

20
201°



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



V N A M

**PROGRAMA POR COMPUTADORA PARA PREDECIR TIEMPOS DE
CONGELACION EN ALIMENTOS DE FORMA REGULAR CON
ALTO CONTENIDO DE HUMEDAD**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A N

**Perez Moscoza Silvia
Rodriguez Aldana Armando**

ASESOR: DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDD. DE MEXICO

1993

TESIS CON
PALLA DE ORIGEN



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.

Mal impreso

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

INDICE

| | Página |
|--------------------|--------|
| Resumen | 1 |
| Introducción | 3 |
| Objetivos | 6 |

I.- Antecedentes Generales

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.- Congelación | 9 |
| 1.1.1.- Velocidad de congelación | 12 |
| 1.1.2.- Punto de congelación | 14 |
| 1.1.3.- Métodos de Congelación | 17 |
| a) Congelación por aire | 18 |
| b) Congelación por contacto indirecto ... | 19 |
| c) Congelación por inmersión | 21 |
| 1.2.- Mecanismos de transferencia de calor durante la congelación | 23 |
| 1.2.1.- Conducción | 23 |
| 1.2.2.- Convección | 28 |
| 1.3.- Propiedades Térmicas | 41 |
| a) Conductividad Térmica | 42 |
| b) Entalpía | 46 |
| c) Capacidad Calorífica | 48 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| d) Difusividad Térmica | 51 |
| e) Calor Latente de Fusión | 52 |
| f) Densidad | 56 |
| g) Contenido de Hielo | 57 |
| 1.4.- Tiempos de Congelación | 59 |
| 1.4.1.- Métodos Analíticos | 63 |
| 1.4.2.- Método Numérico | 64 |
| 1.4.3.- Selección del Método Apropriado | 66 |
| 1.4.4.- Factores que Influyen en el Tiempo de congelación | 67 |

II.- Metodología

| | |
|----------------------------------------|-----|
| 2.1.- Organización de Algoritmos | 70 |
| Cuadro Metodológico | 71 |
| Propiedades Térmicas | 72 |
| Coeficiente Convectivo | 73 |
| Tiempos de Congelación | 74 |
| 2.2.- Descripción del Programa | 75 |
| 2.2.1.- Propiedades Térmicas | 76 |
| 2.2.2.- Coeficiente Convectivo | 89 |
| 2.2.3.- Tiempos de Congelación | 96 |
| 2.3.- Manejo del Programa | 113 |

III.- Resultados

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.- Comparación entre propiedades térmicas bibliográficas y propiedades térmicas obtenidas con el programa | 128 |
| 3.2.- Comparación entre valores de coeficiente convectivo bibliográficos y los obtenidos con el programa | 137 |
| 3.3.- Comparación entre tiempos de congelación bibliográficos y tiempos de congelación obtenidos con el programa | 139 |
| Conclusiones | 148 |
| Bibliografía | 151 |

RESUMEN

Para la realización del presente trabajo encaminado a la creación de un programa por computadora que permita predecir los tiempos de congelación para alimentos de forma regular (con alto contenido de humedad), éste se ha dividido en tres capítulos.

Dentro del capítulo I se define la congelación como uno de los métodos de conservación de los alimentos perecederos, la velocidad de congelación, así como el punto de congelación. De igual manera se describen los métodos mediante los cuales se puede congelar un alimento.

Dada la importancia de analizar la transferencia de calor aplicada a la congelación, también se explican los mecanismos en los cuales se lleva a efecto el intercambio de calor.

Así mismo se exponen cada una de las propiedades termofísicas involucradas en el proceso de congelación de alimentos, mencionando su importancia dentro del proceso y su variación con la temperatura (arriba y abajo del punto de congelación) y con el contenido de humedad.

Referente a tiempos de congelación se cubre una parte importante de los métodos existentes para la predicción de

dicho tiempo, su clasificación, así como las consideraciones que toman en cuenta cada uno de ellos.

El capítulo II corresponde a la metodología que se sigue, en él se encuentra la descripción del programa en forma algorítmica, donde se muestra la secuencia de cálculo para propiedades térmicas, coeficiente convectivo y tiempos de congelación; también se expone la forma en la que se encuentra estructurado el programa, así como una explicación sencilla del manejo de dicho paquete de cómputo.

Finalmente para la generación del programa, en el capítulo III se presentan los resultados. en donde se comparan las propiedades térmicas obtenidas por medio de las ecuaciones empíricas con respecto a datos reportados en la bibliografía por distintos autores, así como para coeficiente convectivo y tiempos de congelación. Todo esto con el fin de verificar la confiabilidad del programa aplicándolo a la ingeniería de alimentos.

INTRODUCCION

De las necesidades del hombre, la alimentación es la más importante para el sustento de la vida. Conforme aumenta la urbanización del mundo y la población se incrementa, la necesidad de la eficiencia en la producción y conservación de los alimentos se hace más aguda.

El problema a resolver hoy en día y a un futuro no muy lejano, es la distribución de los alimentos a cualquier sector de población. En estas últimas décadas la ingeniería de alimentos en México, ha desarrollado un campo de conservación y distribución de los alimentos: la industria de la congelación y refrigeración.⁽¹⁰⁾

La aceptación de productos congelados y/o refrigerados aumentó rápidamente a medida en que se hicieron más comunes los refrigeradores y congeladores en el hogar, esto en general se debe a que los alimentos congelados son aceptables por su calidad (sabor, color, olor), además de que en su mayoría son alimentos de fácil preparación dentro del hogar.⁽¹¹⁾

Cabe señalar que la calidad de los alimentos refrigerados y congelados, depende no sólo de los métodos empleados para su conservación, sino que también es de suma importancia el conocimiento de las propiedades termofísicas de los mismos (conductividad térmica, capacidad calorífica, entalpía, difusividad térmica, densidad, calor latente y contenido de hielo).

Por otro lado, para el diseño o la elección del equipo apropiado, debe tenerse previamente un conocimiento de los factores que determinan los tiempos de refrigeración y/o congelación; ligado con ello, la velocidad de transmisión de calor en el alimento tiene un efecto determinado sobre la calidad final. Así que, el ingeniero en alimentos, conociendo el valor y la forma de variación de las propiedades térmicas con la temperatura, puede predecir cargas frigoríficas, velocidades y tiempos de congelación y/o enfriamiento para unas condiciones dadas, e inferir con otras disciplinas del conocimiento si esa historia térmica es la adecuada para obtener la calidad deseada.⁽¹²⁾

En la industria conservadora de alimentos mediante el frío, los tiempos de congelación y descongelación son vitales, ya que el consumo energético y económico debe ser

minimo para garantizar divisas. En este campo el ingeniero de diseño y de alimentos, conjuntamente han aportado beneficios al desarrollar modelos empíricos, gráficos y numéricos para la predicción del tiempo requerido para enfriar o congelar un alimento, esto, en conjunto con los avances tecnológicos, han generado formas más exactas para la simulación del proceso. El uso de computadoras en la industria de los alimentos ha revolucionado los procesos de producción, transformación y conservación.

En virtud de lo anterior, el presente trabajo plantea la generación de un programa por computadora para predecir el tiempo de congelación en alimentos de forma regular (placa plana, cilindro y esfera) con alto contenido de humedad.

Para tal propósito, el programa está estructurado de la siguiente manera:

- Determinación de propiedades termofísicas
- Determinación del coeficiente convectivo
- Predicción de tiempos de congelación

OBJETIVO GENERAL

Generar un programa por computadora para predecir tiempos de congelación en alimentos con un alto contenido de humedad.

OBJETIVOS PARTICULARES

I.- Determinar propiedades térmicas (Conductividad térmica, capacidad calorífica, entalpía, difusividad térmica, densidad, calor latente de fusión, contenido de hielo) en alimentos con alto contenido de humedad a partir de ecuaciones empíricas.

II.- Determinar los tiempos de congelación en alimentos con un alto contenido de humedad y geometría regular, a partir de ecuaciones empíricas, método gráfico y método numérico.

2.1.- A partir de las ecuaciones empíricas propuestas por Plank, Mellor I.I.R y Cleland-Eearle; predecir los tiempos de congelación.

2.2.- Empleando el método gráfico de Salvadori et al;
predecir los tiempos de congelación.

2.3.- Empleando el método numérico de diferencias
finitas, predecir los tiempos de congelación.

III.- Evaluar la confiabilidad del programa a partir
de datos bibliográficos.

CAPITULO I

ANTECEDENTES GENERALES

1.1.- Congelación

La congelación representa para muchos alimentos el mejor medio de conservación a largo plazo, pues asocia los efectos favorables de las bajas temperaturas a los de la transformación del agua en hielo. ⁽¹⁵⁾

La congelación, al igual que la refrigeración, utiliza el descenso de la temperatura para prolongar el periodo de conservación de los alimentos. Aunque las temperaturas empleadas en la congelación son mucho más bajas que las usadas en la refrigeración, la diferencia esencial entre ambos métodos es la formación de cristales de hielo en el interior de los alimentos. ⁽¹⁶⁾ A continuación se describen las diversas etapas que se suceden en la obtención de un producto congelado :

Nucleación: Se trata de la formación de cristales de hielo, homogénea o heterogénea, según que la cristalización tenga lugar por generación de núcleos de la misma solución, o resulte favorecida por la presencia de cristales de diversas sales solubles, de partículas de polvo, etc. En los alimentos siempre se llega a un tipo de nucleación heterogénea.

Crecimiento de Cristales: Este fenómeno es debido a que las moléculas de agua emigran hacia el medio y terminan agregándose a un núcleo ya existente. En los alimentos, la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo depende de la diferencia de temperatura entre el cristal y el medio que le rodea. La presencia de sustancias en disolución, tales como sales, azúcares, alcoholes, proteínas..., también retarda el crecimiento de los cristales de hielo.

En la tabla No. 1 se observa la influencia que tienen ciertos componentes de los alimentos sobre la velocidad de crecimiento de los cristales, la cuál se ve disminuida a medida en que el peso molecular de la sustancia o componente del alimento aumenta .

TABLA No. 1
VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE CRISTALES PARA CIERTAS
SUSTANCIAS PRESENTES EN LOS ALIMENTOS⁽¹¹⁾

| | TEMPERATURA | VELOCIDAD (mm/seg) |
|-------------|-------------|--------------------|
| Agua | -D. 1 °C | 61 |
| ClNa 0.1M | -D. 1 °C | 41 |
| Etanol 0.1M | -D. 1 °C | 29 |

Dimensión del Cristal: Depende de la velocidad de crecimiento de los mismos, es decir, de la temperatura de congelación. De este modo, una congelación rápida produce cristales más o menos redondeados, de pequeño tamaño, y una congelación lenta cristales alargados, en forma de agujas, que dañan mecánicamente las estructuras celulares. En la obtención de alimentos congelados, una exigencia común a todos los procesos es que los cristales obtenidos tengan unas dimensiones inferiores a un tamaño crítico determinado. Se ha comprobado que en la congelación lenta de frutas, verduras, carnes y pescados, los núcleos de hielo se forman en los espacios existentes entre las células y crecen a expensas del agua que difunde a través de la pared celular. En estas condiciones, las células se distorsionan debido a la deshidratación y a la presión ejercida por los grandes cristales de hielo del exterior. Si el enfriamiento es más rápido, la velocidad de nucleación es mayor y los núcleos se forman en el interior de las células.

Recristalización: Durante el almacenamiento, algunos cristales de hielo aumentan de tamaño a expensas de cristales más pequeños que desaparecen.⁽²⁵⁾

1.1.1.- Velocidad de Congelación

Generalmente se define a la velocidad de congelación como el descenso de la temperatura por unidad de tiempo. Sin embargo, este modo de expresión, no es muy apropiado. Por lo tanto, es preferible referirse a la velocidad de liberación de calor, a la velocidad de desplazamiento del frente de congelación, o al tiempo necesario para traspasar un intervalo de temperatura determinado. Se puede aconsejar la siguiente relación como medida de la velocidad de congelación:

distancia mínima entre la superficie y el centro (o punto crítico) / tiempo que transcurre desde el momento que la temperatura es 0°C en el centro crítico y cuando la temperatura alcanza -15°C , en ese mismo punto.*

La velocidad de congelación depende principalmente de la diferencia de temperatura entre el producto a congelar y el medio de enfriamiento.⁽¹¹⁾

* El centro crítico (o punto crítico) es, en la masa del producto, el punto que se enfría más lentamente.

La tabla No. 2 presenta algunos ejemplos de condiciones de velocidad de congelación que se manejan a nivel industrial, en ella se observa que la velocidad de descenso de temperatura para un producto alimenticio sujeta a congelación con equipos que manejan fluidos frigoríficos, puede ser demasiado rápida (1000 a 10.000 °C/min). Por otro lado es importante mencionar que la calidad de un producto congelado depende directamente de la velocidad a la que es congelado, y hoy en día se acepta que los mejores resultados se obtienen con los alimentos que se han sometido a 'congelación rápida y ultra-rápida'.

TABLA No 2
CONDICIONES DE CONGELACION ⁽¹¹⁾

| VELOCIDAD DE CONGELACION | VELOCIDAD DE DESCENSO DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO. | INSTALACIONES |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| LENTA | $\leq 2^{\circ}\text{C/min}$ | -Congelador doméstico (aire inmóvil a -18°C) |
| RAPIDA | 10 a 100°C/min | -Túneles de aire frío (por ej., aire a -40°C circulando a 20 km/h.) |
| ULTRA RAPIDA | 1000 a $10.000^{\circ}\text{C/min}$ | -Equipos con fluidos frigoríficos. |

Se puede decir que generalmente cuanto más rápida sea la congelación, mejor será la calidad del producto. Sin

embargo, podemos decir que la velocidad de congelación en algunos productos alimenticios depende principalmente de la composición, estructura física, etc.

La composición del alimento incluye no sólo la composición química y la conductividad térmica de los diversos componentes, sino también la disposición física de los mismos, por ejemplo, el modo en que está distribuida la grasa en una pieza de carne y el sentido en que están orientadas las fibras de músculo en relación con la superficie refrigerante.⁽²⁰⁾

1.1.2.- Punto de Congelación

Se conoce por punto de congelación del producto a la temperatura más elevada a la cual los cristales de hielo tienen una existencia estable en el producto alimenticio.⁽²⁾

Es importante mencionar que el agua de los alimentos no es agua pura sino, más bien, una solución de sales, azúcares y proteínas solubles, además de un complejo de moléculas proteicas que están en suspensión coloidal. Mientras que el agua pura congela a 0°C, el punto de congelación de una solución siempre está por debajo de esta cifra, y el grado

en que desciende el punto de fusión es proporcional a la concentración de los solutos. La carne, el pescado, las frutas y verduras más comunes que contienen mucha agua, tienen puntos de congelación entre 0°C y -4°C . Por el contrario, algunos alimentos preparados, con un escaso contenido de agua y en los que los solutos están a una concentración más elevada, tienen puntos de congelación más bajos; por ejemplo, el punto de congelación de los pasteles rellenos de picadillo de carne, fruta y especias es de alrededor de -10°C (15°F).⁽⁵⁾

Los datos de la tabla No. 3, que corresponden a algunas frutas, hortalizas y productos de origen animal, demuestran que la composición de los diferentes alimentos varía en cuanto al nivel de agua, la clase y cantidad de sólidos disueltos en ésta, y que por lo tanto, es de esperarse que los alimentos tengan puntos de congelación diferentes y que bajo condiciones de congelación determinadas, requieran diferentes períodos de tiempo a fin de congelarse completamente. Así mismo se puede observar que alimentos con contenidos de humedad muy altos (por ejemplo: tomate, espárrago, brocoli) tienen valores de punto de congelación bajos, en relación a los otros productos.⁽²⁰⁾

TABLA No. 8
PUNTOS DE CONGELACION DE ALGUNOS ALIMENTOS ⁽²⁷⁾

| ALIMENTO | AGUA (FRACCION) | PTO. DE CONGELACION (°C) |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------|
| ESPARRAGO | 0.98 | -0.6 |
| BROCOLI | 0.90 | -0.6 |
| ZANAHORIA | 0.88 | -1.4 |
| TOMATE (maduro) | 0.94 | -0.5 |
| MANZANA | 0.84 | -1.1 |
| BANANA | 0.75 | -0.8 |
| SALMON | 0.64 | -2.2 |
| POLLO | 0.74 | -2.8 |
| CAMARON | 0.88 | -2.2 |
| LECHE (8.7% grasa) | 0.87 | -0.6 |
| HIGADO | 0.70 | -1.7 |
| CARNE DE RES | 0.70 | -1.0 |
| CARNE DE RE (60% magra) | 0.49 | -1.7 |
| PIERNA DE CORDERO | 0.65 | -1.7 |
| JAMON (74% magro) | 0.56 | -1.7 |
| HUEVO FRESCO | 0.88 | -0.6 |

1.1.3.- Métodos Comerciales de Congelación

Existen tres métodos básicos de congelación que se aplican a escala comercial, éstos son la congelación por aire, la congelación por contacto indirecto con el refrigerante, y la congelación por inmersión directa en un medio refrigerante. A su vez estos métodos pueden subdividirse de varias formas, una de las cuales se indica en la tabla No. 4.

TABLA No. 4
MÉTODOS COMERCIALES DE CONGELACION⁽²⁰⁾

| CONGELACION POR AIRE | CONGELACION POR CONTACTO INDIRECTO | CONGELACION POR INMERSION |
|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| - Circulación Natural. | - Congelador a una placa | - Líquido de intercambio. |
| - Circulación Forzada. | - Congelador a dos placas | - Gas Comprimido. |
| | - Congelador con placa a presión. | - Rocío refrigerante. |
| | - Congelador a consistencia de escaracha. | |

mismos que a continuación se describen :

a) Congelación por aire

Circulación Natural: Este tipo de congelación se llevó a cabo durante los primeros años de desarrollo de la tecnología frigorífica. En las cámaras que se construían a principios del siglo los serpentines se colocaban en los techos y en algunas paredes, las temperaturas de evaporación (amoníaco) no alcanzaban los -15°C , la compresión era en una etapa, y la circulación de aire por convección natural, se lograban tiempos de congelación de 3 a 6 días, consecuentemente existía pérdida de los alimentos y deterioro en los que se lograban conservar. En estas se congelaban carne, peces, aves, y en algunas regiones animales de caza como liebres, gansos, venados, etc.⁽¹²⁾

Circulación Forzada : En contraste con los congeladores de aire con circulación natural, existen los congeladores de aire con corrientes de aire intensas. Estos congeladores funcionan característicamente a temperaturas entre -29°C y -45°C , y con velocidades de aire forzado de 600 a 900 metros por minuto. Bajo estas condiciones los alimentos pueden congelarse en un tiempo que fluctuará entre 12 y 18 horas.

Los congeladores de corrientes de aire intensas son de muchos diseños, desde cuartos en que se congelan los alimentos por lotes, hasta túneles por los que sus carros o bandas transportadoras se mueven continuamente.⁽¹²⁰⁾

Para lograr la congelación rápida de los alimentos se emplean túneles donde los productos pueden estar inmóviles o estar en movimiento. Las velocidades que se logran en estos túneles pueden ser de 5 a 7 mts/seg y los tiempos de congelación fluctúan de acuerdo al aparato y al tipo y dimensiones del producto desde 12 min hasta 12 horas.⁽¹²¹⁾

b) Congelación por Contacto Indirecto

En la congelación de alimentos por contacto con superficies frías se utiliza la transmisión de calor por conducción.⁽¹²²⁾ Aquí el alimento se coloca sobre placas, charolas, bandas transportadoras u otras paredes frías que son enfriadas mediante un refrigerante.

Representativo de los principales congeladores por contacto indirecto es el Congelador Birdseye de Placas Múltiples. Este consta de una serie de estantes o placas de metal a través de los cuales circula el refrigerante. El

alimento, generalmente en paquetes planos, se coloca entre los estantes y, en cuanto se haya cargado completamente el congelador, se aplica presión a fin de acercar más los estantes, estableciendo un contacto más estrecho entre éstos y los dos lados de los paquetes, a fin de lograr la congelación más rápidamente. Según la temperatura del refrigerante, el tamaño de los paquetes, el grado de contacto, y el tipo de alimento, el tiempo requerido para la congelación fluctúa entre 1 y 2 horas para los paquetes comerciales con un espesor entre 3.75 y 5 cm.⁽²⁰⁾ Una de las características más importantes de este tipo de aparatos es que son de operación discontinua y los paquetes deben ser introducidos y sacados en forma manual.⁽¹²⁾

Los congeladores por contacto indirecto para alimentos líquidos y puros son muy distintos. Generalmente tienen la forma de los intercambiadores de calor tubulares en capa fina (superficie raspada), con refrigerante en lugar de vapor en el lado opuesto de la pared por la que pasa el alimento. Para este caso la congelación es prácticamente instantánea, sucediendo en unos segundos. En este tipo de unidad, la congelación nunca se lleva hasta la etapa final, porque el producto totalmente congelado se endurecería en el tubo y obstruiría el flujo continuo. En lugar de eso, el

producto se congela hasta que tenga la consistencia de escarcha, se envasa, y luego se congela en un congelador por corrientes intensas de aire o por inmersión.⁽²⁰⁾

c) Congeladores por Inmersión

En la congelación por inmersión podemos sumergir el alimento suelto o el paquete que lo contiene en el medio refrigerante. O bien podemos rociar el alimento o paquete con refrigerante. Las ventajas de este método incluyen las siguientes:

- 1) Existe un contacto íntimo entre el alimento o paquete y el refrigerante y, por lo tanto, se reduce la resistencia a la transmisión de calor.
- 2) Las unidades sueltas de alimento pueden congelarse individualmente mediante la congelación por inmersión, como también mediante la congelación por aire, pero el primer método tiene la ventaja de reducir el contacto con el aire durante el proceso, lo cual puede ser deseable en el caso de los alimentos muy susceptibles a la oxidación.

3) En algunos alimentos la velocidad de congelación por inmersión en líquidos criogénicos, produce una calidad que no se puede lograr con ningún otro método de congelación conocido actualmente.

Los refrigerantes utilizados en la congelación por inmersión pertenecen a dos clases generales: a saber, los líquidos con un bajo punto de congelación que se enfrían mediante contacto indirecto con otro refrigerante y los líquidos criogénicos, tales como el nitrógeno líquido comprimido, que deben su fuerza enfriadora a su propia evaporación.⁽²⁰⁾

1.2.-MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE LA CONGELACION.

La transferencia de energía se verifica por más de un mecanismo de transferencia de calor, estos mecanismos de transferencia de calor son la conducción, convección y radiación. En el caso de la congelación se trata de una transferencia de calor por conducción en estado inestable, que es característico para aquellos casos en que la variación de la temperatura ocurre, no sólo con la posición espacial dentro del cuerpo, sino que estos perfiles de temperatura cambian con el tiempo.⁽¹⁴⁾

1.2.1.-Mecanismo por conducción

El mecanismo de conducción se verifica cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, presentándose una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura, y está descrito por la ecuación de Fourier:

$$q = -k A \frac{\delta T}{\delta x} \quad (1)$$

en donde q es la rapidez de transferencia de calor, $\frac{\delta T}{\delta x}$ es

el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor, k es la conductividad térmica del material, A es el área de sección transversal normal a la dirección del flujo de calor y el signo menos indica que el calor fluirá de un lugar de mayor temperatura a otro de menor temperatura.

Durante el mecanismo de conducción en un gas, las moléculas con mayor velocidad intercambian energía con las más lentas a través de colisiones. Parece claro que a medida que aumenta la velocidad molecular, el número de colisiones aumenta, así como la velocidad con la cual es transportada la energía. El mecanismo de conducción en los líquidos es similar en algunos aspectos a los gases, pero hay algo más que considerar. Las fuerzas intermoleculares influyen en el intercambio de energía, de modo que es más difícil hacer un modelo del comportamiento de los líquidos y predecir el comportamiento de sus propiedades térmicas.⁽⁴⁾

Se cree que la conducción de calor a través de sólidos se efectúa generalmente por dos mecanismos básicos: el primero es la interacción molecular, en el cual las moléculas de niveles energéticos relativamente mayores (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles inferiores. Este tipo de transferencia

sucede en los sistemas que tienen moléculas de sólidos, líquidos o gases, o en los que hay un gradiente de temperatura.

El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es el de electrones "libres", los cuales se presentan principalmente en los sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales. La facilidad que tienen los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; en consecuencia se espera que los metales puros sean los mejores conductores de calor. ⁽²⁰⁾

La transferencia de calor en estado inestable es importante debido al gran número de problemas de enfriamiento y calentamiento que existen en la industria de los alimentos.

Para el análisis de la variación de la temperatura, simultáneamente con respecto a la posición unidireccional x y al tiempo t , retomaremos la ecuación 1, que es la expresión para la conducción en la dirección x :

$$q_x = -k A \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2)$$

con las variables y , z y el tiempo t manteniéndose constantes. A continuación se realiza el siguiente análisis, entendiéndose como elemento una placa:

velocidad de entrada = velocidad de salida + velocidad de acumulación de calor

La velocidad de entrada de calor a la placa es:

$$\text{vel. de entrada de calor} = q_x \Big|_x = -k(\Delta_y \Delta_z) \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_x \quad (3)$$

Además,

$$\text{vel. de salida de calor} = q_x \Big|_{x + \Delta_x} = -k(\Delta_y \Delta_z) \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x + \Delta_x} \quad (4)$$

La velocidad de acumulación de calor en el volumen $\Delta_x \Delta_y \Delta_z$ en el tiempo dt es:

$$\text{vel. de acumulación de calor} = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z) \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (5)$$

en donde ρ y C_p son la densidad y el calor específico del sólido respectivamente.

Sustituyendo las tres expresiones en el análisis de balance energético y dividiendo entre $(\Delta_x \Delta_y \Delta_z)$:

$$\frac{-k \left(\frac{\delta T}{\delta x} \Big|_x - \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x + \Delta_x} \right)}{\Delta_x} = \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (6)$$

Δ_x

Cuando Δ_x tiende a cero, se obtiene la segunda derivada parcial de T con respecto a x o $\frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$ en el lado izquierdo de

la ecuación. Entonces, reordenando la expresión:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho c p} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (7)$$

donde α es $\frac{k}{\rho c p}$, esto es la difusividad térmica (esta deducción supone que ρ , C_p y k son constantes), a esta expresión se le conoce con el nombre de segunda ley de Fourier para conducción de calor, y para resolver esta ecuación diferencial con el fin de determinar la distribución de temperaturas en un medio, se necesitan especificar las llamadas condiciones de frontera y condiciones iniciales. ⁽⁸⁾

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

CONDICION DE FRONTERA: Especifican la temperatura o la situación de flujo de calor en los límites de la región. ⁽¹²⁾

12.2.- Mecanismo por convección

El mecanismo de la convección se ha expresado por medio de la ley de enfriamiento o calentamiento Newtoniana, definida por la siguiente ecuación:

$$q = hc A (T_{\infty} - T) = C\rho\rho V \frac{\delta T}{\delta t} \quad (8)$$

en donde T es la temperatura del cuerpo, T_{∞} es la temperatura del fluido (temperatura del medio de enfriamiento). A es el área de la superficie, hc, llamado algunas veces *coeficiente pelicular, de conductancia unitaria pelicular o coeficiente pelicular de convección*, es el coeficiente de conductancia de una capa de fluido imaginaria que se encuentra adherida a la superficie de un cuerpo durante su enfriamiento o calentamiento, Cp es el calor específico, ρ densidad, V volumen y t es el tiempo.⁽¹⁷⁾

Por otro lado, sin considerar el fenómeno del flujo involucrado, se sabe que la conducción es el mecanismo de transferencia de energía directamente adyacente a una superficie. Estas capas conductivas superficiales del fluido o "película" del fluido son las que controlan la razón de la transferencia del calor, con lo que determinan un valor

dado de h_c , por esta razón se denomina con frecuencia al coeficiente h_c como el coeficiente de película, Por tal motivo muchas personas insisten en que no se debe establecer una diferencia entre la convección, ya que el factor de control es la conducción.⁽²³⁾

Por medio de la ecuación (8) se puede decir que la convección es la transferencia de energía de un fluido a un cuerpo o de un cuerpo a un fluido y el gradiente de temperatura sobre la pared que se verifica, depende de la rapidéz a la que el fluido conduce el calor o de su campo de flujo.⁽⁴⁾

De lo anterior podemos concluir que la convección describe el proceso mediante el cual un fluido se mueve en una comunicación térmica con una superficie sólida o líquida, recibe o libera energía por medio de conducción o radiación, y entonces deja la superficie.

Para que se efectúe el fenómeno de convección es necesario el movimiento del fluido. Si ese movimiento es causado por algún mecanismo externo como un ventilador o una bomba, la situación se conoce como convección forzada. Si el movimiento es causado por diferencias de temperatura local y

efectos de flotación, es decir, existe movimiento del aire como resultado de los gradientes de densidad (que a su vez dependen de los gradientes de temperatura) cerca del cuerpo, la situación es conocida como convección libre.

Para predecir el grado al cual el calor es transferido por convección dentro de la superficie de un cuerpo (calentamiento) o fuera de la superficie del cuerpo (enfriamiento), por medio de un fluido ambiente (aire o agua), se necesitan los principios de la transferencia de calor, de la dinámica de fluidos, así como de la teoría de capa límite aplicada a la película de fluido adherido a la superficie.

Para la convección natural y forzada con números de Reynolds abajo de 2,100 se considera como flujo en régimen laminar o continuo, para números de Reynolds entre 2,100 y 10,000 existe una región de transición. Para Reynolds mayor a 10,000, el flujo se considera turbulento. ^(e)

Si la superficie de un cuerpo pierde calor por convección libre o forzada al fluido ambiente, el cual en el caso de materiales agrícolas usualmente se trata de aire o agua, existe un gradiente de temperatura el cual varía desde un valor elevado a la superficie del sólido, t_s , hasta un

valor más bajo de flujo libre de la temperatura del fluido, t_p , a cierta distancia desde la superficie.

El coeficiente no es una propiedad del material que se somete a calentamiento o enfriamiento. ⁽¹⁾⁽⁴⁰⁾

Existen dos números adimensionales importantes en la transferencia de calor, los cuales involucran el coeficiente de transferencia de calor convectivo: número de Nusselt y número de Biot. Las diferencias entre estos dos números son la conductividad térmica en el denominador y la longitud característica en el numerador. En el caso del número de Biot, la conductividad térmica k , es la conductividad del material a través del cual se transfiere el calor. En el enfriamiento y calentamiento por conducción de materiales agrícolas, el número de Biot es un parámetro físico que sirve para cálculos posteriores.

Así que el número de Biot está definido como:

$$Bi = \frac{hc \delta}{k} \quad (9)$$

donde:

hc = coeficiente convectivo

δ = dimensión característica

k = conductividad térmica

La dimensión característica del cuerpo involucrado para el cómputo de la transferencia de calor indica la importancia que tiene la resistencia interna a la transferencia o la resistencia externa, h_c y k determinan la facilidad con que es transferido el calor, por lo que su inverso representa la resistencia a esta transferencia.⁽⁴⁾

De esta forma, el número de Biot indicará cual de los mecanismos ha de ser considerado de acuerdo a los casos siguientes:

a) Cuando el valor de Biot es pequeño ($Bi < 0.1-0.2$), la resistencia interna es pequeña en comparación con la resistencia externa por lo que se considera despreciable la primera, ya que la temperatura del cuerpo permanece constante. Esta situación se puede presentar cuando la conductividad es grande, permitiendo que el flujo de calor atraviese el cuerpo con una variación de temperatura aproximadamente de cero. Un valor pequeño de coeficiente convectivo, también puede contribuir, ya que hace difícil que el flujo de calor atraviese fácilmente la superficie. Si el cuerpo es pequeño existirá una distancia pequeña a través de la cual la temperatura puede cambiar.

De esta manera, la pérdida de calor por convección del

cuerpo se manifiesta como una disminución en su energía interna, lo cual se puede expresar mediante la ecuación (8) de la ley de enfriamiento o calentamiento Newtoniana:

$$q = hc A (T_{\infty} - T) = Cp\rho V \frac{\delta T}{\delta t}$$

tomando como condición inicial $T = T_0$ en $t = 0$ y resolviendo:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-(hcA/Cp \rho V)t} \quad (10)$$

La relación de temperaturas $\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ es una función del tiempo y un tiempo constante de velocidad de enfriamiento.

La cantidad $hcA/Cp\rho V$ suele llamarse también *capacitancia térmica global* del sistema y tiene unidades de tiempo⁻¹ es decir, es una velocidad de enfriamiento (cr). De esta misma ecuación se obtiene el tiempo medio de enfriamiento $t_{1/2}$, que es el tiempo que se requiere para reducir la temperatura entre el cuerpo y el medio a la mitad:

$$t_{1/2} = \ln 2/cr \quad (11)$$

b) Cuando el Biot es grande ($Bi > 10-40$) la resistencia interna es mucho mayor que la externa, por lo que la diferencia de temperaturas entre la superficie y los alrededores es despreciable y se puede considerar que la

temperatura del medio de enfriamiento o calentamiento es prácticamente igual a la temperatura de la superficie del cuerpo, por lo tanto el mayor cambio de temperaturas toma lugar de la superficie al centro del cuerpo.

Bajo estas condiciones la ley de enfriamiento o calentamiento de Fourier se aplica mejor (ecuación 1). La relación de temperatura $\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ es función del número de Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha t}{\delta^2} \quad (12)$$

donde:

α = difusividad térmica

t = tiempo

δ = dimensión característica

También es función de la relación de distancias:

$$\frac{\delta}{\delta_m} \quad (13)$$

Esto indica una condición frontera de convección en la superficie del sólido y la ecuación diferencial para su solución debe tomar en cuenta esta transferencia de calor por convección en la superficie. ⁽⁴⁾⁽⁹⁾

Para el caso del número de Nusselt, la conductividad k_f es la conductividad de la película del fluido adherido al

objeto. La dimensión característica de ambos números (Biot y Nusselt) no se refiere a la misma. En el caso de una esfera la dimensión característica es el radio para el número de Biot, $\frac{hc_r}{k}$, y el diámetro para el número de Nusselt, $\frac{hc_L}{k_f}$, donde $L = 2r$.⁽⁴⁷⁾

Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor, hc , se determina generalmente por correlaciones empíricas. La determinación exacta de este factor constituye la mayor dificultad en los cálculos de transferencia de calor y depende de varios parámetros de flujo que incluyen conductividad, densidad, viscosidad y velocidad del flujo, nivel de turbulencia y posición en la superficie.⁽⁴⁾

Existen algunos métodos y técnicas que se han empleado para evaluar el coeficiente convectivo, algunos de ellos son por ejemplo: el método de interferencia, que ha sido reportado por Eckert y Soehnchen (1951),⁽⁴⁷⁾ Método de análisis geométrico, reportado por Smith, et al. (1967)⁽⁴⁷⁾ y el método de ecuaciones empíricas que a continuación se explica:

Método de ecuaciones empíricas.- Existen ecuaciones empíricas para estimar el coeficiente convectivo aplicables

a ciertas geometrías, fluidos y números de Reynolds. Todas esas ecuaciones están en términos del número de Reynolds, debido a que el tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento, del fluido individual, ejerce un efecto considerable sobre el coeficiente convectivo, h_c , pues la mayor parte de la resistencia a la transferencia de calor está localizada en la película delgada cercana a la pared (mientras más turbulento es el flujo, más alto será el coeficiente de transferencia de calor), del número de Nusselt y, en algunos casos del número de Prandtl, que se puede interpretar físicamente como la relación de la capacidad del fluido para almacenar energía a la capacidad para transmitirla o conducirla. ⁽¹²⁾⁽¹³⁾

La mayoría de las correlaciones para predecir coeficientes de película son semiempíricas y dependen de las propiedades físicas del fluido, del tipo y velocidad del flujo, de la diferencia de temperaturas y de la geometría del sistema físico individual en estudio.

En general el coeficiente promedio de transferencia de calor en cuerpos sumergidos en algún fluido está dado por:

$$N_{Nu} = C N_{Re}^m N_{Pr}^{1/3} \quad (14)$$

Donde C y m son constantes que dependen de las diversas configuraciones. Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película $T_f = (T_w + T_b)/2$, donde

T_s es la temperatura superficial o de la pared y T_b es la temperatura general promedio del fluido. La velocidad en N_{Re} es la velocidad v de corriente libre sin perturbaciones, del fluido que se aproxima al objeto. ^{(1)(B)}

Otro número adimensional empleado en los cálculos de convección es el número de Grashof, el cual juega un papel en las condiciones de convección libre similar al del número de Reynolds en las situaciones de convección forzada. Cuando las fuerzas ascensionales son grandes, el flujo se hace turbulento. Cuando las fuerzas viscosas son grandes el flujo se cambia a la situación laminar. ⁽²⁾

En la tabla número 5 se muestran los números dimensionales empleados en la transferencia de calor.

TABLA No. 5

GRUPOS ADIMENSIONALES UTILIZADOS
EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

| GRUPO | SÍMBOLO | FORMULA | SIGNIFICADO FÍSICO |
|---------|---------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biot | Bi | $Bi = \frac{hL}{k}$ | Cociente entre la resistencia térmica del sólido y la del fluido. |
| Fourier | Fo | $Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$ | Cociente entre la conducción del calor y el calor almacenado. Util en transferencia de calor transitoria. |
| Gratz | Gz | $Gz = RePr(d/L)$ | Utilizado en problemas de convección forzada. |
| Grashof | Gr | $Gr = \frac{\rho \nu d^2 C_p}{kL} = \frac{\rho \beta \Delta T L^3}{\nu}$ | Cociente entre las fuerzas de flotación y viscosas. |
| Levís | Le | $Le = \frac{\alpha}{D_{AB}}$ | Cociente entre la difusividad térmica y la difusividad molecular. Para transferencia de masa |

GRUPOS ADIMENSIONALES UTILIZADOS

EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

(continuación)

| GRUPO | SÍMBOLO | FORMULA | SIGNIFICADO FÍSICO |
|----------|---------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nusselt | Nu | $Nu = \frac{hcL}{k}$ | Coficiente básico de la transferencia de calor por convección adimensional. |
| Peclet | Pe | $Pe = RePr$ $Pe = \frac{\rho v L c_p}{k}$ | Cociente entre la transferencia de calor por convección y por conducción. Para convección forzada. |
| Prandtl | Pr | $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$ $= \frac{\nu}{\alpha}$ | Cociente entre el impulso y la difusión térmica |
| Rayleigh | Ra | $Ra = GrPr$ $= \frac{\rho \beta \Delta T c_p \rho^2 L^3}{k \mu}$ | Utilizado en problemas de convección libre. |
| Reynolds | Re | $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ $= \frac{v L}{\nu}$ | Cociente entre las fuerzas de inercia y de viscosidad. |

GRUPOS ADIMENSIONALES UTILIZADOS

EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

(continuación)

| GRUPO | SÍMBOLO | FORMULA | SIGNIFICADO FÍSICO |
|----------|---------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Schmidt | Sc | $Sc = \frac{H}{\rho D_{AB}}$ $= \frac{v}{D_{AB}}$ | Cociente entre el impulso y la difusión de masa |
| Sherwood | Sh | $Sh = \frac{hmL}{D_{AB}}$ | Cociente entre la difusión de masa y la difusividad molecular. |
| Stanton | St | $St = \frac{Nu}{Re Pr}$ $= \frac{hc}{\pi V c_p}$ | Cociente entre el calor transferido en la superficie al transportado por el fluido. |

donde:

c_p = calor específico a presión constante

D_{AB} = difusividad másica

d = diámetro

g = aceleración de la gravedad

hc = coeficiente de transferencia de calor por convección.

hm = coeficiente de transferencia de masa convectiva.

k = conductividad térmica de un fluido.

- k_s = conductividad térmica de un sólido.
 L = dimensión característica.
 t = tiempo.
 V = velocidad.
 α = difusividad térmica.
 β = coeficiente de dilatación cúbica.
 ΔT = diferencia de temperatura.
 μ = viscosidad absoluta o dinámica
 ν = viscosidad cinemática.
 ρ = densidad.

1.3.- Propiedades termofísicas

Las propiedades termofísicas de los alimentos influyen grandemente en los procesos de su conservación por el frío tales como la refrigeración, la congelación, el almacenamiento o el transporte. Por ello, el conocimiento de sus valores es imprescindible si el objetivo que se pretende es la obtención de un producto final de alta calidad partiendo del equipo y de las condiciones de trabajo idóneas.⁽⁴³⁾

Para el diseño o la elección del equipamiento apropiado debe tenerse, previamente, un conocimiento completo de los factores que determinan los tiempos de enfriamiento y/o congelación. Ligado con ello, la velocidad de transmisión de calor del alimento tiene un efecto determinado sobre la calidad final.

La congelación así como la descongelación pueden tener efectos severos sobre las propiedades termofísicas de los alimentos, ya que el agua es el componente mayoritario de éstos y las propiedades del hielo son muy diferentes a las del agua. Por ejemplo, la conductividad térmica del hielo es cuatro veces la del agua, y el calor específico del hielo es la mitad del calor específico del agua.⁽¹⁷⁾

A continuación se explica cada una de las propiedades termofísicas involucradas en el desarrollo del presente trabajo, a saber : conductividad térmica, entalpía, calor específico, difusividad térmica, calor latente, densidad y contenido de hielo.

a).- Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad termofísica que presenta una interrelación con las propiedades

fisicoquímicas de materiales biológicos, como son: pérdida de peso y sólidos solubles, las que son determinantes en la calidad final de un producto.⁽⁴⁾

La definición de la conductividad térmica, k , parte de la ecuación número 1, de acuerdo con la cual, la velocidad de transmisión de calor por conducción es directamente proporcional al área de la sección a través de la cual el calor es transmitido y el negativo del gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor; la conductividad térmica k es el factor de proporcionalidad.

Es decir que k es un valor de la facilidad con que el calor es conducido en una sustancia debido al mecanismo de transferencia de calor por conducción, cuyo valor depende básicamente de la composición química, la estructura física, el estado de la sustancia y la temperatura. En el caso de materiales biológicos, la conductividad depende más de la estructura celular, la densidad y la humedad, que del efecto de la temperatura, ya que cuando existe migración de humedad la conductividad térmica del material se altera continuamente.⁽¹⁷⁾

La mayoría de los alimentos no son homogéneos, especialmente cuando un componente se encuentra disperso en otro componente más continuo. Por ejemplo la mantequilla consta de agua dispersa en una fase de grasa más o menos continua. El componente más continuo tiene mayor influencia en la conductividad térmica. Similarmente se obtienen variaciones de su valor en las carnes, dependiendo de que la dirección de las fibras sea paralela o perpendicular al flujo de calor. A pesar de ello, estos valores influyen en la conductividad térmica por lo común en menos del 10 al 20%.

El contenido de aire en un producto alimenticio tiene una marcada influencia en la conductividad térmica. La conductividad térmica del aire es alrededor del 20% para las grasas y proteínas, 10% para carbohidratos y 4% para el agua. El aire es un excelente aislante siempre y cuando sea atrapado en pequeñas bolsas que evitan las corrientes de convección. En productos como los helados de crema y la crema batida, el aire es uno de los principales constituyentes en base al volumen.⁽⁷⁾

Durante el proceso de congelación, la conductividad térmica puede aumentar considerablemente como se muestra en la figura no. 1:

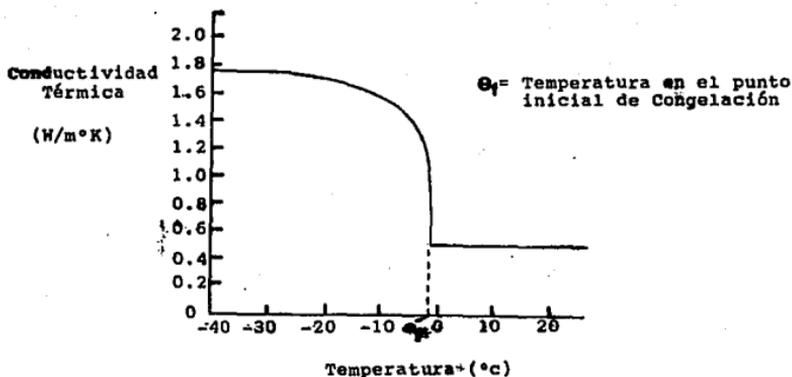


Fig. No. 1. - Variación de la conductividad térmica con la temperatura para productos alimenticios. (45)

En donde se puede observar que la variación de la conductividad térmica de los productos alimenticios con la temperatura generalmente es pequeña dentro de los intervalos de temperatura de mayor interés, a excepción de cuando son congelados. Este fenómeno explica en parte, por que los productos alimenticios a menudo se congelan en menos tiempo que cuando se descongelan en condiciones similares. (17)

b).-Entalpia

Como medida del frío necesario, sirven las diferencias de entalpia entre las temperaturas inicial y final de un proceso de enfriamiento. En la teoría de calor se entiende por entalpia el contenido de calor a presión constante, que puede medirse por vía calorimétrica y para lo que, en los últimos tiempos, se han puesto a prueba métodos muy exactos (calorímetro adiabático). Rjutov (1932), en el Instituto de Investigación del Frío, de Moscú, ha determinado valores de entalpia de numerosos alimentos, en la zona de temperaturas desde -20 a +30 °C. (19)

Si se designan por T_1 y T_2 las temperaturas inicial y final y por E_1 y E_2 los correspondientes valores de entalpia, el frío necesario para 1 Kg de un producto alimenticio es $Q_0 = E_1 - E_2$. Como se puede observar en la figura número 2, por encima del punto de congelación la entalpia aumenta con la temperatura de manera prácticamente lineal, puesto que el calor específico apenas se modifica. por debajo de el punto de congelación comienza una modificación continua de la entalpia, por lo tanto los valores a temperaturas inferiores dependen de la cantidad de agua congelada presente.

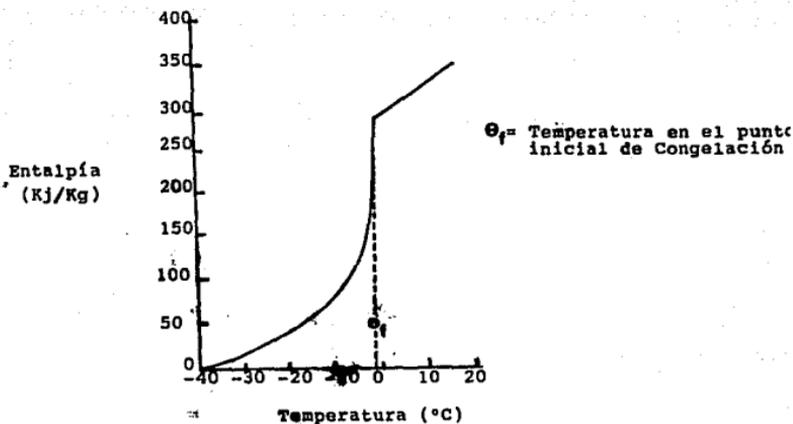


Fig. No. 2.- Variación de la entalpía con la temperatura

para productos alimenticios. (45)

En las grasas, como la manteca, los valores de la entalpía quedan influenciados por la solidificación de cada uno de los componentes. El huevo puede subenfriarse por debajo del punto de congelación y la entalpía toma valores distintos, por ejemplo para -1°C o -3°C , según que el huevo esté congelado o subenfriado. (46)

c).- Capacidad calorífica

El calor específico de una sustancia es la relación entre el calor necesario para subir o bajar en 1° la temperatura de una unidad de la sustancia y el calor necesario para subir o bajar en 1° la temperatura de una unidad de agua. Puesto que el calor específico del agua se utiliza como norma y es uno, resulta que el calor específico de cualquier sustancia es la cantidad de calor necesaria para subir o bajar la temperatura de una unidad de esa sustancia 1° .⁽¹⁹⁾

Se requiere de una cantidad diferente de calor a fin de subir o bajar la temperatura de un material 1° , según si su temperatura está arriba o abajo de su punto inicial de congelación.

El calor específico y el calor latente de los alimentos se conocen, y se utilizan para determinar los requerimientos de refrigeración para el enfriamiento, congelación y almacenamiento de los mismos.⁽²⁰⁾

Dependiendo de la manera en la que el calor es almacenado en el material, esta propiedad térmica puede estar dada por un calor específico a presión constante, denotada por C_p o por un calor específico a volumen

constante C_p . Sin embargo en problemas de transferencia de calor en materiales biológicos usualmente prevalecen a presión constante, por lo que el calor específico a presión constante se emplea normalmente.

Se ha encontrado, que para presiones extremadamente altas, la dependencia del calor específico con la presión es muy pequeña para sólidos y líquidos.⁽¹⁷⁾

Debido a que la energía calorífica se propaga a través de una sustancia debido a un gradiente de temperatura $\frac{\delta T}{\delta x}$, el calor específico denota la variación de la temperatura con el aumento del calor almacenado y depende de la naturaleza del proceso de adición de calor, ya sea a presión constante o a volumen constante, como ya se mencionó anteriormente.

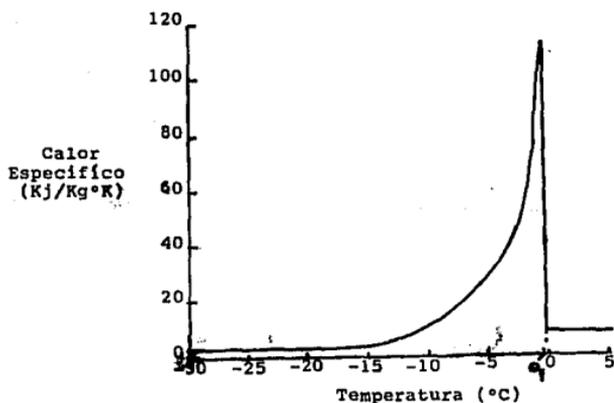
Para efectos de temperatura, si consideramos una diferencia de temperatura infinitesimal dT para una cantidad de calor infinitesimal dQ requerido para provocar un cambio en la temperatura, tenemos:

$$C_p = \frac{1}{W} \left(\frac{dQ}{dT} \right) \quad (15)$$

$$\text{ó} \quad dQ = W \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (16)$$

Esta ecuación indica que el C_p es una función de la

temperatura. En la figura número 3 se puede observar que para temperaturas ordinarias e intervalos de temperatura no grandes; el calor específico se puede considerar como una propiedad física constante. Solamente para temperaturas extremadamente bajas, aproximadamente cero absoluto, todos los valores del calor específico decrecen y, para ciertas sustancias, es aproximadamente cero.



Θ_f = Temperatura en el punto inicial de Congelación.

Fig. No. 3.-Variación del calor específico con la temperatura para productos alimenticios (142)

Si el intervalo de temperatura de un proceso dado es grande, se puede encontrar la variación del calor específico con respecto a la temperatura empleando la siguiente relación:

$$C_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT}{T_2 - T_1} \quad (17)$$

la cual proviene de una curva ordinaria de calor específico contra temperatura entre las temperaturas especificadas T_1 y T_2 .

d).- Difusividad térmica

Un parámetro importante en los sistemas de temperatura transitoria no uniforme es la difusividad térmica del cuerpo, que se puede definir como:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (18)$$

donde :

α es la difusividad térmica [=] m^2/seg

ρ es la densidad [=] Kg/m^3

K es la conductividad térmica [=] $W/m^{\circ}K$

C_p es el calor específico [=] $KJ/Kg^{\circ}K$

Como se observa la difusividad térmica depende de las características propias del material. Entre mayor sea el

valor de α el calor se propagará más rápidamente, es decir que valores elevados de α sugieren que la energía se difundirá muy rápidamente al cuerpo, debiéndose, ya sea a que se tiene un alto valor de conductividad térmica o a que la capacidad calorífica, C_p , es baja. Por otro lado, valores bajos indican una baja velocidad de transferencia de energía dentro del material.

Esta misma ecuación indica que cambios en la conductividad K , significan cambios proporcionales de la difusividad térmica α .⁽⁴⁾⁽¹⁷⁾

e).- Calor Latente

El calor necesario para llevar a cabo un cambio de estado a presión constante sin un cambio en la temperatura, es conocido como calor latente. En el caso de materiales alimenticios, el calor latente se refiere a un calor latente de fusión durante la congelación, por ejemplo, el hielo a 0°C y 1 atm. de presión puede absorber 6 014.4 Kj/mol Kg (este cambio de entalpia es el calor latente de fusión).

Cuando una fase líquida vaporiza a fase vapor con su presión de vapor a temperatura constante, se debe agregar

cierta cantidad de calor que recibe el nombre de *calor latente de vaporización*.

El calor latente de fusión es una propiedad física importante en la congelación de alimentos y para la determinación de las carga de refrigeración.

El calor latente usualmente se obtiene apartir del contenido de agua (%) del alimento y del calor latente de fusión del agua que aproximadamente es de 335 Kj/Kg. Los productos alimenticios perecederos no pueden someterse a un cambio de fase finito a presión constante a menos que se acompañe de un cambio en la temperatura. La sola excepción es el cambio de estado limitado, el cual ocurre cuando la temperatura se ha disminuido hasta el punto eutéctico.

Además, isotérmicamente, la solidificación a presión constante puede ocurrir solamente en una sustancia pura o en una mezcla con una composición eutéctica. Los alimentos perecederos no son ni sustancias puras ni mezclas eutécticas.

En contraste al calor latente, existe también el término de *calor sensible*. Este es el calor que se requiere para provocar un cambio en la temperatura de un material y no debe confundirse con el calor latente, el cual involucra un cambio de estado sin un cambio en la temperatura. La

propiedad física del material que gobierna al calor latente es el calor específico.

Los valores del calor latente aparecen junto con los de calor específico en varias tablas, y han sido muy usadas sin el conocimiento del origen de los valores o del método de cálculo. Análisis de tales datos revelan que al igual que el calor específico, el contenido de agua del material se emplea para calcular estos valores.

Woolrich (1938) encontró los valores de calor latente para nueve productos alimenticios. Graficando los datos en función al contenido de agua, encontró una relación lineal que se muestra en la figura número 4.

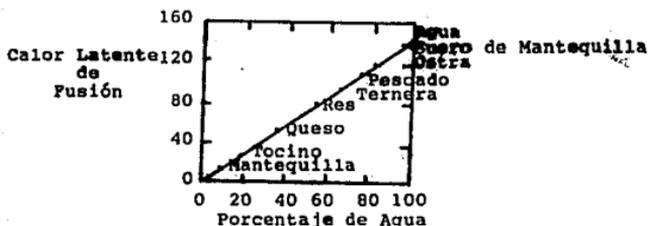


Fig No. 4. -Calor latente de varios productos alimenticios

encontrados por Woolrich (1938)

De acuerdo a esta investigación, se ha encontrado que en materiales no alimenticios el calor latente de fusión difiere de la relación original lineal dada en la figura.

Una de las fuentes citadas por Woolrich es el trabajo reportado por Cooper (1930), este investigador empleó un calorímetro de vacío para medir el calor perdido mediante un peso conocido de agua para la descongelación de una muestra del alimento congelado y elevando su temperatura hasta la temperatura de equilibrio.

En la figura número 5 se muestra el calor latente de algunos productos alimenticios encontrados por Cooper.

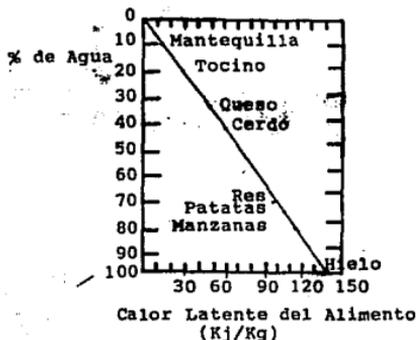


Fig. No. 5.-Calor latente de varios productos alimenticios encontrados por Cooper. (47)

El también concluyó que para efectos prácticos, el calor latente de un alimento se puede calcular multiplicando el porcentaje de agua presente en el alimento por 335 Kj/Kg, que es el calor latente de fusión del agua en el alimento congelado.

Además, considerando el hecho de que el calor de fusión del hielo es una función de la temperatura, la suposición de un valor constante de calor latente puede traer serias discrepancias. (OK17)

f).- Densidad

Para cálculos de transferencia de calor, la densidad usualmente aparece en la forma de peso específico o densidad másica con unidades de Kg/m^3 . Es importante reconocer que existen tres tipos de densidades en el comportamiento con materiales biológicos: densidad másica, densidad unitaria o aparente y la densidad real.

La densidad másica se refiere al peso de una masa de una unidad individual intacta del material empacado en un volumen dado, por un método específico. Este tipo de densidad incluye los espacios dentro del empaque.

La densidad unitaria o la densidad aparente se refiere

al peso de cada unidad intacta del material dividido por el volumen de la unidad. Este tipo de densidad incluye los espacios dentro de cada unidad del material.

Finalmente, la densidad real o densidad del sólido se refiere al peso por unidad de volumen de los sólidos dentro de cada unidad del material.⁽¹⁷⁾

g).- Contenido de hielo

El agua, como constituyente mayoritario de los alimentos, se presenta como el elemento determinante del valor y de la forma de variación de las propiedades termofísicas con la temperatura, principalmente en el intervalo donde ocurre el cambio de fase. Por debajo de -1°C , punto en que aproximadamente comienza a formarse hielo, la variación de esas propiedades deja de ser lineal con la temperatura con lo que crece el interés y la dificultad del conocimiento de sus valores.⁽⁴⁵⁾

La forma en que se lleva acabo la congelación de un alimento es de afuera hacia el interior del mismo, conforme avanza la congelación se le llama frente de hielo y va quedando un corazón sin congelar, para que este centro o

corazón desaparezca por completo debe de haber una considerable pérdida de calor sensible. Sin embargo, es bien conocido que muchos materiales alimenticios no solidifican completamente a temperaturas de congelación. El punto eutéctico de cualquier sistema es disminuido por la adición de cada nuevo componente. En materiales alimenticios se tiene una gran variedad de componentes, la solidificación final puede requerir muy bajas temperaturas de subcongelamiento. ⁽¹⁷⁾⁽¹²⁾

La cantidad de agua congelada tiene una gran influencia sobre los valores de las propiedades térmicas antes mencionadas, es por eso que se debe considerar dentro de los procesos de aplicación del frío.

El hielo tiene una conductividad térmica de $2.16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ y el agua de $0.50 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, o sea que es cuatro veces mayor que el agua líquida, concluyendo de esta manera que una vez que el hielo se forme, el calor va a ser transferido cuatro veces más rápido que en agua. ⁽¹⁷⁾

En el punto de congelación de los alimentos, que queda entre -0.8°C y -2.0°C , comienza una modificación continua de la entalpía, y los valores a temperaturas inferiores dependen de la cantidad de agua congelada presente. ⁽¹⁸⁾

1.4.- TIEMPOS DE CONGELACION

Para los ingenieros en alimentos ha sido de gran interés el conocimiento de los tiempos de enfriamiento y/o congelación ya que permiten :

- 1) Determinar la carga frigorífica que requiere un enfriador o congelador.
- 2) Obtener un diseño satisfactorio de un proceso de producción de alimentos refrigerados y congelados.
- 3) Control de calidad de productos alimenticios, el cual se afecta por el grado de congelación.

Existen dos posibilidades para definir prácticamente el tiempo de congelación, una orientada hacia la calidad del producto, y otra hacia la capacidad de producción de la instalación de congelación:

a) * Tiempo de Congelación Aparente * (T_a) : Se puede definir como el lapso de tiempo en el cual la superficie alcanza 0°C y el centro térmico alcanza la temperatura a la cual comienza la formación de cristales de hielo.⁽²⁰⁾

b) * Tiempo de Congelación Efectivo * (T_f) : Se ha definido como el tiempo necesario para disminuir la temperatura de un producto desde su valor medio inicial hasta un valor dado en el centro térmico.⁽²⁾

Por otro lado el Instituto Internacional del Frío, lo define como el tiempo que transcurre entre el momento en que la superficie del producto alcanza 0°C y el instante en que el centro térmico (punto del alimento que se enfría más lentamente) se encuentra a una temperatura de 10°C por debajo de la formación inicial de hielo en dicho punto; se elige esta temperatura porque, en un producto alimenticio típico, se consigue, virtualmente, la formación de hielo en ese momento.⁽³⁾

Considerando las definiciones anteriores, podemos decir que el proceso total de disminución de temperatura (congelación) se puede dividir en tres etapas:

I. - **Preenfriamiento (T_p)** : Es el tiempo necesario para reducir la temperatura del producto desde una temperatura inicial media hasta la temperatura en el punto inicial de congelación. El calor removido en esta etapa es el calor sensible.

II.- Congelamiento (T_{cf}) : Es el intervalo de tiempo necesario en que se lleva acabo la cristalización de la mayor parte del contenido de agua. Debido al rango de temperaturas en el cual ocurre la cristalización, existe remoción de calor sensible y de calor latente. Esta etapa comienza en el punto inicial de congelación y termina cuando el contenido de humedad se ha congelado en un 85 - 90% (es decir, finaliza aproximadamente cuando el cuerpo ha alcanzado una temperatura de -5.4°C .⁽²⁰⁾

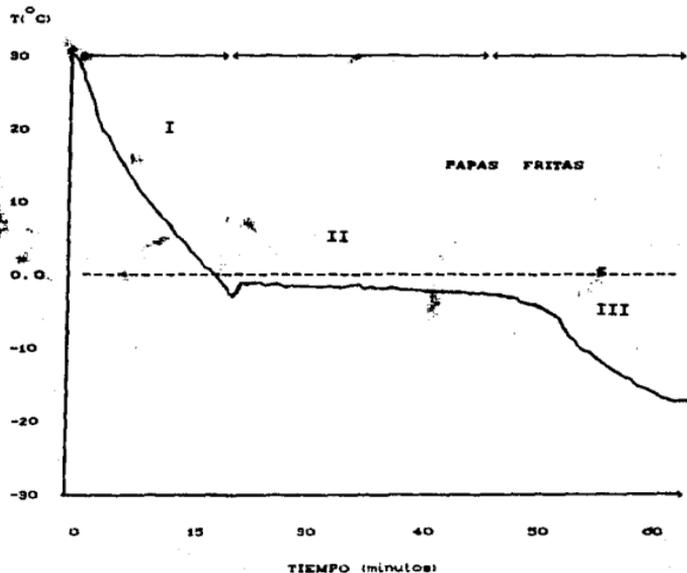
III.- Subenfriamiento o Temperación (T_s) : Se da cuando la contribución del calor latente es insignificante comparado con la del calor sensible y continúa hasta que el producto alcanza la temperatura final deseada en el centro térmico (generalmente para carnes y productos cárnicos esta temperatura es de -10°C o -18°C). Con este intervalo de tiempo el proceso de congelación practicamente ha llegado a su etapa final.⁽⁴⁴⁾

La figura No. 6 muestra una curva típica (historia térmica) de congelación para productos alimenticios , en la

que se observa la variación de la temperatura respecto al tiempo. Así mismo, se observa que el período de congelación con mayor tiempo se da durante el cambio de fase. Finalmente el tiempo efectivo de congelación está dado por:

$$T_f = T_p + T_{cf} + T_t.$$

FIGURA No. 6 CURVA TÍPICA DE CONGELACION (28)



Hoy en día existen en la literatura varios modelos matemáticos para predecir tiempos de congelación en alimentos, los cuales van de lo sencillo a lo complejo, esto debido a los cambios que ocurren dentro del producto y a la correspondiente influencia sobre sus propiedades térmicas.

Así los métodos y/o modelos para predecir tiempos de congelación pueden dividirse en dos grandes grupos: analíticos y numéricos .

1.4.1.- Métodos Analíticos

Los métodos analíticos se derivan de fundamentos teóricos con algunas suposiciones restrictivas. Tienen la ventaja de ser simples, fáciles de entender, reducen el requerimiento de datos térmicos (comparados con los métodos numéricos) y, tienen una amplia aplicabilidad.

Probablemente la expresión matemática más utilizada por su simplicidad es la de Plank (1913,1941), la cual solamente puede ser utilizada para calcular el tiempo de congelación y/o descongelación (la ecuación no da información sobre la distribución de temperaturas).⁽²⁸⁾

Actualmente, existen muchos trabajos que tienen como propósito principal modificar la ec. de Plank y/o tratan de encontrar nuevos métodos de solución (Ede. 1949; Nagaoka et al., 1955; Eddie and Pearson, 1958; Lorentzen and Rosvik, 1959; Fleming, 1967; Cowell, 1967; Mellor, 1976; Schwartzberg, 1977; Cleland and Earle, 1977; 1979a, b; etc...)⁽⁸⁸⁾. Todos estos métodos proponen características específicas de eliminación de calor y formas geométricas del alimento. Finalmente estos trabajos superan las deficiencias o restricciones que la ec. de Plank propone.

1.4.2.- Métodos Numéricos

La solución por métodos numéricos se usa ampliamente en la práctica para determinar la distribución de temperatura en sólidos con formas geométricas y condiciones de frontera complicadas. Un método que se usa frecuentemente es el de: Diferencia Finita. Este método sustituye en forma aproximada la ecuación diferencial parcial de la conducción de calor por un grupo de ecuaciones algebraicas de temperatura en un determinado número de puntos nodales de la región. En consecuencia, el primer paso del análisis consiste en transformar la ecuación diferencial de la conducción del calor en un sistema de coordenadas rectangulares.

La solución de este método en problemas de conducción de calor dependientes del tiempo, se puede dividir en: (1) Método explícito y (2) Método implícito. Ambos métodos transforman la ecuación diferencial y sus condiciones de frontera en un grupo de ecuaciones algebraicas, pero cada método tiene sus propias ventajas y desventajas. Por ejemplo, las ecuaciones que provienen del método explícito no son acopladas y fáciles de resolver, pero las soluciones son estables bajo condiciones muy restringidas. Por otra parte, las ecuaciones provenientes del método implícito son acopladas y más difíciles de resolver pero su solución no está restringida por criterios de estabilidad.⁽¹⁸⁾

En los últimos años se ha aplicado otro método de solución de los problemas de conducción de calor, llamado método de Elemento Finito, el cual se desarrolló para resolver problemas de conducción de calor cuando las formas geométricas (del alimento) son complejas. Este método tiene algunas ventajas sobre el método de la diferencia finita.⁽¹⁸⁾ Sin embargo para cumplir con el objetivo principal de este trabajo, solo abarcaremos la técnica por Diferencia Finita (método explícito) en la predicción de tiempos de congelación.

Finalmente, en este segundo grupo encontramos otra forma de predecir tiempos de congelación: predicción por métodos gráficos.

Los métodos gráficos son un caso especial de soluciones numéricas, donde las ecuaciones son transformadas mediante procedimientos gráficos (Schmidt, 1942; Keller y Ballar, 1956; Longwell, 1956; Sokulski, 1972; Cleland & Earle, 1979a; Salvadori et al, 1987). Usualmente estos métodos se restringen a transferencia de calor unidimensional. (50)

1.4.3.- Selección del Método Apropriado

La selección del método apropiado en la predicción de tiempos de congelación y/o descongelación depende principalmente de la comodidad y grado de exactitud que uno desea. El cálculo de los tiempos de congelación requiere en primera instancia, la selección estable del modelo de predicción, y en segundo, el conocimiento de las propiedades fisicoquímicas del alimento a congelar.

La exactitud del tiempo de congelación depende generalmente de el modelo de predicción y de la simulación de las condiciones usadas en el congelador. Por otro lado

ningún método reúne los criterios necesarios para ser considerado como simple, exacto y con gran aplicabilidad.

1.4.4.- Factores que Influyen en el Tiempo de Congelación

Como es evidente, existen parámetros que tienen influencia directa sobre el tiempo de congelación. Algunos de estos parámetros son: tamaño del producto, calor latente de fusión, densidad del producto, temperatura del medio de congelación, conductividad térmica del producto congelado, etc. Para dar un ejemplo de la manera en que estos influyen se tiene que:

- 1) **Temperatura del Medio de Congelación:** Una reducción en la temperatura del medio de congelación provoca una severa disminución en el tiempo de congelación. Así, el aumento o disminución en la temperatura del medio de congelación, aumenta o disminuye en forma proporcional el tiempo de congelación.

2) **Tamaño del Producto:** Un aumento o disminución en el espesor y/o diámetro del producto representa un aumento o disminución en el tiempo de congelación. La tabla No. 6 demuestra que el tiempo de congelación aumenta y disminuye en relación proporcional al espesor* (o diámetro) del alimento.

TABLA No. 6
DIAMETRO DEL PRODUCTO (mm) (37)

| METODO | TIEMPO DE CONGELACION (min.) | | |
|---------------|------------------------------|------|-------|
| | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| PLANK | 3.60 | 7.77 | 12.49 |
| CLELAND-EARLE | 3.44 | 7.40 | 11.91 |
| COMPUTER | 4.20 | 13.0 | 21.0 |

3) **Temperatura inicial del Producto:** La influencia que este parámetro tiene sobre el tiempo de congelación es mínima (por ejemplo: para un intervalo de 5 a 10 °C los valores de tiempo difieren muy poco).

CAPITULO II METODOLOGIA

2.1.- ORGANIZACION DE ALGORITMOS

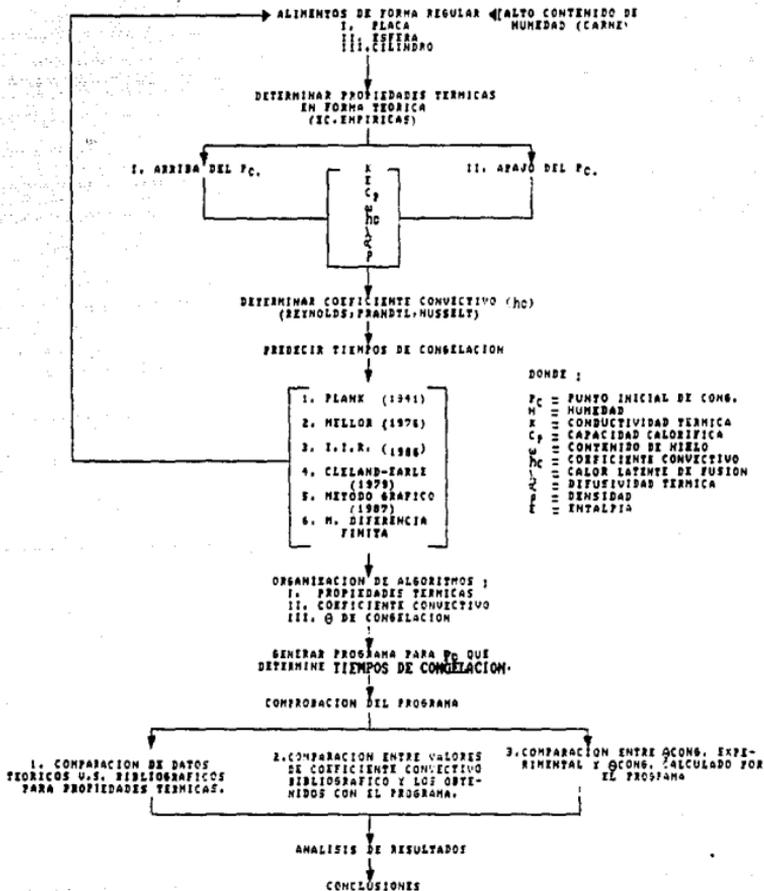
La organización de algoritmos se define como un conjunto de reglas o procedimientos bien definidos, que deben llevar un orden con el fin de obtener una solución a un problema en un número finito de pasos. Un algoritmo puede involucrar procedimientos aritméticos, algebraicos, lógicos y otros tipos de procedimientos e instrucciones.

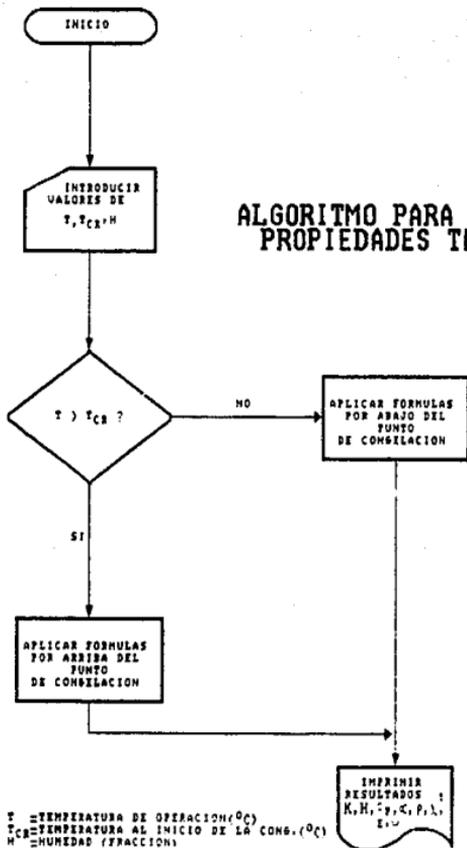
Por otra parte un algoritmo puede ser sencillo o complejo. Sin embargo, todos los algoritmos deben producir una solución dentro de un número finito de pasos. Los algoritmos son fundamentales para resolver problemas cuando se utiliza una computadora, ya que a esta se le debe suministrar un conjunto específico de instrucciones que conducen a una solución en un tiempo razonable.

A continuación se presentan los algoritmos que dan solución y estructuración al software desarrollado para predecir tiempos de congelación, con el orden siguiente:

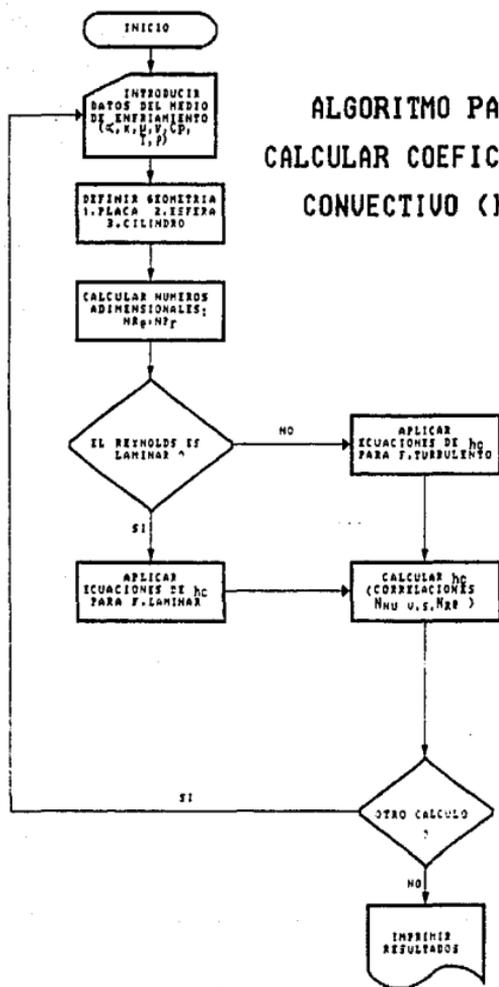
- Cuadro Metodológico
- Propiedades Térmicas
- Coeficiente Convectivo
- Tiempos de Congelación

CUADRO METODOLOGICO

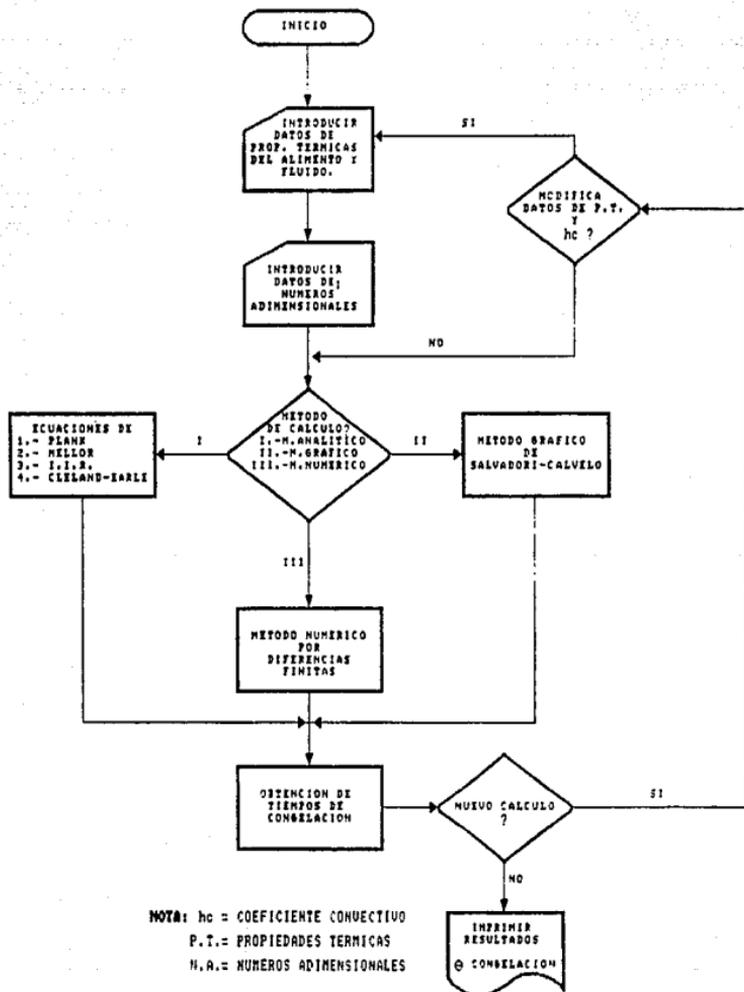




ALGORITMO PARA CALCULAR COEFICIENTE CONVECTIVO (h_c)



ALGORITMO PARA PREDECIR TIEMPOS DE CONGELACION



2.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Debido a que una de las características principales para la estructuración de un programa es la de contar con sistemas simples de ecuaciones que permitan el diseño y elaboración del mismo, ⁽²⁹⁾ primeramente se llevó a cabo una recopilación bibliográfica de las ecuaciones que dan solución a problemas de transferencia de calor (congelación), particularmente hablando de propiedades térmicas, coeficiente convectivo y tiempos de congelación.

En virtud de lo anterior, se divide el paquete de cómputo en tres etapas:

- 1.- Determinación de las propiedades termofísicas, tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación.
- 2.- Evaluación del coeficiente convectivo para geometrías regulares (placa plana, cilindro y esfera) considerando convección forzada.
- 3.- Predicción del tiempo de congelación, empleando ecuaciones empíricas, un método gráfico y un método numérico.

A continuación, se explica cada una de las etapas anteriormente mencionadas.

22.1.- Propiedades térmicas

Como ya se mencionó, las propiedades térmicas de los alimentos tienen gran influencia dentro de los procesos de refrigeración y/o congelación, es por eso que su evaluación es de gran importancia para que finalmente se obtenga un producto de alta calidad. Por tal motivo, la primera parte del programa se ha dirigido hacia la obtención de los valores de: *conductividad térmica, capacidad calorífica, entalpia, difusividad térmica, densidad, calor latente y contenido de hielo.*

Las ecuaciones que a continuación se presentan, son las que forman parte del paquete de cómputo, algunas de ellas son para alimentos en general y otras que pertenecen a casos particulares. Todas referidas al intervalo de temperatura de interés, ya sea por arriba o por abajo del punto inicial de congelación, así como también en función al contenido de humedad del alimento.

Conductividad térmica

Las ecuaciones empíricas junto con su autor se muestran en la tabla No. 7.

TABLA No. 7
Ecuaciones empíricas para el cálculo de
conductividad térmica

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|--------------|------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|
| $T > T_{cr}$ | $0.48594 + 1.0627 \cdot 10^{-3} T$ | 1 | Cordero deshuesado perpendicular a las fibras. |
| $T < T_{cr}$ | $1.2605 + 0.9713/T$ | 1 | |
| $T > T_{cr}$ | $0.26(1-H) + 0.00H$ | 2 | No considera anisotropía y es válida para cualquier alimento. |
| $T < T_{cr}$ | $1.74(1 - (T_{cr}/T))$ | 2 | |

ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DE

CONDUCTIVIDAD TERMICA

(continuación)

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|----------------------|-----------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------|
| $T > T_{cr}$ | 0.48 | 3 | Carne de vacuno 74% de humedad |
| $-30 \leq T \leq -5$ | $1.029 + 0.0821(-T - d)^{0.590}$ | 3 | No considera ρ |
| $-5 \leq T \leq -1$ | $0.48 + (-T)^{0.42P}$ | 3 | anisotropia. |
| $T > T_{cr}$ | $0.0695 + 0.582H + 2.051H \cdot 10^{-3} T$ | 4 | Carne de vacuno perpendicular a las fibras. |
| $T < T_{cr}$ | $0.3381 + 1.2123H + 0.780/T$ | 4 | las fibras. |
| $T > T_{cr}$ | $0.122 + 0.517H + 2.051H \cdot 10^{-3} T$ | 4 | Carne de vacuno paralela a las fibras. |
| $T < T_{cr}$ | $0.397 + 1.4406H + 0.959/T$ | 4 | fibras. |
| $T < T_{cr}$ | $\frac{3.48P}{(2 + \frac{0.407981}{187200})}$ | 5 | Carne de vacuno No considera ρ anisotropia. |

donde:

l= temperatura absoluta

T= temperatura ($^{\circ}$ C)

H= humedad del alimento (fracción)

cr= a la temperatura de comienzo de congelación

1= Bazan y Mancheroni⁽⁴³⁾

2= Fikiin⁽⁴³⁾

3= Levy⁽⁴³⁾

4= Maacheroni⁽⁴³⁾

5= Moreno⁽⁴³⁾

Entalpia

En la tabla No. 8 se presentan ecuaciones empiricas obtenidas generalmente por regresión de datos experimentales o por integración de ecuaciones de capacidad calorífica.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

TABLA No. 8

ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DE
ENTALPIA

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|--------------|-----------------------------------------|-------|--------------------------|
| $T > T_{cr}$ | $11.88+373.79H+(1.44+2.79H)T-T_{cr}$ | 1 | Carne de vaco. |
| | $T_{cr} = \frac{1-H}{0.690-0.4892}$ | | |
| $T > T_{cr}$ | $E_{cr} + Cp(T-T_{cr})$ | 2 | Para cualquier alimento. |
| | $Cp = 1597.3 + 2589.H$ | | |
| | $E_{cr} = 9792.46 + 40509dH$ | | |
| | $T_{cr} = 271.18 + 1.47H$ (para carnes) | | |
| | $T_{cr} = 287.56 - 49.19H + 37.07H^2$ | | (para vegetales y |
| | $T_{cr} = 120.47 + 327.35H - 17d.49H^2$ | | (fruta) |
| | | | (para jugos) |
| $T < T_{cr}$ | $aT_r + (1-a)(T_r)^b$ | 2 | Para cualquier alimento. |
| | $T_r = (T - 227.d) / (T_{cr} - 227.d)$ | | |

donde:

$$a = 0.31d - 0.247(H - 0.73) - 0.089(H - 0.73)^2 \quad (\text{para carnes})$$

$$a = 0.362 + 0.0498(H - 0.73) - 3.465(H - 0.73)^2 \quad (\text{para vegetales, frutas y jugos})$$

$$b = 22.95 + 54.68(a - 0.28) - 5589.03(a - 0.28)^2 \quad (\text{para carnes})$$

$$b = 27.2 - 129.04(a - 0.23) - 481.46(a - 0.23)^2 \quad (\text{para vegetales, frutas y jugos})$$

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

H = humedad del alimento (fracción)

cr = a la temperatura de comienzo de congelación

Cp = calor específico (=) $\text{J/Kg}^{\circ}\text{K}$

E = entalpía (=) J/Kg

1 = Mascheroni⁽⁴³⁾

2 = Chang-Tao⁽²⁹⁾

Capacidad calorífica

Las ecuaciones presentadas a continuación se obtuvieron normalmente por ajuste de modelos teóricos con constantes obtenidas de datos experimentales, o directamente por regresión a partir de valores medidos.

TABLA No. 9
ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DE
CAPACIDAD CALORIFICA

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|--------------|-----------------------|-------|--------------------------|
| $T > T_{cr}$ | $1.4474(1-H)+4.184H$ | 1 | Cordero deshuesado. |
| $T > T_{cr}$ | $1597.3 + 2587.9H$ | 2 | Para cualquier alimento. |
| $T > T_{cr}$ | $1.3805(1-H)+4.1833H$ | 3 | Para cualquier alimento. |

ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DE

CAPACIDAD CALORIFICA

(continuación)

| TEMPERATURA | EQUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------|
| $T < T_{cr}$ | $1.3805 - H \left(\frac{2.241}{1 + \frac{.31}{\log(T_{cr} - T + 1)}} - 2.8028 \right)$ | 3 | |
| Válida para cualquier alimento y no tiene en cuenta el cambio de fase | | | |
| $T > -1$ | 3.314 | 4 | Carne de vacuno |
| $T < T_{cr}$ | $C_s + H(C_l - C_s) + H(C_v - C_l) \frac{T}{T_{cr}} - \lambda H \left(\frac{T}{T_{cr}} \right)^2$ | 5 | Cualquier tipo de alimento |
| $T > T_{cr}$ | $1.4474(1-H) + 4.1883H$ | d | Carne de vacuno |
| $T < T_{cr}$ | $(0.12dH) + .84$ | 7 | Cualquier tipo de alimento |

donde:

T= temperatura (°C)

H= humedad del alimento (fracción)

cr= a la temperatura de comienzo de congelación

$g =$ a la temperatura definida por Bazan y Mascheroni.

$c_i, c_m, c_v =$ capacidad calorífica del hielo
(2.10 KJ/kg K), de los sólidos del alimento (1.91 KJ/Kg K) y
del agua (4.19 KJ/Kg K) respectivamente.

$\lambda =$ calor latente del hielo (333 KJ/Kg)

1= Bazan y Mascheroni⁽⁴³⁾

2= Dickerson⁽²⁹⁾

3= Fikiin⁽⁴³⁾

4= Levy⁽⁴³⁾

5= Mellor⁽⁴⁵⁾

6= Mascheroni y Calvelo⁽⁴³⁾

7= Siebel⁽²⁷⁾

Densidad

Su aportación en los procesos de aplicación del frío a los productos perecederos constituye un factor no menos importante de las ya mencionadas propiedades térmicas. La tabla No. 10 muestra las ecuaciones empíricas empleadas para su evaluación.

TABLA No. 10
ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DE
DENSIDAD

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACIONES |
|--------------|--------------------------------------------------|-------|---------------------------|
| $5 < T < 30$ | $\frac{1077.44}{(1+0.000375(T-5))}$ | 1 | Para carne vacuna. |
| $T < T_{cr}$ | $\frac{1053}{0.932+0.110H+0.257\frac{(1-H)}{T}}$ | 2 | Válida para carne vacuna. |

donde:

T= temperatura (^oC)

H= humedad del alimento (fracción)

cr= a la temperatura de comienzo de congelación

1= Jarvis⁽⁴³⁾

2= Mascheroni y Calvelo⁽⁴³⁾

Difusividad térmica

Para la evaluación de la difusividad térmica se empleó la ecuación (18), tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación, que es una definición general:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

donde:

α = difusividad térmica

ρ = densidad

c_p = calor específico

como ya se mencionó anteriormente, es una propiedad termofísica que depende de las características propias del alimento, así que es válida para cualquier tipo de alimento.

Contenido de hielo

El contenido de hielo es otro parámetro importante, ya que las propiedades anteriormente mencionadas cambian a medida que aumenta la fracción de agua congelada. La tabla número 11 muestra las ecuaciones empleadas para su evaluación en función al contenido de humedad y de la temperatura de operación.

TABLA No. 11

ECUACIONES EMPIRICAS PARA EL CALCULO DEL
CONTENIDO DE HIELO

| TEMPERATURA | ECUACION | AUTOR | OBSERVACION |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------|
| $T < T_{cr}$ | $1.18d - \frac{0.18dd}{H} + \frac{2.7013}{T} \left(\frac{1-H}{H} \right)$ | 1 | Carne vacuna |
| $T < T_{cr}$ | $0.5954 + 0.4d19H + \left(\frac{0.7521 + 0.1434H}{T} \right)$ | 2 | Cordero desh. H(0.7-0.7d). |
| $T < T_{cr}$ | $1 - \frac{T_{cr}}{T}$ | 3 | Para cual- quier alimen- to. |

donde:

T= temperatura °C.

H= humedad del alimento (fracción)

cr= a la temperatura de comienzo de congelación

1= Mascheroni y Calvelo ⁽⁴³⁾

2= Bazan y Mascheroni ⁽⁴³⁾

3= Fiklin ⁽⁴³⁾

Calor latente

Generalmente el calor latente de fusión se obtiene apartir del contenido de humedad (H), y del calor latente del agua pura, ⁽⁸⁾ (335 KJ/Kg), por ello la siguiente expresión se empleó para su evaluación, siendo aplicable para cualquier tipo de alimento.

$$\lambda = 335 * H \quad (19)$$

donde

λ = calor latente de fusión [=] KJ/Kg

H = humedad del alimento (fracción)

335 = calor latente de fusión del agua [=] KJ/Kg

Empleando cada uno de los modelos anteriormente mencionados, se evaluaron las propiedades termofísicas de diversos alimentos a diferentes temperaturas, los cuales se muestran en el capítulo III.

Para corroborar la confiabilidad de los valores calculados mediante el programa, se compararon dichos valores con los reportados en la bibliografía determinándose el porcentaje de diferencia (valor calculado - valor bibliográfico/valor calculado x 100) y por medio de una prueba de hipótesis se comprobó que éstos se pueden considerar iguales a los reportados bibliográficamente.

Las pruebas de hipótesis están basadas en la nulidad de las diferencias, es decir la diferencia de promedios de muestras es cero o estima a cero (o la diferencia entre lo experimental observado y lo teórico esperado es cero, o situaciones similares). Dicha diferencia de promedios de poblaciones se simboliza por H_0 y se conoce como hipótesis de nulidad. La hipótesis contraria se conoce como alternativa, se expresa como H_a y está basada en la no nulidad de las diferencias.⁽²¹⁾⁽²⁴⁾ Para dicha prueba se empleó un nivel de significancia α de 0.010 a 0.025 con las siguientes hipótesis:

$$H_0: p = \mu, H_a: p \neq \mu$$

en donde p es el valor calculado y μ es el valor reportado en la bibliografía, así que para la hipótesis nula se tiene que el valor calculado es igual al valor reportado bibliográficamente, es decir no existe diferencia significativa entre ambos valores.

2.2.2.- Coeficiente Convectivo

La segunda parte del paquete de cómputo está encaminada a la determinación del coeficiente convectivo h_c , mediante correlaciones empíricas. La determinación exacta de este factor constituye la mayor dificultad en los cálculos de transferencia de calor, ya que depende de varios

parámetros de flujo que incluyen conductividad, densidad, viscosidad y velocidad del fluido, nivel de turbulencia y geometría del cuerpo en estudio. Todos estos factores han sido considerados dentro de las correlaciones que se incluyen en el programa, además de que se considera convección forzada alrededor de: placa plana paralela al flujo, cilindro individual y esfera individual, se consideran dichas geometrías ya que son muy comunes en los problemas de transferencia de calor y se considera convección forzada, por que la mayoría de los congeladores industriales operan bajo ésta condición para efectuar la congelación de los alimentos.

Cabe señalar que primeramente se determinaron los números de Reynolds y Prandtl de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (20)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (21)$$

donde:

Re = No. de Reynolds

Pr = No. de Prandtl

ρ = densidad

V = velocidad

L = dimensión característica del cuerpo en estudio

μ = viscosidad

C_p = capacidad calorífica

k = conductividad térmica

las propiedades corresponden al fluido (medio de enfriamiento) a la temperatura de película $T_f = (T_w - T_b)/2$, donde T_w es la temperatura superficial o de la pared y T_b es la temperatura general promedio del fluido ⁽¹⁸⁾.

Placa paralela al flujo

Cuando el fluido fluye paralelo a una placa plana y existe transferencia de calor entre la totalidad de la placa y el fluido, se emplea la siguiente expresión ⁽¹⁹⁾ para número de Reynolds inferior a $3 \cdot 10^5$ en la región laminar y un número de Prandtl mayor a 0.7:

$$Nu = \frac{hcL}{k_f} = 0.664 \text{ No.Re}^{0.5} \text{ No.Pr}^{1/3} \quad (22)$$

Para la región completamente turbulenta con No.Re superior a $3 \cdot 10^5$ y $\text{No.Pr} > 0.7$, la siguiente ecuación se aplica ⁽²⁰⁾:

$$Nu = \frac{hcL}{k_f} = 0.0336 \text{ No.Re}^{0.8} \text{ No.Pr}^{1/3} \quad (23)$$

Cilindro individual

Para el caso de esta geometría se tienen dos opciones:

a) Sucede con frecuencia que un cilindro que contiene un fluido en su interior se calienta o se enfría por medio de otro fluido que circula perpendicularmente a su eje. La ecuación para predecir el coeficiente promedio de transferencia de calor en el exterior de cilindros para gases y líquidos es la siguiente⁽⁸⁾:

$$Nu = \frac{hcL}{k_f} = CNo.Re^m No.Pr^{1/3} \quad (24)$$

en donde los valores de C y m son constantes que dependen de la geometría y se dan en la tabla No. 12.

TABLA NO. 12
 CONSTANTES PARA LA ECUACION DE TRANSFERENCIA DE
 CALOR EN CILINDROS CON EL EJE PERPENDICULAR
 AL FLUJO (No. Pr > 0.6)^(B)

| No. Re | m | C |
|----------------------------------------|-------|--------|
| 1-4 | 0.380 | 0.989 |
| 4-40 | 0.385 | 0.911 |
| 40-4*10 ³ | 0.466 | 0.683 |
| 4*10 ³ -4*10 ⁴ | 0.618 | 0.198 |
| 4*10 ⁴ -2.5*10 ⁵ | 0.805 | 0.0266 |

para el número de Reynolds L es el diámetro exterior del tubo.

b) La siguiente ecuación es válida cuando se asume un cilindro individual en cuyo exterior fluye aire o agua⁽¹⁷⁾.

Solamente se consideran números de Reynolds aplicables en calentamiento o enfriamiento de materiales alimenticios.

$$Nu = \frac{hcL}{k_f} = BNo.Re^n \quad (25)$$

donde B y n son constantes que se dan en la tabla No. 13.

TABLA No. 18
 CONSTANTES PARA LA ECUACION DE TRANSFERENCIA DE
 CALOR EN CILINDROS ⁽¹⁷⁾

| No. Re | n | B | hL/kf |
|----------------------------------------|-------|-------|-----------|
| 1-4 | 0.33 | 0.591 | 0.89-1.42 |
| 4-40 | 0.885 | 0.821 | 1.4 -3.4 |
| 40-4*10 ³ | 0.466 | 0.616 | 3.4 -29.6 |
| 4*10 ³ -4*10 ⁴ | 0.618 | 0.174 | 29.5-121 |
| 4*10 ⁴ -2.5*10 ⁴ | 0.805 | 0.024 | 121-528 |

Esfera

Quando una esfera se está calentando o enfriando con un fluido que pasa por ella, se puede aplicar la siguiente ecuación ⁽⁸⁾ para predecir el coeficiente promedio de transferencia de calor para un No.Re entre 1 y 17 000 y un número de Prandtl de 0.6-400:

$$Nu = \frac{hcL}{k_p} = 2 + 0.60No.Re^{0.5}No.Pr^{1/3} \quad (26)$$

Para No.Re inferior a 17, Groeber et al.⁽⁴⁷⁾ propusieron la siguiente ecuación:

$$\text{Nu} = \frac{hcL}{k_f} = 2 + 0.33\text{No.Re}^{0.5} \quad (27)$$

quienes mostraron que para aire estancado $hL/k = 2$.

Finalmente para corroborar los resultados obtenidos, se realizó el mismo análisis estadístico empleado en las propiedades térmicas, con el mismo nivel de significancia.

2.2.3.- Tiempos de Congelacion

Los modelos que se incluyen en el paquete de cómputo para determinar los tiempos de congelación, consideran las geometrías regulares de placa, cilindro y esfera, ya que como se mencionó anteriormente estas geometrías son comúnmente estudiadas.

El programa para determinar tiempos de congelación para esta última parte se fundamenta en lo siguiente:

- a) Metodos Analíticos
- b) Método Gráfico
- c) Método Numérico

a) Métodos Analíticos

Dentro del programa, la primera ecuación analítica que se consideró fué la de Plank (1941) dado a que es la más utilizada por la simplicidad matemática que representa en cálculos de predicción de tiempos de congelación y/o descongelación.

$$\theta_1 = \frac{\lambda \rho}{T_f - T_a} [P d/hc + Rd^2/k] \dots\dots (28)$$

La ec. de Plank puede ser aplicada en muestras con forma de placa infinita, cilindro infinito y esfera principalmente. La tabla No. 14 muestra los valores de P y R para las geometrías indicadas:

TABLA No. 14
TABLA DE CONSTANTES P Y R (28)

| GEOMETRIA | P | R |
|-----------|-------|--------|
| PLACA | $1/2$ | $1/8$ |
| CILINDRO | $1/4$ | $1/16$ |
| ESFERA | $1/6$ | $1/24$ |

Esta ecuación supone que :

- 1) Al principio, todo el material esta a la temperatura de congelación, pero sin congelarse.
- 2) La conductividad térmica de la pieza congelada es constante.
- 3) Se remueve todo el calor latente en el punto de congelación.
- 4) El calor transferido por conducción en la capa congelada se verifica con lentitud, de tal manera que proceda en condiciones de estado pseudoestable.⁽⁸⁾
- 5) La densidad no cambia durante el proceso de congelación.

- 6) No existe restricción sobre el tipo de congelador.
- 7) Las condiciones ambientales son constantes.
- 8) El agua cristaliza al punto de congelación.

Finalmente, cuando la ecuación se emplea para predecir el tiempo de congelación los valores de ρ y k son del producto congelado, mientras que el cálculo de tiempos de descongelación el valor de las propiedades debe considerarse por arriba del punto de congelación.⁽²⁹⁾

Una segunda opción que se ha incluido para el cálculo de tiempos de congelación por métodos analíticos es el propuesto por Mellor (1976).

Este autor, presenta una ecuación modificada (a partir de la ecuación original de Plank), el toma en cuenta el cambio total de calor durante el proceso de congelación, esto involucra datos de temperatura inicial y final del producto; así como valores de calor específico, tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación respectivamente. El modelo propuesto por Mellor fué :

$$\frac{\rho_2}{C_1} = [0.5 C_{p1} (T_i - T_f) + \lambda + 0.5 C_{p2} (T_f - T_c)] \times \frac{\rho_2}{T_f - T_a} [P d/hc + Rd^2/k_2] \dots\dots\dots (29)$$

Este modelo supone que las constantes P y R son las mismas a las del modelo de Plank (1941).⁽⁴²⁾

Cleland - Earle en 1979b analizaron la conducción de calor en alimentos para diferentes geometrías (placa infinita, cilindro infinito, esfera y empaques rectangulares). Ellos al igual que Mellor presentan una ecuación modificada:

$$\theta_1 = \frac{\Delta E_v}{T_f - T_a} [P_2 d/hc + R_2 d^2/k_2] \dots\dots\dots (30)$$

donde:

$$\Delta E_v = [\rho_2 \lambda \omega_1 + \rho_2 C_{p2}(T_f - T_c)] \dots\dots (31)$$

$$\omega_1 = [(\omega_a + \omega_c)] / 2 \dots\dots\dots (32)$$

Los valores para las constantes P₂ y R₂ , pueden estimarse de la siguiente forma :

P₁ y R₁ se calculan apartir de las contantes P y R propuestas por Plank en su ecuación de 1941.

$$P_1 = P[1.026 + 0.5808Pk + Ste(0.2296Pk + 0.0182 / Bi + 0.1050)] \dots\dots\dots (33)$$

$$R_1 = R[1.202 + Ste(0.410Pk + 0.7336)] \dots\dots\dots (34)$$

Calcular P_2 y R_2 para cada geometría :

Placa Infinita :

$$P_2 = P_1 \quad \text{y} \quad R_2 = R_1 \dots\dots\dots (35)$$

Cilindro Infinito y Esfera :

$$P_2 = P_1 + 0.1278P \dots\dots\dots (36)$$

$$R_2 = R_1 - 0.1888R \dots\dots\dots (37)$$

Empaques Rectangulares :

$$P_2 = P_1 + P[0.1136 + Ste(5.766P - 1.242)] \dots\dots (38)$$

$$R_2 = R_1 + R[0.7344 + Ste(49.89R - 2.900)] \dots\dots (39)$$

Esta ecuación asume :

- 1) Cambio de calor por convección entre el medio de enfriamiento y la superficie del alimento.
- 2) Temperatura inicial constante en el alimento, y temperatura diferente para el cambio de fase.
- 3) Diferencia entre la densidad del producto congelado y no congelado.
- 4) Propiedades térmicas dependientes de la temperatura.⁽²⁸⁾

Es conveniente especificar que la ecuación se encuentra limitada a las siguientes condiciones⁽²⁸⁾:

$$0.155 \leq Ste \leq 0.345$$

$$0 \leq Pk \leq 0.55$$

$$0.2 \leq Bi \leq 20 \quad \text{Placa}$$

$$0.5 \leq Bi \leq 4.5 \quad \text{Cilindros y Esferas}$$

$$0.5 \leq Bi \leq 22 \quad \text{Empaques rectangulares}$$

$$1 \leq \beta_1 \leq 4 \quad \text{Empaques rectangulares}$$

$$1 \leq \beta_2 \leq 4 \quad \text{Empaques rectangulares}$$

Finalmente, en este grupo encontramos la ecuación propuesta por el I.I.R. (Instituto Internacional de Refrigeración) en 1986.

En esta ecuación el calor latente de fusión (λ) es reemplazado por una diferencia de entalpías entre la temperatura del punto inicial de congelación y la temperatura final en el centro del producto congelado. Este modelo también supone que el objeto está inicialmente a la temperatura del punto de congelación. El modelo es :

$$\theta_1 = \frac{\Delta E_1 \rho_2}{T_f - T_a} [P d/hc + Rd^2/k_2] \dots \dots \dots (40)$$

donde:

$$\Delta E_1 = [\lambda + C_{p2}(T_f - T_c)] \dots \dots \dots (41)$$

Al igual que los otros modelos el I.I.R. supone que las constantes P y R son las mismas a las que Plank empleó en su modelo de 1941.⁽⁴²⁾

b) Método Gráfico

Para la predicción del tiempo de congelación en alimentos de forma regular con alto contenido de humedad, se propone el método gráfico de Salvadori et al; 1967.

Este modelo fue desarrollado a partir de las predicciones de un modelo numérico que resuelve el balance calorífico de un alimento sujeto a congelación. El método es válido para alimentos con diferentes geometrías (placa plana, cilindros y esferas) y cubre un amplio rango de condiciones de trabajo de la industria de la congelación. Este modelo también permite hacer predicciones para cualquier temperatura final en el centro térmico del alimento.

El método es aplicable para cualquier condición práctica de la industria de la congelación y se basa en una gráfica generalizada que da la variación de la temperatura en el alimento en función a una variable adimensional X.

La base del modelo es encontrar una nueva variable independiente que pueda tomar adecuadamente en cuenta la influencia simultánea del tiempo, parámetros del proceso (T_c , T_a , T_f , T_i), Biot, propiedades térmicas del alimento, y dimensión característica del alimento, sobre la variación de la temperatura del centro térmico.

Esta variable esta definida como:

$$x = \frac{Fo[(T_a - T_f)/T_f]^m}{(1/Bi + c)[(T_f - T_i)/T_f]^n} \dots\dots\dots (42)$$

La tabla No. 15 muestra los intervalos de los parámetros del proceso, Biot, T_i y T_a , cubiertos en la optimización del método.

TABLA No. 15
RANGOS EXTREMOS DE LAS CONDICIONES DE PROCESO Y VALORES DE LAS CONSTANTES EMPÍRICAS PARA EL CALCULO DE X (47)

| GEOMETRIA | T_i | T_a | Bi | m | n | c |
|-------------------|-------|---------|------|------|------|------|
| PLACA PLANA (*) | 2-25 | -25a-45 | 1-50 | 1.04 | 0.09 | 0.18 |
| PLACA PLANA (**) | 2-20 | -25a-45 | 1-60 | 1.09 | 0.10 | 0.16 |
| CILINDRO INFINITO | 7-25 | -20a-40 | 1-30 | 1.00 | 0.09 | 0.17 |
| ESFERA | 2-25 | -25a-45 | 1-20 | 0.90 | 0.06 | 0.18 |

$T[^\circ] \text{ } ^\circ\text{C}$

m, n, c(=) Adim.

(*) FLUJO DE CALOR PERPENDICULAR

(**) FLUJO DE CALOR PARALELO

La figura No. 7 muestra las curvas que definen el rango de variación de X para cada una de las geometrías empleadas. Debe notarse que el método es válido para cualquier T_c , cuando la mayoría de los métodos aproximados son únicamente válidos para un conjunto de temperaturas finales, generalmente de -10 o -18°C .

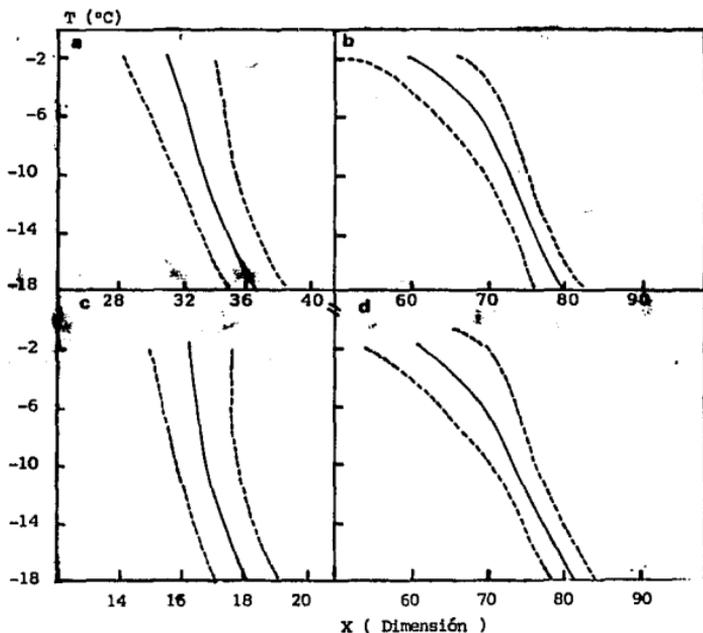


FIG. NO 7: TEMPERATURA FINAL V.S. X⁽⁵⁷⁾

Debe señalarse que el método fue evaluado para carne pero puede emplearse para otros alimentos que tengan las mismas geometrías y trabajen en el intervalo de temperaturas de la tabla No.15. El modelo para el cálculo del tiempo de congelación esta definido por:

$$\theta_1 = x \left(\frac{1}{Bi} + c \right) \left[\frac{(T_f - T_i)}{T_f} \right]^n \left[\frac{(T_a - T_f)}{T_f} \right]^{-m} \frac{d^2}{\alpha} \quad (42)$$

c) Método Numérico

Finalmente, el programa incluye el método explícito de solución por diferencia finita de problemas de conducción del calor en una dimensión y dependientes del tiempo, para geometría de placa plana, dados en la forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{para } 0 < x < L \quad \text{cuando } t > 0 \dots (44)$$

sometido a las condiciones de frontera

$$-k(\frac{\partial T}{\partial x}) + h_1 T = f_1 \quad \text{en } x = 0 \quad \text{cuando } t > 0 \dots (45a)$$

$$k(\frac{\partial T}{\partial x}) + h_2 T = f_2 \quad \text{en } x = L \quad \text{cuando } t > 0 \dots (45b)$$

Las que indican que en la superficie el calor se transfiere por convección.

y a la condición inicial:

$$T = F(x) \quad \text{cuando } t = 0 \quad \text{para } 0 < x < L \quad \dots(45c)$$

La que indica que la temperatura en todos los nodos al tiempo igual a cero es igual a la temperatura del medio de enfriamiento.

Para entender mejor el método, consideremos la figura No. 8 que parte de la existencia de un cuerpo con dominios x, t . Primeramente en este método se dividen los dominios x y t en pequeños intervalos Δx y Δt .

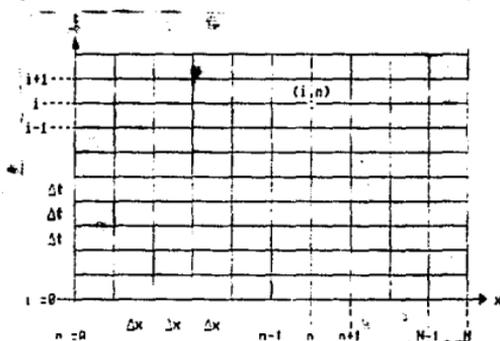


Fig. No. 8: subdivisión del dominio x, t en intervalos Δx y Δt para representar por diferencia finita la ecuación de conducción de calor. (19)

siendo:

$$x = n\Delta x \quad n=0, 1, 2 \dots N \quad \text{en donde } L=N\Delta x$$

$$t = i\Delta t \quad i=0, 1, 2 \dots \dots\dots(46)$$

Posteriormente supongase que se desea calcular la temperatura en un punto x y a un tiempo t , es decir :

$$T(x, y) = T(n\Delta x, i\Delta t) = T(j, n) \quad \dots\dots (47)$$

Dado lo anterior, se procede a describir el modo de aproximar las derivadas que aparecen en la ecuación anterior de conducción de calor por diferencia finita. Siendo que:

La segunda derivada de la temperatura con respecto a x , en un punto $n\Delta x$ y en un tiempo $i\Delta t$, se representa en la forma de diferencia finita de la forma:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{n,i} = (T_{n-1}^i + T_{n+1}^i - 2T_n^i) / (\Delta x)^2 \quad \dots\dots (48)$$

donde T_{n-1}^i y T_{n+1}^i son las temperaturas de los dos puntos contiguos al nodo T_n^i las cuales se calculan en el tiempo $i\Delta t$.

La primera derivada de la temperatura con respecto a la variable t en un punto $n\Delta x$ y en un tiempo $i\Delta t$ se representa por

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{n,i} = (T_{n,i+1} - T_{n,i}) / (\Delta t) \quad \dots\dots (49)$$

en donde T_n^{i+1} es la temperatura en el punto $n\Delta x$ en el tiempo $(i+1)\Delta t$.

Al sustituir las ecuaciones (48) y (49) en la ecuación (43) se obtiene la forma de la diferencia finita de la ecuación de conducción de calor dependiente del tiempo.

$$\frac{(T_n^{i+1} - T_n^i)}{\Delta t} = \alpha \frac{(T_{n-1}^i + T_{n+1}^i - 2T_n^i)}{\Delta x^2} \quad \dots\dots\dots (50)$$

Finalmente, la representación por diferencia finita de las condiciones frontera y condición inicial es:

$$-k ((T_1^{i+1} - T_0^{i+1}) / (\Delta x)) + h_1 T_0^{i+1} = f_1 \quad \dots \quad (51a)$$

$$k ((T_N^{i+1} - T_{N-1}^{i+1}) / (\Delta x)) + h_2 T_N^{i+1} = f_2 \quad \dots \quad (51b)$$

$$T_n^0 = F(n\Delta x) \quad n = 0, 1, \dots, N \quad \dots \quad (51c)$$

Ordenando las ecuaciones (50) y (51) se obtiene :

$$T_n^{i+1} = Fo T_{n-1}^i + (1-2Fo) T_n^i + Fo T_{n+1}^i \quad n=1, \dots, N-1 \quad \dots \quad (52)$$

$$T_0^{i+1} = (1/(1+(h_1\Delta x/k))) * (T_1^i + (f_1\Delta x/k)) \quad \text{en } n=0 \quad \dots \quad (53a)$$

$$T_N^{i+1} = (1/(1+(h_2\Delta x/k))) * (T_{N-1}^i + (f_2\Delta x/k)) \quad \text{en } n=N \quad \dots \quad (53b)$$

$$T^n = F(n\Delta x) \quad n = 0, 1, \dots, \quad \text{cuando } i=0 \dots (53c)$$

en donde: $F_0 = (\alpha \Delta t) / (\Delta x)^2$

$$h_1 = h_2 = h \quad \therefore \quad f_1 = f_2 = hT_0 \quad \dots \dots \dots (54)$$

Las ecuaciones (52) y (53) representan las formas explícitas de respuesta por diferencia finita de problemas de conducción de calor en una dimensión y dependientes del tiempo. Las ecuaciones (52) y (53) son un grupo de ecuaciones algebraicas en función de las $N+1$ temperaturas desconocidas de los nodos $n=0, 1, 2, \dots, N$ para cada instante i de tiempo. Por último, para que la solución de estas ecuaciones sea estable el valor del parámetro F_0 (Fourier) sea tal que:

$$0 < F_0 \leq 0.5 \quad \dots \dots \dots (55)$$

Las ecuaciones de solución por diferencia finita en la predicción de tiempos de congelación mediante la ayuda de una computadora son fáciles de resolver. Dentro del Software este método permite obtener el tiempo de preenfriamiento y atemperamiento, así mismo se puede observar la gráfica correspondiente al perfil de temperaturas que se da durante estas dos etapas.

Para el cálculo del tiempo de congelación en el cambio de fase se propuso el modelo de Michaelles y Calvelo (1983).

El modelo puede emplearse en congeladores de placas, blast-freezer, procesos criogenicos, etc. Asi mismo puede ser aplicable a más de una dimensión de flujo de calor. La siguiente expresión corresponde al modelo propuesto:⁴⁶

$$T_{Cf} = \frac{\rho \cdot H \lambda \omega \cdot d^2}{(\frac{T_f - T_a}{\alpha} K_m)} \ln \left(\frac{P}{R} + R \right) \dots \dots \dots (56)$$

Nota: Los valores de P y R para el caso de placa y cilindro finito para dos o tres dimensiones de flujo de calor se pueden obtener a partir de las ecuaciones analíticas desarrolladas por Cleland-Earle (1979) y de las gráficas de Ede (1949), las ecuaciones y la gráfica se pueden obtener consultando la referencia (46).

Finalmente y para concluir con la parte correspondiente a tiempos de congelación se propuso un análisis estadístico de prueba de hipótesis para evaluar la confiabilidad del programa respecto a valores experimentales (bibliográficos y/o de L.E.M IV) en un 95-99% de confianza. Siendo que las hipótesis a comprobar son:

$$H_0 = \mu_c = \mu_b$$

$$H_a = \mu_c \neq \mu_b$$

donde: H₀, H_a=Hipótesis nula e hipótesis alterna respect.

μ_c , μ_b =Valor calculado y valor bibliográfico.

Nomenclatura

- θ_1 = Tiempo de congelación
- λ = Calor latente de fusión
- ρ = Densidad del alimento
- ρ_1 = Densidad del alimento sin congelar
- ρ_2 = Densidad del alimento congelado
- P y R = Constantes para la ecuación de Plank
- P_1 y R_1 = Constantes para la ec. modificada de Cleland-Earle
- P_2 y R_2 = Constantes para la ec. modificada de Cleland-Earle
- d o L = Dimensión característica (espesor de una placa infinita, diametro de un cilindro o esfera)
- hc o h = Coeficiente convectivo
- K = Conductividad térmica del alimento.
- K_m = Conductividad térmica del alimento congelado evaluada a
- $$T_m = (T_f + T_a) / 2$$
- K_2 = Conductividad térmica del alimento congelado
- C_{p_1} = Capacidad calorífica del producto no congelado
- C_{p_2} = Capacidad calorífica del producto congelado
- T_f = Temperatura en el punto inicial de congelación
- T_a = Temperatura del medio de enfriamiento
- T_i = Temperatura inicial del producto
- T_c = Temperatura final en el centr: del producto congelado

ΔE_v = diferencia de entalpía entre la T° en el punto de congelación y la T° final en el centro térmico del producto congelado.

ω_1 = Fracción media de agua congelada a la temperatura media entre T_a y T_c .

ω_a = Fracción de agua congelada a la temperatura T_a

ω_c = Fracción de agua congelada a la temperatura T_c

Ste = Número de Stefan

Pk = Número de Plank

Bi = Número de Biot

$Bi_m = hd/k_m$

c, m, n = Constantes empíricas cuyos valores dependen del alimento y su geometría.

α = Difusividad térmica

X = Variable adimensional para el método gráfico de Salvadori et al.

H = Contenido inicial de humedad del alimento (fracción)

2.3.- MANEJO DEL PROGRAMA

A continuación se explica en forma breve y sencilla el manejo del programa. El programa puede ser ejecutado tecleando * Master * (archivo principal), este archivo contiene una secuencia logica de entrada a cada submenú del programa en forma automatica. Es importante aclarar que para que se pueda correr el programa se requiere de un interprete de BASIC (Gwbasic, Basica, etc).

En primer término el programa muestra en pantalla un menú principal de la siguiente forma :

MENU PRINCIPAL

- 1) PROPIEDADES TERMOFISICAS
- 2) COEFICIENTE CONVECTIVO
- 3) TIEMPOS DE CONGELACION
- 4) SALIR A: A)

OPCION: ?

De esta forma el usuario cuenta con la opción de seleccionar el formato que sea de su interés. Por otra parte es recomendable que el usuario cuente con una impresora, ya que todos los calculos pueden llevarse a impresión .

Dada la presentación del menú principal, a continuación se da una breve descripción de cada una de las opciones mostradas en pantalla, bajo el siguiente orden:

1) Propiedades Térmofísicas

Una vez que el ordenador ha identificado esta opción, la pantalla desplegará un submenú como el que a continuación se muestra:

PROPIEDADES TERMOFISICAS

(ARRIBA DEL PTO. DE CONG.)

MENU 1

- 1) CONDUCTIVIDAD TERMICA
- 2) CAPACIDAD CALORIFICA
- 3) DIFUSIVIDAD TERMICA
- 4) DENSIDAD
- 5) ENTALPIA
- 6) MENU (ABAJO DEL P. C.)
- 7) MENU PRINCIPAL
- 8) SALIR A: A)

OPCION : ?

NOTA: P. C. = Punto Inicial de Congelación

En este submenú o menú no.1 se muestran las opciones de cálculo para propiedades térmicas por arriba del punto inicial de congelación (opciones 1-5). Así mismo se cuenta

con opciones (6-8) que permiten movernos a otros menus de trabajo y/o finalizar el programa, por ejemplo:

Opción (6) *Menú (Abajo del P.C.)* .- Esta opción muestra en pantalla un submenú que define el cálculo de propiedades térmicas por abajo del punto inicial de congelación. Este submenu presenta características de manejo muy similares a las del cálculo de propiedades térmicas por arriba del punto inicial de congelación, siendo la diferencia principal las propiedades a calcular.

Opción (7) *Menu Principal* .- Con esta opción el usuario tiene la ventaja de regresar al menu principal y seleccionar otra opción de trabajo.

Opción (8) *Salir a: A> * .- Esta opción permite al usuario finalizar la ejecución del programa y regresar en forma automática a DOS.

Es de importancia especificar que cuando trabajemos con las opciones que definen el cálculo de alguna propiedad térmica (cual sea el caso), primeramente debemos de contar con los siguientes datos: contenido inicial de la humedad del producto, temperatura a la que se quiere evaluar el cálculo y punto inicial de congelación del alimento (para el

caso de propiedades térmicas por abajo del punto inicial de congelación). Una vez que el usuario cuente con estos datos el programa podrá emplearse.

Inicialmente el programa indicará al usuario los valores que se requieren para el cálculo de la propiedad seleccionada. Dado lo anterior en pantalla se mostrará un menú de ecuaciones (nombre de los autores) que dan solución al cálculo. Cada ecuación proporciona el valor numérico de la propiedad evaluada a las condiciones iniciales de operación, la ventaja principal del programa es que permite visualizar en forma separada, pero evaluados al mismo tiempo el valor numérico de la propiedad evaluada para todo el submenú de ecuaciones, por ejemplo:

Supongamos que estamos calculando valores de conductividad térmica y que hemos introducido los datos necesarios para el cálculo, y además estamos listos para seleccionar X ecuación. Supongamos nuevamente, que seleccionamos Fikiin, en pantalla se mostrará el valor numérico de la propiedad seguido de la pregunta... Deseas realizar nuevo cálculo?, si nosotros decimos que NO el programa nos llevará nuevamente al menú de ecuaciones para seleccionar otro autor y por consiguiente visualizar el valor calculado.

Es importante mencionar que las ecuaciones para el cálculo de las propiedades térmicas son en casos particulares para carne, así como para cualquier alimento según se especifique. Así que para auxiliarnos en el momento de seleccionar la ecuación a emplear, en la tabla No. 16 se muestra la propiedad térmica (tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación), el autor y el alimento para la que es aplicable.

TABLA No. 16: RELACION DE ECUACIONES
PARA PROPIEDADES TERMICAS

| CONDICION DE OPERACION | PROPIEDAD TERMICA | AUTORES |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| TEMPERATURAS POR ARRIBA DEL PUNTO INICIAL DE CONGELACION | CAPACIDAD CALORIFICA | B-M; FIXIIM; LEVY; M-C; DICKERSON FIXIIM; DICKERSON |
| | CONDUCTIVIDAD TERMICA | B-M; FIXIIM; LEVY; MASCHERONI FIXIIM |
| | DENSIDAD | CARNE JARVIS |
| | ENTALPIA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO CHANG-TAO; MN CHANG-TAO |
| TEMPERATURAS POR ABAJO DEL PUNTO INICIAL DE CONGELACION | CAPACIDAD CALORIFICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO SIEBEL; FIXIIM; HELLOR SIEBEL; FIXIIM; HELLOR |
| | CONDUCTIVIDAD TERMICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO B-M; FIXIIM; LEVY; MN; MORENO FIXIIM |
| | DENSIDAD | CARNE MASCHERONI-CALVELO |
| | ENTALPIA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO CHANG-TAO CHANG-TAO |
| | CALOR LATENTE DE FUSION | CUALQUIER ALIMENTO ECUACION GENERAL |
| | CONTENIDO DE HIELO | CARNE CUALQUIER ALIMENTO FIXIIM; B-M; M-C FIXIIM |

B-M = BASAN Y MASCHERONI
M-C = MASCHERONI Y CALVELO
MN = MASCHERONI

Finalmente y de acuerdo a todo lo anterior a continuación se presenta un formato de impresión de resultados para propiedades térmicas (el cual se logra seleccionando la opción de Imprimir Formato, que se encuentra en el menú de ecuaciones), se recomienda que sea lo primero a imprimir y posterior a esto el valor numérico de la propiedad térmica evaluada para cada autor).

FORMATO DE IMPRESION
PROPIEDADES TERMICAS

| CONDICIONES DE OPERACION: | IMPRESION DE FORMATO |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| CAPACIDAD CALORIFICA (ARRIBA DEL PUNTO DE CONGELACION) | |
| TEMPERATURA DE OPERACION (°C) = 10 | |
| HUMEDAD (FRACCION) = .775 | |
| PRODUCTO :CARNE DE VACUNO | |
| CAPACIDAD CALORIFICA (KJ/Kg°K) = 3.568265 | VALOR NUMERICO |
| ECUACION 1:BAZAN Y MASCHERONI | |
| CAPACIDAD CALORIFICA (KJ/Kg°K) = 3.55267 | DE LA PROPIEDAD |
| ECUACION 2:PIKIRI | |
| CAPACIDAD CALORIFICA (KJ/Kg°K): 3.5140 | TERMICA EVALUADA |
| ECUACION 3: LEVY | |
| CAPACIDAD CALORIFICA (KJ/Kg°K) = 3.567722 | |
| ECUACION 4:MASCHERONI Y CALVELLO | |

2) Coeficiente Convectivo

Una vez que el usuario ha decidido trabajar con este submenú, el siguiente desplegado aparecerá en pantalla:

COEFICIENTE CONVECTIVO MENU 3

- 1) COEFICIENTE CONVECTIVO
- 2) MENU PRINCIPAL
- 3) MENU 1
- 4) MENU 2
- 5) SALIR A: A)

OPCION : ?

Dado lo anterior, el usuario cuenta con opciones que le permiten trabajar directamente con otros menús (2-4) o si lo prefiere en el cálculo del coeficiente convectivo, del cual en primera instancia se requieren los datos generales del medio de enfriamiento, tales como: densidad, viscosidad, velocidad, capacidad calorífica y conductividad térmica. Así mismo y con el objeto de evaluar el número de Reynolds y el número de Prandtl se requiere definir la dimensión característica del cuerpo en estudio. Una vez evaluados ambos números adimensionales, en pantalla aparecerá su resultado numérico (que definirá el régimen de trabajo),

seguido de las opciones : Imprimir resultado?, Deseas realizar nuevo cálculo?... Si el usuario ha decidido no realizar otro cálculo, entonces el programa en forma automática nos desplegará el siguiente submenú:

COEFICIENTE CONVECTIVO

TRANSFERENCIA DE CALOR CON CONVECCION FORZADA EN EL EXTERIOR PARA DIFERENTES GEOMETRIAS

1) PLACA PLANA

2) CILINDRO

3) ESFERA

Del que debe de especificar la geometría del cuerpo en estudio. Para el caso en el que se trate de una placa plana, en pantalla aparecerá un desplegado con los intervalos de Reynolds para régimen laminar y turbulento, esto con el fin de que el usuario especifique el régimen bajo el cual trabaja, una vez especificado la computadora realizará el cálculo del coeficiente convectivo.

Cuando el usuario selecciona la opción 2 la cual corresponde a geometrías cilíndricas la pantalla mostrará las siguientes opciones:

1) Mc Adams

2) Geankoplis

Ambos autores proponen de manera similar la evaluación del coeficiente convectivo . Por ejemplo, si se ha seleccionado el método de Mc Adams, en la pantalla aparecerá una tabla con lo valores de n y B , que son constantes propias de la ecuación de dicho autor en función al número de Reynolds, se introducen los valores correspondientes a las constantes y finalmente aparecerá el valor del coeficiente convectivo .

Finalmente si la geometría seleccionada corresponde a una esfera la pantalla indicará las siguientes opciones de trabajo:

- 1) FLUJO LAMINAR (No. Re <17)
- 2) No. Re (1-17000)

El funcionamiento para estas opciones es muy similar a los anteriores, por lo que no redundaremos en más explicaciones. Finalmente y de acuerdo a todo lo anterior a continuación se presenta un formato de impresión de resultados para coeficiente convectivo en placa.

FORMATO DE IMPRESION

```

COEFICIENTE CONVECTIVO
CONDICIONES DE OPERACION:
(MEDIO DE ENFRIAMIENTO)
DENSIDAD (Kg/m3) = 1.097
VISCOSIDAD (Kg/m s) = 0.0000195
UNIDADES CONV. = 1
CAPACIDAD CALORIFICA (KJ/Kg K) = 1.017
CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m K) = 0.028
NUMERO DE REYNOLDS = 33002.74
NUMERO DE PRANDTL = 0.7002670
TRANSFERENCIA DE CALOR CON CONVECCION FORZADA
(PLACA PLANA PARALELA AL FLUJO)
COEFICIENTE CONVECTIVO (W/m2 K) = 68.88267
    
```

3) Tiempos de Congelación

Si el usuario ha decidido trabajar con esta opción, la pantalla visualizará el siguiente formato:

TIEMPOS DE CONGELACION

(CALCULOS)

MENU 3

- 1) ECUACION DE PLANK
- 2) ECUACION DE MELLOR
- 3) ECUACION DEL I. I. R.
- 4) EC. DE CLELAND - EARLE
- 5) METODO GRAFICO
- 6) METODO POR DIFERENCIA FINITA
- 7) MENU 1
- 8) MENU 2
- 9) MENU PRINCIPAL
- 10) SALIR A: A>

OPCION : ?

En este caso, cada ecuación o método a emplear (1-6) se caracteriza por los datos requeridos para la predicción del tiempo de congelación.

El programa para predecir los tiempos de congelación lleva al usuario de la mano, hasta la obtención final del valor numérico del tiempo. Para ello debe contarse con los datos necesarios de propiedades térmicas (por arriba o abajo del punto inicial de congelación) del alimento, contenido inicial de humedad, dimensión característica del alimento, coeficiente convectivo, temperatura del medio de enfriamiento, temperatura inicial y final del alimento, así como el contenido de agua congelada a la temperatura del medio de enfriamiento y temperatura final en el centro del alimento.

Cabe señalar que para todos los modelos, excepto para el método por diferencias finitas puede predecirse el valor de tiempo de congelación para placa plana, cilindro y esfera.

Una característica fundamental en cada uno de los modelos (principalmente en los analíticos), es que la evaluación total de los resultados se imprimen en pantalla y consecuentemente (si uno lo desea) vía impresora. Es importante mencionar que una vez calculado el valor de tiempo de congelación se presenta un menú de opciones que permiten avanzar hacia otros menús o hacia otro modelo de predicción.

En el caso del método gráfico a continuación se presenta una guía práctica para determinar el tiempo:

- 1) Definir el producto y sus propiedades térmicas en el estado normal sin congelar (estos pueden obtenerse a partir del programa que determina propiedades térmicas), bibliográficamente o experimentalmente.
- 2) Definir la geometría del alimento, así como la temperatura final para el centro térmico.
- 3) Definir las condiciones de trabajo que simulen el proceso de congelación, esto incluye: temperatura inicial del producto, temperatura del medio de congelación, temperatura en el punto inicial de congelación, dimensión característica del cuerpo.
- 4) Una vez que se han incluido los parámetros anteriores el programa determina automáticamente el valor de la variable X de acuerdo a la curva seleccionada en la gráfica.

5) Finalmente la pantalla mostrará el valor calculado para el tiempo de congelación.

Hemos de mencionar que cuando el usuario selecciona la opción 6 que corresponde al método por diferencia finita se deben tomar en cuenta además de las propiedades térmicas y condiciones de operación el número de intervalos en los que se va a dividir la placa para determinar el perfil de temperaturas, el número de intervalos de tiempo para alcanzar la temperatura final deseada y consecuentemente el tiempo de congelación. Finalmente es necesario aclarar que este método calcula en forma separada cada uno de los tiempos (enfriamiento, cambio de fase y atemperación) por lo que el usuario debe llevar un registro para cada uno de los tiempos calculados, para que posteriormente defina el tiempo total efectivo de congelación. Para los periodos de preenfriamiento y atemperación en pantalla se muestra gráficamente los perfiles de temperatura correspondientes.

De las opciones (7-10) se entiende que son demasiado específicas, por lo que no se da una explicación más detallada de su funcionamiento.

Finalmente, en esta sección se presenta un formato de impresión para el cálculo de tiempo de congelación, así mismo se incluyen las condiciones de operación empleadas en su evaluación.

TIEMPO DE CONGELACION
EQUACION DE MELLOR (1976)

CONDICIONES DE OPERACION:

PRODUCTO :CARNE DE VACA
HUMEDAD (FRACCION) = .74
TEMPERATURA DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO ($^{\circ}$ K) = 251.15
TEMPERATURA AL COMIENZO DE LA CONG. ($^{\circ}$ K) = 272.15
TEMPERATURA DEL PRODUCTO ANTES DE LA CONG. ($^{\circ}$ K) = 307.65
TEMP. FINAL EN EL CENTRO DEL PRODUCTO CONG. ($^{\circ}$ K) = 263.15

EVALUACION DE RESULTADOS:

DIMENSION CARACTERISTICA (m) = .0485
COEFICIENTE CONDUCTIVO (hc) EN (W/m° K) = 90
CALOR LATENTE DE FUSION (KJ/Kg) = 247.9
CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m° K)
(DEL PRODUCTO NO CONGELADO) = .522
CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m° K)
(DEL PRODUCTO CONGELADO) = 1.15
NUMERO DE BIOT = 3.795653
CALOR ESPECIFICO DEL PRODUCTO CONGELADO (KJ/Kg $^{\circ}$ K) = 2.16
CALOR ESPECIFICO DEL PRODUCTO NO CONGELADO (KJ/Kg $^{\circ}$ K) = 3.47

DENSIDAD DEL PRODUCTO CONGELADO (Kg/m 3) = 1045

TIEMPO DE CONGELACION (Hrs)
= 2.316485

CAPITULO III
R E S U L T A D O S

3.1.- COMPARACION ENTRE LAS PROPIEDADES TERMICAS BIBLIOGRAFICAS Y PROPIEDADES TERMICAS OBTENIDAS CON EL PROGRAMA .

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el programa para propiedades térmicas, evaluadas a temperaturas por arriba y por abajo del punto inicial de congelación, para productos de origen animal así como para algunos frutos y hortalizas, comparándolos con valores reportados en la bibliografía.

En la tabla No. 17 se muestran los valores de conductividad térmica para carne de pollo, leche evaporada y fresas; así como las condiciones a las que se evaluó la propiedad. En ella se observa que para temperaturas por arriba del punto inicial de congelación los modelos de Bazan y Mascheroni, levy y Mascheroni proporcionaron datos confiables para el caso de carne, ya que estadísticamente se acercaron al valor bibliográfico en un 95% de confianza, de igual manera para temperaturas por abajo del punto inicial de congelación los modelos propuestos por Bazan y Mascheroni, levy, Mascheroni y Moreno proporcionaron valores confiables.

Para el caso del modelo propuesto por Fikiin, los

valores son confiables para los distintos tipos de alimento y rangos de temperatura, con un porcentaje de diferencia de -12 a 22 %, por lo que efectivamente el modelo es aplicable a cualquier tipo de alimento.

Tabla No. 17
COMPARACION ENTRE VALORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA BIBLIOGRAFICOS
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (43) (W/M K) | MODELOS PROPUESTOS | | | | |
|---------------------------|------------|----------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| CARNE DE POLLO H=76.3% | TEMP. (°C) | | B-M | FININ | LEVI | MASCHERONI(±) | |
| | | 0 | 0.49 | 0.48 (-1.0) | 0.51 (4.0) | 0.48 (-2.0) | 0.47 (-4.0) |
| | 10 | 0.50 | 0.49 (-2.0) | 0.51 (1.9) | 0.48 (-4.0) | 0.53 (26.0) | |
| | 20 | 0.51 | 0.50 (-2.0) | 0.51 (0.0) | 0.49 (-5.0) | 0.78 (52.0) | |
| | | | B-M | FININ | LEVI | MASCHERONI(±) | NOFENS |
| | -10 | 1.269 | 1.25 (-9.7) | 1.56 (22) | 1.21 (-4.6) | 1.19 (-6.6) | 1.74 (37) |
| | -20 | 1.452 | 1.31 (-9.7) | 1.65 (13) | 1.41 (-2.3) | 1.22 (-15) | 1.74 (20) |

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (24) (W/M K) | MODELO PROPUESTO | |
|------------------------------|------------|----------------------------------------|------------------|------------|
| LECHE CONDENSADA H=72% | TEMP. (°C) | | FININ | |
| | | 2 | 0.48 | 0.50 (4.2) |
| | 10 | 0.50 | 0.50 (0.0) | |
| | 50 | 0.55 | 0.50 (-9) | |
| | 50 | 0.56 | 0.50 (-12) | |
| | | | FININ | |
| PESAS H=72% | -10 | 1.1 | 1.74 (58) | |
| | -15 | 0.95 | 1.74 (82) | |

B - M = BAZAN Y MASCHERONI

(±) = FLUJO PERPENDICULAR

Los datos calculados para entalpía se muestran en la tabla no. 18 . En ella se observa que para temperaturas por arriba del punto inicial de congelación el modelo propuesto por Chang-Tao es aplicable para cualquier alimento y no existe diferencia significativa entre el valor bibliográfico y el calculado. Así mismo el modelo de Mascheroni dió resultados confiables, pero se limita a productos cárnicos.

Para temperaturas por abajo del punto inicial de congelación el modelo de Chang-Tao proporcionó valores confiables en un 95% de confianza respecto al valor bibliográfico dado a que estadísticamente no existe diferencia significativa entre dichos valores.

TABLE No. 18
COMPARACION ENTRE VALORES DE ENTALEPIA BIBLIOGRAFICOS
LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (23) | MODELOS PROPUESTOS | |
|--------------------------|------------|--------------------------|--------------------|---------------|
| | TEMP. (°C) | (Kj/Kg) | CHANG-TAO | MASCHERONI |
| CARNE DE RES N=76.0 | 4.4 | 300.3 | 336.36 (0.12) | 314.63 (0.04) |
| | 10.0 | 313.8 | 336.36 (0.12) | 324.29 (0.26) |
| | 15.6 | 320.5 | 376.24 (0.13) | 354.12 (0.27) |
| | 21.1 | 340.3 | 335.33 (0.13) | 373.52 (0.27) |
| JUSO DE NARANJA N=83% | | VALOR BIBLIOGRAFICO (31) | CHANG - TAO | |
| | | (Kj/Kg) | | |
| | 0 | 261.4 | 374.79 (3.5) | |
| | 10 | 420.4 | 413.63 (3.2) | |
| 20 | 433.7 | 419.7 | (3.2) | |

COMPARACION ENTRE VALORES DE ENTALEPIA BIBLIOGRAFICOS
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (26) (KJ/Kg) | MODELO PROPUESTO | DIFERENCIA % |
|-------------------------|------------|----------------------------------------|------------------|-----------------|
| ALIMENTO | TEMP. (°C) | | CHANG-TAO | |
| CARNE DE RES H=74,5% | -1 | 285 | 295,84 | 3,9 |
| | -2 | 190 | 224,09 | 24 |
| | -3 | 138 | 175,82 | 27 |
| | -4 | 113 | 143,41 | 26 |
| | -5 | 105 | 121,61 | 15 |
| | -6 | 95 | 106,82 | 12 |
| | -7 | 38 | 96,63 | 9 |
| | -8 | 81 | 89,42 | 10 |
| | -9 | 76 | 84,13 | 10 |
| | -10 | 72 | 80,84 | 11 |
| | -14 | 58 | 68,96 | 18 |
| | -16 | 52 | 64,30 | 23 |
| | -18 | 47 | 59,89 | 27 |
| -20 | 42 | 55,51 | 32 | |
| SAMANORIAS H=87,5% | -1 | 357 | 296,9 | -16 |
| | -2 | 218 | 234,8 | 7,7 |
| | -3 | 166 | 190,5 | 14,8 |
| | -4 | 139 | 159,1 | 14,5 |
| | -5 | 124 | 136,7 | 10,3 |
| | -6 | 111 | 120,7 | 8,81 |
| | -7 | 102 | 109,1 | 7,05 |
| | -8 | 94 | 100,6 | 7,08 |
| | -9 | 87 | 94,20 | 8,28 |
| | -10 | 91 | 99,16 | 10,07 |
| | -12 | 72 | 81,58 | 13,30 |
| | -14 | 64 | 75,69 | 18,27 |
| | -16 | 57 | 70,51 | 23,70 |
| -18 | 51 | 65,77 | 28,62 | |
| -20 | 46 | 60,78 | 32,13 | |

Los valores calculados para la capacidad calorífica se muestran en el tabla No. 19, en ella se observa que para temperaturas por arriba del punto de congelación, los modelos de Bezan-Mascheroni, Levv y Mascheroni-Calvelo (aplicables en productos cárnicos) muestran un porcentaje de diferencia de -4.6 a -0.3. Mientras que para Dickerson y Fikiin al mismo intervalo de temperaturas, pero aplicable en cualquier alimento el porcentaje de diferencia es de -0.3 a -0.25. Así mismo se puede observar que para temperaturas por abajo del punto de congelación los modelos de Fikiin, Siebel y Mellor proporcionan valores confiables para cualquier alimento.

TABLA No. 19
COMPARACION ENTRE VALORES DE CAPACIDAD CALORIFICA BIBLIOGRAFICOS
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (43) (KJ/M K) | MODELOS PROPUESTOS | | | | |
|-----------------------------|------|-----------------------------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| TEMP. (°C) | B-N | | FIKIIN | LEVY | M-C | DICKERSON | |
| CARNE DE RES H=77.5% | 0 | 3.60 | 3.55 (-1.4) | 3.55 (-2) | 3.51 (-1.9) | 3.55 (-1.4) | 3.55 (-1.4) |
| | 10 | 3.60 | 3.55 (-1.1) | 3.55 (-1) | 3.51 (-1.7) | 3.55 (-1.1) | 3.55 (-0.3) |
| | 21.1 | 3.60 | 3.55 (-1.1) | 3.55 (-1) | 3.51 (-1.7) | 3.55 (-1.1) | 3.55 (-0.3) |
| CARNE DE RES H=75% | | REF. (45) | SIEBEL | | FIKIIIN | | MELLOR |
| | -2.5 | 2.00 | 1.700 (-37.0) | | 2.02 (-11.7) | | 2.00 (-10.0) |
| | -10 | 2.10 | 1.700 (-18.1) | | 2.17 (-8.6) | | 2.00 (-16.0) |
| | -20 | 2.10 | 1.700 (-18.6) | | 2.00 (-4.9) | | 2.00 (0.0) |
| -32.5 | 2.00 | 1.700 (-12.0) | | 2.00 (0.0) | | 2.00 (0.0) | |
| JUGO DE NARANJA H=89% | | VALOR BIBLIOGRAFICO (21) (KJ/M K) | MODELOS PROPUESTOS | | | | |
| | | | FIKIIIN | | DICKERSON | | |
| | 0 | 3.00 | 3.07 (+2.3) | | 3.00 (0.0) | | |
| | 10 | 3.00 | 3.07 (+2.3) | | 3.00 (0.0) | | |
| | 20 | 3.00 | 3.07 (+2.3) | | 3.00 (0.0) | | |
| | | | SIEBEL | FIKIIIN | | MELLOR | |
| -10 | 2.0 | 1.981 (-21.5) | | 2.00 (-10.0) | | 2.00 (0.0) | |
| -40 | 1.00 | 1.981 (2.10) | | 2.17 (19.0) | | 2.00 (40.1) | |

B-N= BEZAN Y MASCHERONI
M-C= MASCHERONI Y CALVELO

En la tabla No. 20 se muestran los valores de densidad por arriba y por abajo del punto inicial de congelación, correspondientes a carne de res. Se observa que los valores obtenidos muestran un porcentaje de diferencia con respecto al reportado en la bibliografía de -0.81 a 11.56, siendo confiables estadísticamente en un 97.5% de confianza, el modelo es aplicable solamente para cárnicos.

Tabla No. 20

COMPARACION ENTRE VALORES DE DENSIDAD BIBLIOGRAFICOS
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (8) (Kg/m ³) | MODELO PROPUESTO | DIFERENCIA % |
|-----------------------|------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| ALIMENTO | TEMP. (°C) | | JARVIS | |
| CARNE DE RES H=75% | 7.2 | 1070 | 1076.51 | 0.61 |
| | 37.8 | 1073 | 1064.3 | -0.81 |
| | | VALOR BIBLIOGRAFICO (8B) (Kg/m ³) | MODELO PROPUESTO M - C | |
| CARNE DE RES H=70% | -1 | 1012 | 1129 | 11.56 |
| H=63% | -1.7 | 1019 | 1110 | 8.93 |
| H=57% | -2.9 | 1025 | 1099 | 7.30 |
| H=45% | -4 | 1057 | 1112 | 5.2 |

M - C = MASCHERONI Y CALVELO

Los valores calculados para el contenido de hielo se muestran en la tabla No. 21, en la que se puede observar que el modelo propuesto por Fikiin es aplicable para cualquier tipo de alimento, no existiendo diferencia significativa entre el valor reportado en la bibliografía y el calculado. De igual forma el modelo de Mascheroni y Calvelo y el de Bazan y Mascheroni proporcionaron resultados confiables con un porcentaje de diferencia de 0.87 a 4.3%, pero limitándose a productos cárnicos.

TABLE No. 21
COMPARACION ENTRE VALORES BIBLIOGRAFICOS DE CONTENIDO DE HIELO
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | TEMPERATURA | VALOR BIBLIOGRAFICO (31) | MODELOS PROPUESTOS | | |
|-------------------|-------------|--------------------------|--------------------|------------------|----------------|
| | | | FIKIIN | MASCH. y CALVELO | BAZAN y MASCH. |
| CARNE DE VACA | -40 | 89.2 | 87.5 (4.5) | 91.07 (2.05) | 91.57 (2.59) |
| | -20 | 88.5 | 85.7 (4.4) | 90.2 (1.89) | 90.0 (1.6) |
| | -10 | 82.5 | 82.2 (1.3) | 81.3 (1.43) | 85.1 (5.3) |
| | 0 | 89.09 | 75.5 (14.4) | 87.7 (8.3) | 71.2 (4.2) |
| LECHO DE VARIANZA | | VALOR BIBLIOGRAFICO (31) | | | |
| | -40 | 87.5 | | 87.5 (0.0) | |
| | -20 | 84.5 | | 84.5 (0.05) | |
| | -10 | 91.0 | | 92.0 (1.13) | |
| 0 | 81.0 | | 80.0 (1.5) | | |

En la tabla No. 22 se muestran los valores de calor latente para varios productos alimenticios, así como las condiciones a las que se evaluó. Se observa que los valores obtenidos muestran un porcentaje de diferencia con respecto al bibliográfico de -0.002 a 0.001, estadísticamente resultando que son confiables, por lo que el modelo es válido para cualquier tipo de alimento dado a que no existe diferencia significativa entre dichos valores.

TABLA No. 22
COMPARACION ENTRE VALORES DE CALOR LATENTE BIBLIOGRAFICOS
Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | | VALOR BIBLIOGRAFICO (26) (KJ/Kg) | MODELO PROPUESTO | DIFERENCIA ' |
|-----------------------|------------|----------------------------------------|------------------|-----------------|
| ALIMENTO | UNIDAD (%) | | EC. GENERAL | |
| CARNE DE RES | 49 | 164.0 | 164.0 | 0 |
| CARNE DE RES MAGRA | 45 | 151.0 | 150.7 | -0.2 |
| MILADO | 70 | 235.0 | 234.5 | -0.2 |
| ESPARRAGO | 93 | 312.0 | 311.5 | -0.001 |
| BROCOLI | 90 | 302.0 | 301.5 | -0.001 |
| SANAMORIA | 89 | 295.0 | 294.8 | -0.006 |
| CERESAS | 84 | 285.0 | 281.4 | -0.012 |
| MARANJAS | 87 | 292.0 | 291.45 | -0.002 |
| FRESAS | 90 | 302.0 | 301.5 | -0.002 |
| MANZANAS | 84 | 261.0 | 261.4 | 0.001 |

Finalmente, en la tabla no. 23 se muestran los resultados estadísticos para todas las propiedades térmicas evaluadas; en donde se puede observar que efectivamente no existe diferencia de los valores calculados con respecto al valor reportado en la bibliografía, tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación, por lo que todos los modelos propuestos por los diferentes autores dieron valores confiables en un 95% a 97.5%.

TABLA No. 23
 RESULTADOS ESTADÍSTICOS PARA PROPIEDADES TÉRMICAS
 (ARRIBA Y ABAJO DEL PTO. INICIAL DE CONGELACION)

| CONDICION DE OPERACION | PROPIEDAD TERMICA | PRUEBA DE HIPOTESIS < -0.025 -0.0185 |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| TEMPERATURAS POR ARRIBA DEL PUNTO INICIAL DE CONGELACION | CAPACIDAD CALORIFICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | CONDUCTIVIDAD TERMICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | DENSIDAD | CARNE N.D.S. |
| | ENTALPIA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| TEMPERATURAS POR ABAJO DEL PUNTO INICIAL DE CONGELACION | CAPACIDAD CALORIFICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | CONDUCTIVIDAD TERMICA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | DENSIDAD | CARNE N.D.S. |
| | ENTALPIA | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | CALOR LATENTE DE FUSION | CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |
| | CONTENIDO DE HIELO | CARNE CUALQUIER ALIMENTO N.D.S. |

N.D.S. = NO HAY DIFERENCIA SIGNIFICATIVA

3.2.- COMPARACION ENTRE LOS VALORES DE COEFICIENTE CONVECTIVO BIBLIOGRAFICOS Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el programa para coeficiente convectivo alrededor de diferentes geometrías, comparándolos con valores reportados en la bibliografía. En todos los casos el medio de enfriamiento es aire forzado.

En la tabla No. 24 se observa que los valores calculados con el programa para una geometría esférica tienen un porcentaje de diferencia de -23.06 a 47.35, con respecto al reportado en la bibliografía, demostrándose que estadísticamente no existe diferencia significativa entre ambos valores, por lo que son confiables.

Para el caso de una placa, los valores que se muestran con un asterisco fueron tomados de experimentaciones anteriores realizadas en el LEM IV, se observa que los valores calculados muestran un porcentaje de diferencia con respecto al experimental de -24.6 a -14.5, estadísticamente resultando ser confiables ya que no existe diferencia significativa entre éstos valores.

TABLA No. 24
 COMPARACION ENTRE VALORES BIBLIOGRAFICOS PARA COEFICIENTE CONVECTIVO
 Y LOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA

| CONDICIONES | VELOCIDAD DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO (M/S) | VALOR BIBLIOGRAFICO (26) ($M^2/N^2 \cdot K$) | VALOR CALCULADO ($M^2/N^2 \cdot K$) | NUMERO DE REYNOLDS | NUMERO DE PRANDTL |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| GEOMETRIA : ESTIPA T(°C) DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO: 1-4 RADIO 0.013 M | 1.3 | 47.8 | 38.84 (-23.8) | 1154.52 | 0.725 |
| | 3.0 | 82.8 | 57.21 (-44.2) | 2664.29 | 0.725 |
| | 4.5 | 102.1 | 69.29 (-47.35) | 3996.4 | 0.725 |
| GEOMETRIA : PLACA T(°C) DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO: -10 LONGITUD 0.13 M | 2.18 | 38.62^N | 38.99 (-24.6) | 8588.72 | 0.728 |
| | 0.482 | 7.81^N | 6.87 (-14.1) | 4298.97 | 0.728 |
| GEOMETRIA : PLACA T(°C) DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO: -16 LONGITUD 0.13 M | 2.3 | 11.91^N | 10.882 (-14.8) | 4298.97 | 0.728 |

3.3.- COMPARACION ENTRE TIEMPOS DE CONGELACION BIBLIOGRAFICOS Y TIEMPOS DE CONGELACION CALCULADOS POR EL PROGRAMA

En la tabla No. 25 se muestran los valores de tiempos de congelación para los modelos propuestos contra los tiempos de congelación bibliográficos, el porcentaje de diferencia que existe entre ambos y el resultado estadístico propuesto (prueba de hipótesis). En donde se observa que:

El modelo de Plank (1941) mostró en todos los casos, valores mucho más bajos que los valores bibliográficos (-10.29 a -21.53%). Esto quizás se debe a que la ecuación solamente considera el cálculo del tiempo de congelación durante el cambio de fase, y que por lo tanto no considera los valores de calor sensible eliminado durante los periodos de enfriamiento y subenfriamiento.

Por otro lado, los resultados estadísticos mostraron que la ecuación es confiable en un 95% de confianza, ya que no existe diferencia significativa entre el valor bibliográfico y el valor calculado. Así, la ecuación de Plank en la predicción de tiempos de congelación puede ser

empleada cuando se requieran valores aproximados al tiempo de congelación real.

Para la ecuación de Mellor (1976) se observa que los valores calculados se encuentran en su mayoría por abajo de los tiempos de congelación bibliográficos (-3.18 a 13%). La razón de esto quizás se debe a que toma en cuenta las temperaturas inicial y final del producto respectivamente, así como los valores medios del calor específico (tanto por arriba como por abajo del punto inicial de congelación) .

El modelo propuesto por el I.I.R. (Instituto Internacional de Refrigeración ; 1986) considera en primer término los periodos de cambio de fase y subenfriamiento para el cálculo del tiempo de congelación, además toma en cuenta una diferencia de entalpia entre la temperatura inicial de congelación y la temperatura final del producto en el centro térmico, pero supone que el producto esta inicialmente a la temperatura del punto inicial de congelación.

Esta suposición puede ser la razón por la que los valores de los tiempos de congelación determinados sean

bajos en comparación a los datos bibliográficos (-5.39 a -13.07%), pero confiables estadísticamente en un 95% de confianza.

Cleland - Earle (1979b) proporcionaron un método empírico que considerará los periodos de cambio de fase y subenfriamiento para el cálculo del tiempo de congelación, el modelo emplea una diferencia total de entalpia (el calor sensible por arriba del punto inicial de congelación no es considerado) y supone un gradiente de temperaturas entre el punto inicial de congelación y medio de enfriamiento.

Los valores de tiempos de congelación determinados por esta ecuación mostraron una diferencia de (-19.23 a 12.5%) respecto al valor bibliográfico.

Para el método gráfico propuesto por Salvadori et al (1986) los resultados obtenidos encontraron por debajo de los valores reportados bibliograficamente (-16.44 a -38.18%).

Esto quizás se debe a que no se consideran valores de propiedades térmicas por debajo del punto inicial de congelación, calor latente de fusión, y calor sensible, además del contenido de agua congelada.

Diferencias Finitas .- Este modelo considera el calculo del tiempo efectivo de congelación (tiempo de preenfriamiento, cambio de fase y de temperación). Los resultados obtenidos mostraron un intervalo de diferencia del +21.0 a 33% respecto al valor experimental.

Las diferencias de estos datos quizás se debe a que se empleó un método analítico para calcular el tiempo durante el cambio de fase, y por otro lado para los tiempos antes y después del cambio de fase se empleó el método numérico por diferencia finita explicita.

Esto muestra que el método no es al 100% numérico , pero tiene la ventaja de observar gráficamente los perfiles de temperatura que ocurren antes y después del punto inicial de congelación. En ningún caso los valores obtenidos se encuentran estadísticamente fuera del intervalo de confianza (95%), lo que indica que cualquiera de los modelos propuestos peden ser empleados en el cálculo de tiempos de congelación.

TABLA No. 25

COMPARACION ENTRE TIEMPO DE CONGELACION EXPERIMENTAL Y
CON LOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS PROPUESTOS PARA PLACA
PLANA (CARNE DE VACA CON 74% DE HUMEDAD)

| CONDICION | MODELO | TIEMPO DE CONG. (Hrs) | D (N) | P. de M. α=0,85 | RF |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------|--------------------|----|
| L=0.05 | | | | | |
| T _i =18.8 | Bibliográfico | 1.30 | | | 33 |
| T _a =-38.7 | Plank | 1.02 | -21.53 | N.D.S | |
| T _c =-18 | Mellor | 1.20 | -7.49 | N.D.S | |
| T _f =-1 | I. I. R. | 1.18 | -19.07 | N.D.S | |
| hc=158.5 | C - E | 1.48 | +10.00 | N.D.S | |
| | Grafico | 1.05 | -19.23 | N.D.S | |
| | D. Finita (explicito) | 1.90 | +33.00 | N.D.S | |
| L=0.072 | | | | | |
| T _i =30.0 | Bibliográfico | 4.74 | | | 33 |
| T _a =-40.0 | Plank | 4.20 | -11.39 | N.D.S | |
| T _c =-10 | Mellor | 5.16 | +8.80 | N.D.S | |
| T _f =-1 | I. I. R. | 4.48 | -6.54 | N.D.S | |
| hc=21.6 | C - E | 5.53 | +16.60 | N.D.S | |
| | Grafico | 2.98 | -38.18 | N.D.S | |
| | D. Finita (explicito) | 5.74 | +21.01 | N.D.S | |
| L=0.0485 | | | | | |
| T _i =24.5 | Bibliográfico | 2.04 | | | 33 |
| T _a =-22.0 | Plank | 1.83 | -10.20 | N.D.S | |
| T _c =-10 | Mellor | 2.91 | +18.23 | N.D.S | |
| T _f =-1 | I. I. R. | 1.93 | -5.39 | N.D.S | |
| hc=90.0 | C - E | 2.94 | +14.70 | N.D.S | |
| | Grafico | 1.47 | -29.94 | N.D.S | |
| | D. Finita (explicito) | 2.48 | +22.0 | N.D.S | |

TABLA No. 25

continuación...

COMPARACION ENTRE TIEMPOS DE CONGELACION EXPERIMENTAL Y
CON LOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS PROPUESTOS PARA PLACA
PLANA (CARNE DE VACA CON 74% DE HUMEDAD)

| CONDICION | MODELO | TIEMPO DE CONG. (Hrs) | D (%) | P. de H. $\alpha=0.95$ | REF. |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------|---------------------------|------|
| L=0.0g | | | | | |
| T _l =-17.8 | Bibliográfico | 1.57 | | | 46 |
| T _a =-29.0 | Plank | 1.30 | -17.10 | N.D.S | |
| | Mellor | 1.52 | - 3.18 | N.D.S | |
| T _c =-18 | I. I. R. | 1.44 | - 8.28 | N.D.S | |
| T _c =-1 | C - E | 1.79 | +12.00 | N.D.S | |
| T _f =-1 | Grafico | 1.22 | -22.20 | N.D.S | |
| hc=88.1 | D. Finita(explicito) | 2.01 | +28.04 | N.D.S | |
| L=0.0g | | | | | |
| T _l =18.0 | Bibliográfico | 1.52 | | | 46 |
| T _a =-29.5 | Plank | 1.25 | -17.76 | N.D.S | |
| | Mellor | 1.47 | - 3.28 | N.D.S | |
| T _c =-18 | I. I. R. | 1.40 | - 8.00 | N.D.S | |
| T _c =-1 | C - E | 1.71 | +12.50 | N.D.S | |
| T _f =-1 | Grafico | 1.27 | -16.44 | N.D.S | |
| hc=146.0 | D. Finita(explicito) | 1.96 | +20.06 | N.D.S | |

D (%) = DIFERENCIA = 100 (CALCULADO - EXPERIMENTAL)

EXPERIMENTAL

P. de H. = Prueba de hipotesis.

C-E = Cleland - Earle

N.D.S = No hay diferencia significativa respecto al valor experimental.

T_l, T_a, T_c, T_f = °C ; L = (Mts) ; hc = W/m²°C

Finalmente para el análisis de resultados del método de diferencia finita, en la figura No. 9 se muestra el formato de impresión de la historia térmica (en el nodo central) para el periodo de preenfriamiento de una placa plana de melón, bajo las siguientes condiciones experimentales (LEM IV):

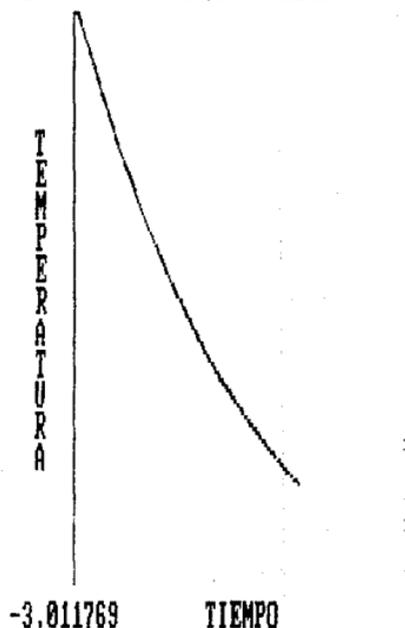
| | |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $T_i = 14.14 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\alpha = 1.35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| $T_a = -10.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $K = 0.536 \text{ N/m } ^\circ\text{C}$ |
| $T_e = -3.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $h_o = 7.88 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| No. de nodos = 10 | No. de iteraciones = 400 |
| Espesor = 0.025 m | |

En donde se observa que la temperatura inicial del producto desciende hasta el punto inicial de congelación (-3.01) en un tiempo de 128.47 min. (7708.3 seg.).

Para verificar la confiabilidad del método, la figura No. 10 muestra la historia térmica real (LEM IV) y la teórica (dif. finita) para las condiciones ya mencionadas.

En la figura se observa que la tendencia de ambas curvas es similar, con un tiempo de preenfriamiento real de 112 min. y un tiempo de preenfriamiento teórico de 128.47 min., obteniéndose un % de diferencia entre ambos de 15 %, por lo que el método de diferencia finita es confiable en un 85% para una simulación de un proceso de congelación

14.14 PREENFRIAMIENTO



HISTORIA TERMICA @ NODO CENTRAL

TEMPERATURA FINAL ALCANZADA

=-3.011769

POR LO TANTO EL TIEMPO DEL PERIODO

DE PREENFRIAMIENTO= 7708.308

IMPRIMIR= <Shift + PrtSc>

OPRIMA (C) PARA CONTINUAR...

Fig. No. 9: Historia Térmica

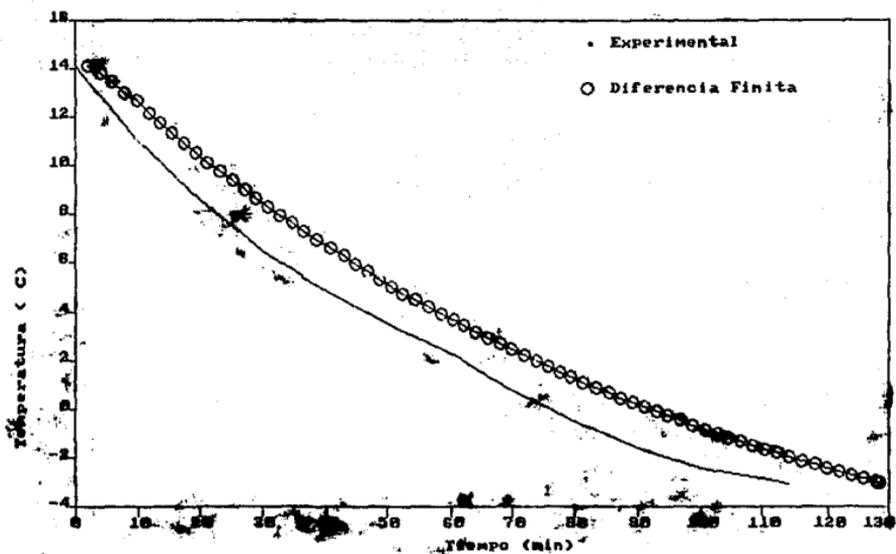


Fig. No. 10 Comparación entre tiempos de congelación.

Tiempo de preenfriamiento real: 112 min.
 Tiempo de preenfriamiento teórico: 128.47 min.
 % de diferencia: 15 %

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados mostrados, los modelos más exactos para la evaluación de las propiedades térmicas fueron los siguientes:

Por arriba del punto inicial de congelación:

Conductividad térmica.- Bazán y Mascheroni con un % de diferencia de -0.8 a -1.0

Entalpia.- Mascheroni con un % de diferencia de 0.04 a 0.07

Calor específico.- Dickerson con un % de diferencia de -2.4 a 0.25

Por abajo del punto inicial de congelación:

Conductividad térmica.- Levy con un % de diferencia de -2.3 a -4.6

Calor específico.- Fikiin con un % de diferencia de -11.7 a 13.0

Contenido de hielo.- Mascheroni y Calvelo con un % de diferencia de 0.87 a 2.05

Sin embargo, todos los modelos empleados para la evaluación de las propiedades térmicas proporcionaron resultados confiables, ya que estadísticamente no se encontró diferencia significativa entre el valor obtenido con el programa y el valor reportado en la bibliografía.

Referente a los modelos empleados para la predicción de los tiempos de congelación, cabe mencionar que el modelo más exacto fue el propuesto por Mellor, con un % de diferencia de -3.18 a 13.0. Sin embargo, todos los modelos empleados para la predicción de los tiempos de congelación proporcionaron valores confiables, ya que estadísticamente los valores obtenidos se acercan al valor experimental en un 95 % de confianza, apesar de que cada uno tiene sus propias limitaciones. Finalmente la selección del método depende de la comodidad y del grado de exactitud que se desea, pero es necesario aclarar que ningún método reúne los requisitos necesarios para ser considerado como simple y exacto.

En cuanto a coeficiente convectivo, las correlaciones empleadas para su evaluación proporcionaron valores confiables, ya que mediante la prueba de hipótesis se comprobó que no existe diferencia significativa entre el valor calculado con el programa y el reportado en la bibliografía.

En virtud de lo anterior, podemos asegurar que el paquete de cómputo proporciona de manera sencilla los elementos necesarios para el estudio de la transferencia de calor en alimentos a bajas temperaturas, así mismo nos da las herramientas necesarias para el diseño y seguimiento de un proceso de congelación de alimentos.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

- 1.- Batty, J. C. "Fundamentos de la Ingeniería de los Alimentos" Ed. C.E.C.S.A. México (1980)
- 2.- Brennan, J. G. "Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos" Colegio Nacional de Tecnología de Alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza, España. (1970)
- 3.- Charm, S. E. "Fundamentals of Food Engineering" Ed. Westport, AVI. (1971)
- 4.- Cortazar, F. Laura. Tesis: "Evaluación de las Propiedades Termofísicas de la Uva de Mesa, Variedad Cornichón, Durante su Tratamiento Frigorífico" F.E.S. - Cuautitlán C-1 (1988)
- 5.- Cox, P. M. "Ultra Congelación de Alimentos. Guía de la Teoría y Práctica" Ed. Acribia. Zaragoza, España (1987).
- 6.- Desrosier, N. W. "Conservación de los Alimentos" Ed. C.E.C.S.A. Segunda edición. México D. F. (1990)
- 7.- Earle, R. L. "Ingeniería de los Alimentos" Ed. Acribia. Zaragoza, España. (1968)
- 8.- Geankoplis, C. "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias" Ed. C.E.C.S.A. Segunda edición. México (1986)

- 9.- Goldstein, L. J. "I.B.M. Pc : Introducción al Sistema Operativo, programación y Aplicaciones en Basic" Ed. Prentice Hall Hispanoamericana. (1986)
- 10.- Holman, J. P. "Transferencia de Calor" Ed. Mc Graw Hill. Séptima edición. New York (1980)
- 11.- Jean - Claude, Cheftel, et al. "Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos" Vol II Ed. Acribia. España (1976)
- 12.- Lage, S. J. "Panorama Sistemático de las Aplicaciones de la Tecnología de Bajas Temperaturas a los Alimentos" P.U.A.L. UNAM, México (1989)
- 13.- Levine, G. G. "Introducción a la Computación y a la Programación Estructurada" Ed. Mc Graw Hill. Segunda edición. México (1989)
- 14.- Henrique, J. A. "Transferencia de Calor" Ed. Harla. México (1976)
- 15.- Microsoft, Co. "Guía del Usuario: Sistema Operativo" (1987)
- 16.- Microsoft, Co. "Guía del Usuario: GwBasic" (1988)
- 17.- Mohsenin, N. "Thermal Properties of Food and Agricultural Materials" Gordon and Breach Publ. (1980)
- 18.- Ozisik, M. N. "Transferencia de Calor" Ed. Mc Graw Hill. México, D. F. (1988)

- 19.- Blank, R. "El Empleo del Frio en la Industria de la Alimentación" Ed. Reverte. Madrid, España. (1984)
- 20.- Potter, N. N. "La Ciencia de los Alimentos" Ed. Edutex, S.A. Primera edición. México. (1973)
- 21.- Reyes, C. P. "Bioestadística Aplicada: agronomía, biología, química" Ed. Trillas, Segunda edición. México. (1980)
- 22.- Tressler, K. D. "Fundamentals of Food Freezing" Ed. West Port, AVI (1977)
- 23.- Versello, R. J. "Procesamiento de Datos: Conceptos y Sistemas" Ed. Mc Graw-Hill. México, D.F. (1983)
- 24.- Walpole, R. E.; Myers, R. H. "Probabilidad y Estadística para Ingenieros" Ed. Mc Graw-Hill. Tercera edición. México (1988)
- 25.- Welty, J. R. "Tranferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería" Ed. Limusa. México (1978)

ARTICULOS

- 28.- ASHRAE "Fundamentals Handbook", chapter 29. New York, New York. (1977)
- 27.- ASHRAE "Fundamentals Handbook", chapter 30. New York, New York. (1989)

- 28.- ASHRAE "Fundamentals Handbook", chapter 29. New York, New York. (1989)
- 29.- Chang, H. D.; Tao, L. "Correlation of Enthalpies of Food Systems" J. of Food Sc. 46(1981)
- 30.- Chen, C. S. "Thermodynamic Analysis of the Freezing and Thawing of Foods: Enthalpy and Apparent Specific Heat" J. of Food Sc. Vol. 50 (1985).
- 31.- Chen, C. S. "Thermodynamic Analysis of the Freezing and Thawing of Foods: Ice Content and Mollier Diagram" J. of Food Sc. Vol. (incompleta)
- 32.- Chung, S.; Heiritt, J. "Freezing Time Modeling for Small Finite Cylindrical Shaped Foodstuff" J. of Food Sc. Vol. 56. No.4 (1981).
- 33.- Cleland, A.; Earle, R. "A Comparison of Analytical and Numerical Methods of Predicting the Freezing Times of Foods" J. of Food Sc. Vol. 42. No.5 (1979).
- 34.- Enamorado, R.; et al. "Simulación y Control del Proceso de Esterilización por Ordenador Personal para la Optimización de la Calidad y Seguridad de Conservas" Rev. Alimentaria. No. 190 (1988).
- 35.- Frias, T. I.; et al. "Procedimientos de Conservación de los Alimentos. Parte 1: El Frio" Rev. Alimentaria. 210(1990).

- 36.- Güemes, D. R. "Heat Transfer Characteristics During Air Precooling of Strawberries" Int. J. Refrig. 12(1989).
- 37.- Heldman, D. "Factors Influencing food Freezing Rates" Food Tech. April(1983).
- 38.- Hung, Y. C.; Thompson, D. R. "Freezing Time Prediction for Slab Shape for Foodstuffs by an Improved Analytical Method" J. of Food Sc. 48(1983).
- 39.- Hung, Y. C. "Predictions of Cooling and Freezing Time" Food Tech. May (1990).
- 40.- Ilıcak, C. ; Sağlam, M. "A Simplified Analytical Model for freezing Time Calculation in Foods" J. of Food Proces. Eng. 9(1987).
- 41.- Le Blanc, D.I.; et al. "Freezing of a Parallelepiped Foods Product. Part 1: Experimental Determination" Int. J. Refrig. 13(1990).
- 42.- Le Blanc, D.I.; et al. "Freezing of a Parallelepiped Foods Product. Part 2: Comparison of Experimental and Calculated Results" Int. J. Refrig. 13(1990).
- 43.- Mascheroni, R.; et al. "Recopilación y Evaluación de las Propiedades Térmicas de Productos Cárnicos" Rev. de Tec. e Higiene Alim. 153(1984).

- 44.- Mascheroni, R.; Calvelo, A. "A Simplified Model for Freezing Time Calculations in Foods" J. of Food Sc. 47(1982).
- 45.- Mellor, J. D. "Themophysical Properties of Foodstuffs" Bull. del I.I.R. Part. 1: 56(3) (1976). Part 2: 58(3)(1978).
- 46.- Michelis, A.; Calvelo, A. "Freezing Time Prediction for Brick and Cylindrical Shaped Foods" J. of Food Sc. 48 (1983).
- 47.- Salvadori, V. O.; et al. "Freezing Times Prediction for Regular Shaped Foods: A Simplified Graphical Method" Int. J. Refrig. 10 (1987).