1)	1.3117(-1)
56.50	0.8400(-2)	0.9573(-2)	1.0811(-2)	1.1673(-2)	1.1885(-1)	1.2460(-1)	1.3233(-1)	1.3232(-1)
56.00	0.8486(-2)	0.9658(-2)	1.0901(-2)	1.1773(-2)	1.1976(-1)	1.2555(-1)	1.3348(-1)	1.3347(-1)
55.50	0.8572(-2)	0.9743(-2)	1.0991(-2)	1.1873(-2)	1.2067(-1)	1.2650(-1)	1.3463(-1)	1.3462(-1)
55.00	0.8658(-2)	0.9828(-2)	1.1081(-2)	1.1973(-2)	1.2158(-1)	1.2745(-1)	1.3578(-1)	1.3577(-1)
54.50	0.8744(-2)	0.9913(-2)	1.1171(-2)	1.2073(-2)	1.2249(-1)	1.2840(-1)	1.3693(-1)	1.3692(-1)
54.00	0.8830(-2)	0.9998(-2)	1.1261(-2)	1.2173(-2)	1.2340(-1)	1.2935(-1)	1.3808(-1)	1.3807(-1)
53.50	0.8916(-2)	1.0083(-2)	1.1351(-2)	1.2273(-2)	1.2431(-1)	1.3030(-1)	1.3923(-1)	1.3922(-1)
53.00	0.9002(-2)	1.0168(-2)	1.1441(-2)	1.2373(-2)	1.2522(-1)	1.3125(-1)	1.4038(-1)	1.4037(-1)
52.50	0.9088(-2)	1.0253(-2)	1.1531(-2)	1.2473(-2)	1.2613(-1)	1.3220(-1)	1.4153(-1)	1.4152(-1)
52.00	0.9174(-2)	1.0338(-2)	1.1621(-2)	1.2573(-2)	1.2704(-1)	1.3315(-1)	1.4268(-1)	1.4267(-1)
51.50	0.9260(-2)	1.0423(-2)	1.1711(-2)	1.2673(-2)	1.2795(-1)	1.3410(-1)	1.4383(-1)	1.4382(-1)
51.00	0.9346(-2)	1.0508(-2)	1.1801(-2)	1.2773(-2)	1.2886(-1)	1.3505(-1)	1.4498(-1)	1.4497(-1)
50.50	0.9432(-2)	1.0593(-2)	1.1891(-2)	1.2873(-2)	1.2977(-1)	1.3600(-1)	1.4613(-1)	1.4612(-1)
50.00	0.9518(-2)	1.0678(-2)	1.1981(-2)	1.2973(-2)	1.3068(-1)	1.3695(-1)	1.4728(-1)	1.4727(-1)
49.50	0.9604(-2)	1.0763(-2)	1.2071(-2)	1.3073(-2)	1.3159(-1)	1.3790(-1)	1.4843(-1)	1.4842(-1)
49.00	0.9690(-2)	1.0848(-2)	1.2161(-2)	1.3173(-2)	1.3250(-1)	1.3885(-1)	1.4958(-1)	1.4957(-1)
48.50	0.9776(-2)	1.0933(-2)	1.2251(-2)	1.3273(-2)	1.3341(-1)	1.3980(-1)	1.5073(-1)	1.5072(-1)
48.00	0.9862(-2)	1.1018(-2)	1.2341(-2)	1.3373(-2)	1.3432(-1)	1.4075(-1)	1.5188(-1)	1.5187(-1)
47.50	0.9948(-2)	1.1103(-2)	1.2431(-2)	1.3473(-2)	1.3523(-1)	1.4170(-1)	1.5303(-1)	1.5302(-1)
47.00	1.0034(-2)	1.1188(-2)	1.2521(-2)	1.3573(-2)	1.3614(-1)	1.4265(-1)	1.5418(-1)	1.5417(-1)
46.50	1.0120(-2)	1.1273(-2)	1.2611(-2)	1.3673(-2)	1.3705(-1)	1.4360(-1)	1.5533(-1)	1.5532(-1)
46.00	1.0206(-2)	1.1358(-2)	1.2701(-2)	1.3773(-2)	1.3796(-1)	1.4455(-1)	1.5648(-1)	1.5647(-1)
45.50	1.0292(-2)	1.1443(-2)	1.2791(-2)	1.3873(-2)	1.3887(-1)	1.4550(-1)	1.5763(-1)	1.5762(-1)
45.00	1.0378(-2)	1.1528(-2)	1.2881(-2)	1.3973(-2)	1.3978(-1)	1.4645(-1)	1.5878(-1)	1.5877(-1)
44.50	1.0464(-2)	1.1613(-2)	1.2971(-2)	1.4073(-2)	1.4069(-1)	1.4740(-1)	1.5993(-1)	1.5992(-1)
44.00	1.0550(-2)	1.1698(-2)	1.3061(-2)	1.4173(-2)	1.4160(-1)	1.4835(-1)	1.6108(-1)	1.6107(-1)
43.50	1.0636(-2)	1.1783(-2)	1.3151(-2)	1.4273(-2)	1.4251(-1)	1.4930(-1)	1.6223(-1)	1.6222(-1)
43.00	1.0722(-2)	1.1868(-2)	1.3241(-2)	1.4373(-2)	1.4342(-1)	1.5025(-1)	1.6338(-1)	1.6337(-1)
42.50	1.0808(-2)	1.1953(-2)	1.3331(-2)	1.4473(-2)	1.4433(-1)	1.5120(-1)	1.6453(-1)	1.6452(-1)
42.00	1.0894(-2)	1.2038(-2)	1.3421(-2)	1.4573(-2)	1.4524(-1)	1.5215(-1)	1.6568(-1)	1.6567(-1)
41.50	1.0980(-2)	1.2123(-2)	1.3511(-2)	1.4673(-2)	1.4615(-1)	1.5310(-1)	1.6683(-1)	1.6682(-1)
41.00	1.1066(-2)	1.2208(-2)	1.3601(-2)	1.4773(-2)	1.4706(-1)	1.5405(-1)	1.6798(-1)	1.6797(-1)
40.50	1.1152(-2)	1.2293(-2)	1.3691(-2)	1.4873(-2)	1.4797(-1)	1.5500(-1)	1.6913(-1)	1.6912(-1)
40.00	1.1238(-2)	1.2378(-2)	1.3781(-2)	1.4973(-2)	1.4888(-1)	1.5595(-1)	1.7028(-1)	1.7027(-1)
39.50	1.1324(-2)	1.2463(-2)	1.3871(-2)	1.5073(-2)	1.4979(-1)	1.5690(-1)	1.7143(-1)	1.7142(-1)
39.00	1.1410(-2)	1.2548(-2)	1.3961(-2)	1.5173(-2)	1.5070(-1)	1.5785(-1)	1.7258(-1)	1.7257(-1)
38.50	1.1496(-2)	1.2633(-2)	1.4051(-2)	1.5273(-2)	1.5161(-1)	1.5880(-1)	1.7373(-1)	1.7372(-1)
38.00	1.1582(-2)	1.2718(-2)	1.4141(-2)	1.5373(-2)	1.5252(-1)	1.5975(-1)	1.7488(-1)	1.7487(-1)
37.50	1.1668(-2)	1.2803(-2)	1.4231(-2)	1.5473(-2)	1.5343(-1)	1.6070(-1)	1.7603(-1)	1.7602(-1)
37.00	1.1754(-2)	1.2888(-2)	1.4321(-2)	1.5573(-2)	1.5434(-1)	1.6165(-1)	1.7718(-1)	1.7717(-1)
36.50	1.1840(-2)	1.2973(-2)	1.4411(-2)	1.5673(-2)	1.5525(-1)	1.6260(-1)	1.7833(-1)	1.7832(-1)
36.00	1.1926(-2)	1.3058(-2)	1.4501(-2)	1.5773(-2)	1.5616(-1)	1.6355(-1)	1.7948(-1)	1.7947(-1)
35.50	1.2012(-2)	1.3143(-2)	1.4591(-2)	1.5873(-2)	1.5707(-1)	1.6450(-1)	1.8063(-1)	1.8062(-1)
35.00	1.2098(-2)	1.3228(-2)	1.4681(-2)	1.5973(-2)	1.5798(-1)	1.6545(-1)	1.8178(-1)	1.8177(-1)
34.50	1.2184(-2)	1.3313(-2)	1.4771(-2)	1.6073(-2)	1.5889(-1)	1.6640(-1)	1.8293(-1)	1.8292(-1)
34.00	1.2270(-2)	1.3398(-2)	1.4861(-2)	1.6173(-2)	1.5980(-1)	1.6735(-1)	1.8408(-1)	1.8407(-1)
33.50	1.2356(-2)	1.3483(-2)	1.4951(-2)	1.6273(-2)	1.6071(-1)	1.6830(-1)	1.8523(-1)	1.8522(-1)
33.00	1.2442(-2)	1.3568(-2)	1.5041(-2)	1.6373(-2)	1.6162(-1)	1.6925(-1)	1.8638(-1)	1.8637(-1)
32.50	1.2528(-2)	1.3653(-2)	1.5131(-2)	1.6473(-2)	1.6253(-1)	1.7020(-1)	1.8753(-1)	1.8752(-1)
32.00	1.2614(-2)	1.3738(-2)	1.5221(-2)	1.6573(-2)	1.6344(-1)	1.7115(-1)	1.8868(-1)	1.8867(-1)
31.50	1.2700(-2)	1.3823(-2)	1.5311(-2)	1.6673(-2)	1.6435(-1)	1.7210(-1)	1.8983(-1)	1.8982(-1)
31.00	1.2786(-2)	1.3908(-2)	1.5401(-2)	1.6773(-2)	1.6526(-1)	1.7305(-1)	1.9098(-1)	1.9097(-1)
30.50	1.2872(-2)	1.3993(-2)	1.5491(-2)	1.6873(-2)	1.6617(-1)	1.7400(-1)	1.9213(-1)	1.9212(-1)
30.00	1.2958(-2)	1.4078(-2)	1.5581(-2)	1.6973(-2)	1.6708(-1)	1.7495(-1)	1.9328(-1)	1.9327(-1)
29.50	1.3044(-2)	1.4163(-2)	1.5671(-2)	1.7073(-2)	1.6799(-1)	1.7590(-1)	1.9443(-1)	1.9442(-1)
29.00	1.3130(-2)	1.4248(-2)	1.5761(-2)	1.7173(-2)	1.6890(-1)	1.7685(-1)	1.955	

Valores de Ugc/C cuando z = 20°F

Los valores de Ugc/c para los siguientes valores de Jc

$\frac{h}{K_c}$ (°F)	0.60	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	1.90
100.00	0.9229(-2)	0.1096(-1)	0.1220(-1)	0.1976(-1)	0.7021(-1)	0.8410(-1)	0.1112	0.1248	0.1300
95.00	0.9585(-2)	0.1114(-1)	0.1253(-1)	0.2030(-1)	0.7114(-1)	0.8465(-1)	0.1126	0.1260	0.1318
90.00	0.9844(-2)	0.1133(-1)	0.1288(-1)	0.2086(-1)	0.7211(-1)	0.8520(-1)	0.1142	0.1277	0.1335
85.00	0.1012(-2)	0.1177(-1)	0.1325(-1)	0.2145(-1)	0.7312(-1)	0.8575(-1)	0.1158	0.1295	0.1354
80.00	0.1011(-2)	0.1213(-1)	0.1364(-1)	0.2204(-1)	0.7418(-1)	0.8632(-1)	0.1174	0.1313	0.1373
75.00	0.1072(-2)	0.1249(-1)	0.1405(-1)	0.2263(-1)	0.7529(-1)	0.8691(-1)	0.1192	0.1332	0.1394
70.00	0.1104(-2)	0.1297(-1)	0.1449(-1)	0.2324(-1)	0.7645(-1)	0.8751(-1)	0.1210	0.1353	0.1415
65.00	0.1129(-2)	0.1328(-1)	0.1496(-1)	0.2382(-1)	0.7767(-1)	0.8814	0.1229	0.1374	0.1437
60.00	0.1176(-2)	0.1377(-1)	0.1548(-1)	0.2463(-1)	0.7895(-1)	0.8881	0.1249	0.1396	0.1460
55.00	0.1216(-2)	0.1418(-1)	0.1599(-1)	0.2549(-1)	0.8029(-1)	0.8952	0.1270	0.1420	0.1485
50.00	0.1258(-2)	0.1462(-1)	0.1657(-1)	0.2632(-1)	0.8172(-1)	0.9027	0.1293	0.1444	0.1510
45.00	0.1304(-2)	0.1523(-1)	0.1719(-1)	0.2731(-1)	0.8322(-1)	0.9117	0.1319	0.1470	0.1538
40.00	0.1353(-2)	0.1589(-1)	0.1785(-1)	0.2837(-1)	0.8479(-1)	0.9218	0.1347	0.1498	0.1566
35.00	0.1407(-2)	0.1664(-1)	0.1858(-1)	0.2950(-1)	0.8641(-1)	0.9330	0.1376	0.1527	0.1597
30.00	0.1465(-2)	0.1744(-1)	0.1938(-1)	0.3131(-1)	0.8811(-1)	0.9454	0.1408	0.1558	0.1629
25.00	0.1529(-2)	0.1789(-1)	0.2022(-1)	0.3268(-1)	0.9005(-1)	0.9599	0.1433	0.1591	0.1663
20.00	0.1598(-2)	0.1872(-1)	0.2118(-1)	0.3418(-1)	0.9224(-1)	0.9766	0.1454	0.1626	0.1700
15.00	0.1675(-2)	0.1963(-1)	0.2219(-1)	0.3583(-1)	0.9450(-1)	0.9958	0.1480	0.1663	0.1739
10.00	0.1760(-2)	0.2066(-1)	0.2334(-1)	0.3766(-1)	0.9698(-1)	0.1296	0.1534	0.1708	0.1781
05.00	0.1857(-2)	0.2182(-1)	0.4085(-1)	0.3573(-1)	0.9329	0.1388	0.1588	0.1747	0.1826
00.00	0.2104(-2)	0.2327(-1)	0.4193(-1)	0.4193(-1)	0.9025	0.1466	0.1655	0.1817	0.1875
95.00	0.2101(-2)	0.2323(-1)	0.2769(-1)	0.4403(-1)	0.1057	0.1495	0.1651	0.1845	0.1920
90.00	0.2276(-2)	0.2580(-1)	0.2955(-1)	0.4779(-1)	0.1093	0.1470	0.1702	0.1901	0.1977
85.00	0.2414(-2)	0.2769(-1)	0.3170(-1)	0.5101(-1)	0.1132	0.1498	0.1757	0.1962	0.2051
80.00	0.2570(-2)	0.2976(-1)	0.3420(-1)	0.5460(-1)	0.1176	0.1552	0.1819	0.2031	0.2122
75.00	0.2768(-2)	0.3221(-1)	0.3715(-1)	0.5878(-1)	0.1227	0.1612	0.1888	0.2107	0.2202
70.00	0.2909(-2)	0.3512(-1)	0.4085(-1)	0.6373(-1)	0.1285	0.1682	0.1967	0.2193	0.2291
65.00	0.3080(-2)	0.3717(-1)	0.4429(-1)	0.6957(-1)	0.1353	0.1762	0.2057	0.2287	0.2388
60.00	0.3283(-2)	0.4380(-1)	0.5032(-1)	0.7687(-1)	0.1434	0.1855	0.2161	0.2405	0.2511
55.00	0.4001(-2)	0.4840(-1)	0.5703(-1)	0.8575(-1)	0.1532	0.1966	0.2284	0.2539	0.2650
50.00	0.4618(-2)	0.5540(-1)	0.6584(-1)	0.9675(-1)	0.1652	0.2101	0.2432	0.2698	0.2814
45.00	0.5740(-2)	0.6102(-1)	0.7492(-1)	0.1111	0.1803	0.2268	0.2612	0.2892	0.3014
40.00	0.6392(-2)	0.7084(-1)	0.9197(-1)	0.1285	0.1997	0.2478	0.2840	0.3122	0.3261
35.00	0.7607(-2)	0.8162(-1)	0.1124	0.1529	0.2251	0.2750	0.3129	0.3437	0.3579
30.00	0.9415(-2)	0.9170	0.1408	0.1868	0.2591	0.3106	0.3507	0.3834	0.3978
25.00	0.1197	0.1591	0.1898	0.2322	0.3056	0.3593	0.4014	0.4361	0.4516

Valores de Ugc/C cuando z = 20°F

Los valores de Ugc/C para los siguientes valores de Jc

$\frac{h}{K_c}$ (°F)	2.60	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80
20.00	0.1355	0.1163	0.1449	0.1192	0.1533	0.1572	0.1690	0.1615	0.1678
25.00	0.1471	0.1122	0.1468	0.1312	0.1552	0.1593	0.1639	0.1669	0.1713
30.00	0.1596	0.1116	0.1487	0.1352	0.1571	0.1614	0.1652	0.1678	0.1724
35.00	0.1708	0.1164	0.1508	0.1383	0.1596	0.1636	0.1678	0.1712	0.1761
40.00	0.1821	0.1181	0.1530	0.1375	0.1619	0.1660	0.1699	0.1736	0.1782
45.00	0.1935	0.1593	0.1552	0.1599	0.1643	0.1681	0.1724	0.1762	0.1798
50.00	0.1472	0.1526	0.1576	0.1623	0.1667	0.1710	0.1750	0.1788	0.1825
55.00	0.1497	0.1550	0.1600	0.1648	0.1693	0.1736	0.1777	0.1816	0.1853
60.00	0.1520	0.1575	0.1626	0.1673	0.1721	0.1761	0.1806	0.1845	0.1883
65.00	0.1642	0.1601	0.1653	0.1703	0.1749	0.1794	0.1836	0.1875	0.1914
70.00	0.1772	0.1629	0.1682	0.1732	0.1779	0.1825	0.1867	0.1905	0.1947
75.00	0.1800	0.1658	0.1712	0.1763	0.1811	0.1857	0.1901	0.1942	0.1982
80.00	0.620	0.1689	0.1744	0.1796	0.1845	0.1891	0.1936	0.1978	0.2019
85.00	0.1661	0.1721	0.1777	0.1830	0.1880	0.1928	0.1974	0.2016	0.2057
90.00	0.1695	0.1756	0.1813	0.1867	0.1918	0.1966	0.2012	0.2058	0.2098
95.00	0.1730	0.1793	0.1851	0.1908	0.1958	0.2007	0.2051	0.2099	0.2142
100.00	0.1768	0.1832	0.1891	0.1948	0.2001	0.2051	0.2099	0.2145	0.2198
105.00	0.1806	0.1871	0.1932	0.1992	0.2046	0.2096	0.2143	0.2189	0.2238
110.00	0.1845	0.1911	0.1972	0.2030	0.2085	0.2134	0.2180	0.2226	0.2271
115.00	0.1884	0.1951	0.2012	0.2072	0.2128	0.2176	0.2225	0.2270	0.2316
120.00	0.1923	0.2001	0.2062	0.2124	0.2180	0.2228	0.2277	0.2323	0.2371
125.00	0.1962	0.2041	0.2102	0.2166	0.2223	0.2271	0.2319	0.2367	0.2416
130.00	0.1999	0.2089	0.2151	0.2218	0.2277	0.2326	0.2375	0.2423	0.2473
135.00	0.2036	0.2127	0.2189	0.2258	0.2318	0.2368	0.2417	0.2466	0.2516
140.00	0.2072	0.2164	0.2226	0.2297	0.2358	0.2408	0.2457	0.2506	0.2556
145.00	0.2108	0.2201	0.2263	0.2336	0.2397	0.2447	0.2496	0.2545	0.2595
150.00	0.2144	0.2237	0.2299	0.2374	0.2435	0.2485	0.2534	0.2583	0.2633
155.00	0.2179	0.2273	0.2335	0.2412	0.2473	0.2523	0.2572	0.2621	0.2671
160.00	0.2214	0.2308	0.2370	0.2449	0.2510	0.2560	0.2609	0.2658	0.2708
165.00	0.2248	0.2343	0.2405	0.2486	0.2547	0.2597	0.2646	0.2695	0.2745
170.00	0.2282	0.2377	0.2439	0.2522	0.2583	0.2633	0.2682	0.2731	0.2781
175.00	0.2316	0.2411	0.2473	0.2558	0.2619	0.2669	0.2718	0.2767	0.2817
180.00	0.2349	0.2445	0.2507	0.2594	0.2655	0.2705	0.2754	0.2803	0.2853
185.00	0.2382	0.2478	0.2540	0.2629	0.2690	0.2740	0.2789	0.2838	0.2888
190.00	0.2415	0.2511	0.2573	0.2664	0.2725	0.2775	0.2824	0.2873	0.2923
195.00	0.2447	0.2543	0.2605	0.2698	0.2759	0.2809	0.2858	0.2907	0.2957
200.00	0.2479	0.2575	0.2637	0.2732	0.2793	0.2843	0.2892	0.2941	0.2991

Valores de Ugc/C cuando  $t_2 = 20^{\circ}\text{F}$

Los valores de Ugc/C para los siguientes valores de Jc

m K, (°F)	2.00	Jc, valores 3.00	m K, (°F)	2.00	Jc, valores 3.00
400.00	0.1204	0.1220	100.00	0.1711	0.1743
395.00	0.1211	0.1227	195.00	0.1733	0.1766
390.00	0.1219	0.1234	190.00	0.1757	0.1789
385.00	0.1227	0.1240	185.00	0.1781	0.1813
380.00	0.1235	0.1248	180.00	0.1806	0.1839
375.00	0.1243	0.1256	175.00	0.1833	0.1866
370.00	0.1252	0.1264	170.00	0.1860	0.1894
365.00	0.1260	0.1271	165.00	0.1889	0.1923
360.00	0.1269	0.1279	160.00	0.1919	0.1954
355.00	0.1278	0.1287	155.00	0.1951	0.1986
350.00	0.1287	0.1295	150.00	0.1985	0.2020
345.00	0.1297	0.1303	145.00	0.2020	0.2056
340.00	0.1306	0.1311	140.00	0.2057	0.2094
335.00	0.1316	0.1319	135.00	0.2096	0.2134
330.00	0.1326	0.1328	130.00	0.2138	0.2177
325.00	0.1337	0.1338	125.00	0.2183	0.2222
320.00	0.1347	0.1347	120.00	0.2230	0.2270
315.00	0.1358	0.1358	115.00	0.2281	0.2321
310.00	0.1369	0.1369	110.00	0.2335	0.2377
305.00	0.1380	0.1380	105.00	0.2393	0.2436
300.00	0.1392	0.1417	100.00	0.2456	0.2500
295.00	0.1404	0.1430	95.00	0.2525	0.2570
290.00	0.1416	0.1442	90.00	0.2600	0.2646
285.00	0.1428	0.1455	85.00	0.2683	0.2730
280.00	0.1441	0.1468	80.00	0.2774	0.2823
275.00	0.1455	0.1481	75.00	0.2876	0.2926
270.00	0.1468	0.1495	70.00	0.2991	0.3033
265.00	0.1482	0.1509	65.00	0.3120	0.3144
260.00	0.1497	0.1524	60.00	0.3269	0.3325
255.00	0.1511	0.1539	55.00	0.3442	0.3601
250.00	0.1527	0.1555	50.00	0.3645	0.3707
245.00	0.1543	0.1571	45.00	0.3889	0.3954
240.00	0.1559	0.1587	40.00	0.4187	0.4258
235.00	0.1576	0.1604	35.00	0.4537	0.4631
230.00	0.1593	0.1622	30.00	0.5028	0.5167
225.00	0.1611	0.1640	25.00	0.5611	0.5755
220.00	0.1630	0.1659			
215.00	0.1649	0.1679			
210.00	0.1669	0.1699			
205.00	0.1689	0.1720			

## GRUPO II

Se basa en la evaluación de la letalidad de la masa promedio del cuerpo del alimento.

La forma de evaluar el valor del proceso  $F_s$  puede ser matemática o experimental. La fórmula para estimar el valor del proceso  $F_s$  se deriva matemáticamente combinando fórmulas para la conducción de calor y para la inactivación térmica del factor vulnerable C.

El análisis dimensional de la fórmula indica que se necesitan seis grupos adimensionales para determinar el valor de  $F_s$ . Estos seis grupos seleccionados son  $C_b$ ,  $F_k$ ,  $S$ ,  $U_g$ ,  $T_x$  y  $T_z$  y se detienen como sigue:

$$(TI - 250/z)$$

$C_b = (0.5 \text{ } t_b / D_r) \cdot 10$	Ec. 2-66a
$F_k = F_s / (D_r C_b)$	2-67
$S = a/l$	2-68
$U_g = (T_I - T_o)$	2-69
$T_x = (T_I - T_c) / z$	2-70
$T_z = (T_I - T_o) / z$	2-71

Donde  $t_b$  es el tiempo que dura la fase de calentamiento (min.),  $D_r$  es la reducción decimal (min.),  $T_o$  temperatura inicial del alimento  $F$ ,  $T_I$ , la temperatura que tiene la autoclave  $F$ ,  $T_c$  la temperatura del agua de enfriamiento  $F$ ,  $T_g$  la temperatura al centro del alimento en la parte final de la fase de calentamiento ( $F$ )  $a$ , es el radio interno de la lata ( $I_n$ ), y  $l$  la altura interna de la lata ( $I_n$ ).

Para los grupos adimensionales que mencionamos anteriormente se trabaja dentro de los siguientes rangos:

$$\begin{aligned} 0.1 &\leq Cb \leq 700 \\ 0.2 &\leq S \leq 2.0 \\ 0.2 &\leq Ug \leq 0.001 \\ 1 &\leq Tx \leq 20 \\ 1 &\leq Tz \leq 18 \end{aligned}$$

Para calcular el valor de esterilización de la masa promedio  $F_k$ , se han tabulado valores de  $Cb$ ,  $S$ ,  $Ug$ ,  $Tx$ , y  $Tz$ . Para calcular  $Ug$  utilizamos la siguiente ecuación:

$$Ug = j \cdot 10^{-0b/f} \quad \text{Ec. 2-72}$$

y  $F_s$  se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_s = F_u \cdot D_r \cdot C_b \quad \text{Ec. 2-73}$$

En el ejemplo siguiente se muestra la forma de utilizar el método.

Un puré de guisantes es preparado y empacado en una lata de 211 X 300. Las muestras fueron preparadas en un autoclave. Los datos del proceso son los siguientes:  $T_0 = 66.5^\circ\text{F}$ ,  $T_1 = 250^\circ\text{F}$ ,  $T_c = 54^\circ\text{F}$ ,  $R_g = 216.6^\circ\text{F}$  y  $T_b = 30 \text{ mm.}$  Calcular la cantidad de tiamina residual en las muestras después del proceso. Los valores de "z" y  $D_r$  para tiamina en el puré de guisantes son respectivamente  $46.7^\circ\text{C}$  y 160 min..

a) Se realizan los siguientes cálculos:

$$T_z = (250 - 66.5)/46.7 = 3.93$$

$$T_x = (250 - 54)/46.7 = 4.20$$

$$C_b = (0.5 \times 30/160) \times 10$$

$$U_g = (250 - 216.6)/(250 - 66.5) = 0.182$$

$$S = 211/300 = 0.4569$$

- b) Con estos datos entramos a la tabla 1 e interpolando con los datos anteriores encontramos  $F_k$ .

$$F_k = 0.8011$$

- c) Se calcula el valor del proceso.

$$F_s = 0.8011 \times 160 \times 0.938 = 12.02$$

La cantidad de tiamina residual se calcula como sigue:

$$c/Co = R \cdot 10^{-F_s/Dr} = 1 \cdot 10^{-12.02/160} = 0.841 \quad \text{Ec. 2-74}$$

En la Ec. 2-74  $R$  es el coeficiente de intercepción de la curva de sobrevivientes de un factor térmicamente a - - 250°F.  $R = 1$  cuando no hay una porción curvilínea al comienzo de la gráfica.

La tabla se muestra a continuación:



S = 1.0												
u <sub>s</sub>												
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	C <sub>s</sub>	0.1	0.03	0.00	0.04	0.02	0.01	0.008	0.006	0.004	0.002
2	2	0.1	1.2409	1.1773	1.3342	1.3973	1.4371	1.5251	1.5522	1.5653	1.5501	1.6098
		0.5	1.1813	1.1250	1.2853	1.3595	1.4050	1.5002	1.5288	1.5420	1.5314	1.5935
		1.0	1.1194	1.0711	1.2328	1.3114	1.3690	1.4713	1.5018	1.5173	1.5095	1.5754
		5.0	0.9181	0.8866	1.0465	1.1419	1.2198	1.3421	1.3785	1.4013	1.4032	1.4828
		10.0	0.8479	0.8203	0.9778	1.0763	1.1576	1.2842	1.3221	1.3469	1.3513	1.4350
2	8	0.1	1.1663	1.1071	1.2685	1.3574	1.3833	1.4801	1.5080	1.5219	1.5114	1.5741
		0.5	1.0908	1.0407	1.2050	1.2843	1.3439	1.4473	1.4784	1.4914	1.4873	1.5543
		1.0	1.0108	0.9697	1.1371	1.2357	1.2967	1.4097	1.4431	1.4621	1.4580	1.5307
		5.0	1.7509	0.7280	0.8945	1.0029	1.1000	1.2388	1.2799	1.3085	1.3177	1.4078
		10.0	0.6678	0.6478	0.8123	0.9333	1.0235	1.1667	1.2093	1.2399	1.2518	1.3464
3	3	0.1	1.0217	0.9718	1.1355	1.2153	1.2771	1.3843	1.4164	1.4339	1.4291	1.4997
		0.5	0.9414	0.9019	1.0673	1.1573	1.2308	1.3474	1.3820	1.4026	1.4014	1.4770
		1.0	0.8626	0.8317	0.9977	1.0966	1.1805	1.3063	1.3435	1.3673	1.3700	1.4508
		5.0	0.6332	0.6214	0.7789	0.8935	0.9959	1.1428	1.1866	1.2188	1.2327	1.3298
		10.0	0.5617	0.5513	0.7049	0.8217	0.9262	1.0768	1.1219	1.1560	1.1726	1.2737
3	12	0.1	0.9931	0.9441	1.1087	1.1993	1.2550	1.3647	1.3975	1.4160	1.4123	1.4846
		0.5	0.9024	0.8645	1.0311	1.1240	1.2019	1.3223	1.3581	1.3800	1.3806	1.4586
		1.0	0.8123	0.7837	0.9507	1.0533	1.1433	1.2740	1.3133	1.3389	1.3440	1.4282
		5.0	0.5467	0.5354	0.6391	0.8126	0.9237	1.0797	1.1263	1.1619	1.1803	1.2840
		10.0	0.4630	0.4562	0.6101	0.7313	0.8441	1.0037	1.0515	1.0890	1.1102	1.2150
4	4	0.1	0.8877	0.8456	1.0100	1.0980	1.1728	1.2914	1.3268	1.3485	1.3490	1.4274
		0.5	0.7981	0.7671	0.9316	1.0313	1.1176	1.2469	1.2854	1.3106	1.3150	1.3998
		1.0	0.7132	0.6911	0.8540	0.9629	1.0592	1.1985	1.2398	1.2686	1.2780	1.3684
		5.0	0.4828	0.4768	0.6250	0.7467	0.8578	1.0172	1.0651	1.1027	1.1240	1.2318
		10.0	0.4103	0.4073	0.5502	0.6734	0.7852	0.9476	0.9967	1.0360	1.0599	1.1714
4	16	0.1	0.8724	0.8302	0.9946	1.0841	1.1594	1.2793	1.3152	1.3373	1.3387	1.4181
		0.5	0.7781	0.7455	0.9099	1.0107	1.0992	1.2308	1.2699	1.2901	1.3021	1.3879
		1.0	0.6941	0.6626	0.8249	0.9350	1.0347	1.1773	1.2195	1.2496	1.2606	1.3533
		5.0	0.4283	0.4225	0.5694	0.6916	0.8067	0.9718	1.0215	1.0615	1.0859	1.1993
		10.0	0.3500	0.3465	0.4870	0.6111	0.7265	0.8944	0.9453	0.9870	1.0141	1.1304

Table 1.

S = 0.1												
		$u_e$										
$T_1$	$T_2$	C.	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.008	0.006	0.004	0.002
2	2	0.1	1.1255	1.1069	1.3459	1.3995	1.4826	1.5161	1.5639	1.5742	1.6120	1.6505
		0.5	1.0687	1.1431	1.2974	1.3557	1.4199	1.5203	1.5798	1.5513	1.5927	1.6347
		1.0	1.0098	1.0863	1.2452	1.3080	1.4129	1.4905	1.5120	1.5289	1.5701	1.6161
		5.0	0.9231	0.9901	1.0660	1.1368	1.2042	1.2695	1.3877	1.4117	1.4624	1.5220
		10.0	0.7030	0.8391	1.0051	1.0759	1.2070	1.3065	1.3349	1.3605	1.4134	1.4703
2	8	0.1	1.0550	1.1979	1.2934	1.3190	1.4349	1.5044	1.5237	1.5380	1.5762	1.6184
		0.5	0.9833	1.0619	1.2218	1.2887	1.3931	1.4714	1.4931	1.5101	1.5517	1.5984
		1.0	0.9076	0.9891	1.1547	1.2282	1.3454	1.4331	1.4573	1.4774	1.5287	1.5744
		5.0	0.6603	0.7487	0.9225	1.0058	1.1519	1.2638	1.2952	1.3240	1.3822	1.4515
		10.0	0.5931	0.6746	0.8487	0.9320	1.0515	1.1964	1.2292	1.2602	1.3201	1.3933
3	3	0.1	0.9144	0.9918	1.1513	1.2179	1.3252	1.4070	1.4299	1.4486	1.4925	1.5428
		0.5	0.8300	0.9195	1.0847	1.1577	1.2783	1.3694	1.3949	1.4160	1.4643	1.5190
		1.0	0.7656	0.8468	1.0165	1.0914	1.2273	1.3275	1.3556	1.3805	1.4321	1.4929
		5.0	0.5581	0.6357	0.8089	0.8900	1.0455	1.1649	1.1992	1.2322	1.2949	1.3714
		10.0	0.4955	0.5711	0.7439	0.8239	0.9822	1.1042	1.1395	1.1740	1.2387	1.3187
3	12	0.1	0.8887	0.9667	1.1272	1.1955	1.3054	1.3895	1.4130	1.4325	1.4774	1.5293
		0.5	0.8047	0.8953	1.0520	1.1274	1.2321	1.3468	1.3733	1.3962	1.4454	1.5030
		1.0	0.7207	0.8025	0.9739	1.0547	1.1933	1.2935	1.3280	1.3540	1.4054	1.4722
		5.0	0.4764	0.5534	0.7283	0.8127	0.9774	1.1054	1.1423	1.1786	1.2454	1.3283
		10.0	0.4040	0.4792	0.6535	0.7367	0.8929	1.0344	1.0724	1.1102	1.1792	1.2657
4	4	0.1	0.7869	0.8652	1.0289	1.1008	1.2217	1.3146	1.3408	1.3630	1.4128	1.4708
		0.5	0.7049	0.7814	0.9533	1.0309	1.1662	1.2693	1.2997	1.3251	1.3785	1.4428
		1.0	0.6264	0.7058	0.8781	0.9595	1.1074	1.2204	1.2524	1.2824	1.3406	1.4169
		5.0	0.4182	0.4901	0.6625	0.7420	0.9101	1.0410	1.0793	1.1176	1.1873	1.2743
		10.0	0.3566	0.4257	0.5968	0.6743	0.8444	0.9773	1.0164	1.0560	1.1278	1.2180
4	16	0.1	0.7736	0.8518	1.0155	1.0880	1.2100	1.3040	1.3306	1.3539	1.4037	1.4626
		0.5	0.6860	0.7632	0.9242	1.0125	1.1499	1.2552	1.2850	1.3121	1.3669	1.4322
		1.0	0.6013	0.6800	0.8523	0.9343	1.0552	1.2011	1.2341	1.2652	1.3249	1.3972
		5.0	0.3681	0.4374	0.6080	0.6881	0.8611	0.9973	1.0374	1.0780	1.1509	1.2425
		10.0	0.2984	0.3652	0.5350	0.6119	0.7867	0.9249	0.9658	1.0078	1.0829	1.1779

Table 1/ Condensed table of  $F_3$  values.

S = 0.2												
		$u_e$										
$T_1$	$T_2$	C.	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.008	0.006	0.004	0.002
2	2	0.1	1.2157	1.2100	1.2714	1.2953	1.3632	1.5134	1.5468	1.4967	1.5651	1.6077
		0.5	1.1587	1.1508	1.2227	1.2543	1.3316	1.4883	1.5237	1.4757	1.5605	1.5924
		1.0	1.1001	1.1002	1.1710	1.2097	1.2962	1.4596	1.4972	1.4513	1.5448	1.5746
		5.0	0.8192	0.8188	0.9959	1.0482	1.1550	1.3355	1.3795	1.3402	1.4421	1.4851
		10.0	0.6581	0.6502	0.9335	0.9879	1.0991	1.2819	1.3275	1.2898	1.3937	1.4405
2	8	0.1	1.1455	1.1441	1.2094	1.2300	1.3147	1.4711	1.5062	1.4582	1.5491	1.5755
		0.5	1.0739	1.0763	1.1482	1.1872	1.2746	1.4394	1.4771	1.4316	1.5256	1.5561
		1.0	0.9999	1.0049	1.0825	1.1363	1.2296	1.4029	1.4432	1.4005	1.4979	1.5334
		5.0	0.7590	0.7729	0.8552	0.9220	1.0174	1.2429	1.2913	1.2572	1.3654	1.4180
		10.0	0.6938	0.6973	0.7827	0.8492	0.9772	1.1762	1.2263	1.1939	1.3046	1.3613
3	3	0.1	0.9972	0.9983	1.0701	1.1106	1.2019	1.3707	1.4100	1.3663	1.4628	1.4976
		0.5	0.9231	0.9204	1.0040	1.0539	1.1572	1.3347	1.3765	1.3360	1.4359	1.4755
		1.0	0.8508	0.8530	0.9370	0.9917	1.1089	1.2917	1.3397	1.3018	1.4052	1.4501
		5.0	0.6505	0.6494	0.7340	0.8034	0.9563	1.1393	1.1917	1.1612	1.2741	1.3340
		10.0	0.5572	0.5583	0.6671	0.7377	0.8728	1.0762	1.1323	1.1032	1.2181	1.2824
3	12	0.1	0.9714	0.9731	1.0466	1.0881	1.1821	1.3543	1.3932	1.3504	1.4479	1.4842
		0.5	0.8987	0.8927	0.9739	1.0143	1.1147	1.3126	1.3557	1.3161	1.4175	1.4593
		1.0	0.8072	0.8121	0.8958	0.9549	1.0765	1.2650	1.3134	1.2774	1.3825	1.4303
		5.0	0.5749	0.5731	0.6706	0.7311	0.8746	1.0853	1.1404	1.1128	1.2291	1.2957
		10.0	0.5021	0.4977	0.5929	0.6577	0.8100	1.0113	1.0711	1.0451	1.1610	1.2344
4	4	0.1	0.8633	0.8669	0.9151	0.9214	1.0467	1.2765	1.3190	1.2801	1.3817	1.4245
		0.5	0.7850	0.7873	0.8365	0.8272	1.0111	1.2317	1.2801	1.2436	1.3419	1.3890
		1.0	0.7088	0.7101	0.7619	0.7610	0.9590	1.1871	1.2367	1.2017	1.3132	1.3673
		5.0	0.5086	0.5066	0.5577	0.5585	0.8048	1.0153	1.0729	1.0473	1.1606	1.2178
		10.0	0.4100	0.4106	0.4610	0.4612	0.7156	0.9090	0.9699	0.9550	1.0607	1.1217
4	16	0.1	0.8549	0.8545	0.9298	0.9295	1.0552	1.2662	1.3097	1.2706	1.3729	1.4165
		0.5	0.7765	0.7685	0.8500	0.8500	1.0283	1.2201	1.2671	1.2315	1.3380	1.3879
		1.0	0.6948	0.6959	0.7597	0.7678	0.9685	1.1643	1.2188	1.1873	1.2986	1.3551
		5.0	0.4612	0.4510	0.5465	0.6115	0.7797	0.9777	1.0371	1.0135	1.1353	1.2100
		10.0	0.3953	0.3899	0.4611	0.5171	0.6574	0.8650	0.9262	0.9140	1.0378	1.1272

Table 1.

S = 0.0												
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	C <sub>0</sub>	u <sub>a</sub>									
			0.1	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.008	0.006	0.004	0.002
2	2	0.1	1.1736	1.2152	1.2743	1.3452	1.4867	1.5688	1.5674	1.5531	1.6147	1.6532
		0.5	1.1154	1.1607	1.2255	1.3125	1.4511	1.4831	1.4535	1.5314	1.5955	1.6376
		1.0	1.0548	1.1232	1.1731	1.2557	1.4176	1.4530	1.5160	1.5662	1.5731	1.6191
		5.0	0.8649	0.9359	0.9940	1.1256	1.2709	1.3255	1.3935	1.3908	1.4666	1.4538
		10.0	0.8044	0.8747	0.9335	1.0655	1.2147	1.2727	1.3418	1.3406	1.4184	1.4815
2	8	0.1	1.1036	1.1687	1.2121	1.3284	1.4576	1.4659	1.5203	1.5139	1.5781	1.6203
		0.5	1.0296	1.0794	1.1498	1.2758	1.3960	1.4330	1.4950	1.4861	1.5535	1.6003
		1.0	0.9517	1.0251	1.0819	1.2131	1.3483	1.3947	1.4599	1.4534	1.5244	1.5764
		5.0	0.7037	0.7804	0.8472	0.9901	1.1350	1.2237	1.2982	1.3010	1.3838	1.4538
		10.0	0.6295	0.7058	0.7731	0.9165	1.0819	1.1589	1.2325	1.2306	1.3210	1.3957
3	3	0.1	0.9015	1.0300	1.0800	1.2041	1.3291	1.3694	1.4330	1.4254	1.4949	1.5454
		0.5	0.6837	0.9559	1.0125	1.1437	1.2622	1.3320	1.3984	1.3935	1.4667	1.5223
		1.0	0.6073	0.8918	0.9430	1.0805	1.2315	1.2904	1.3594	1.3570	1.4346	1.4957
		5.0	0.5949	0.6681	0.7354	0.8776	1.0519	1.1300	1.2051	1.2113	1.2985	1.3758
		10.0	0.5314	0.6033	0.6709	0.8121	0.9896	1.0703	1.1464	1.1541	1.2432	1.3238
3	12	0.1	0.9348	1.0640	1.0550	1.1806	1.3083	1.3511	1.4156	1.4086	1.4792	1.5312
		0.5	0.8472	0.9202	0.9783	1.1118	1.2548	1.3083	1.3757	1.3721	1.4489	1.5049
		1.0	0.7597	0.8350	0.8987	1.0380	1.1958	1.2599	1.3303	1.3304	1.4097	1.4740
		5.0	0.5007	0.5901	0.6496	0.7953	0.9798	1.0670	1.1449	1.1547	1.2462	1.3301
		10.0	0.4330	0.5053	0.5746	0.7200	0.9070	0.9967	1.0756	1.0868	1.1803	1.2679
4	4	0.1	0.8317	0.9621	0.9569	1.0869	1.2256	1.2771	1.3442	1.3404	1.4151	1.4734
		0.5	0.7457	0.8186	0.8797	1.0163	1.1700	1.2321	1.3023	1.3019	1.3810	1.4454
		1.0	0.6639	0.7379	0.8033	0.9446	1.1113	1.1831	1.2581	1.2594	1.3428	1.4130
		5.0	0.4491	0.5184	0.5862	0.7283	0.9162	1.0081	1.0851	1.0966	1.1905	1.2784
		10.0	0.3863	0.4533	0.5204	0.6609	0.8512	0.9432	1.0231	1.0360	1.1316	1.2230
4	16	0.1	0.8173	0.8578	0.9435	1.0730	1.2129	1.2657	1.3333	1.3299	1.4053	1.4646
		0.5	0.7251	0.7977	0.8590	0.9904	1.1523	1.2108	1.2873	1.2879	1.3680	1.4340
		1.0	0.6383	0.7096	0.7752	0.9173	1.0873	1.1623	1.2363	1.2408	1.3257	1.3988
		5.0	0.3932	0.4602	0.5274	0.6698	0.8631	0.9389	1.0399	1.0540	1.1510	1.2441
		10.0	0.3219	0.3869	0.4533	0.5942	0.7806	0.8873	0.9692	0.9847	1.0835	1.1800

Table 1.

S = 0.8												
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	C <sub>0</sub>	u <sub>a</sub>									
			0.1	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.009	0.008	0.004	0.002
2	2	0.1	1.2207	1.2963	1.2875	1.4025	1.4847	1.5400	1.5660	1.5428	1.6141	1.6525
		0.5	1.1624	1.2428	1.2398	1.3612	1.4529	1.5240	1.5433	1.5217	1.5935	1.6373
		1.0	1.1017	1.1859	1.1850	1.3160	1.4170	1.4954	1.5168	1.4973	1.5738	1.6194
		5.0	0.9081	0.9976	1.0105	1.1487	1.2714	1.3694	1.3965	1.3841	1.4698	1.5285
		10.0	0.8436	0.9330	0.9473	1.0866	1.2130	1.3152	1.3436	1.3330	1.4206	1.4832
2	8	0.1	1.1464	1.2358	1.2215	1.3422	1.4326	1.5034	1.5229	1.5102	1.5752	1.6176
		0.5	1.0715	1.1563	1.1598	1.2887	1.3912	1.4710	1.4928	1.4738	1.5510	1.5973
		1.0	0.9923	1.0826	1.0938	1.2294	1.3441	1.4333	1.4577	1.4417	1.5225	1.5745
		5.0	0.7404	0.8301	0.8582	1.0084	1.1508	1.2057	1.2276	1.2000	1.2826	1.3432
		10.0	0.6617	0.7575	0.7807	0.9318	1.0778	1.1968	1.2300	1.2253	1.3203	1.3741
3	3	0.1	1.0039	1.0890	1.0910	1.2202	1.3252	1.4084	1.4314	1.4140	1.4934	1.5437
		0.5	0.9251	1.0141	1.0215	1.1614	1.2789	1.3717	1.3972	1.3829	1.4659	1.5211
		1.0	0.8478	0.9403	0.9560	1.0999	1.2288	1.3310	1.3591	1.3478	1.4315	1.4851
		5.0	0.6286	0.7211	0.7483	0.8992	1.0489	1.1720	1.2065	1.2033	1.3002	1.3577
		10.0	0.5514	0.6533	0.6802	0.8311	0.9835	1.1103	1.1460	1.1445	1.2436	1.3025
3	12	0.1	0.9744	1.0592	1.0631	1.1942	1.3022	1.3581	1.4118	1.3954	1.4759	1.5231
		0.5	0.8818	0.9719	0.9871	1.1266	1.2488	1.3457	1.3724	1.3594	1.4441	1.4929
		1.0	0.7928	0.8828	0.9081	1.0518	1.1900	1.2979	1.3276	1.3183	1.4074	1.4575
		5.0	0.5633	0.6516	0.6884	0.8315	0.9729	1.1039	1.1433	1.1437	1.2353	1.2877
		10.0	0.4588	0.5530	0.5801	0.7350	0.8967	1.0332	1.0718	1.0730	1.1730	1.2251
4	4	0.1	0.8712	0.9582	0.9668	1.1027	1.2206	1.3155	1.3448	1.3286	1.4132	1.4714
		0.5	0.7831	0.8714	0.8903	1.0388	1.1654	1.2712	1.3005	1.2909	1.3797	1.4425
		1.0	0.6997	0.7933	0.8148	0.9688	1.1070	1.2231	1.2534	1.2492	1.3423	1.4026
		5.0	0.4782	0.5707	0.5970	0.7496	0.9105	1.0470	1.0876	1.0879	1.1916	1.2527
		10.0	0.4167	0.5017	0.5280	0.6796	0.8422	0.9817	1.0215	1.0214	1.1311	1.2019
4	16	0.1	0.8577	0.9417	0.9505	1.0869	1.2062	1.3026	1.3294	1.3167	1.4020	1.4613
		0.5	0.7597	0.8509	0.8672	1.0115	1.1375	1.2369	1.2639	1.2552	1.3461	1.4080
		1.0	0.6686	0.7620	0.7837	0.9339	1.0804	1.2001	1.2341	1.2280	1.3241	1.3882
		5.0	0.4481	0.5483	0.5749	0.7281	0.8859	1.0311	1.0717	1.0719	1.1767	1.2422
		10.0	0.3812	0.4824	0.5070	0.6600	0.8152	0.9329	0.9667	0.9712	1.0801	1.1529

## V CONGELACION

### i Principios de Congelación

La conservación de un alimento, por congelación, esté éste procesado o en su estado natural depende del control de la destrucción microbiológica por medio de la conservación del agua en forma de hielo, y el almacenamiento a bajas temperaturas, y también de la retardación de la velocidad de los cambios fisiológicos, enzimáticos y no enzimáticos.

Considerando todo el proceso de congelación, todos los requerimientos de calor son relacionados con el calor sensible, requerido para enfriar los productos antes y después de congelados, y el calor latente requerido para congelarlo.

El coeficiente de transferencia de calor para consistencia de congelación debe de ser considerado en términos de:

- a) El calor transferido al producto que es esencialmente un estado inestable de conducción.
- b) La transferencia de calor de la superficie del producto que debe de incluir las resistencias adicionales de la envoltura y la densidad del empacado.

La ecuación para la transferencia de calor suponiendo que las resistencias son aditivas son:

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{d}{K}$$

Ec. 2-66

## MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PRODUCTO.-

Las condiciones de transferencia de calor dentro del producto son esencialmente las de estado inestable. [ver Fig. □]. Los regímenes más importantes, como lo muestra la gráfica, son la de pre-enfriamiento, super-enfriamiento, congelamiento y post-enfriamiento. Algunos autores (Hayakawa-Bakal) en sus estudios, consideran que la zona de super-enfriamiento es de una duración muy pequeña, en muchos casos o que no se llega a presentar, por lo que lo excluyen en sus cálculos.

La conductividad térmica del hielo es 2.45 a 2.60 ( $w/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) (Holdsworth Food Processes and Low Temp, 1970) y la del agua entre 0.50 y 0.63 ( $w/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), o sea que la conductividad térmica del hielo es 4 veces mayor que la del agua, concluyendo de esta manera que una vez que el hielo se forme, el calor va a ser transferido 4 veces más rápido que en el agua.

La forma como se lleva a cabo la congelación de un producto es de afuera hacia el interior de éste, y conforme la congelación va avanzando, a esto se le llama frente de congelación, y va quedando un corazón sin congelar.

Para poder alcanzar el congelamiento total, o sea que este centro o corazón sin congelar desaparezca por completo debe de haber una considerable pérdida de calor sensible. La velocidad del líquido en el corazón sin congelar y de la temperatura y la velocidad de avance de la frontera congelada.

Esto último existe a una temperatura fija i e: cuando el punto inicial de congelamiento del material, y el centro sin congelar buscan el equilibrio térmico con la frontera. El equilibrio es, sin embargo, solamente obtenido cuando la temperatura externa es relativamente alta y la velocidad de avance de la frontera sin congelar es pe-

queña. En caso de un rápido congelamiento el equilibrio no existe.

Conforme avanza la frontera de congelamiento, se libera el calor latente de fusión y además el calor sensible que proviene del centro sin congelar, éstos dos calores deben de alcanzar el medio congelante a través de la capa congelada. La velocidad a la cual el calor puede ser removido es determinada por la velocidad de avance de la frontera.

Esto último depende de la nucleación y el crecimiento de los cristales de hielo.

La velocidad de avance de la frontera ( $= db/dt$ ) es gobernada por la siguiente ecuación (4):

$$C_c \frac{db}{d\theta} = K_1 \left. \frac{dT}{dx} \right|_1 - k_2 \left. \frac{dT}{dx} \right|_2 \quad \text{Ec. 2-67}$$

donde  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura (1) en el hielo y (2) en el agua.

Esta ecuación solo puede ser resuelta si se asume que el medio es inicialmente equilibrado en el punto de congelamiento y exista un gradiente lineal entre la superficie del producto y la frontera congelante (i.e. ignorando el calor específico del hielo).

Bajo estas condiciones la ecuación se reduce a:

$$C_c \frac{db}{d\theta} = K_1 \left. \frac{dT}{dx} \right|_1 \quad \text{Ec. 2-68}$$

$$b = \sqrt{\left( \frac{2 K_1 \Delta T}{C_c} \cdot \theta \right)} \quad \text{Ec. 2-69}$$

La correspondiente solución para el modelo cilíndrico es

$$\frac{1}{2}(r^2 - (r-b)^2) - (r-b) \ln \frac{r}{r-b} = \frac{2K_1 \Delta T}{C_c} \theta \quad \text{Ec. 2-70}$$

y similarmente para el caso de una esfera

$$b^2 - \frac{2}{3} rb^3 = \frac{2K_1 \Delta T}{C_c} \theta \quad \text{Ec. 2-71}$$

#### NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE CRISTALES

El modelo de la forma en que se lleva a cabo la nucleación, es el de que primeramente se forma una partícula de hielo (agente nucleante) y se van formando agregados cristalinos alrededor de esta película.

Se ha propuesto una ecuación para determinar la velocidad de nucleación  $dN/dt$  que es el número de núcleos formados por unidad de tiempo en una unidad de volumen:

$$\frac{dN}{d\theta} = C \exp \phi_1 \quad \text{Ec. 2-72}$$

El crecimiento de los cristales ocurre mucho más rápido que el proceso de nucleación y la velocidad es gobernada por la temperatura y por la velocidad del calor desprendido. El crecimiento de los cristales se ve afectado por la viscosidad de la solución, la cual decrece con el descenso de la temperatura y consecuentemente retarda el proceso. Para compensar este hecho se tiene que la velocidad de crecimiento de los cristales se incrementa con el aumento en la diferencia de temperaturas, i.e., incrementando la velocidad de calor des-

prendido. La temperatura por debajo de la cual es el crecimiento de los cristales declara es del orden de  $-80^{\circ}\text{C}$ .

El crecimiento de los cristales de hielo se ve afectado por las membranas y poros que lo contienen. Los cristales pueden crecer en las áreas intracelulares y extracelulares. En general, un enfriamiento lento produce cristales grandes localizadas en las áreas extracelulares y un rápido enfriamiento produce cristales pequeños localizados en ambas partes.

El hecho de un rápido congelamiento produce un material de una calidad más aceptable (textura), indicándonos de esta manera que la formación intercelular de hielo es deseable.



NOMENCLATURA

- C = Concentración de factores vulnerables
  - Cc = Calor latente de congelamiento
  - D = Reducción decimal o velocidad de muerte térmica
  - d = Grosor o diámetro de la partícula
  - Fp = Valor de esterilización
  - h<sub>1</sub> = Coeficiente de transferencia de calor externo
  - h<sub>2</sub> = Coeficiente de transferencia de calor del empaque
  - IT = Temperatura inicial del alimento procesado
  - K<sub>1</sub> = Conductividad térmica del hielo
  - K<sub>2</sub> = Conductividad térmica del agua
  - n = Concentración de factores vulnerables
  - RT = Temperatura de autoclave
  - R = Coeficiente de intercepción
  - r = Radio
  - T = Temperatura
  - Tr = Temperatura de referencia
  - TDT = Curva de tiempo de muerte térmica
  - z = Pendiente de la curva de tiempo de muerte térmica
- 
- θ = Tiempo
  - θe = Tiempo en el que se termina el proceso de calentamiento

CAPITULO 3

MODELOS DE CONDUCCION EN ALIMENTOS

	PAGINA
I INTRODUCCION	88
II GENERALIDADES	88
III MODELO: ESTIMACION DE LA TEMPERATURA CENTRAL DE UN ALIMENTO ENLATADO DURANTE EL PERIODO INICIAL DE CALENTAMIENTO O ENFRIAMIENTO	93
IV MODELO: MODELO PARA PREDECIR LA TEMPE RATURA TRANSIENTE EN EL ALIMENTO DURANTE EL CONGELADO Y DESCONGELADO	101
V NOMENCLATURA	113

## CAPITULO 3

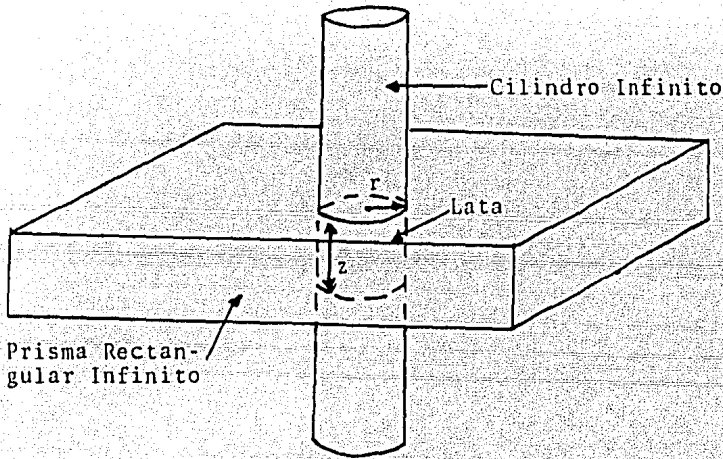
### I INTRODUCCION

En los capítulos anteriores se han enfocado varios aspectos de la conducción. El primero fue sobre las generalidades y en el segundo se tocó en específico, un proceso en el cual es fundamental la conducción, este tipo de proceso es la esterilización. Este capítulo se desarrollará en base a modelos de conducción en alimentos.

### II GENERALIDADES

Cuando se realiza un proceso de conservación por lo general el alimento está contenido dentro de un recipiente, por ejemplo en la esterilización, el recipiente puede ser un frasco o una lata, y cuando el contenido del envase no se mueve, el calentamiento se lleva a cabo por conducción. La temperatura en cada punto del recipiente estará en función del tiempo y será diferente según la posición de que se trate.

La transmisión de calor se lleva a cabo a través de la superficie cilíndrica y por los extremos planos del bote. Auxiliándonos de la regla de Newman resolveremos el problema de la transmisión de calor, esta regla considera al bote o lata como un cilindro finito constituido por la intersección de un prisma rectangular con un cilindro finito, como se muestra en la siguiente figura.



La formación de un cilindro finito (lata) por la intersección de un prisma rectangular infinito y un cilindro infinito

La regla de Newman nos dice que la solución al problema de la transmisión para un cuerpo finito es igual al producto de las soluciones para los cuerpos infinitos que forman al cuerpo finito. Esta regla nos ayudará bastante en este capítulo para entender como se llega a los modelos matemáticos de la conducción de calor.

Otro concepto que es importante tener en cuenta, son las funciones de Bessel  $J_0(x)$  y  $J_1(x)$  que son expresiones matemáticamente análogas a las funciones trigonométricas seno y coseno. Las funciones de Bessel son comunes en problemas que consideran una geometría cilíndrica. Estas funciones se encuentran tabuladas en forma similar a las funciones trigonométricas. Se representan en la siguiente tabla. (Tabla 3-1)

TABLA 3-1

FUNCIONES BESSEL								
$x$	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$x$	$J_2(x)$	$J_3(x)$	$x$	$J_4(x)$	$J_5(x)$
0.0	1.0000	.0000	5.0	-.1776	-.3276	10.0	-.2454	.0435
0.1	.9975	.0499	5.1	-.1443	-.3371	10.1	-.2490	.0192
0.2	.9900	.0995	5.2	-.1103	-.3432	10.2	-.2526	-.0069
0.3	.9776	.1481	5.3	-.0755	-.3460	10.3	-.2577	-.0213
0.4	.9604	.1960	5.4	-.0412	-.3453	10.4	-.2634	-.0355
0.5	.9385	.2423	5.5	-.0068	-.3414	10.5	-.2696	-.0499
0.6	.9120	.2867	5.6	.0270	-.3343	10.6	-.2776	-.0642
0.7	.8812	.3290	5.7	.0599	-.3241	10.7	-.2864	-.0784
0.8	.8463	.3688	5.8	.0917	-.3110	10.8	-.2959	-.0922
0.9	.8075	.4059	5.9	.1220	-.2951	10.9	-.3051	-.1053
1.0	.7652	.4401	6.0	.1506	-.2767	11.0	-.3132	-.1178
1.1	.7196	.4709	6.1	.1773	-.2559	11.1	-.3202	-.1293
1.2	.6711	.4983	6.2	.2017	-.2329	11.2	-.3259	-.1399
1.3	.6201	.5220	6.3	.2238	-.2081	11.3	-.3302	-.1493
1.4	.5669	.5419	6.4	.2433	-.1816	11.4	-.3331	-.1575
1.5	.5118	.5579	6.5	.2601	-.1538	11.5	-.3347	-.1645
1.6	.4554	.5699	6.6	.2740	-.1250	11.6	-.3350	-.1700
1.7	.3990	.5778	6.7	.2851	-.0953	11.7	-.3340	-.1741
1.8	.3400	.5815	6.8	.2931	-.0652	11.8	-.3318	-.1768
1.9	.2819	.5812	6.9	.2981	-.0349	11.9	-.3284	-.1780
2.0	.2239	.5767	7.0	.3001	-.0047	12.0	-.3238	-.1775
2.1	.1666	.5683	7.1	.2991	.0252	12.1	-.3180	-.1752
2.2	.1104	.5560	7.2	.2951	.0543	12.2	-.3111	-.1710
2.3	.0555	.5399	7.3	.2882	.0826	12.3	-.3031	-.1650
2.4	.0025	.5202	7.4	.2786	.1096	12.4	-.2940	-.1573
2.5	-.0484	.4971	7.5	.2663	.1352	12.5	-.2839	-.1478
2.6	-.0968	.4705	7.6	.2516	.1592	12.6	-.2728	-.1365
2.7	-.1424	.4416	7.7	.2346	.1813	12.7	-.2607	-.1235
2.8	-.1850	.4097	7.8	.2154	.2014	12.8	-.2477	-.1088
2.9	-.2243	.3754	7.9	.1944	.2192	12.9	-.2338	-.0922
3.0	-.2601	.3391	8.0	.1717	.2346	13.0	-.2190	-.0738
3.1	-.2921	.3009	8.1	.1473	.2476	13.1	-.2033	-.0535
3.2	-.3202	.2613	8.2	.1222	.2580	13.2	-.1867	-.0315
3.3	-.3443	.2207	8.3	.0964	.2657	13.3	-.1692	-.0078
3.4	-.3643	.1792	8.4	.0699	.2708	13.4	-.1508	.0165
3.5	-.3801	.1374	8.5	.0419	.2731	13.5	-.1315	.0349
3.6	-.3918	.0955	8.6	.0146	.2728	13.6	-.1113	.0540
3.7	-.4002	.0538	8.7	-.0125	.2707	13.7	-.0902	.0711
3.8	-.4056	.0123	8.8	-.0402	.2661	13.8	-.0681	.0841
3.9	-.4088	-.0272	8.9	-.0653	.2599	13.9	-.0450	.0915
4.0	-.4097	-.0660	9.0	-.0880	.2523	14.0	-.0210	.0925
4.1	-.4083	-.1033	9.1	-.1083	.2424	14.1	.0039	.0850
4.2	-.4046	-.1386	9.2	-.1267	.2304	14.2	.0278	.0775
4.3	-.3980	-.1719	9.3	-.1437	.2164	14.3	.0515	.0695
4.4	-.3887	-.2023	9.4	-.1594	.2006	14.4	.0748	.0600
4.5	-.3770	-.2311	9.5	-.1739	.1833	14.5	.0975	.0490
4.6	-.3631	-.2586	9.6	-.1873	.1646	14.6	.1195	.0355
4.7	-.3473	-.2851	9.7	-.1996	.1446	14.7	.1405	.0200
4.8	-.3301	-.3095	9.8	-.2108	.1234	14.8	.1602	.0025
4.9	-.3117	-.3317	9.9	-.2209	.1011	14.9	.1785	-.0155

En el procedimiento para calcular la distribución de temperaturas "Y" del recipiente. Primeramente calcularemos la distribución de temperaturas (Yp) para la transferencia de calor a través de un prisma rectangular infinito y es:

$$Y_p = \frac{T_A - T_z}{T_A - T_I} \quad \text{Ec. 3-1}$$

donde Tz es la temperatura en cualquier punto del prisma en función de la profundidad (z) y tiempo.

Ahora para un cilindro infinito es:

$$Y_c = \frac{T_A - T_r}{T_A - T} \quad \text{Ec. 3-2}$$

donde Tr es la temperatura en cualquier punto del cilindro en función del radio y tiempo.

Por lo tanto la distribución en una lata es la siguiente:

$$Y_{Lata} = Y_p \cdot Y_c \quad \text{Ec. 3-3}$$

La solución de Yp, Yc y YL se expresan a continuación en forma de series infinitas:

$$Y = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos \beta_m \frac{z}{l} e^{(-\beta_m \cdot \frac{K}{\rho C} \cdot \frac{4}{l} \cdot t)} \quad \text{Ec. 3-4}$$

donde:

m = índice numérico 1, 2, 3.....

z = cualquier posición en el prisma a partir del plano central

l = grosor del prisma C = calor específico (capac. específica)

ρ = densidad del alimento K = conductividad térmica en el alimento

$$\beta_m = \frac{\pi}{2} (2m - 1)$$

Para un cilindro infinito:

$$Y_c = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n \cdot J_1(\beta_n)} \cdot e^{(-\beta_n^2 \cdot \frac{K}{\rho C} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot t)} \quad \text{Ec. 3-5}$$

donde:

- n = índice numérico 1, 2, 3 .....
- J<sub>0</sub> = función de Bessel de orden cero tabla 3-1
- J<sub>1</sub> = función de Bessel de primer orden tabla 3-1
- n = enésima raíz de J<sub>0</sub> n = 0 tabla 3-2
- r = cualquier posición radial
- R = radio del cilindro

Para un cilindro finito o lata:

$$Y_{lata} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cdot \frac{\cos(\beta_m 2z)}{1} \cdot \frac{2 \cdot J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n \cdot J_1(\beta_n)} \cdot e^{-\frac{(\beta_n^2 + 4 \frac{m^2}{l^2}) \cdot K}{\rho C} t} \quad \text{Ec. 3-6}$$

En la Ecuación 3-6 han aparecido diferentes términos que nos serán familiares en el desarrollo de distintos modelos de conducción que serán expresados a continuación.

TABLA 3-2

VALORES DE  $\beta_n$  PARA  $J_0(\beta_n) = 0$  Y EL VALOR CORRESPONDIENTE A  $J_1(\beta_n)$

	$\beta_n$	$J_1(\beta_n)$
$\beta_1$	2.4048	+ 0.5191
$\beta_2$	5.5201	- 0.3404
$\beta_3$	8.6537	+ 0.2715
$\beta_4$	11.7915	- 0.2324
$\beta_5$	14.9309	+ 0.2065

Las curvas de calentamiento o enfriamiento pueden ser graficadas a partir de los datos experimentales o por medio de un modelo matemático. A continuación presentaremos el desarrollo de un modelo matemático.

### III MODELO: ESTIMACION DE LA TEMPERATURA CENTRAL DE UN ALIMENTO ENLATADO DURANTE EL PERIODO INICIAL DE CALENTAMIENTO O ENFRIAMIENTO

La temperatura adimensional  $(T - T_w)/(T_1 - T_0)$  en el centro de un cilindro finito es calculada por la Ecuación 3-7 en la fase de enfriamiento y por la Ecuación 3-8 en la fase de calentamiento.

$$\frac{T - T_w}{T_1 - T_0} = \frac{T_1 - T_w}{T_1 - T_0} \cdot Y(Bc) - Y(Bc + Bb) \quad \text{Ec. 3-7}$$

$$Y(B) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1(\beta_k)} \cdot \frac{1}{(2n-1)\beta_k} \cdot (-1)^{n+1} \cdot \exp^{(-AB)} \quad \text{Ec. 3-8}$$

donde  $A = (\beta_k/m)^2 + \pi^2 (2n-1)^2$  y  $B = t/l^2 \alpha$

Ahora si multiplicamos la Ec. 3-7 por  $T_1 - T_0$  obtenemos

$$T - T_w = \frac{T_1 - T_w}{T_1 - T_0} \cdot \Delta T_A - \Delta T_B \quad \text{Ec. 3-9}$$

donde  $\Delta T_A = (T_1 - T_0) \cdot Y(Bc)$  y  $\Delta T_B = (T_1 - T_0) \cdot Y(Bc + Bb)$

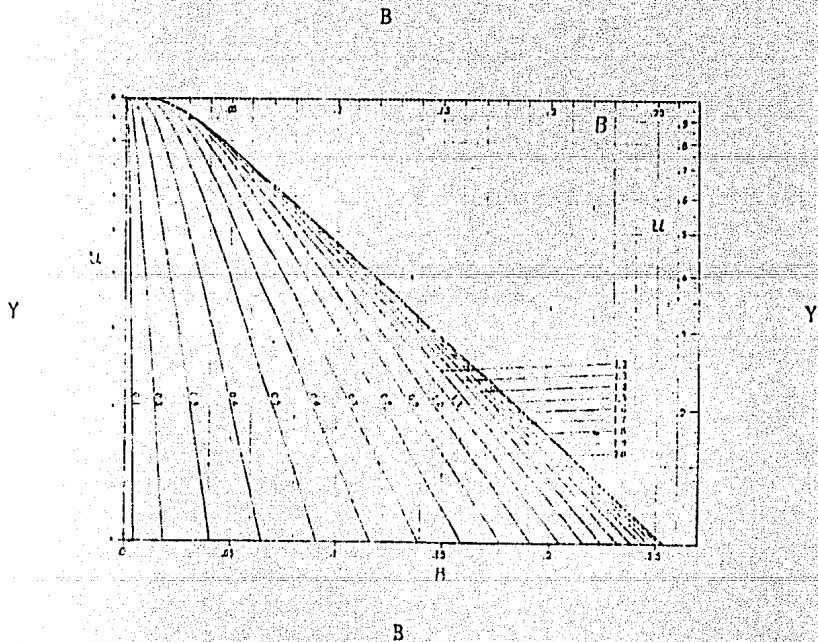
Las Ecuaciones 3-8 y 3-9 nos indican que hay una semejanza grande entre la fase de calentamiento y la fase de enfriamiento.

Como se vio en la parte de generalidades de este capítulo, uno puede realizar los cálculos para un cilindro finito partiendo de un



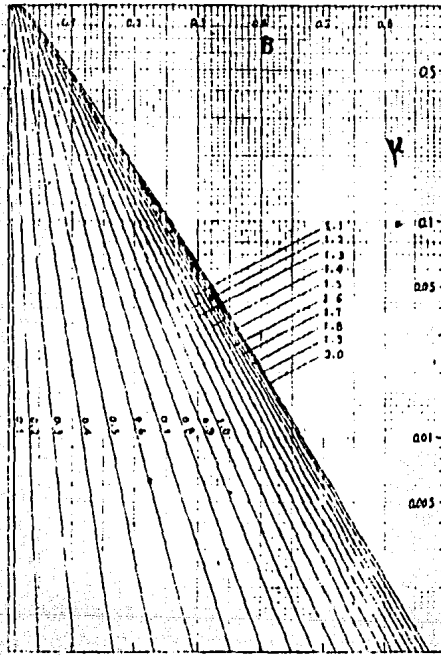
prisma infinito y un cilindro infinito por medio de la regla de Newman, pero es más conveniente tener gráficas para un cilindro finito ya que esto nos ahorra muchos cálculos.

La función  $Y(B)$  en las ecuaciones anteriores nos representa una temperatura adimensional en el centro del alimento durante la fase de calentamiento. Las curvas se obtienen graficando  $Y(B)$  vs.  $B$  que es el número de FOURIER en papel semilogarítmico. A continuación se presentan dos ejemplos de estas gráficas.



GRAFICA 3-1

Gráfica de temperaturas de respuesta para un cilindro finito  $1 \geq Y \geq 0.1$ . El valor de forma para cada curva está señalado por el valor localizado por el valor que se encuentra en cada curva.



GRAFICA 3-2

Gráfica de temperaturas de respuesta para un cilindro finito  $1 \geq Y \geq 0.001$ . El valor de forma para cada curva está señalado por el valor localizado por el valor localizado por el valor que se encuentra en cada curva.

En el siguiente ejemplo se verá como se utiliza este modelo y como se obtienen curvas de calentamiento y enfriamiento.

Valores aproximados para el factor de forma para las latas metálicas más usadas en la industria.

TABLA 3

Medida (en S)	Shape Factor (S)	Nominal Can Size	Shape Factor (S)
1/2 X 3/8	0.584	307 X 509	0.281
1/2 X 3/4	0.550	307 X 413	1.110
1/2 X 1 1/4	0.412	307 X 302	0.936
3/4 X 3/4	0.530	307 X 305	0.905
3/4 X 1 1/4	0.285	307 X 508	0.770
3/4 X 1 3/8	1.080	307 X 514	0.655
3/4 X 1 3/4	0.790	307 X 400	0.515
1 X 1 1/4	0.570	307 X 400	0.452
1 X 1 1/2	0.510	307 X 409	0.392
1 X 1 3/4	0.515	307 X 509	0.310
1 X 2 1/8	0.480	307 X 510	0.313
1 X 2 1/2	0.417	307 X 513	0.305
1 X 2 3/4	0.355	307 X 504	0.239
1 1/4 X 1 1/4	0.286	401 X 505.5	0.988
1 1/4 X 2 1/8	0.229	401 X 507.5	0.930
1 1/4 X 2 3/8	0.718	401 X 411	0.451
1 1/4 X 2 1/2	0.450	401 X 407	0.750
1 1/4 X 2 3/4	0.396	401 X 414	0.400
1 1/2 X 1 1/2	0.353	491 X 700	0.313
1 1/2 X 2 1/4	0.243	592 X 510	0.474
1 1/2 X 2 3/4	0.683	693 X 508	0.730
1 3/4 X 1 1/4	0.248	693 X 700	0.150
1 3/4 X 2 1/4	0.331	693 X 412	0.360

Valores de Y(B) para diferentes valores de S.

TABLA 4

Y(B)/S	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
1	0.014197	0.0211023	0.030289	0.041400	0.0542148
2	0.0191990	0.0291167	0.0417115	0.0557557	0.0724291
3	0.0231179	0.0351751	0.0491419	0.0634551	0.0827462
4	0.0261157	0.0391494	0.0531556	0.0686706	0.0906529
5	0.0281113	0.0422812	0.0551615	0.0720211	0.0953401
6	0.0291091	0.0442152	0.0571651	0.0746151	0.0986151
7	0.0291110	0.0450251	0.0579119	0.0754909	0.0995823
8	0.0291154	0.0456250	0.0582708	0.0761555	0.0999357
9	0.0291150	0.0461077	0.0584700	0.0765909	0.0999511
10	0.0291155	0.0464710	0.0586156	0.0768138	0.0999551
11	0.0291140	0.0467157	0.0587125	0.0769161	0.1000051
12	0.0291154	0.0468665	0.0587791	0.0769718	0.1000055
13	0.0291179	0.0469450	0.0588021	0.0769957	0.1000057
14	0.0291152	0.0469811	0.0588063	0.0769991	0.1000057
15	0.0291192	0.0469815	0.0588152	0.0769951	0.1000057
16	0.0291000	0.0469169	0.0588021	0.0769991	0.1000057

Y(B)/S	0.5	0.6	0.7	0.8	
17	0.0281140	0.0467072	0.0587177	0.0769100	0.1000051
18	0.0281153	0.0464200	0.0585611	0.0767093	0.1000099
19	0.0281010	0.0461553	0.0583735	0.0765729	0.1000071
20	0.0281111	0.0458197	0.0581592	0.0764021	0.1000051
21	0.0281116	0.0454711	0.0579193	0.0762126	0.1000047
22	0.0281118	0.0451116	0.0576661	0.0760095	0.1000048
23	0.0281011	0.0447391	0.0574071	0.0757871	0.1000090
24	0.0281015	0.0443652	0.0571421	0.0755452	0.1000095
25	0.0281010	0.0439900	0.0568711	0.0752851	0.1000098
26	0.0281010	0.0436146	0.0565951	0.0750071	0.1000098
27	0.0281010	0.0432391	0.0563151	0.0747211	0.1000098
28	0.0281010	0.0428636	0.0560311	0.0744271	0.1000098
29	0.0281010	0.0424881	0.0557431	0.0741251	0.1000098
30	0.0281010	0.0421126	0.0554511	0.0738151	0.1000098

Y(B)/S	1.0	1.5	
31	0.0191010	0.0309999	0.0430557
32	0.0191010	0.0281220	0.0390619
33	0.0191010	0.0252630	0.0350681
34	0.0191010	0.0224101	0.0310743
35	0.0191010	0.0195629	0.0270805
36	0.0191010	0.0167157	0.0230867
37	0.0191010	0.0138685	0.0190929
38	0.0191010	0.0110213	0.0150991
39	0.0191010	0.0081741	0.0111053
40	0.0191010	0.0053269	0.0071115
41	0.0191010	0.0024797	0.0031177
42	0.0191010	0.0006325	0.0001239

Una lata de almejas de 211 X 400 fue procesada en un autoclave a 245°F por 60 minutos. El efecto de calentamiento durante C.U.T. es corregido por la siguiente fórmula:

$$X = C.U.T. \times 0.58$$

$$X = 3 \text{ min.} \times 0.58 = 1.74 \text{ min.}$$

El factor de forma para la lata se puede calcular con las siguientes fórmulas:

$$s = \frac{a}{l}$$

a = radio interno de la lata en pulgadas

l = longitud interna de la lata

$$s = \frac{\text{diámetro interno}}{2 * (\text{altura nominal} - 3/8 \text{ in})}$$

para mayor facilidad estos valores están reportados en la Tabla 3-3 siendo para nuestro caso de 211 X 400 s igual a 0.355.

Es deseable escoger un valor pequeño de Y (B) para poder calcular la difusividad térmica, tomando Y (B) = 0.1 para calcular el valor de B, entramos a la Tabla 3-4, con Y (B) = 0.1 y s = 0.355 y encontramos B = 0.05399.

La altura normal de la lata es calculada como sigue:

$$l = \text{altura nominal} - 3/8$$

$$l = 4 - 3/8 = 3.625 \text{ in.}$$

Ahora utilizando la siguiente ecuación calcularemos la difusividad térmica:

$$\theta = B \cdot l^2/\alpha \quad \text{Ec. 3-10}$$

Pero de la Ec. 3-10 no conocemos  $\theta$ , éste lo calculamos con la siguiente ecuación:

$$\frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} = Y(B) \quad \text{Ec. 3-11}$$

Sustituyendo los valores que ya conocemos en la ecuación anterior

$$\frac{T_1 - T}{245 - 171} = 0.1$$

$$T_1 - T = 7.4$$

En la Gráfica 3-3 entramos con el valor  $T_1 - T = 7.4$  y encontramos el tiempo  $\theta = 49.7$  min.

Rearreglando la Ecuación 3-10 obtenemos la difusividad térmica.

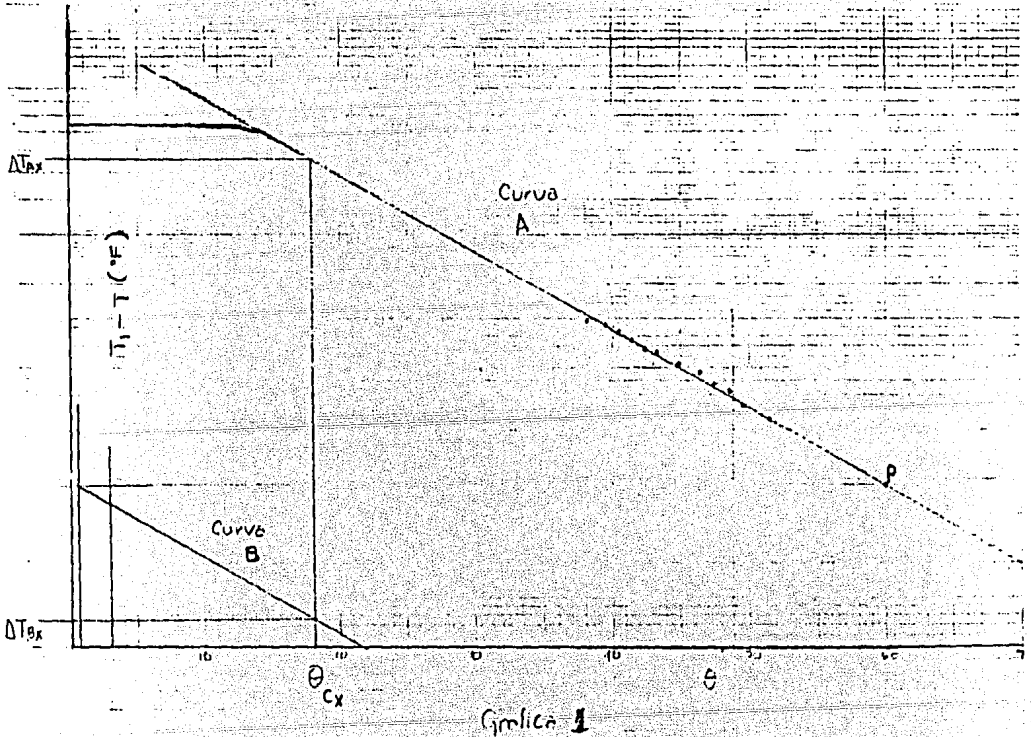
$$\alpha = \beta \cdot \frac{l^2}{\theta}$$

$$\alpha = 0.05399 \cdot \frac{(3.625)^2}{49.7}$$

$$\alpha = 0.0157 \text{ in}^2/\text{min}$$

Ahora en el caso de que se tenga la difusividad térmica, ésta se podrá utilizar, sin ningún problema en el cálculo de la curva de calentamiento.

Para realizar el cálculo de la curva de calentamiento, supongo diferentes temperaturas  $T$  y cálculo  $Y$  (B), con este valor entro a las gráficas 3-1 y 3-2 cálculo B que lo sustituyo en la Ecuación 3-10 y así obtengo el valor de  $\theta$  (min). De esta manera ya tengo  $T_1 - T$ , y  $\theta$  para poder graficar la curva de calentamiento.



A continuación se presenta una tabla para diferentes  $Y(B)$  y  $B_i$ , con  $T_1 - T$  y  $\theta$ .

$Y(B)$	$T_1 - T$	$B_i$	$\theta$
0.1	7.4	0.05399	49.50
0.11	8.14	0.05274	48.46
0.12	8.88	0.05148	47.30
0.13	9.62	0.05022	46.15
0.14	10.36	0.04896	44.99
0.15	11.10	0.04771	43.84
0.16	11.84	0.04645	42.68
0.17	12.58	0.04519	41.53
0.18	13.32	0.04394	40.37
0.19	14.06	0.04268	39.22
0.20	14.80	0.04142	38.06

Con estos datos podemos graficar la curva de calentamiento que se observa en la gráfica # 1 y que es la curva A.

Para la curva de enfriamiento se tienen los siguientes pasos:

1. Localizar el punto P en la gráfica 1 que indica el final de la fase de calentamiento.
2. Trasladar la parte de la curva de calentamiento que se encuentra bajo el punto P hacia la izquierda hasta llegar con el cero corregido originando con esto la curva B.
3. Cambiar el rótulo de la abscisa de la gráfica de calentamiento de  $\theta$  por  $\theta_c$ , tomando un determinado  $\theta$  se sube verticalmente en la gráfica y se encuentran los  $\Delta T_A$  y  $\Delta T_B$  de las curvas A y B respectivamente.

En la gráfica 1 se muestran las diferencias de temperatura  $\Delta T_{AX}$  y  $\Delta T_{BX}$  para un tiempo  $\theta_{cx}$

De esta manera hemos encontrado los valores de  $\Delta T_{AX}$  y  $\Delta T_{BX}$  de la ec. 3-9 y podemos calcular el valor de  $T - T_w$  y realizar la gráfica de enfriamiento.

#### IV MODELO: PARA PREDECIR LA TEMPERATURA TRANSIENTE EN EL ALIMENTO DURANTE EL CONGELADO Y DESCONGELADO

El modelo puede ser aplicado tanto a congelamiento como al descongelamiento de un alimento, este se desarrollará para el congelamiento.

El periodo de congelamiento está dividido en cuatro partes que son:

- 1) Pre-enfriamiento
- 2) Superenfriamiento
- 3) Cambio de fase o congelación
- 4) Período de temperado o post-enfriamiento

El periodo de superenfriamiento se ha visto que es demasiado corto motivo por el cual no se tomará en cuenta.

El modelo es desarrollado para una placa infinita, la cual por un lado está aislada y el flujo de calor es unidireccional como se muestra en la siguiente figura.

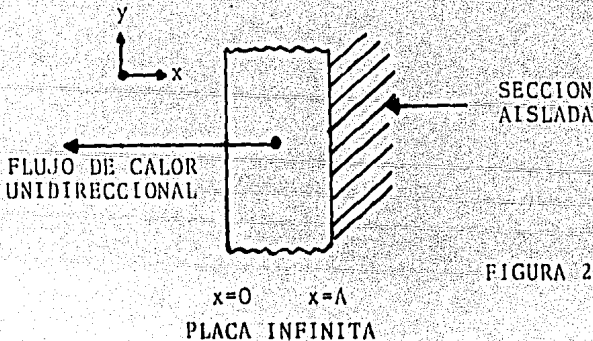


FIGURA 2



En la figura 2 se muestra una descripción sistemática del modelo juzgado.

Primero considerando la placa sin congelar a una temperatura uniforme. Segundo el flujo de calor es unidireccional. Ahora la placa del alimento se pone en un ambiente con una temperatura uniforme y constante. Para que ocurra el congelamiento del producto, la temperatura ambiental debe de ser menor al punto de congelamiento del alimento.

En la etapa inicial, la temperatura del cuerpo va decreciendo a través de este, sin que haya un cambio de fase (fig. 2A). Este etapa corresponde al período de pre-enfriamiento. Cuando la temperatura de la superficie es igual a la temperatura del punto inicial de congelamiento  $T_q$ , el congelamiento es iniciado en la superficie y una fase mixta se mueve con dirección a la transferencia de calor (fig. 2B). La temperatura en la parte donde se encuentra la fase congelada y la fase descongelada es constante a  $T_q$  y la cantidad de materia congelada es de en  $x=0$ . A este período se le conoce como primer período de cambio de fase.

La longitud de este período depende de las propiedades térmicas, del espesor y del gradiente de temperaturas. Este período termina cuando la temperatura de la superficie alcanza el punto final de congelamiento  $T_s$  o cuando el frente inicial de congelamiento alcanza la superficie aislada, lo que ocurra primero. Ahora cuando el frente inicial de congelamiento alcanza la superficie aislada, hay un enfriamiento lento y existe una zona parcialmente congelada a través del cuerpo (fig. 2C). Esta etapa es el período de cambio de la fase intermedia y termina cuando la temperatura de la superficie alcanza el punto final de congelamiento.

$T_s$  representa la temperatura a la cual el alimento se aproxima al congelamiento total. Esta etapa es el segundo período cambio de

fase (fig. 2D). Conforme transcurre el tiempo de congelamiento, la parte frontal de congelamiento alcanza la parte aislada y todo el material se encuentra completamente congelado. En este momento se inicia el periodo de temperado (fig. 2E).

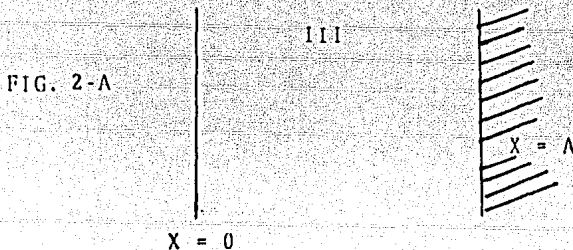
Cuando una placa es congelada rápidamente y tiene un espesor grueso, se presentan tres zonas. Bajo estas circunstancias, la superficie alcanza la temperatura de punto de congelamiento antes que la parte frontal de congelamiento alcance la zona aislada. Esto se puede ver en la fig. 2F).

El modelo matemático describe cada uno de los periodos anteriores y a continuación se describirá cada parte por el modelo. Para resolver el modelo se aplicaron las siguientes condiciones de frontera y condiciones iniciales.

- I. La transferencia de calor es unidireccional.
- II. La transferencia de calor es por conducción térmica.
- III. Las propiedades físicas son independientes de la temperatura, pero pueden cambiar de una fase a otra.
- IV. El cambio de volumen ocasionado por el cambio de fase es despreciable.
- V. La distribución de sólidos en la zona de congelado tiene una relación lineal con la distancia.
- VI. Se impone como condición de frontera que la transferencia de calor es lineal.

A continuación desarrollaremos el modelo para cada parte de este.

#### PERIODO DE ENFRIAMIENTO



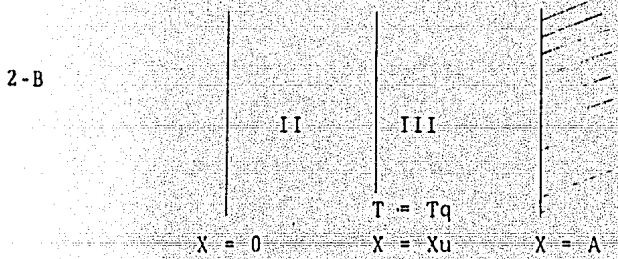
La figura 2-A nos muestra este periodo, la distribución de temperaturas está dada por:

$$\frac{T_3 - T_a}{T_{3o} - T_a} = \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \beta n_3 \cos (\beta n_3 x / a) \cdot \exp (-F_o \beta^2 n_3)}{\beta n_3 + \sin \beta n_3 \cos \beta n_3} \quad 3-12$$

donde  $\beta n_3, \tan \beta n_3 = \beta i_3$       3-13

Estas ecuaciones 3-12 y 3-13 las utilizamos para predecir las temperaturas en el periodo de pre-enfriamiento durante el congelado o durante el periodo de calentamiento durante el descongelado.

PRIMER PERIODO DE CAMBIO DE FASE



La fig. 2-B nos muestra este periodo, y las siguientes ecuaciones 3 - 14, 3 - 15 y 3 - 16 representan la transferencia de calor en el alimento durante el primer cambio de fase.

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{E}{K_2} = 0 \quad 0 < X \leq X_u \quad (3-14) \quad \text{donde } E = \rho L \frac{\partial f}{\partial \theta} \quad (3-15)$$

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_3} \frac{\partial T_3}{\partial \theta} \quad X_u < X \leq a \quad (3-16)$$

Para resolver las ecuaciones anteriores, se imponen las siguientes condiciones de frontera y las condiciones iniciales.

$$K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}(0,0) = H (T_2(0,0) - T_a) \quad (3-17) \quad T_2(X_u,0) = T_3(X_u,0) = T_q \quad (3-18)$$

$$K_2 \frac{\partial T_2(Xu, \Theta)}{\partial x} = K_3 \frac{\partial T_3(Xu, \Theta)}{\partial x} \quad (3-19) \quad \frac{\partial T_3(a, \Theta)}{\partial x} = 0 \quad (3-20)$$

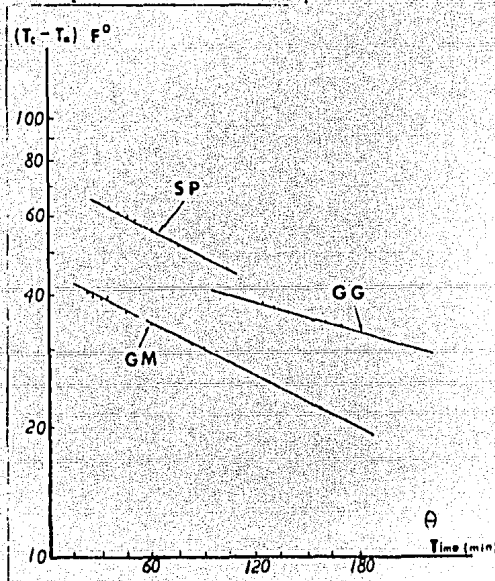
$$T_3(a, \Theta) = T_c \quad (3-21) \quad Xu(0) = 0 \quad (3-22)$$

$$T_3(x, 0) = Ax + Bx^2 + C \quad (3-23)$$

La ecuación (ec.3-14) es la ecuación de conducción de calor para una parte de la zona congelada, que se obtiene suponiendo que el término de acumulación de calor es despreciable. La ecuación (ec. 3-16) que es la ecuación diferencial de conducción de calor en la zona sin congelar durante el proceso de congelamiento y la parte congelada cuando se tiene el deshielo.

Además de las condiciones impuestas anteriormente, fue necesario imponer restricciones adicionales para obtener una solución aproximada de la ec. 3-14 y 3-16.

Se observó de datos experimentales una relación lineal entre el logaritmo de la temperatura en la superficie aislada y el tiempo.



Gráfica de temperatura como función del tiempo. En esta gráfica se muestra el avance de la temperatura en la superficie aislada de la placa después que se comienza el congelamiento, como función del tiempo.

GG = Gel de Gelatina  
 GM = Carne Molida  
 SP = Solución Azucarada al 50% con G.05% de pectina

De esta observación se propuso que la temperatura en la superficie siguiera la siguiente relación:

$$T_c - T_a = (T_c^0 - T_a) \cdot u^{\theta/\theta_{\max}} \quad (3-24)$$

donde

$$u = (T_q - T_a) / (T_c^0 - T_a) \quad (3-25)$$

Se tiene también que la localización del frente como función del tiempo puede ser aproximada por la siguiente relación:

$$X_u = \lambda \cdot t^2 \quad (3-26)$$

basándose en la condición V, la distribución de la fracción sólida es dada por:

$$f_s = f_{s*2} (1 - X/X_u) \quad (3-27)$$

donde  $f_{s*2}$  es la función sólida en la superficie en función del tiempo. La distribución de temperaturas en la zona sin congelar se supone que es de la forma de la ec. 3-23, los valores de las ctes. de esta ecuación fueron obtenidos de las ecuaciones 3-20, 3-21, 3-22 y son:

$$A = 2(T_c - T_q) / (a - X_u)$$

$$B = (T_c - T_q) / (a - X_u)^2$$

$$C = T_q.$$

Integrando la ec. 3-16 de  $X = X_u$  a  $X = a$ , se tiene la siguiente relación:

$$\frac{T_c - T_q}{a - X_u} = \frac{1}{3\alpha_1} \left\{ (a - X_u) \frac{dT_c}{d\theta} - (T_c - T_q) \frac{dX_u}{d\theta} \right\} \quad (3-28)$$

De las ecuaciones 3-24 y 3-26 la derivación de  $X_u$  y  $T_c$  con respecto al tiempo son evaluados y sustituidos en la ec. 3-28

$$3\alpha_1 = 2(a - X_u) \sqrt{\lambda X_u} - (a - X_u)^2 \frac{(T_c - T_q)}{(T_c - T_q)} \frac{\ln u}{\sqrt{a}} \quad (3-29)$$

Cuando el valor de  $\lambda$  es calculado en el tiempo al cual el frente congelado alcanza la mitad del espesor de la placa, la ec. 3-29 se reduce a:

$$\sqrt{\lambda} = 3\alpha_3/a\sqrt{a} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{(T_c^* - T_a) \ln u}{4 (T_c^* - T_q)} \right\} \quad (3-30)$$

donde  $T_c^*$  es la temperatura de la superficie aislada en este tiempo en particular. La ec. 3-29 es la solución de la ecuación 3-16.

La solución de la ecuación 3-14 puede ser obtenida integrando esta ecuación con respecto a  $X$  y las constantes de integración son obtenidas de las condiciones de frontera V y VI.

$$T_2(x, \theta) = - \frac{\rho L}{K_2} \left\{ \frac{dfs^*2}{d\theta} \cdot \frac{X^2}{2} - \frac{dfs^*2}{d\theta} \cdot \frac{X^3}{6Xa} + fs^*2 \cdot \frac{X^2}{2X^2u} \cdot \frac{dxu}{d\theta} \right\} Fx + G \quad (3-31)$$

Suponiendo que la fracción de sólido en la superficie es lineal relacionada con la localización del frente congelado ( $fs^*2 = Xu$ ), la ecuación 3-31 se reduce a:

$$T_2(x, \theta) = - \frac{\rho L Q}{2K_2} \cdot \frac{dxu}{d\theta} \left( \frac{X^2 - X^3}{3Xu} + \frac{X^2}{2Xu} \right) + Fx + G \quad (3-32)$$

donde

$$F = \frac{\left( \frac{Bi_2}{a} (T_q - T_a) + \frac{\rho L Q}{2K_2} \cdot \frac{Bi_2}{a} \cdot \frac{dxu}{dt} \left( \frac{2}{3} \frac{X^2u}{2} + \frac{Xu}{2} \right) \right)}{\left( 1 + \frac{Bi_2 Xu}{a} \right)} \quad (3-33)$$

$$G = T_q + \frac{\rho L Q}{2K_2} \cdot \frac{dxu}{dt} \cdot \left( \frac{2X^2u}{3} + \frac{Xu}{2} \right) - Fxu \quad (3-34)$$

De la condición de frontera ecuación 3-21 el valor de  $Q$ , puede ser obtenido:

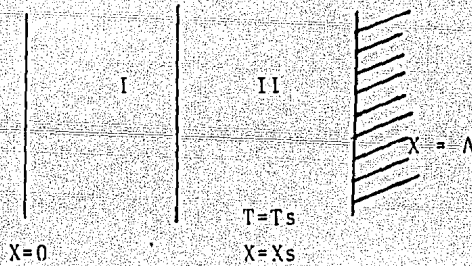
$$Q = \frac{\left[ \frac{2 K_3}{K_1} \frac{(T_c - T_q)}{(a - Xu)} \right] - \left[ Bi_2 \frac{(T_q - T_a)}{a(1 + Bi_2 \frac{Xu}{a})} \right]}{\left\{ \frac{L}{2\alpha_2 C_2} \frac{dxu}{dt} \frac{Bi_2}{a} \left( \frac{2X^2u}{3} + \frac{Xu}{2} \right) - (1 + Xu) \right\}} \quad (3-35)$$

PERIODO DE CAMBIO EN LA FASE INTERMEDIA

Este período comienza cuando termina el anterior y existe si la temperatura de la superficie aislada alcanza el punto final de congelación. Este período no es descrito por el modelo.

SEGUNDO PERIODO DE CAMBIO DE FASE

Cuando la temperatura de la superficie alcanza el punto final de congelamiento, una capa de sólido se comienza a formar. Se tiene la siguiente figura que lo describe.



Para resolver las ecuaciones de conducción de calor se toman en cuenta las condiciones I a VI. También se supone que la temperatura inicial de la superficie aislada es  $T_q$ . Este valor puede ser cambiado a cualquier valor arbitrario correspondiente a la temperatura inicial, en esta posición en particular.

El problema puede ser fórmula matemáticamente como sigue:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \theta} \quad 0 < x \leq x_s \quad (3-36) \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{E}{k_2} = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \theta} \quad x_s < x \leq a \quad (3-37)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(0, \theta)}{\partial x} = H \{ T_1(0, \theta) - T_a \} \quad (3-38) \quad T_1(x_s, 0) = T_2(x_s, 0) = T_s \quad (3-39)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1(X_s, 0)}{\partial x} = K_2 \frac{\partial T_2(X_s, 0)}{\partial x} \quad (3-40) \quad \frac{\partial T_2(a, 0)}{\partial x} = 0 \quad (3-41)$$

$$X_s(0) = 0 \quad (3-42) \quad T_2(X, 0) = \lambda x + Bx^2 + C \quad (3-43)$$

Para resolver la ecuación 3-36 con las condiciones de frontera de las ecuaciones 3-38 y 3-39 tiene la siguiente solución:

$$T_1(X, 0) = T_s + (T_s - T_a) \frac{\{ \operatorname{erf}(x / (2\sqrt{a_1 0})) + \exp(h_1^2 a_1 + h_1 x) \cdot \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{a_1 0} + h_1 \sqrt{a_1 0}) \}}{\{ \operatorname{erf}(X_s) + \exp(h_1^2 a_1 + h_1 X_s) \cdot \operatorname{erfc}(X_s + h_1 a_1 0) \}} \quad (3-44)$$

donde

$$h_1 = H/K_1 \quad y \quad X_s = 2\lambda/\sqrt{a_1 0} \quad (3-45)$$

Suponiendo que la distribución de temperaturas en la zona de mezcla es de la forma:  $T_2(X, t) = A(X - X_s) + B(X - X_s)^2 + C$  Ec. 3-46

Las constantes A, B y C pueden ser calculadas por las condiciones de frontera de las ecs. 3-39 y 3-41 y la condición inicial de la ec. 3-43.

$$A = 2(a - X_s)(T_q - T_s)/a \quad \text{Ec. 3-47} \quad B = (T_q - T_s)/a \quad \text{Ec. 3-48} \quad C = T_s \quad \text{Ec. 3-49}$$

La constante  $\lambda$  es obtenida de la condición de frontera de la ec. 3-40

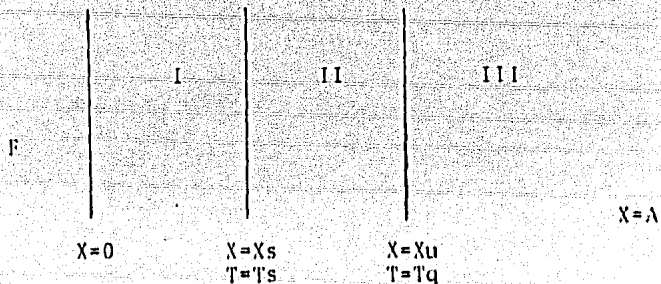
$$(T_s - T_a) \left\{ \frac{\exp(\tau^2 + 2\lambda\tau) \cdot \operatorname{erfc}(\lambda + \tau)}{\operatorname{erf}(\lambda) + \exp(\tau^2 + 2\lambda\tau) \cdot \operatorname{erfc}(\lambda + \tau)} \right\} = \frac{2(a - X_s)(T_q - T)}{B a} \quad (3-50)$$

donde

$$\tau = (H/k_1) \sqrt{a_1 0} \quad (3-51)$$

### PERIODO DE TRES ZONAS

La siguiente figura nos muestra el periodo de tres zonas





En este periodo también se utilizan las suposiciones I a VI debido a que la temperatura en la zona sin congelar es uniforme y constante en el punto inicial de congelamiento. La formulación matemática del problema es similar a el segmento de cambio de fase.

La distribución de temperaturas en la parte totalmente congelada y la localización del frente de congelación son dadas por las ecuaciones 3-44 y 3-45 respectivamente.

La distribución de temperaturas en la parte que no está totalmente congelada está dada por la siguiente ecuación:

$$T_2 = \{2(Tq - Ts)(X - Xs)\} / \Delta\epsilon - (Tq - Ts)(X - Xs)^2 / \Delta\epsilon^2 + Ts \quad (3-52)$$

Los valores de  $\Delta\epsilon, \lambda, \delta$  son calculados por la ecuación 3-53 a 3-55

$$\Delta\epsilon = Xu^0 + 2\delta\sqrt{\alpha_2\theta} \quad (3-53)$$

$$\frac{2(Tq - Ts)}{(A + 2\lambda_2\sqrt{\alpha_2\theta}) - (\rho Lfs/k_2) \cdot (\lambda\sqrt{\alpha_1}/\tau + \delta\sqrt{\alpha_2}/\theta)} = \left\{ \frac{(Tq - Ts)}{\alpha_2} \right\} \cdot \left( \lambda \frac{\sqrt{\alpha_1}}{\theta} + \frac{\delta}{\theta} \sqrt{\alpha_2} \right) \quad (3-54)$$

$$\frac{2(Tq - Ts)}{(A + 2\delta\sqrt{\alpha_2\theta})} = \left\{ \frac{B_2(Ts - Ta)}{a} \right\} \cdot \left\{ \frac{\exp(\tau^2 + 2\lambda\tau) \cdot \operatorname{erfc}(\lambda + \tau)}{(\operatorname{erf}(\lambda) + \exp(\tau^2 + 2\lambda\tau) \operatorname{erfc}(\tau + \lambda))} \right\} \quad (3-55)$$

### PERIODO DE TEMPERADO

Se supone que la contribución de el calor latente es despreciable comparada con el calor sensible. Este periodo se reduce a la solución para una placa infinita; se supone que la distribución inicial de la temperatura es lineal:

$$T_1(X, 0) = (Tc^0 - Ts^0) x/a + Ts^0 \quad (3-56)$$

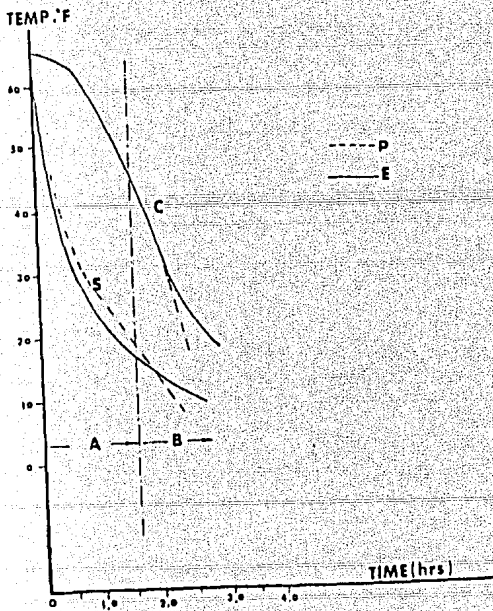
La ecuación dada por Carlaw y Jaeger se reduce a:

$$T_1 - T_a = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-F_0 \beta n_1^2) \cdot \text{Cos}(\beta n_1 x/a) / (\beta n_1 + \text{Sin} \beta n_1 \text{Cos} \beta n_1) \cdot \{ (T_c^\circ - T_s^\circ) (\text{Sin} \beta n_1 / \beta n_1 - \text{Cos} \beta n_1) + T_s^\circ \text{Sin} \beta n_1 \} \quad (3-57)$$

donde

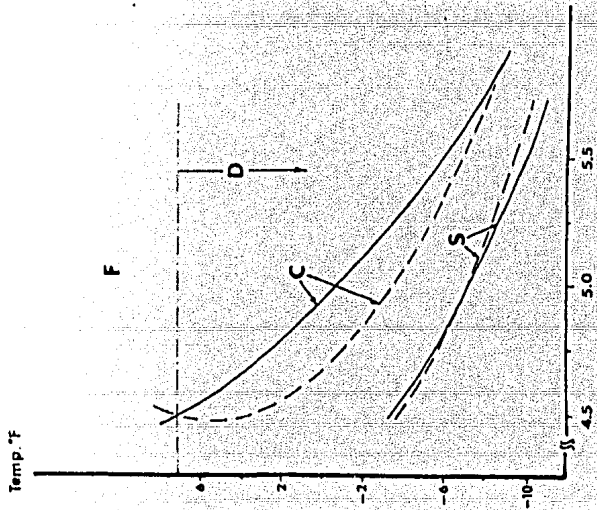
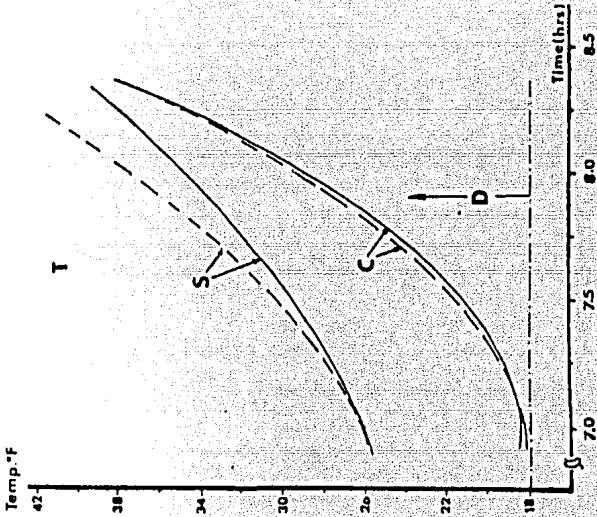
$$\beta n_1 \tan \beta n_1 = \beta i_1$$

A continuación se presentan varias gráficas donde se muestran el comportamiento experimental y teórico de las temperaturas con respecto al tiempo.



Gráfica de temperaturas experimentales y predichas de jugo de toronja concentrada a 40°Bx en la zona de pre-congelamiento del primer periodo de cambio de fase.

- A = Periodo de pre-congelamiento
- B = Primer periodo de cambio de fase
- C = Area aislada
- S = Area expuesta
- E = Experimental
- P = predicha



Gráfica de temperaturas experimentales y predichas de jugo de toronja concentrada a 40°Bx en el segundo periodo de cambio de fase.

- C = Superficie aislada
- D = Segundo periodo de cambio
- S = Superficie
- F = Congelamiento
- T = Descongelamiento

V NOMENCLATURA

a	=	espesor de la placa
Bi	=	número de BIOT
C <sub>1</sub> C	=	calor específico
C.U.T.	=	
Fo	=	número de Fourier
H	=	coeficiente de calor de la superficie
i	=	índice de dummy
Jo (X)	=	funciones de Bessel de orden oro
Ji (X)	=	funciones de Bessel de primer orden
K	=	conductividad térmica del alimento
L	=	calor latente de congelamiento
m	=	índice numérico
r	=	cualquier posición radial
R	=	radio del cilindro
s	=	factor de forma
T <sub>1</sub> t	=	temperatura
u <sub>1</sub> Y	=	distribución de temperaturas
x	=	distancia medida desde la superficie expuesta
z	=	cualquier posición en el prisma a partir del punto central
α	=	difusividad térmica
ρ	=	densidad
θ	=	tiempo

CAPITULO 4

	PAGINA
I INTRODUCCION	115
II PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS DURANTE LA CONGELACION	115
i Densidad de los alimentos congelados	
ii Entalpía de los alimentos congelados	
III MODELO: DEPENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA CON RESPECTO AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN CARNE	119
IV MODELO: DEPENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y LA DENSIDAD CON RESPECTO AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MANZANAS	125
V MODELO: PARA DETERMINAR LA DIFUSIVIDAD TERMICA EN CAMOTES	127
VI NOMENCLATURA	129

## CAPITULO 4

### INTRODUCCION

Todos los alimentos tienen propiedades físicas y químicas muy especiales que determinan su comportamiento en los procesos. En el estudio de la transferencia de calor por conducción encontramos, algunas de estas propiedades dentro de los modelos que se han mencionado en los capítulos anteriores.

De estas propiedades y su determinación trata este capítulo. En los capítulos anteriores se revisaron dos métodos de conservación en los que la transferencia de calor por conducción juega un papel muy importante, y a continuación las propiedades que se mencionan están relacionadas directamente con estos métodos de conservación.

### PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS DURANTE LA CONGELACION

Las propiedades de un producto alimenticio cambian de una forma muy dramática durante el congelamiento. Esto es debido principalmente al alto contenido de agua dentro de los alimentos, puesto que la mayoría de estos tienen un contenido de humedad mayor al 50%.

Una de las características del alimento congelado es el cambio gradual de temperaturas conforme hay un cambio de fase.

Esta observación implica que la fracción del agua congelada cambia continuamente con la temperatura, abajo del punto inicial de congelamiento, y de esta forma también sus propiedades.

### DENSIDAD DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS

La densidad se ve influenciada significativamente durante el congelamiento aunque la magnitud del cambio depende de las característi-

cas del producto congelado. El contenido del agua es el factor más importante.

Heish et al (1977) propone la siguiente ecuación para predecir la densidad de un producto alimenticio.

$$\frac{1}{\rho} = M_n \left(\frac{1}{\rho_u}\right) + M_s \left(\frac{1}{\rho_s}\right) + M_i \left(\frac{1}{\rho_i}\right) \quad \text{Ec. 4-1}$$

donde  $M_n$  es la fracción masa del agua sin congelar en el producto,  $M_s$  la Fracción masa del producto sólido,  $M_i$  la fracción del hielo en el producto.

Para ilustrar como varía la densidad de un producto con respecto a la temperatura se tiene la siguiente figura para fresas.

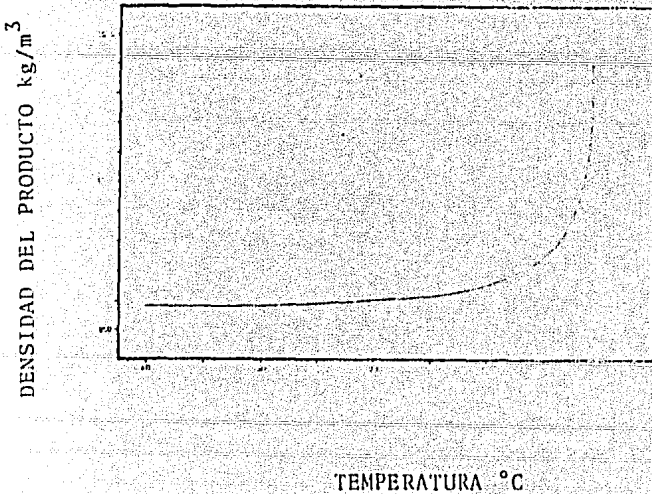


FIGURA 1  
Influencia del congelamiento en la densidad predicha de fresas, con un contenido de agua de 89.3% y una temperatura inicial de congelamiento de -0.89°C.

ENTALPIA DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS

La entalpía de un producto congelado puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$H_T = H_s + H_u + H_L + H_i \quad \text{Ec. 4-2}$$

Donde la H significa la contribución de entalpías por las diferentes fases,  $H_i$ , es la contribución del hielo que se encuentra en el producto  $H_s$  es la contribución del producto sólido,  $H_u$  del agua sin congelar,  $H_L$  es el calor latente de fusión. Todas las contribuciones a la entalpía total son funciones de la temperatura y de la fracción de agua congelada a dicha temperatura.

Si para la ecuación anterior tomamos el límite inf. de  $-40^\circ\text{C}$  para  $H = 0$  como referencia, e integramos con respecto a la temperatura nos queda:

$$H = M_s C_{ps} \int_{-40}^{T_i} dT + M_u C_{pu} \int_{T_f}^{T_i} dT + \int_{-40}^{T_f} M_u(T) C_{pu}(T) dT + M_u(T_f) L + \int_{-40}^{T_f} M_i(T) C_{pi}(T) dT$$

Ec. 4-3

Usando la ecuación 4-3, el cambio de la entalpía con la temperatura puede producirse dentro de un intervalo que va desde los  $-40^\circ\text{C}$  hasta arriba del punto de congelación. En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de esta ecuación para la cerezas. (Fig.2)

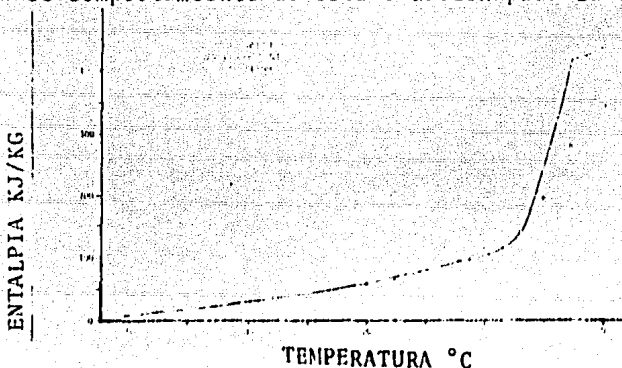


FIGURA 2  
Entalpía de cerezas como función de la temperatura, con un contenido del agua del 77% y una temperatura inicial de congelamiento de  $-2.61^\circ\text{C}$ .



Recordando la ecuación 1-1

$$q = -kA \frac{d\theta}{dx}$$

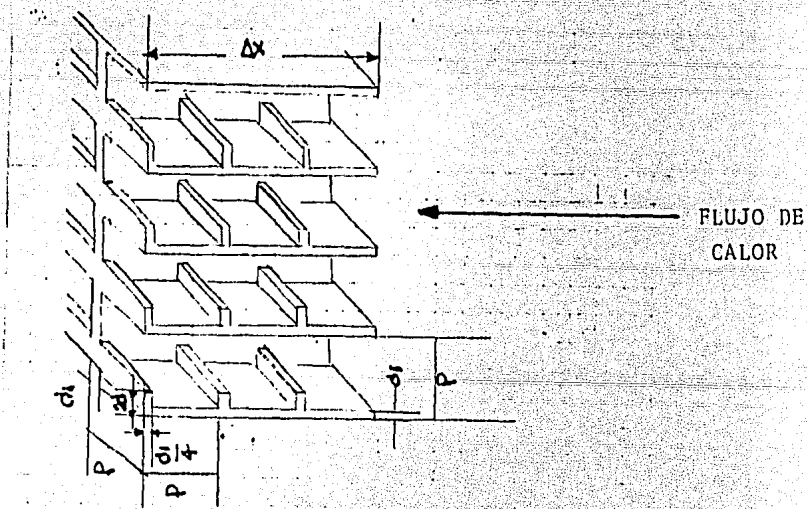
Ec. 1-1

conocida como la LEY DE FOURIER encontramos el término k que es llamado CONDUCTIVIDAD TERMICA, y es la propiedad que tiene un aumento para conducir el calor. Entre mayor sea ésta, será más fácil que se lleve a cabo la conducción, y es una propiedad específica de cada material. En el diseño de un equipo de procesos para alimentos, se necesitan las propiedades del alimento a procesar, ya sea que vaya a ser calentado o congelado y por eso es necesario conocer la conductividad térmica.

La conductividad térmica se ve afectada por el contenido de humedad que presentan los distintos alimentos, a continuación tenemos como ejemplo un modelo para carne y también en manzanas.

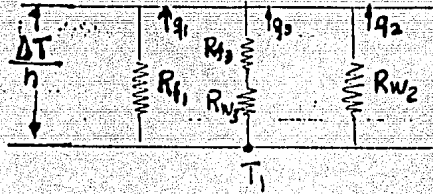
MODELO: DEPENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA CON RESPECTO AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN CARNE.

El siguiente diagrama muestra el modelo propuesto por Hill, Leitman y Sunderland.



El modelo propone tres caminos para la transferencia de calor. El primer camino está compuesto solamente de fibras, el segundo camino de hielo y el tercer camino es un arreglo de hielo y fibras. Su ponemos que la energía no cruza a través de las fronteras de los distintos caminos y que el calor solo es transferido por conducción térmica.

El equivalente del modelo esquematizado como un circuito eléctrico es el siguiente:



Considerando una área igual a  $P^2$  la cual permanece en un plano perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, si el espesor total de la muestra es  $\Delta x$ , el espesor de cada capa de fibras (P) es igual a  $x/n$ , donde  $n$  es el número de capas de fibras. El descenso de temperatura a través de cada capa de fibras es  $T/n$ , donde  $T$  es la diferencia de temperaturas a través de la muestra. La velocidad de conducción de calor a través de las fibras ( $q_1$ ) es dada por la siguiente ecuación:

$$q_1 = k_f d_1 (2P - d_1) \frac{\Delta T}{nP} \quad \text{Ec. 4-4}$$

donde  $k_f$  es la conductividad térmica de la fibra.

La velocidad de transferencia de calor a través del hielo es la siguiente:

$$q_2 = k_w (P - d_1)^2 - 2d_1 (P - d_1) \frac{\Delta T}{nP} \quad \text{Ec. 4-5}$$

donde  $k_w$  es la conductividad térmica del hielo.

La velocidad de conducción de calor a través del hielo en serie con la fibra es dado por la siguiente ecuación:

$$q_3 = k_{fw} \frac{2d_1 (P - d_1)}{nP} \frac{\Delta T}{n} \quad \text{Ec. 4-6}$$

donde:

$$k_{fw} = \frac{4k_f \cdot k_w}{\frac{d_1}{P} k_w + (4 - \frac{d_1}{P}) k_f} \quad \text{Ec. 4-7}$$

La conductividad térmica aparente  $k_a$  está dada por:

$$k_a = \frac{A(q_1 + q_2 + q_3)}{\frac{P^2 \Delta T}{\Delta x}} \quad \text{Ec. 4-8}$$

Por lo tanto nos queda el modelo matemático de la siguiente forma:

$$k_a = k_f \frac{2 d_1 - (d_1/P)^2}{P} + k_w (1 - \frac{4d_1}{P} + 3 \frac{(d_1)^2}{P^2} + 1) \quad \text{Ec. 4-9}$$

donde:

$$I = \frac{8 k_f k_w \frac{d_1}{P} - (d_1/P)^2}{\frac{d_1}{P} k_w + (4 - \frac{d_1}{P}) k_f} \quad \text{Ec. 4-10}$$

Si observamos las Ec. 4-9, 4-10 encontramos que la relación  $d_1/P$  se repite constantemente, por lo tanto buscaremos una relación con propiedades físicas fácilmente determinable, para resolver el modelo.

El volumen de uno de los cubos ( $V_T$ ) del modelo es dado por la suma del volumen de la fibra ( $V_f$ ) y el volumen del hielo ( $V_w$ ).

Esto es:

$$V_T = V_f + V_w = p^3 \quad \text{Ec. 4-11}$$

De la figura del modelo podemos encontrar el volumen de la fibra por medio de la siguiente ecuación:

$$V_f = 2 d \frac{p^2}{2} - \frac{d_1^2 p}{2} - \frac{d_1^3}{2} \quad \text{Ec. 4-12}$$

Puesto que  $d$  es muy pequeño comparado con  $P$  el último término de la Ecuación 4-12 puede ser despreciado.

Por lo tanto:

$$d_1/P = 2 - 4 - 2V_f/V_T \quad \text{Ec. 4-13}$$

La relación  $d_1/P$  puede ser expresada también en términos del peso total y del peso de las fibras, dando la siguiente ecuación:

$$d_1/P = 2 - 4 - 2 W_f/W_T \quad \text{Ec. 4-14}$$

Donde  $W$  significa peso.

Para este modelo, Hill et al asumieron que la conductividad de la carne es independiente de la temperatura.

El modelo es recomendado para un intervalo de  $0^\circ\text{C}$  a  $26.6^\circ\text{C}$ , en todos los casos se aplica para carnes que han sido previamente congeladas.

El modelo aplicado para carne no deshidratada presenta excelentes resultados en la región de  $-17.7^\circ\text{C}$  a  $-5.55^\circ\text{C}$ .

A continuación se presenta un programa para hacer los cálculos en una forma más rápida con la calculadora programable TI-59.

	)	*
2	+	(
2	(	RCL 02
(	RCL 04	-
(	*	(
4	1	RCL 02
-	-	X <sup>2</sup>
(	(	)
RCL 00	4	)
+	*	)
RCL 01	RCL 02	:
)	)	(
)	+	RCL 02
Y <sup>X</sup>	(	*
0.5	3	RCL 04
)	+	+
=	(	(
STO 02	RCL 02	(
R/S	X <sup>2</sup>	4
RCL 03	)	RCL 02
*	)	)
(	)	*
(	(	RCL 03
2	+	)
*	((	)
RCL 02	*	)
)	*	)
-	RCL 03	=
(	*	R/S
RCL 02	RCL 04	R/T
X <sup>2</sup>		
)		

Memoria

- 00 Peso de la fibra ( $W_f$ )
- 01 Peso total de la muestra ( $W_t$ )
- 02  $d_i/P$
- 03 Conductividad térmica de fibras
- 04 Conductividad térmica del hielo

El programa primeramente calcula la relación  $d_i/P$ , y posteriormente calcula cada uno de los términos del modelo y al mismo tiempo los suma. Dando como resultado la conductividad térmica aparente.

MODELO: DEPENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y LA DENSIDAD  
CON RESPECTO AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MANZANAS

Este modelo fue propuesto y desarrollado en forma experimental por J. Lozano y colaboradores.

La conductividad térmica se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$T - T_i = \frac{Q}{4K} \ln (\theta/\theta_i) \quad \text{Ec. 4-15}$$

donde T y T<sub>i</sub> son la temperatura final e inicial,  $\theta$  y  $\theta_i$  los tiempos final e inicial, Q es el calor producido por unidad de longitud y K la conductividad térmica.

Para realizar el cálculo de la conductividad térmica, Lozano et al alimentaron datos de tiempo y temperatura a una computadora para que los correlacionara por medio de mínimos cuadrados y por medio de esto llegamos al siguiente modelo:

$$k = \frac{Q}{4\pi S} \quad \text{Ec. 4-16}$$

donde S es la pendiente.

Para resolver la ecuación anterior se realizaron una serie de corridas experimentales en la variedad de manzana "Grann y Smith", con los datos obtenidos de estas corridas se llega a la siguiente correlación.

$$K = 0.283 - 0.256 \exp (-0.206X) \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \text{H}^\circ \text{F}} \quad \text{Ec. 4-17}$$

donde X es el contenido de humedad (gr de agua/gr de material seco).



En este modelo se supone que el contenido de humedad a través de la muestra es homogéneo.

La densidad también es medida y correlacionada para manzanas por la siguiente ecuación.

$$\rho = 0.636 + 0.102 \ln X$$

Ec. 4-18

donde  $\rho$  es la densidad en  $\text{gr/cm}^3$ .

De la ecuación 1-4, tenemos un término " $\alpha$ " llamado DIFUSIVIDAD - TERMICA, y su significado físico es asociado con la velocidad de propagación del calor en el sólido durante la variación de la temperatura con el tiempo. A continuación un modelo para la difusividad térmica en camotes.

MODELO PARA DETERMINAR LA DIFUSIVIDAD TERMICA EN CAMOTES (Objeto de Forma Irregular)

Wadsworth Spadro (1969) utilizaron el siguiente modelo matemático de difusividad térmica para calcular las temperaturas transientes en una raíz de camote, obteniendo magníficos resultados en su objetivo. Esto lo realizaron resolviendo la ecuación diferencial de calor en coordenadas cilíndricas. Por el método de diferencias finitas, describiendo la conducción de calor en dos dimensiones, todo esto realizado por medio de una computadora. Obteniendo un polinomio de cuarto grado para calcular la difusividad térmica:

$$\alpha = 0.30 * 10^{-2} + 0.10 * 10^{-4} * T + 0.50 * 10^{-7} * T^3 - 0.55 * 10^{-9} * T^4$$

T es en °C                       $\alpha = \text{ft}^2/\text{hr}$

El rango recomendado para esta expresión es de 27°C a 90°C y puede ser usada con un pequeño error en el rango de 0°C a 27°C.

A continuación se presenta un programa para resolver el polinomio por medio de la calculadora programable TI-59.

# DE PASO	CODIGO	SIGNI- FICADO	# DE PASO	CODIGO	SIGNI- FICADO
000	76	LBL	031	94	+/-
001	11	A	032	07	7
002	42	STO	033	65	*
003	00	O	034	*53	(
004	91	R/S	035	43	RCL
005	76	LBL	036	00	0
006	12	B	037	45	Y <sup>x</sup>
007	53	(	038	03	3
008	93	.	039	54	)
009	03	3	040	54	)
010	00	0	041	75	-
011	52	EE	042	53	(
012	94	+/-	043	93	.
013	02	2	044	05	5
014	54	)	045	05	5
015	85		046	52	EE
016	53	(	047	94	+/-
017	93	.	048	09	9
018	01	1	049	65	*
019	52	EE	050	53	(
020	94	+/-	051	43	RCL
021	06	6	052	00	0
022	65	*	053	45	Y <sup>x</sup>
023	43	RCL	054	04	4
024	00	0	055	54	)
025	54	)	056	54	)
026	85	+	057	95	=
027	53	(	058	91	R/S
028	93	.	059	81	RST
029	05	5	060	00	
030	52	EE			

NOMENCLATURA

A	=	Area de transferencia
C <sub>pi</sub>	=	Calor específico del hielo
C <sub>ps</sub>	=	Calor específico del producto sólido
C <sub>pu</sub>	=	Calor específico del agua sin congelar
H	=	Entalpía
H <sub>i</sub>	=	Entalpía del hielo
H <sub>s</sub>	=	Entalpía del producto sólido
H <sub>u</sub>	=	Entalpía del agua
H <sub>l</sub>	=	Calor latente de fusión
k	=	Conductividad térmica
K <sub>w</sub>	=	Conductividad térmica del hielo
M <sub>i</sub>	=	Fracción del hielo en el producto
M <sub>n</sub>	=	Fracción masa del agua sin congelar
M <sub>s</sub>	=	Fracción masa del producto sólido
n	=	Número de fibras
p	=	Area
T	=	Temperatura
T <sub>i</sub>	=	Temperatura inicial del producto
T <sub>f</sub>	=	Temperatura inicial de congelamiento
W	=	Peso
Δx	=	Espesor de muestra
Θ	=	Tiempo
ρ	=	Densidad
α	=	Difusividad térmica

CAPITULO 5

APENDICE DE PROPIEDADES FISICAS

	PAGINA
I INTRODUCCION	131
II DEFINICIONES	131
III TABLAS	133

## CAPITULO 5

### I INTRODUCCION

Como se mencionó en el capítulo 4, las propiedades de los alimentos son las que contribuyen a su comportamiento en los procesos.

En este capítulo se darán datos específicos sobre distintos alimentos, así como se recordarán ciertas distinciones sobre las propiedades que traen las tablas.

### II DEFINICIONES

§ Contenido de agua.- Es la cantidad de agua encontrada en un alimento dividido por la masa total del alimento.

Punto de congelación promedio.- Es la temperatura en °C a la cuál el líquido y el sólido se encuentran en equilibrio a una presión dada, que normalmente es la presión atmosférica.

Calor Latente.- Es la cantidad de calor generado cuando una célula viva del alimento retiene oxígeno del aire o del agua, utilizándolo para la oxidación del alimento, dándonos dióxido de carbono y calor (J/24hrs . Kg).

Calor Específico.- Es la cantidad de calor, medida en Joules, necesaria para incrementar la temperatura, medida en grados Kelvin, de un kilogramo de un alimento dado un grado Kelvin (J/Kg . °K).

Conductividad Térmica.- Es la cantidad de calor en Watts, transmitida por conducción a través de un metro cuadrado de un alimento homogéneo por cada grado Kelvin de diferencia entre las superficies del alimento (W/m . °K).

Difusividad Térmica.- Es la relación que hay entre la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, y se mide en  $m^2/seg.$

### III TABLAS

A continuación se presentan una serie de tablas donde se enumeran las propiedades definidas anteriormente.

ALIMENTO	CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO, (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVI- DAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPI- RATORIO			
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg · °K)		TEMPERA- TURA (°C)	CONDUCTI- VIDAD TERMAL (W/m · °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	TEMPERA- TURA (°C)	CALOR RESPIRA- TORIO (J/24 hr · kg)
				CONGELA- CION ALTA	CONGELA- CION BAJA					
<b>PESCADO</b>										
<b>BACALAO FRESCO</b>										
-	-	-2.2	-	3,770	2,050	-	-	276,800	-	
-	-	-	-	-	-	2.8	0.5435	-	-	
-	-	-	-	-	-	0	0.5573	-	-	
-	-	-	-	-	-	-5	1.328	-	-	
-	-	-	-	-	-	-10	1.497	-	-	
-	-	-	-	-	-	-20	1.516	-	-	
FRITO	60	-	0-100	3,020	-	-	-	-	-	
CONGELADO	70	-2.2	-	3,180	1,720	-	-	234,900	-	
<b>FILETES</b>										
<b>MERLUZA</b>										
BACALAO	80	-	-	3,520	1,840	-	-	-	-	
<b>CABALLA</b>										
PERCA DE OCEANO	57	-	-	2,760	1,550	-	-	-	-	
<b>PERCA DE OCEANO</b>										
POLLOCK	80	-	-	3,520	1,840	-	-	-	-	
MERLUZA	79	-	-	3,480	1,840	-	-	-	-	
MERLUZA	82	-	-	3,600	1,840	-	-	-	-	
<b>PESCADO EN SALMUERA SECO/SALADO</b>										
SECO	70	-	-	3,180	1,716.6	-	-	234,900	-	
SECO/SALADO	16-20	-	0-100	1,720	-	-	-	-	-	
GRASOSO FRESCO	60	-	-	1,840	1,590	-	-	-	-	
FRISCO	80	-	0-100	2,850	1,590	-	-	-	-	
MUSCULO DE PESCADO	-	-	-	-	-	-3.9	0.4310	-	-	
BACALAO ESC.	78	-	-	-	-	-1.1	1.437	-	-	
ARENQUE CURADO	75	-	-	3,430	1,800	-	-	-	-	
ARENQUE CURADO	75	-	-	3,350	1,800	-	-	-	-	
CONGELADO	70	-	-	3,180	1,720	-	-	-	-	
NIJUNADO	64	-	-	3,180	1,720	-	-	-	-	
MEJIADEH	62	-	-	2,970	1,630	-	-	-	-	
SIN GRASA	75-80	-	-	2,930	1,680	-	-	-	-	
SALMON	64	-	-	3,350	1,800	-	-	-	-	
SALMON	64	-	-	2,970	1,630	-	-	-	-	
NIJUNADO	-	-	-	-	-	-2.5	1.298	-	-	
NIJUNADO	-	-	-	-	-	3.9	0.5019	-	-	
NIJUNADO	-	-	-	2,930	1,630	-	-	-	-	
<b>MARISCOS</b>										
<b>LANGOSTA AMERICANA</b>										
CAVIAR	79	-	-	3,400	1,040	-	-	-	-	
OSTION (CONCHA)	50-56	-	-	2,930	1,300	-	-	-	-	
OSTION (CONCHA)	80.4	-2.8	-	3,400	1,840	-	-	260,800	-	



ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO. (°C)	NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVI DAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPI- RATORIO		
				CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)		TEMPERA TURA (°C)	CONDUCTI VIDAD TERMAL (W/m . °K)	CALOR LATENTE (J/kg)	TEMPERA TURA (°C)	CALOR RESPIRA TORIO (J/24 hr . kg)
				CONGELA- CION ALTA	CONGELA- CION BAJA					
OSTION (TUBO)	87	-2.8	-	3,770	1,930	-	-	290,800	-	
PECHINA	80	-	-	3,520	1,840	-	-	-	-	
CARNE DE PECHINA	80.3	-2.2	-	3,730	2,010	-	-	269,800	-	
CAMARON	70.8	-2.2	-	3,480	1,880	-	-	276,800	-	
ATUN	70	-	-	3,180	1,720	-	-	-	-	
<b>CARNES</b>										
TOCINO FRESCO	57	-	-	2,010	-	-	-	-	-	
	20	-	-	2,090	1,260	-	-	-	-	
MOLLA FRESCA	68	-1.7	-	3,220	1,680	-	-	232,600	-	
MOLLA AHUMADO	51	-	0-100	3,430	-	-	-	-	-	
	13-29	-	-	1,260	1,010	-	-	41,870	-	
		-	-	1,800	1,210	-	-	95,370	-	
CARNE DE RES HERVIDO SECO	57	-	0-100	3,060	-	-	-	-	-	
	5-15	-	-	921	796	-	-	16,300	-	
		-	-	1,420	1,090	-	-	51,200	-	
GRASA FRESCA	-	-2.2	-	2,510	1,470	-	-	184,000	-	
GRASA	51	-	0-100	2,890	-	-	-	-	-	
CARNE DE CABALLO	-	-	-	-	-	-	0.4396	-	-	
RIONES	-	-	-	3,600	-	-	-	-	-	
TERNERA	71.8	-	-	-	-	5.4	0.4500	-	-	
		-	-	-	-	61.1	0.4777	-	-	
	71	-	-	-	-	5.6	0.4154	-	-	
		-	-	-	-	61.4	0.4223	-	-	
	58	-1.7	-	2,810	1,260	-	-	194,000	-	
FRESCA	60-70	-2.2	-	2,850	1,590	-	-	200,000	-	
	70-1.7	-	-	-	-	-	-	-	-	
CONGELADA	-	-	-	-	-	-	1.125	-	-	
HIGADOS	65.5	-1.7	-	3,020	1,680	-	-	217,000	-	
CARNES, CONGELACION ALTA	-	-	-	-	-	0	0.5019	-	-	
	-	-	-	-	-	5	0.5116	-	-	
	-	-	-	-	-	10	0.5227	-	-	
CARNE MOLIDA	72	-	0-100	3,520	-	-	-	-	-	
CARNEO PUERCO	90	-	0-100	3,890	-	-	-	-	-	
	75.1	-	-	-	-	6	0.4881	-	-	
		-	-	-	-	59.3	0.5400	-	-	
		-	-	-	-	3.8	0.4431	-	-	
		-	-	-	-	60.7	0.4898	-	-	
GRASA	39	-	0-100	2,600	-	-	-	-	-	
FRESCO	60	-2.2	-	2,850	1,340	-	-	201,000	-	
GRASA FRESCA	39	-	-	2,600	-	-	-	-	-	

ALIMENTO	CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERCIAL		CALOR LATENTE (J/Kg)	DATOS DE CALOR RESPIRATORIO		
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg · °K)		TEMPERATURA (°C)		CONDUCTIVIDAD TERCIAL (W/m · °K)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr · kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA					
FRESCO/SIN GRASA	57	-	-	3,060	-	-	-	-	-	
CONGELADO	57	-	-	2,510	1,340	-	-	-	-	
HOLLA	57	-	0-100	3,060	-	-	-	-	-	
PUERCO, MAGRO COSTADO 3.4% GRASA	74	-	-	-	-	2.2	0.4604	-	-	
	-	-	-	-	-	-15	1.109	-	-	
	-	-	-	-	-	-25	1.215	-	-	
PUERCO, PIERNA MAGRA 6.1% GRASA FLUJO DE CALOR PERPENDICULAR	72	-	-	-	-	0	0.4465	-	-	
	-	-	-	-	-	-5	1.172	-	-	
	-	-	-	-	-	-10	1.239	-	-	
	-	-	-	-	-	-20	1.347	-	-	
PUERCO, PIERNA MAGRA 6.7% GRASA FLUJO DE CALOR PERPENDICULAR	75.9	-	-	-	-	21.4	0.5158	-	-	
	-	-	-	-	-	3.8	0.5400	-	-	
	-	-	-	-	-	6	0.4881	-	-	
	-	-	-	-	-	-8.1	1.277	-	-	
PUERCO, PIERNA MAGRA 6.1% GRASA FLUJO DE CALOR PARALELO	72	-	-	-	-	0	0.4811	-	-	
	-	-	-	-	-	-5	1.314	-	-	
	-	-	-	-	-	-10	1.435	-	-	
	-	-	-	-	-	-20	1.5611	-	-	
PUERCO, PIERNA MAGRA 7.8% GRASA FLUJO DE CALOR PARALELO	75.1	-	-	-	-	60.7	0.4898	-	-	
	-	-	-	-	-	42.9	0.4846	-	-	
	-	-	-	-	-	19	0.4535	-	-	
	-	-	-	-	-	6.1	0.4517	-	-	
	-	-	-	-	-	3.8	0.4431	-	-	
	-	-	-	-	-	-4.7	1.263	-	-	
	-	-	-	-	-	-5.9	1.289	-	-	
SIRLOX MAGRO (9% GRASA)	85	-	-	-	-	6.1	0.5227	-	-	
	-	-	-	-	-	2.2	0.5019	-	-	
	-	-	-	-	-	-2.8	1.134	-	-	
	-	-	-	-	-	-5	1.298	-	-	
	-	-	-	-	-	-10	1.381	-	-	
	-	-	-	-	-	-15	1.424	-	-	
	-	-	-	-	-	-20	1.508	-	-	
	-	-	-	-	-	-25	1.549	-	-	
AHUMADO SALCHICHAS CUBIERTA SECAS	65.5	-1.3	-	2,510	1,340	-	-	216,000	-	
FRANKS	60	-1.7	-	3,730	2,350	-	-	200,000	-	
FRASCAS	65	-1.3	-	3,730	2,350	-	-	216,000	-	
	72	-	0-100	3,430	-	-	-	-	-	
AHUMADAS	60	-1.9	-	3,600	2,350	-	-	200,000	-	



ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO. (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVI DAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPIRATORIO			
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)		TEMPERA TURA (°C)	CONDUCTI VIDAD TERMAL (W/m . °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	TEMPERA TURA (°C)	CALOR RESPIRA TORIO (J/24 hr . kg)
				CONGELA- CION ALTA	CONGELA- CION BAJA					
COCIDO FRESCO	92	-	-	3,770	-	-	-	-	-	
	86-90	-	0-100	3,810-3,940	-	-	0,6058	-	-	
PURE	-	-	-	-	-	-	1,263	-	-	
ACEITE DE CASTOR	-	-	20	1,820	-	-	0,1800	-	-	
COLIFLOR	91,7	-	-1,1	3,890	1,970	-	-	307,000	4,4	
APIO	88,3	-	-	3,810	1,930	-	-	293,100	-	
APIO	93,7	-1,3	-	3,980	2,010	-	-	314,000	4,4	
	-	-	-	-	-	-	-	-	2,790	
QUESO LIMBURGER	37-38	-2,2	-	2,090	1,300	-	-	125,600	-	
ROQUEFORT	55	-7,2	-	2,930	1,680	-	-	200,000	-	
SUIZO	55	-16,1	-	2,720	1,340	-	-	183,800	-	
SIN GRASA	55	-9,4	-	2,680	1,510	-	-	183,800	-	
CEREZAS	83	-3,3	-	3,650	1,890	-	-	279,100	-	
JUGO DE CEREZA	-	-	-	3,850	-	-	-	-	-	
CHOCOLATE (COVERTURA)	55	29,4-35	-	1,260	2,300	-	-	93,040	-	
ACHITE DE CIDRO	-	-	5,6	1,830	-	-	-	-	-	
BEBIDA DE COCOA	-	-	0-100	1,840	-	-	-	-	-	
ELOTE, SECO	10,5	-	-	1,170	963	-	-	34,890	-	
VERDE	73,9	-1,7	-	3,310	1,760	-	-	246,600	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	8,370-13,100	
	-	-	-	-	-	-	-	4,4	12,300-15,400	
DULCE AMARILLO	-	-	-	3,320	1,770	-	-	-	-	
ARANDANO	87,4	-2,6	-	3,770	1,930	-	0,1405	288,400	-	
CREMA DULCE	75	-	-	3,560	2,090	-	-	-	-	
15% GRASA	-	-	-	3,850	-	-	-	-	-	
30% GRASA	-	-	-	3,890	-	-	-	-	-	
40% GRASA	73	-2,2	-	3,560	1,680	-	-	209,300	-	
60% GRASA	-	-	-	4,150	-	-	-	-	-	
40-60% GRASA	57-75	-	0-100	3,060-3,270	-	-	-	-	-	
HELADO	58-66	-17,8 A -2,8	-	3,270	1,880	-	-	223,300	-	

ALIMENTO	CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION PROMEDIO. (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPIRATORIO		
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg · °K)		TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m · °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr · kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA				
REMA AGRIA	57-73	-	-	2,930	1,260	-	-	-	-
UESO CREMA	80	-	-	2,930	1,880	-	-	-	-
EPLINO	97	-	0-100	4,103	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	0.5988	-	-
UESO COTTAGE	60-70	-	0-100	3,270	-	-	-	-	-
ROSELLA	-	-	-	-	-	-	0.3098	-	-
ATILLES SECOS	20	-20.1	-	1,510	1,090	-	-	67,450	-
FRESCOS	78	-	-	3,430	1,800	-	-	-	-
ARZA	-	-1.6	-	-	-	-	-	-	-
ASA	-	-	-	1,880	-	-	-	-	-
	-	-	-	2,180	-	-	-	-	-
UEVO	-	-2.8	-	3,180	1,680	-	-	232,600	-
SECO, ALBUMINA ROCIADA	6	-	-	1,050	-	-	-	20,930	-
FERMENTADO	3-15	-	-	921	-	-	-	9,304	-
ALBUMINA	-	-	-	1,340	-	-	-	48,850	-
CONGELADO	-	-2.8	-	1,720	-	-	-	232,600	-
CONGELADO ENTERO	-	-	-	-	-	-8	0.9692	-	-
CLARA	-	-	-	-	-	-	0.5573	-	-
	87	-	0-100	3,850	-	-	-	-	-
YEMA	-	-	-	-	-	-	0.3392	-	-
	48	-	0-100	2,810	-	-	-	-	-
	3	-	-	921	879	-	-	-	-
YEMA SECA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BERENJENA (DES HIELADA Y RECONGELADA)	92.7	-0.9	-	3,940	2,010	-	-	307,000	-
ENDIVIA (ESCAROLA)	93.3	-0.6	-	3,940	2,010	-	-	307,000	-
HIGO SECO	24	-	-	1,630	1,130	-	-	79,080	-
FRESCO	78	-1.7	-	3,430	1,800	-	-	260,500	-
HARINA	12-13.5	-	0-100	1,800	-	-	-	-	-
	13.5	-	-	1,880	-	-	-	-	-
	8.8	-	-	1,590	1,170	-	-	-	-
TRIGO	8.8	-	-	-	-	-	0.4500	-	-
RUTAS FRESCAS	75-92	-	0-100	3,350	-	-	-	-	-
	-	-	-	3,770	-	-	-	-	-
SECAS	30	-	0-100	2,090	-	-	-	-	-
JO SECO	74.2	-3.7	-	3,310	1,760	-	-	246,600	-

ALIMENTO	CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION P <sub>10</sub> MEDIO. (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERNAL		DATOS DE CALOR RESPIRATORIO			
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg · °K)		TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERNAL (W/m · °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr · kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA					
GELATINA CON GELADA, SECA	-	-	-	-	-	-	1.7080	-	-	
PRESION ATMOSFERICA	-	-	-	-	-	-	1.5940	-	-	
HUESO SECO	-	-	-	-	-	-	0.609	-	-	
VACUUM BONE DRY	-	-	-	-	-	-	-	293,100	-	
GROSELLAS SECAS	88.3	-1.7	-	3,770	1,930	-	-	0.2769	-	
CONGELADAS	-	-	-	-	-	-	-	0.02769	-	
HUMEDOS	-	-	-	-	-	-	-	0.3288	-	
GRANOS	15-20	-	-	-	-	-	-	-	-	
	15-20	-	0-100	-	-	-	-	-	-	
TORONJA	88.8	-2	-	2,810	1,930	-	-	-	293,100	
TORONJA MACHADA	-	-	-	3,710	-	-	-	1.3500	-	
UVA TIPO AMERICANO	81.9	-2.5	-	3,600	1,840	-	-	-	269,800	
JUGO DE UVA	-	-	4.4-32.2	3,810	-	-	-	-	-	
MIEL	-	-	-	-	-	2	0.5625	-	-	
	80.0	-	-	-	-	2	0.5019	-	-	
	14.8	-	-	-	-	69	0.6230	-	-	
	80.0	-	-	-	-	69	0.4154	-	-	
RABANO	73.4	-3.1	-	3,270	1,760	-	-	-	249,600	
HIELO	-	-	-	-	-	-25	2.4230	-	-	
	-	-	-	-	-	-20	2.3880	-	-	
	-	-	-	-	-	-15	2.3370	-	-	
	-	-	-	-	-	-10	2.3620	-	-	
	-	-	-	-	-	-5	2.2670	-	-	
	-	-	-	-	-	0	2.2150	-	-	
COL	86.6	-	-	3,730	1,930	-	-	-	-	
COLINABO	90.1	-1.1	-	3,850	1,980	-	-	-	297,700	
MANTECA	-	-	-	2,180	-	-	-	-	-	
PUERCO VERDE	88.2	-1.6	-	3,770	1,930	-	-	-	293,100	
PUERCO	92	-	0-100	3,980	-	-	-	-	-	
LIMONES	89.3	-2.2	-	3,850	1,930	-	-	-	295,400	
LIMON EUREKA	-	-	-	3,740	-	-	1.817	-	4.4	
LENTEJAS	12	-	0-100	1,840	-	-	-	-	-	
LECHUGA	94.8	-0.4	-	4,020	2,010	-	-	-	316,300	

ALIMENTO	CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO. (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		CALOR LATENTE (J/Kg)	DATOS DE CALOR RESPIRATORIO		
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/Kg . °K)		TEMPERATURA (°C)		CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m . °K)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr . kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA					
JECES SECAS	3-10	-	-	879-	796-	-	-	10,000-	1.7	1,160
				1,210	1,010			32,600		
AVENA O ROLLOS										
AVENA F. SECA	8.7	-	-	-	-	-	0.6404	-	-	-
ALBOMBO	89.8	-	-	3,850	1,930	-	-	-	-	-
LEOMARGARINA	15.5	-	-	1,340	1,050	-	-	-	-	-
CEITUNAS FRESCA	75.2	-1.9	-	3,350	1,760	-	-	251,200	-	-
ACEITE DE OLIVA	-	-	-	-	-	15.6	0.1887	-	-	-
	-	-	-	-	-	100	0.1627	-	-	-
	-	-	-	-	-	15.6	0.1887	-	-	-
EBOLLA	87.5	-1.1	-	3,770	1,930	-	-	288,400	-	814-
										1,280
	80-90	-	0-100	3,600-	-	-	-	-	4.4	-
				3,890						
ARANJAS	87.2	-2.2	-	3,770	1,930	8.6	0.5746	-	-	-
								288,400	0	925
									4.4	2,010
PELADAS	-	-	-	-	-	28	0.5800	-	-	-
UGO DE NJA.	-	-1.2	4.4-32.2	3,890	-	-	-	-	-	-
CONGELADAS	-	-	-	4,605	4,605	-18	2.3880	-	-	-
APAYAS	90.8	-	-	3,430	1,970	-	-	-	-	-
EREJIL	65-95	-	-	3,180-	-	-	-	-	-	-
				4,060						
HIRIVIA	78.6	-1.7	-	3,520	1,930	-	-	260,500	-	-
URAZNOS	86.9	-1.4	-	3,770	1,930	-	-	288,400	4.4	2,020
						28	0.5815	-	-	-
ACEITE DE CACA										
ACEITE	-	-	-	-	-	3.9	0.1679	-	-	-
ERA	-	-	-	-	-	8.7	0.5954	-	-	-
UGO DE PERA	-	-	-	-	-	20	0.4760	-	-	-
	-	-	-	-	-	80	0.5365	-	-	-
EARL BARLEY	-	-	0-100	2,810-	-	-	-	-	-	-
				2,850						
ERAS BARLET	83.5	-1.9	-	3,600	1,880	-	-	274,500	0	895.51
ERAS SECAS	14	-	0-100	1,840	-	-	-	-	-	-
LACK-EYED	-	-	-	-	-	2.8-16.7	0.3115	-	-	-
SECAS	9.5	-	-	1,170	921	-	-	32,600	-	-
VERDES	74.3	-1.1	-	3,308	1,760	-	-	246,600	0	15,400
									4.4	18,600

-170-

ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION PROMEDIO (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)		DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		CALOR LATENTE (J/kg)	DATOS DE CALOR RESPIRATORIO		
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA	TEMPERATURA (°C)		CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m . °K)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr . kg)
LECHAS	86	-1.7	-	3,730	1,930	-	-	283,800	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.6	
PELADAS	-	-	-	-	-	-	0.4900	-	-	
ACARRONES	12.3-13.5	-	0-100	1,840	1,880	-	-	-	-	
LANGOS	93	0	-	3,770	1,930	-	-	311,700	-	
ZUCAR MAPLE	5	-	-	1,010	879	-	-	16,280	7.2	
ARABE MAPLE	36	-	-	2,050	1,300	-	-	121,000	-	
ARGARINA	9-15	-	0-100	1,760	-	-	0.2340	-	-	
-	-	-	-	2,090	-	-	-	-	-	
LECHONES DULCES	92.6	-6.7	-	3,940	2,010	-	-	307,000	-	
MELON ALMIZDADO	92.7	-1.7	-	3,940	2,010	-	-	307,000	-	
MANDIA	92.1	-1.6	-	4,060	2,010	-	-	307,000	-	
ECHE	87.5	-0.6	-	3,890	2,050	-	-	288,400	-	
.7% GRASA CON ENTRADA	-	-	-	-	-	-	0.5296	-	-	
.5% GRASA	-	-	-	-	-	20	0.5054	-	-	
CONDENSADA	-	-	-	-	-	78.2	0.6404	-	-	
.3% AGUA	-	-	-	-	-	24.2	0.5711	-	-	
.3% AGUA	-	-	-	-	-	26	0.3288	-	-	
-	-	-	-	-	-	78.4	0.3635	-	-	
.0% AGUA	-	-	-	-	-	26.7	0.5365	-	-	
LECHE SIN GRASA	4.2	-	-	-	-	39.1	0.4188	-	-	
VAPORADA	4.2	-	-	-	-	20	0.5573	-	-	
.5% GRASA	-	-	-	-	-	50	0.5919	-	-	
-	-	-	-	-	-	80	0.6196	-	-	
LECHE	87.5	-	0-100	3,850	-	-	-	-	-	
LECHE DESNATADA	91	-	0-100	3,980	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	4,020	-	-	-	-	-	
-	91	-	-	3,980	2,510	-	-	-	-	
MAMPINONES	91.1	-1	-	3,890	1,970	-	-	302,400	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	
SECOS	30	-	0-100	2,350	-	-	-	-	-	
FRESCOS	90	-	0-100	3,940	-	-	-	-	-	
CONGELADO/SECO	-	-	-	-	-	-	0.0343	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	0.0196	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	0.0111	-	-	
VARIEDAD DE MELOCOTON	82.9	-1.7	-	3,770	2,050	-	-	276,800	-	
-	-	-	-	-	-	8.6	0.5850	-	-	



ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO. (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)			DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		CALOR LATENTE (J/Kg)	DATOS DE CALOR RESPIRATORIO	
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m . °K)		TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr . kg)
PECTIN 5% CON GELADO/SECO	-	-	-	-	-	-	0,4967	-	-	-
BASE SECA PRESION ATMOSFERICA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PECTIN 10% BASE SECA PRESION ATMOSFERICA	-	-	-	-	-	-	0,7200	-	-	-
PECTIN 5% GLUCOSA, 5% CONGELADO/SECO	-	-	-	-	-	-	0,7408	-	-	-
FRUTILLA 52% RH	-	-	-	-	-	-	1,9900	-	-	-
FRUTILLA 52% RH	-	-	-	-	-	-	2,0700	-	-	-
PIMIENTA DULCE	92.4	-1.1	-	3,940	1,970	-	-	307,000	4.4	5,470
PIMIENTA, CHILE	12.0	-	-	1,260	1,010	-	-	-	-	-
PERSIMMONS	78.2	-2.1	-	3,520	1,800	-	-	260,500	-	-
PIÑA	-	-	-	-	-	-	0,5486	-	-	-
PIÑA PREPARADA	85.3	-1.4	-	3,680	1,880	-	-	283,800	-	-
CIRUELAS	85.7	-2.2	-	3,680	1,880	-	-	286,100	-	-
CIRUELA AZUL SECAS	28-35	-	0-100	2,220	2,470	-	-	-	-	-
FRASCAS	75-78	-	0-100	3,520	-	-	-	-	-	-
LARGAS	-	-	-	-	-	-	0,2423	-	-	-
PEQUEÑAS	-	-	-	-	-	-	0,2942	-	-	-
GRANADAS	77	-2.2	-	3,680	2,010	-	-	260,500	-	-
PALOMITAS	13.5	-	-	1,300	1,010	-	-	-	-	-
ACEITE	-	-	-	-	-	-	0,1693	-	-	-
GACHAS	-	-	0-100	3,220	-	-	-	-	-	-
				3,770						
PAPAS BLANCAS	77.8	-1.7	-	3,430	1,800	-	-	258,200	0	1,510
	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4	2,090

ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION MEDIO. (°C)	CONGELACION PRO	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVI		DATOS DE CALOR RESPI-			
				NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)		DAD TERCAL		CALOR LATENTE (J/kg)	RATORIO	
					CONGELA- CION ALTA	CONGELA- CION BAJA	TEMPERA TURA (°C)	CONDUCTI VIDAD TERCAL (W/m . °K)		TEMPERA TURA (°C)	CALOR RESPIRA TORIO (J/24 hr . kg)
PAPAS	14	-	-	0-100	1,840	-	-	-	-	-	
HERVIDAS	75	-	-	0-100	3,520	-	-	1.0900	-	-	
CRUDAS	-	-	-	-	-	-	-	0.5538	-	-	
FRESCAS/MA- CIACADAS	-	-	-	-	-	-	-13	1.0900	-	-	
MOLIDAS	-	-	-	-	-	-	-8	0.4154	-	-	
EN ENSALADA	-	-	-	-	-	-	-	0.4846	-	-	
ALMIDON CON GELADAS	-	-	-	-	-	-	-	0.3773	-	-	
PRESION ATMOS FERICA BASE SECA	-	-	-	-	-	-	-	1.6270	-	-	
P.A. 52% RH	-	-	-	-	-	-	-	1.6960	-	-	
CALABAZA	90.5	-	-	-	3,850	1,970	-	-	302,400	-	
REINAS	85.3	-2.2	-	-	3,680	1,880	-	-	283,800	-	
RABANOS	93.6	-	-	-	3,980	2,010	-	-	-	-	
PREPARADOS	93.6	-	-	-	3,980	2,010	-	-	-	-	
DE INVIERNO	93.6	-	-	-	3,980	2,010	-	-	311,700	-	
PASAS	24.5	-	-	0-100	1,970	-	-	-	-	-	
ACEITE	-	-	-	37.8	-	-	-	-	-	4.4	
										7,910-9,890	
										21,100-25,900	
FRAMBUESA	82	-1.1	-	-	3,560	1,880	-	-	283,800	4.4	
										7,910-9,890	
										21,100-25,900	
NEGRAS	80.7	-1.2	-	-	3,520	1,840	-	-	283,800	-	
ROJAS	83.4	-0.9	-	-	3,600	1,880	-	-	283,800	-	
RUBARBO	94.9	-2	-	-	4,020	2,010	-	-	311,700	-	
ARROZ	10.5-13.5	-	-	0-100	-	1,760-1,840	-	-	-	-	
RUTABAGAS	89.1	-1.4	-	-	3,810	1,970	-	-	295,400	-	
SALSIFY	79.1	-2	-	-	3,480	1,840	-	-	262,800	-	

ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION PROMEDIO, (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPIRATORIO			
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg · °K)		TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m · °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr · kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA					
ACEITE DE SESAMO	-	-	-	1,620	-	-	-	-	-	
ORRTEL	92	-	0-100	4,020	-	-	0.1755	-	-	
ACEITE DE SOYA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ESPINACA	85-90	-	0-100	3,770	-	-	0.0692	-	-	
	92.7	-0.94	-	3,940	2,010	-	-	307,000	-	
QUASH VERANO	95.0	-	-	4,020	-	-	-	-	-	
INVIERNO	88.6	-	-	3,810	-	-	-	-	-	
FRESAS	90.9	-	-	3,885	1,140	-	-	289,670	-	
	90.0	-1.2	-	3,850	1,970	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	0.6750	-	-	-	
FRESCAS	89.9	-	-	3,850	1,264	-	-	-	-	
CONGELADAS	7.2.0	-	-	-	1,760	-	-	-	-	
TODOS TAMAÑOS FUERTEMENTE EMPACADAS	-	-	-	-	-	13.3	0.6750	-	-	
	-	-	-	-	-	-6.7	1.0890	-	-	
	-	-	-	-	-	-12.2	1.0970	-	-	
	-	-	-	-	-	-17.8	1.1230	-	-	
TODOS TAMAÑOS EN 57% DE SACAROSA	-	-	-	-	-	-17.3	0.9692	-	-	
	-	-	-	-	-	-12.7	-	-	-	
UGO DE FESA SACAROSA GRANULADA	-	-0.9	4.4-32.2	3,980	-	2.9-9.5	0.5884	-	-	
	-	-	-	-	-	-6.7	0.0116	-	-	
	-	-	-	-	-	-12.2	0.0234	-	-	
	-	-	-	-	-	-17.8	0.0308	-	-	
	-	-	-	-	-	-23.3	0.0403	-	-	
	-	-	-	-	-	-28.9	0.0452	-	-	
ACAROSA LACTOSA	-	-	-	-	-	-12.2	0.0258	-	-	
	-	-	-	-	-	-17.8	0.0338	-	-	
	-	-	-	-	-	-23.3	0.0428	-	-	

ALIMENTO	% CONTENIDO DE AGUA	PUNTO DE CONGELACION PROMEDIO (°C)	DATOS DE CALOR ESPECIFICO		DATOS CONDUCTIVIDAD TERMAL		DATOS DE CALOR RESPIRATORIO			
			NIVEL DE TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg . °K)		TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERMAL (W/m . °K)	CALOR LATENTE (J/Kg)	TEMPERATURA (°C)	CALOR RESPIRATORIO (J/24 hr . kg)
				CONGELACION ALTA	CONGELACION BAJA					
JACAROSA LACTOSA	-	-	-	-	-	-28.9	0.4811	-	-	-
AZUCAR	-	-	0-100	1,260	-	-	-	-	-	-
APAS DULCES	68.5	-1.9	-	3,140	1,680	-	-	226,000	4.4	1,990
TANGERINAS	87.3	-2.2	-	3,890	2,090	-	-	293,100	-1.1	3,800
	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4	6,820
TABACO	-	-	-	-	-	-	0.0727	-	-	-
JITOMATES MADUROS	94.7	-0.9	-	3,980	2,010	-	-	311,700	15.6	7,250
VERDES	94.1	-0.9	-	3,980	2,010	-	-	311,700	4.4	1,470
JITONATE CE-REZA	-	-	-	-	-	-	0.4621	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	0.5279	-	-	-
NABOS	90.9	-0.8	-	3,890	1,970	-	-	302,400	0	2,210
	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4	2,560
	-	15	-	-	-	-	0.5625	-	-	-
QUA	-	-	-	-	-	20	0.5867	-	-	-
	-	-	-	-	-	10	0.5850	-	-	-
	-	-	-	-	-	5	0.5642	-	-	-
	-	-	-	-	-	0	0.5435	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	0.1627	-	-	-
PRIGO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CALABAZA BLANCA	90-92	-	0-100	3,890	-	-	-	-	-	-
HERVIDA	97	-	0-100	4,100	-	-	-	-	-	-
LEVADURA	70.9	-	-	3,220	1,720	-	-	-	-	-

### CONCLUSIONES

Los principales problemas que se presentan en la transferencia de calor por conducción en alimentos son las diferentes ----- estructuras que conforman un alimento ,las cuales por no ser homogneas, presentan dificultad en al evaluación exacta de la transferencia de calor.

Los principales procesos en los que se utiliza la transferencia de calor por conducción en alimentos son la estereilización y la congelación.

Las propiedades de los alimentos varían mucho dependiendo de el lugar en dode: fue cosechado, la época del año, condiciones climatológicas esto en caso de vegetales y en el caso de -- animales de la alimentación, especie, género, edad.

Los objetivos planteados inicialmente fueron cubiertos----- ampliamente en cada uno de los capítulos de la presente tesis.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Experimental formulas for accurate estimation of transient Temperature of Food and their application to thermal process evaluation. Kan-Ichi Hayakawa Food Technology Vol 24. December 1970.
- 2.- Kan-Ichi Hayakawa "New Parameters for Calculating Miss Average Sterilizing value to estimate nutrients in thermally conductive food. Canadian Institute of food technology journal vol. 2 No. 4 1969.
- 3.- Kan-Ichi Hayakawa "Experimental Formulas for Accurate Estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation" Food technology vol. 24, 1415 December 1970 .
- 4.- Kan-Ichi Hayakawa " A Critical Review of Mathematical procedures for determinig proper heat sterilization processes food technology March 1970.
- 5.- S.D. Holdsworth "Food Processes and Low Temperature Chemical Engineering" The Chemical Engineer May. 1970.
- 6.- C.M.F. Flambert & J. Del Tour "Lethal Effect of food temperature on lineal portion of heating or cooling curve" Journal of food scrence Vol. 42 No. 2 1977.
- 7.- R.J. Steele and P. W. Board " Amendents to Balls formula method for calculating the lethal value of thermal processes " Journal of food science vol. 44 No.1 (1979).
- 8.- R.L. Merson, R.P. Singh, y P.A. Carroad "An evaluation of ball's formula method of thermal process calculations" Food Technology March (1978).

- 9) KAN-ICHIHAYAKAWA "MODIFIED LETHAL RATE PAPER TECHNIQUE FOR THERMAL PROCESS EVALUATION" CANADIAN INSTITUTE OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL VOL. 6 No.4 1973.
- 10) KAMICHI HAYAKAWA " A PROCEDURE FOR CALCULATING THE STERILIZING VALUE OF THERMAL PROCESS" FOOD TECHNOLOGY VOL 22, QU5 JULY 1968
- 11) M. PATASCHNIK " A SIMPLIFIED PROCEDURE FOR THERMAL PROCESS EVALUATION" -- FOOD TECHNOLOGY VOL 7 No.1 1953
- 12) S.L. PALLEY, O.P. SNYDER Y P. NUTNOUR " A COMPILATION OF THERMAL PROPERTIES OF FOODS" FOOD TECHNOLOGY NOVEMBER 1980
- 13) LENTZ C.P 1961 THERMAL CONDUCTIVITY OF MEATS, FATS GELATINS AND ICE FOOD - TECHNOLOGY 15;243
- 14) SANTI R. BHOWMIK Y VIANICHI HAYAKAWA " A NEW METHOD FOR DETERMINING THE -- APPARENT THERMAL DIFFUSIVITY OF THERMALLY CONDUCTIVE FOOD" JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOL. 44 No.2 (1979).
- 15) GRAHAM LUSK, MARCUS KAREL Y SAMUEL A BOLDBLITH "THERMAL CONDUCTIVITY OF SOME FROZEN - DRIED FISH FOOD TECHNOLOGY OCTOBER 1964
- 16) JUN-ICHI UNO Y VIANICHI HAYAKAWA "A METHOD FOR ESTIMATING THERMAL DIFFUSIVITY OF HEAT CONDUCTION FOOD IN A CYLINDRICAL CAN " JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOLUME 45; 692 1980.
- 17) STANLEY CHARM "A METHOD FOR CALCULATING THE TEMPERATURE DISTRIBUTION AND MASS AVERAGE TEMPERATURE IN CONDUCTION - HEATED CANNED FOODS DURING WATER COOLING" FOOD TECHNOLOGY MAY 1961.
- 18) KAN ICHI HAYAKAWA "ESTIMATING THE CENTRAL TEMPERATURES OF CANNED FOOD DURING THE INITIAL HEATING OR COOLING PERIOD OF HEAT., FOOD TECHNOLOGY VOL. 23 1473
- 19) KANICHI HAGAKAWA " FORMULAS FOR PREDICTING TRANSIENT TEMPERATURES IN FOOD FREEZING OR THAWING" AIChE SYMPOSIUM SERIES No.132 VOL. 69.
- 20) N.D. COWELL AND H.L. EVANS "STUDIES IN CANNING PROCESSES IV" FOOD TECHNOLOGY SEPTEMBER 1961.
- 21) KAN ICHIHAYAKAWA "RESPONSE CHARTS FOR ESTIMATING TEMPERATURES IN CYLINDRICAL CANS OF SOLID FOOD SUBJECTED TO TIME VARIABLE PRECESSING TEMPERATURES" JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOLUME 39 1974
- 22) KAN-ICHI HAYAKAWA " NEW COMPUTATIONAL PROCEDURE FOR DETERMINING THE APPARENT THERMAL DIFFUSIVITY OF A SLAB BODY APPROXIMATED WITH AN INFINITE SLAB" JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOLUME 38 (1973)

- 23) S. W. MOLINE, J.A. SOWDYE A.J. SHORT Y AP. RINFRET "THERMAL PROPERTIES OF FOODS AT LOW TEMPERATURES I" FOOD TECHNOLOGY MAY 1961.
- 24) J. LOZANO, M.J. URBICAIN Y E. ROTSTERN "THERMAL CONDUCTIVITY OF APPLES AS A FUNCTION OF MOISTURE CONTENT" JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOL 44 No.1 (1979)
- 25) IKAN-ICHI HAYAKAWA JORGE SUCCAR " A METHOD FOR DETERMINING THE APPARENT THERMAL DIFFUSIVITY OF SPHERICAL FOODS" LEBENSM. WISS U - TECHNOL, 16, 373-375 (1983).
- 26) J.I. WADSWORTH, J.J. SPADRO "TRANSIENT TEMPERATURE DISTRIBUTION IN WHOLE SWEETPOTATO ROOTS DURING IMMERSION HEATING" FOOD TECHNOLOGY 1969.
- 27) R. PAUL SNGH "THERMAL DIFFUSIVITY IN FOOD PROCESSING" FOOD TECHNOLOGY FEBRUARY 1982.
- 28) E.E. WOODAMS Y J.E. NOWREY "LITERATURE VALUES OF THERMAL CONDUCTIVITIES OF FOODS" FOOD TECHNOLOGY VOL. 22 494 APRIL 1968.
- 29) J.E. HILL, J.D. LEITMAN Y J.E. SUNDERLAND "THERMAL CONDUCTIVITY OF VARIOUS MEATS" FOOD TECHNOLOGY VOL. 21,1143 AUGUST 1967.
- 30) D.R. HELDMAN " FOOD PROPERTIES DURING FREEZING" FOOD TECHNOLOGY - FEBRUARY 1982.