

CAPITULO I



ASPECTOS GENERALES

ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

Diferentes estudios se han realizado con el objeto de conocer las propiedades térmicas de los alimentos, en estos se han obtenido valores para cada una de las propiedades y se han desarrollado modelos matemáticos para predecir su comportamiento a partir de la relación con la temperatura y características del material como: la composición química, el contenido de humedad, la estructura, entre otras (*Nesvadba, et al., 2004*). Entre los estudios realizados en los últimos años sobre el tema se destacan: el estudio de la conductividad térmica y punto de congelación del jugo de naranja (*Gabas, et al., 2003*), la determinación y modelo de las propiedades térmicas del tofu (*Baik y Mittal, 2003*), nuevos métodos para congelar y descongelar alimentos (*Li y Sun, 2002*), la medida de las propiedades térmicas de pescados como el atún (*Zhang, et al., 2001*), la congelación de alimentos por medio de líquidos criogénicos (*Agnelli y Mascheroni, 2001*), la construcción y validación experimental de un modelo matemático para predecir las propiedades del queso (*Marschoun, et al., 2001*), entre otros. En el caso específico de la carne, los trabajos se han dedicado a determinar el valor de sus propiedades térmicas y modelar su comportamiento térmico y mecánico (*Choi y Okos, 1986, Lind, 1991, Rahman, 1995*), modelos matemáticos basados en métodos numéricos que se aproximan a la representación del fenómeno físico (*Franke, 2000, Saad y Scott, 1996, Sanz, et al., 1999, Sun y Zhu, 1999*). Las propiedades térmicas de la carne han sido estudiadas por diferentes investigadores, sin embargo la información disponible es dispersa, fraccionada existe un alto grado de variación, lo que dificulta el uso de los valores publicados y de los modelos propuestos en aplicaciones industriales.

El empleo de bajas temperaturas es uno de los métodos más antiguos para conservar los alimentos. Al parecer los hombres prehistóricos guardaban la caza entre hielo para

consumirla posteriormente, ya en el siglo VIII a.c., los chinos mantenían el hielo del invierno en cuevas o bajo tierra para emplearlo durante el verano. La producción continua de frío y su aplicación en la industria alimentaria, indicada en el siglo XIX, ha sido precisamente una de las grandes innovaciones de la tecnología de los alimentos. Este gran avance permitió el almacenamiento y el transporte de los alimentos perecederos. Hacia 1830 comenzaron a desarrollarse algunas máquinas frigoríficas industriales, instalándose a finales del siglo XIX en barcos para el transporte de carne congelada desde Argentina, Australia y Nueva Zelanda a Europa, donde se recibía en excelentes condiciones. La disponibilidad de refrigeradores y congeladores a lo largo de toda la cadena alimentaria, incluyendo los hogares, ha mejorado considerablemente la calidad de los productos refrigerados y congelados (Ordoñez, 1998).

La aplicación del frío, en sus dos importantes vertientes – refrigeración y congelación, permite alargar la vida útil de los alimentos, ya sean frescos o procesados, durante periodos relativamente largos como una mínima repercusión en sus características nutritivas y organolépticas. Se amplía, por lo tanto, la esfera de utilización de la materia prima, tanto en tiempo como en distancia geográfica (Ordoñez, 1998).

Existen estudios referentes a la carne de llama en lo que es genética, fibra y sanidad animal, pero no hay estudios referentes a conservación que permitan preservar un producto de calidad a largo plazo. Se han realizado estudios de congelación en diferentes tipos de carnes, determinando el punto de congelación, como se muestra en el cuadro 1.1, puntos de congelación en diferentes carnes.

**CUADRO 1.1. PUNTOS DE CONGELACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE
CARNE**

PRODUCTOS	PUNTO DE CONGELACIÓN
Conejo	-2.7
Pollo	-2.8
Cordero	-2.0
Res	-2.0
Cerdo	-2.0
Pavo	-2.8

Fuente: Monleon, 1999

La conservación mediante congelación es mucho más compleja en los aspectos tecnológicos y termotécnico que la refrigeración. La capacidad de conservación del producto congelado es en muchas veces superior a la del mismo producto manteniendo en refrigeración como lo demostró (Z. Gruda, J. Postolski, 1986).

En los procesos de refrigeración y congelación sobre los productos alimentarios, es necesario establecer una distinción entre:

1. Alimentos de estructura celular, que son la mayoría (carnes, pescados, verduras, frutas, legumbres, etc.).
2. Alimentos sin estructura celular (algunas salsas).

Durante los procesos de refrigeración y congelación de los alimentos se debe tomar en cuenta los cambios, que se producen en la estructura de los alimentos durante su congelación, es muy importante saber cómo se encuentra el agua en los tejidos como lo indica (Madrid y Gómez, 1994)

Cuando la congelación es lenta, el agua retenida se congela formando cristales grandes. Pero hay que distinguir entre el agua retenida en el interior de las células y el agua retenida en los espacios intercelulares. El agua presente en los espacios

intercelulares tiene una concentración menor en nutrientes que la que hay en el interior de la célula.

Por ello congela antes haciendo que el fluido extracelular se concentre en nutrientes, lo que provoca una salida de agua de las células circundantes para compensar esa concentración. Esto provoca una concentración de las células, una deshidratación y desnaturalización de las proteínas contenidas en ellas, rotura de la membrana celular, etc. en resumen, con la congelación lenta se provoca la rotura de la estructura celular de los alimentos (Madrid y Gómez, 1994).

Cuando la congelación es muy rápida, como cuando se utiliza nitrógeno líquido, se congela el agua presente en el interior de la célula formando pequeños cristales, antes de que se formen cristales más grandes extracelulares. De esta forma se preserva la estructura celular del producto congelado (Madrid y Gómez, 1994).

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación se justifica por las siguientes razones:

- Desde el punto de vista técnico, los procesos de transformación agroindustrial requieren el conocimiento de los parámetros de conductividad termal a fin de establecer los procesos de tratamiento térmico, además de elegir los materiales adecuados para el diseño y construcción de equipos ya que la transferencia de calor es diferente para cada tipo de equipo empleado, y su determinación contribuirá al mejor entendimiento y el adecuado desarrollo científico y tecnológico en la transformación de esta especie olvidada.
- Desde el punto de vista económico, la elección del adecuado material para la fabricación o elaboración de alimentos a base de carne de llama, permitirán reducir costos para alcanzar y lograr las temperaturas en el menor tiempo posible aminorando gastos en el consumo de combustible en el proceso propiamente dicho.
- Desde el punto de vista social, una adecuada conservación de la carne de llama, permitirá satisfacer las necesidades de preservar la carne de llama en

condiciones saludables para su consumo y aprovechamiento industrial con mejores oportunidades económicas.

- Los estudios contribuirán en el enriquecimiento de la ciencia y tecnología alimentaria al contar con parámetros fisicoquímicos reales de la carne de llama en nuestro país; con la finalidad de ser divulgados en foros científicos.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- Obtener los parámetros de conductividad y difusividad térmica en cortes especiales de la carne de llama; en el proceso de congelación.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la conductividad térmica en los cortes anatómicos de la carne de llama.
- Determinar la difusividad térmica en los cortes anatómicos de la carne de llama.
- Construir la curva de congelación para las partes anatómicas y determinar gráficamente el punto inicio de congelación

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es la conductividad térmica y difusividad térmica en los cortes anatómicos de la carne de llama durante el proceso de congelación?

1.6 PLANTEAMIENTO DE LOS PROBLEMAS ESPECIFICOS

¿Cuál es el valor de conductividad térmica en los cortes anatómicos de la carne de llama durante el proceso de congelación?

¿Cuál es el valor de la difusividad térmica en los cortes anatómicos de la carne de llama durante el proceso de congelación?

¿Cuál es el punto inicio de congelación de los cortes anatómicos de la carne de llama?

1.7 HIPÓTESIS

La determinación de los parámetros de difusividad y conductividad térmica en congelación es posible determinar el tiempo de congelación requerido para las partes anatómicas de la carne de llama y proponer técnicamente los parámetros de conservación en congelación de la carne de llama.

CAPITULO II



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 LA LLAMA (*Lama glama*)

La llama es el más grande de los camélidos y se asemejan a su progenitor, el guanaco en casi todos los aspectos morfológicos y comportamiento social. Igual que su progenitor, el guanaco, la llama se ha adaptado a un amplio rango de condiciones medioambientales. Después de su domesticación en las pumas peruanas, hace aproximadamente 6000 años, fue llevado por el hombre a los valles interandinos peruanos y al norte de Chile, donde se ha encontrado restos en sitios arqueológicos con una antigüedad de 3800 años, la crianza de llamas se extendió, 2400 años más tarde, a la costa norte de Perú y al Ecuador, llegando a jugar un rol importante en la economía local de ambas regiones. Además existen evidencias de que fueron criadas hace 900 años en la costa sur, en la región de Moquegua y en el sitio de Gran Pajatén, ubicada en alta ceja de selva de San Martín. Se conoce que durante el Incanato, caravanas de llamas solían acompañar a los ejércitos reales, extendiendo de esta manera la distribución de esta especie a lo largo de los Andes, desde el sur de Colombia a la zona central de Chile (Wheeler, 1991).

La actual distribución de la llama es un producto de la historia. Con la llegada del dominio español y la introducción de ganado foráneo en 1532, los rebaños nativos fueron rápidamente diezmados y desplazados de la costa y los valles interandinos a las punas de gran altura, donde los animales europeos no prosperaban. Actualmente, en el extremo norte de su distribución se encuentran poblaciones relictos en la zona de pasto, Colombia (1° latitud norte) y Riobamba, Ecuador (2° latitud sur). Al sur, se extienden hasta aproximadamente 27° en el centro de Chile, pero la zona de mayor productividad está ubicada entre 11° y 21° latitud sur entre elevaciones de 3800 a 5000 m.s.n.m (Wheeler, 1991).

2.1.1 DESCRIPCIÓN TAXONÓMICO

En la escala taxonómico (Jane C. Wheeler, 1991) se ubica la llama dentro de la siguiente clasificación se muestra en el cuadro 2.1.

CUADRO. 2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LA LLAMA.

Orden	Artiodactyla
Suborden	Tylopoda
Familia:	Camelidae
Género:	Llama
Especie:	Llama glama

Fuente: Jene C. Wheeler, 1991

2.1.2 LA CARNE DE LLAMA

Desde hace más de 5000 años, en las tierras altas sudamericanas las llamas y alpacas son los principales proveedores de carne. Es mas: La arqueología supone que el acceso a carne fresca sin necesidad de caza fue el principal motivo de la domesticación de las especies silvestres (Qhapaj Kayninchis, 2003).

En la época colonial, los cronistas confirman el consumo y las propiedades que la carne de la llama y la alpaca tienen para el hombre. El Inca Garcilaso de la vega, en el año 1604, escribió “la carne de este ganado mayor es la mejor de cuantas hoy se comen en el mundo; es tierna, sana y sabrosa; la de sus corderos de cuadro y cinco meses mandan los médicos dar a los enfermos antes que gallinas ni pollos” (Qhapaj Kayninchis, 2003).

Actualmente en Perú y en Bolivia la carne de camélido domesticado tiene una importancia primaria en la dieta popular estimándose, que solo en el Perú se consume anualmente 18000 toneladas de carne de llama y alpaca, mientras que en Bolivia el movimiento económico generado por la venta de carne de camélidos es de aproximadamente 4 millones de dólares (Qhapaj Kayninchis, 2003).

2.1.3 COMPOSICIÓN DE LA CARNE

La carne fresca de llama tiene niveles de colesterol diez veces menores que la carne de cordero o de la vaca, por lo que su consumo sería más saludable. Tiene un aspecto semejante a la carne vacuno y posee un sabor y aroma distintivos. La grasa es muy blanca y tiene bajas niveles de colesterol, en el siguiente cuadro 2.2, se muestra la composición bromatológica de la carne de llama (López, 1991).

CUADRO. 2.2. COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA DE LA CARNE DE CAMÉLIDOS DOMÉSTICOS.

COMPOSICIÓN BROMATOLOGICA (%)	LLAMA	ALPACA
Humedad	69.17-73.83	71.9-77.30
Proteína	19.40-24.83	18.93-21.74
Grasa	1.21-4.80	1.06-7.20
Cenizas	1.17-1.7	1.11-1.60
• Fosforo	0.20	0.30
• Calcio	0.011	0.009
• Fierro	0.0036	0.0027
Colesterol	0.16	0.20
Indicé de yodo	53.9	58.6

Fuente: López, 1991

2.1.3.1 CONTENIDO PROTEICO

Las necesidades de proteína, recomendadas también por FAO, para América Latina, es de 52 gramos de proteína, lo cual puede ser suplido fácilmente por 100 gramos de carne de llama, que proporciona 24 gramos de éste principio nutritivo, que es casi la mitad de los requerimientos diarias, pues como se sabe entre las carnes animales es la

que mayor contenido proteico tiene, tal como se ha demostrado innumerables veces por numerosos

Investigadores, y que para mayor objetividad se muestra en el cuadro 2.3, el contenido proteico de diversas carnes animales (Bustinza, 1995).

CUADRO. 2.3. CONTENIDO PROTEICO DE DIVERSAS CARNES ANIMALES.

ESPECIE ANIMAL	PORCENTAJES DE PROTEINA POR CADA 100 GRAMOS (%)
Carne de llama	24.82
Huevo de gallina	12.1
Carne de cerdo	14.4
Carne de pollo	15.6
Carne de gallina	19.2
Carne de cordero	19.0
Carne de vacuno	21.3

Fuente: Bustinza, 1995

2.1.3.2 CANTIDAD DE GRASA

La carne de llama es la que menos cantidad de grasa oferta, al ser comparada con las otras especies animales, la cual aun puede ser mucho menor en caso de animales jóvenes, y mucho mayor en los animales adultos y engordados, pues existen autores que señalan que las llamas pueden aportar hasta un 20% de sebo, cuando están encordadas, más aun ésta habría sido una importante fuente de grada en el pasado cultural incaico, como suplemento alimenticio de grasa y para la iluminación

(Bustanza, 1995). En el siguiente cuadro 2.4 se muestra la cantidad de grasas en la carne de algunos animales.

**CUADRO. 2.4. CANTIDAD DE GRASA EN LA CARNE DE
ALGUNOS ANIMALES.**

ESPECIE ANIMAL	PORCENTAJE DE GRASA POR 100 GRAMOS DE CARNE (%)
Llama	3.7
Gallina	5.9
Oveja	6.0
Vaca	6.0
Huevo de gallina	10.0
Cerdo	15.0
Pollo	18.0

Fuente: Bustanza, 1995

2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

El calentamiento y el enfriamiento son los procesos más habituales en una planta de procesamiento de alimentos. Es habitual encontrar en la moderna industria alimentaria unidades de refrigeración, congelación, esterilización, secado y evaporación. En estas unidades tiene lugar la transmisión de calor entre un producto y un agente calefactor o refrigerante. El calentamiento y el enfriamiento de productos alimentarios son necesarios para prevenir la degradación microbiana y enzimática. Además, los alimentos, pueden adquirir algunas propiedades organolépticas deseadas cuando se calientan o enfrían (Singh y Heldman, 1997). Se denomina energía transitoria la que se manifiesta exclusivamente cuando tiene lugar un intercambio energético entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno.

Cuando el intercambio energético es debido a una diferencia de temperaturas, se dice que la energía se transmite mediante el flujo de calor; por tanto la existencia de una diferencia de temperaturas es una condición necesaria para que se manifieste la forma de energía transitoria denominada calor (Hermida, 2000).

En determinadas circunstancias el objetivo principal de la transmisión de calor es obtener el máximo flujo térmico por unidad de superficie (siempre dentro de límites económicos), como en evaporadores, condensadores, generadores de vapor, etc. En otros casos se pretende minimizar el flujo de calor como en cámaras frigoríficas o tuberías de transporte de vapor, mediante la incorporación de un aislante. En muchas ocasiones se trata de evitar la pérdida de calor, recuperando en dispositivos como cambiadores de calor que reciben nombres específicos como recuperadores o regeneradores (Hermida, 2000).

La transmisión de calor característica de sustancias alimenticias y la rapidez con que el producto se calienta o se enfría durante el tratamiento térmico. Las distintas clases de calor que aparecen en los procesos de transferencia en las operaciones de la industria alimentaria han sido estudiadas. El calor se transmite por tres mecanismos diferentes, denominados conducción, convección y radiación. La conducción es el principal mecanismo de transmisión de calor en materiales sólidos, mientras la convección es apropiada principalmente para fluidos. En los procesos de transmisión de calor por radiación, la energía se transmite por medio de ondas electromagnéticas, es decir, infrarrojo, ultravioleta o microondas. Muchas operaciones no están limitadas a un solo mecanismo. En un intercambiador de calor, el calor se transfiere de un fluido a otro a través de un tubo o placa metálica; participan así en el proceso la conducción y la convección (Hermida, 2000).

2.2.1 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Los mecanismos de transmisión de calor se clasifican en tres tipos básicos que se denomina genéricamente, conducción, convección y radiación, y que sólo

excepcionalmente se presentan independientes en un proceso específico; con carácter general se dan simultáneamente al menos dos de ellos (Hermida, 2000).

a) Transmisión de calor por conducción

Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases. El ejemplo común de conducción a través de sólidos opacos es de los ladrillos de las paredes de un horno o la pared de un tubo metálico (Mc Cabe, 1991). La conducción se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes. Este tipo de transferencia siempre está presente, en mayor o menor grado, en sólidos, líquidos y gases en los que existe un gradiente de temperatura (Geankoplis, 1995).

Es un transporte de energía a nivel molecular, debido al movimiento Browniano originado por un gradiente de temperatura. Tiene lugar en aquellos sistemas en los que no existan desplazamientos apreciables de las moléculas en el sentido de la transmisión, como son los sólidos (cuya rigidez estructural impide dicho desplazamiento) o los fluidos circulan en régimen laminar con transmisión de calor perpendicular a la dirección del movimiento (en donde la circulación en forma de láminas impide la mezcla transversal). También se presenta a través de las superficies de contacto entre dos cuerpos inmóviles con algunas restricciones respecto al acabado de dichas superficies (Hermida, 2000).

La conducción es la forma en que tiene lugar la transferencia de energía a la escala molecular. Cuando las moléculas absorben energía térmica vibran sin desplazarse, aumentando la amplitud de la vibración conforme aumenta el nivel de energía. Esta vibración se transmite de unas moléculas a otras sin que tenga lugar movimiento alguno de traslación (Singh y Heldman, 1997).

El mecanismo de la conducción establece que la conducción tiene lugar a escala molecular debido al desplazamiento de los electrones. Es habitual la existencia de

electrones libres en los metales y son éstos los responsables del transporte de energía térmica y eléctrica. Por ello, los buenos conductores de la electricidad lo son también de la energía térmica por ejemplo el cobre y la plata (Singh y Heldman, 1997).

En la transmisión de calor por conducción no hay movimiento de materia. La conducción es el método más habitual de transmisión de calor en procesos de calentamiento y enfriamiento de materiales sólidos. Si existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, tendrá en lugar una transmisión de calor desde la zona de alta temperatura hacia la que está a temperatura más baja. El flujo de calor será proporcional al gradiente de temperatura (Singh y Heldman, 1997).

Las leyes por las que se rige este mecanismo de transmisión se expresan en términos matemáticos precisos, están basadas en la ecuación de Fourier:

$$\frac{q_x}{A} \propto \frac{dT}{dX} \quad \text{Ec. 1}$$

e introduciendo la constante de proporcionalidad

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo q_x el flujo de calor por conducción en la dirección x (W), k la conductividad térmica (W/m °C), A el área (normal a la dirección x) a través de la que fluye el calor (m^2), T la temperatura (°C) y x la distancia (m).

b) Transmisión de calor por convección

La transferencia de calor por convección según implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Además, con frecuencia incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido. Conviene aclarar que hay una diferencia entre

la transferencia de calor por convección forzada en la que se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico y la convección libre o natural, en la cual un fluido más caliente o más frío que está en contacto con la superficie sólida causa una circulación debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido. Todo fluido que está en movimiento lleva asociada consigo una energía que hace que exista una transferencia de calor, por mezcla de una parte del fluido con otra que se encuentran a diferentes temperaturas, debido precisamente a este movimiento. El movimiento de líquidos o gases se produce por diferencia de densidades debido a la diferencia de temperaturas; esto hace que se presente un transporte de calor en forma natural, (Geankoplis, 1995).

Es el transporte turbulento de calor debido al movimiento de masas de moléculas. El calor se transporta de unos puntos a otros del sistema por desplazamiento de las moléculas entre dichos puntos lo que obliga a una libertad de movimientos propia de los fluidos. El proceso real de la transmisión de molécula a molécula sigue siendo por conducción, e incluso si el medio es transparente, por radiación, pero el efecto global de la transmisión se debe al desplazamiento de masas. Si el movimiento del flujo es solamente debido a la diferencia de densidad originada por la diferencia de temperaturas, el mecanismo se conoce como convección natural. Si el movimiento es, además, potenciado por medios mecánicos externos, el mecanismo se conoce como convección forzada (Hermida, 2000).

Cuando un fluido circula alrededor de un sólido, por ejemplo por el interior de una tubería, existiendo una diferencia de temperatura entre ambos tiene lugar un intercambio de calor entre ellos. Esta transmisión de calor se debe al mecanismo de convección. El calentamiento y enfriamiento de gases y líquidos son los ejemplos más habituales de transmisión de calor por convección. Dependiendo de si el flujo del fluido es provocado artificialmente o no, se distingue dos tipos de transmisión de calor por convección: forzada y libre (también llamada natural). La convección forzada implica el uso de algún medio mecánico, como una bomba o un ventilador,

para provocar el movimiento del fluido. Por el contrario, la convección natural tiene lugar a causa de diferencia de densidad provocadas a su vez por gradientes de temperatura. Ambos mecanismos pueden provocar un movimiento laminar o turbulento del fluido (Singh y Heldman, 1997).

El flujo de calor se expresa mediante la ley de Newton, que considera el efecto global de la convección.

$$q = hA(T_P - T_{\infty}) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Q = Flujo de calor

A = Área a través de la cual el calor fluye

h = Coeficiente de transferencia de calor convectivo

T_p = Temperatura constante estacionaria (superficial, externa)

ΔT = Temperatura del fluido convectivo

c) Transmisión de calor por radiación

La radiación difiere de la conducción y la convección en que no se requiere un medio físico para la transferencia. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas, de manera similar a las ondas electromagnéticas que propagan y transfieren la luz (Geankoplis, 1995).

Es el transporte de energía en ondas electromagnéticas emitidas por la superficie del cuerpo excitado térmicamente. Cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura dada emite energía radiante en todas direcciones, de forma que cuando incide sobre otro cuerpo, una parte de la misma puede ser absorbida y transformarse cuantitativamente en calor. En función de las características de este segundo cuerpo, el resto de energía no absorbida puede ser reflejada o transmitida. (Hermida, 2000).

El calor transmitido según este mecanismo no necesita medio material como vehículo, aunque la existencia de un fluido entre los cuerpos emisor y absorbente no afecta al proceso. La velocidad de transferencia de calor por este mecanismo se expresa en términos matemáticos por la ley de Stefan-Boltzman:

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

Donde: en la que σ es una constante de proporcionalidad, ε es el poder emisivo del cuerpo y T es la temperatura absoluta.

La transmisión de calor por radiación tiene lugar entre superficies mediante la emisión y posterior absorción de radiación electromagnética. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere ningún medio para su propagación y puede tener lugar incluso en el vacío. La energía irradiada (o emitida) por una superficie es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia y depende de las características de la superficie (Singh y Heldman, 1997).

2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO

➤ TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Los procesos en los cuales la temperatura de cualquier punto del sistema cambia con el tiempo, es decir, la transferencia de calor en estado no estacionario o transitorio, (Geankoplis, 1998).

➤ Conducción en estado no estacionario en un cilindro largo

Se considerará en ahora la conducción en estado no estacionario en un cilindro extenso, donde el proceso se verifica únicamente en dirección radial. El cilindro es

bastante largo, por lo que la conducción en los extremos es despreciable o bien se puede considerar que dichos extremos están aislados. (Geankoplis, 1998).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad \text{Ec. 5}$$

Dado que la temperatura es función de dos variables independientes tiempo y posición, la siguiente ecuación es la que define la situación para el caso unidimensional, (Heldman, 1983).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

T: es la temperatura (°C)

t: es el tiempo (s)

x: la posición (m)

La combinación de propiedades nos da la difusividad térmica.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde α se denomina difusividad térmica, ρ es la densidad del producto, C_p es el calor específico del producto.

Es importante destacar que la solución analítica de esta ecuación es posible para algunas geometrías sencillas, como la esfera, el cilindro infinito o la lamina infinita.

Los métodos de transferencia de calor en estado no estacionario, para la medición de la conductividad termal, hacen uso de una fuente lineal de calor o una o más fuentes planas de calor. En ambas categorías el procesamiento usual es aplicar un flujo de

calor estable a la muestra, el cual debe estar inicialmente en equilibrio térmico, (Mohsenin, 1980).

Las técnicas en estos métodos son menos complicadas que en los métodos de estado estacionario. Visto que la mayoría de los materiales de alimentos sujetos a procesamientos térmicos contienen ciertas cantidades de humedad, el problema de la migración de la humedad es presentada cuando es usado un método de estado estacionario. Por lo tanto los métodos de transferencia de calor en estado *transiente* parecen ser más apropiados para el caso de alimentos, (Mohsenin, 1980).

2.3 PROPIEDADES TERMICAS DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS

El proceso de congelación produce un drástico cambio de las propiedades térmicas de los alimentos. Las propiedades de los alimentos cambian debido a la pérdida de agua que experimenta así como al efecto que el cambio de fase produce en el agua. Cuando el agua dentro del producto pasa del estado líquido al estado sólido también cambian de forma gradual propiedades como la densidad, la conductividad térmica, la entalpía y el calor específico aparente del producto (Singh y Heldman, 1997).

2.3.1 DENSIDAD

La densidad es la masa de una sustancia o un alimento contenida en una unidad de volumen, (Alvarado, 2001).

$$Densidad = \frac{masa}{volumen} \quad \text{Ec. 8}$$

Las dimensiones de la densidad son $[ML^{-3}]$. En el Sistema Internacional de Unidades (SI) la densidad se expresa $kg\ m^{-3}$, su símbolo habitual es la letra griega rho ρ , (Lewis, 1993).

En alimentos líquidos (ej. bebidas, néctar, etc.) la densidad se diferencia entre densidad real y densidad aparente (Chen, 1993), de la misma manera también se aplica a los sólidos, (Lewis, 1993)

Densidad real, cuando la determinación se realiza en vacío, sin que exista efecto de flotación de aire (Alvarado, 2001).

$$Densidad\ real = \frac{masa}{volumen\ real\ de\ la\ muestra} \quad Ec. 9$$

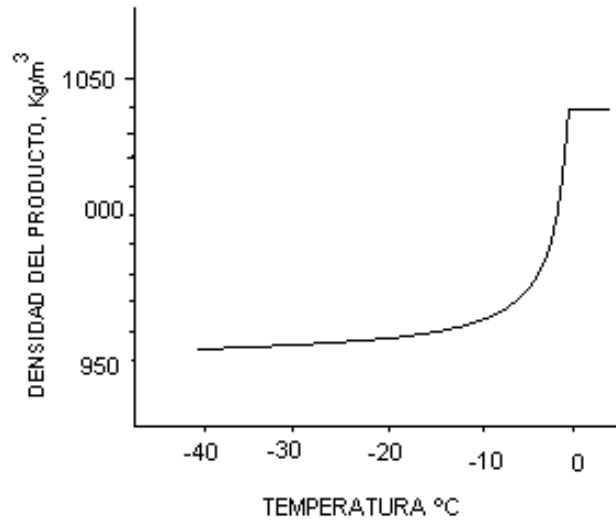
Densidad aparente, cuando la determinación se realiza en presencia de aire; en consecuencia se debe hacer la corrección que incluya el efecto de la temperatura, presión y humedad relativa del aire para expresarla como densidad absoluta (Alvarado, 2001).

$$Densidad\ aparente = \frac{masa}{volumen\ global\ de\ la\ muestra} \quad Ec. 10$$

El concepto de densidad en líquidos es fácil de comprender, pero los sólidos en forma particular (guisantes y polvos) tienen una densidad global así como una densidad propia del sólido que debe considerarse. Los gases y vapores, al contrario de los líquidos y sólidos se considera que son compresibles. El estudio de la densidad en el procesamiento de alimentos es de gran importancia (Lewis, 1993).

La densidad del agua en estado sólido (hielo) es menor que la densidad del agua líquida. La densidad de un alimento congelado será, por tanto, menor que la del producto no congelado, existiendo una dependencia con la temperatura como se muestra en la figura 2.1, el cambio gradual en la densidad se debe al cambio gradual en la proporción de agua congelada en función de la temperatura (Singh y Heldman, 1997).

FIGURA 2.1. INFLUENCIA DE LA CONGELACIÓN EN LA DENSIDAD TEÓRICA.



Fuente: Singh y Heldman, 1997

2.3.2 DIFUSIDAD TÉRMICA

El calentamiento y enfriamiento de materiales involucra estados variables o conducción de calor transiente. La distribución de temperatura en un cuerpo para la condición en estado variable es dada por la Ley general de Fourier de conducción de calor en la forma de una ecuación diferencial parcial como sigue, (Mohsenin, 1980).

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) = \alpha \nabla^2 T \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

T = es la temperatura en cualquier punto dado por las coordenadas x, y, z.

t = es el tiempo en horas

α = es la difusividad termal unidades de $m^2 s^{-1}$

La difusividad termal como una propiedad importante para la simulación de procesos en que la transmisión de calor se efectúa en estado transitorio. El significado físico de la difusividad térmica consiste en determinar lo rápido que el calor se propaga o difunde a través de un material, es decir la rapidez con la que se propaga la temperatura cuando hay calentamiento o enfriamiento. Esta propiedad también es definida como la relación entre tres propiedades diferentes de $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ ecuación (Alvarado, 2001).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

α = Difusividad térmica

k = Conductividad térmica

ρ = Densidad

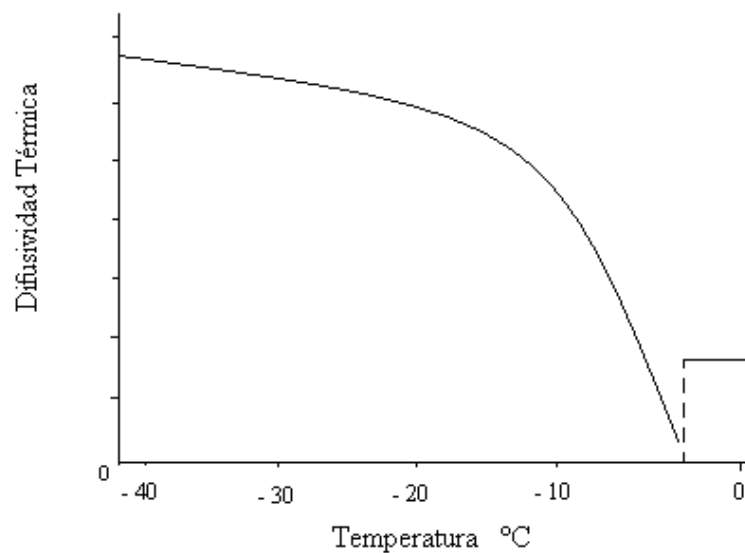
C_p = Calor específico del alimento.

En el sistema internacional (SI), las unidades de difusividad térmica son metro cuadrado por segundo, es decir $m^2 s^{-1}$.

Los alimentos que tienen alta difusividad térmica, pueden ser calentados o enfriados rápidamente, a la inversa los que tienen baja difusividad térmica se calientan o enfrían lentamente.

Cuando se combinan la densidad, la conductividad térmica y el calor específico aparente de un producto congelado para calcular su difusividad térmica aparente se obtiene un perfil como se muestra en la Figura 2.2, la relación teórica entre la Difusividad térmica y la temperatura durante la congelación de un alimento.

FIGURA 2.2. RELACIÓN TEÓRICA ENTRE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA Y LA TEMPERATURA DURANTE LA CONGELACIÓN DE UN ALIMENTO.



Fuente: Heldman y Lund, (1992)

Se observa como la difusividad térmica aparente aumenta progresivamente al disminuir la temperatura por debajo del punto inicial de congelación del producto. Los valores obtenidos para el producto congelado son muy superiores a los del producto sin congelar (Singh y Heldman, 1997).

Se muestra en apéndices 1, algunos valores de difusividad térmica de algunos alimentos. Otros tipos de modelos, para la medición de la difusividad térmica los métodos usados son similares a los utilizados para determinar la conductividad térmica en estado transitorio, los cuales parten de resolver la ecuación de

transferencia de calor por conducción. Los modelos disponibles en la literatura para predecir la difusividad térmica se presenta en apéndices 2 y 3 es de anotar que los modelos para el estudio de esta propiedad son escasos, normalmente se estudia la conductividad térmica y luego se obtiene la difusividad a partir ella (Medellin ene, 2006).

➤ **CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL**

En las ecuaciones de transferencia de calor en estado trasiente y con propiedades termal (conductividad termal) constantes, para una placa plana infinita y cilindro infinito, se encuentra la difusividad termal, parámetro importante en la determinación del tiempo de proceso, dependiente de la temperatura y de la posición dentro del objeto. (Singh, 1982). La ecuación para la placa finita es la siguiente:

$$\frac{d^2T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 13}$$

Utilizando las respectivas ecuaciones es posible obtener una ecuación que permita obtener los perfiles de temperatura para una lámina y cilindro finitos (Carslaw y Jaeger, 1959; Ball y Olson, 1957; citados por Singh, 1982). Las soluciones analíticas son soluciones de series que contienen exponenciales, seno y funciones trascendentales. Para un cilindro finito a una temperatura inicial uniforme, expuesto a una temperatura ambiental constante y con superficie con resistencia a la convección despreciable, la solución propuesta por Carslaw y Jaeger (1959) es la siguiente:

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos(\beta_m 2x / \ell) \frac{2J_o(\beta_n r / R)}{\beta^n J_1(\beta_n)} \exp \left[- \left(\frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{\ell^2} \right) \alpha t \right] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

T_s = Temperatura del medio circundante ($^{\circ}\text{C}$)

T = Temperatura

T_i = Temperatura inicial

x = Coordenada rectangular

ℓ = Longitud del cilindro finito (m)

J_0 = Función Bessel de primera clase de orden cero

J_1 = Función Bessel de primera clase de orden uno

R = Radio (m)

βm = Raíz de la función Coseno

βn = Raíz de la función Bessel

α = Difusividad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

t = Tiempo (s)

r = Coordenada radial

➤ MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL

La difusividad termal puede ser determinada directamente (métodos directos) o estimada a partir de los datos de conductividad termal, densidad y calor específico (predicción indirecta) (Rahman, 1995).

Es posible conducir experimentos que permiten medir directamente la difusividad termal, y dentro de estos se cita cuatro métodos (Singh, 1982):

- Estimación por mínimos cuadrados.
- Uso de curvas de penetración de calor.
- Uso de cartas de tiempo temperatura.

- Uso de soluciones analíticas.

➤ **ESTIMACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS**

Se registra la temperatura en el centro de un objeto de forma definida, tal como un cilindro, una placa o una esfera, y se encuentra una solución analítica apropiada a las ecuaciones diferenciales adecuadas, la cual es programada en una computadora para predecir la temperatura a varios tiempos para valores de difusividad termal seleccionados arbitrariamente (Mohsenin, 1980).

➤ **USO DE CURVAS DE PENETRACIÓN DE CALOR**

Para situaciones donde la muestra es expuesta por un período prolongado de tiempo, solo el primer término de la solución por series es necesario. Para un objeto finito de forma cilíndrica, la solución expresada por la ecuación puede ser simplificada considerando que $m = n = 1$; es decir, $\beta m = \beta/2$, $\beta n = 2,4048$, y $J_1(2,4048) = 0,5191$. En el centro del objeto cilíndrico, $x = 0$, $r = 0$, y $Jo(0) = 1,0$. De esta manera la solución aproximada para largos períodos de tiempo es expresada como (Carslaw & Jaeger, 1959).

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = 2,0396 \exp \left[- \left(\frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{\ell^2} \right) \alpha t \right] \quad \text{Ec. 15}$$

Cuando se grafican las curvas de penetración de calor experimentales sobre papel semilogarítmico y se obtiene la siguiente expresión (Ball & Olson, 1957):

$$t = f_h \log \left(j \frac{T_s - T_i}{T_s - T} \right) \quad ; \quad \text{ec 16} \quad f_h = 0,398 \frac{r^2}{\alpha} \quad \text{Ec. 17}$$

f_h = Parámetro de la curva de calentamiento (s)

$j = 1.6$; para el caso de un cilindro infinito.

2.3.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La gradiente de temperatura, $\frac{dt}{dx}$ entre dos superficies hacia el cual fluye el calor es la unidad, la cantidad de calor (q) que fluye en una unidad de tiempo, a través del área (A), se llama conductividad termal denotada por k . En términos matemáticos, la conductividad termal es el factor de proporcionalidad en el estado constante de flujo de calor o la ley de Fourier para conducción de calor dado por (Mohsenin, 1980).

$$q = kA \frac{dT}{dr} \quad \text{Ec. 18}$$

Esta es una forma simplificada de la ecuación:

$$\frac{dQ}{d\theta} = -kA \frac{dT}{dr} \quad \text{Ec. 19}$$

Si el gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dr}$, a lo largo del radio del material en el cual fluye calor es igual a la unidad la conductividad termal, k puede ser interpretada como la cantidad de flujo de calor (q) por unidad de tiempo y el área (A) perpendicular a la dirección del flujo térmico (Mohsenin, 1980).

En el sistema internacional (SI), las unidades de conductividad térmica son watts por metro cuadrado por unidad de temperatura en grados Celsius (o Kelvin) por metro (Lewis, 1980):

$$\frac{\frac{W}{m^2}}{m^{\circ}C} = \frac{W}{m^{\circ}C}$$

➤ **Teoría lineal de la fuente de calor**

Esta teoría relaciona el aumento de la temperatura de un medio homogéneo infinito causado por una fuente lineal de calor de potencia constante interior, esto por la conductividad termal del medio. La expresión que gobierna este proceso es indicada en la ecuación (9) (Dutta, 1988).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad \text{Ec. 20}$$

Donde, la solución para la temperatura está dada por:

$$T = \frac{Q}{2\pi k} I(rn) \quad ; \quad n = \frac{1}{2} (\alpha t)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 21}$$

Y la función de Bessel $I(rn)$ está dada por:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad \text{Ec. 22}$$

$$T = \frac{Q}{2\pi k} [A - \ln(rn)]$$

Donde:

T_1 = Temperatura al tiempo t_1 (°C)

T_2 = Temperatura al tiempo t_2 (°C)

Por lo tanto:

$$k = \frac{Q}{4\pi \Delta T} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad \text{Ec. 23}$$

k = conductividad termal ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

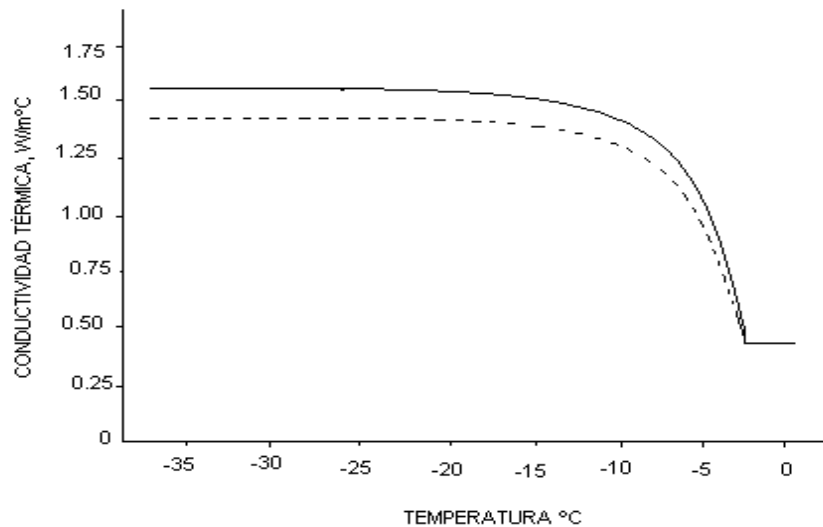
Q = potencia consumida por la fuente lineal de calor (W m^{-1})

ΔT = variación de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)

t = Tiempo de medición

La conductividad térmica del hielo es aproximadamente cuatro veces superior a la del agua líquida. Esta relación tiene un efecto similar sobre la conductividad térmica de un alimento congelado, teniendo en cuenta que el cambio de fase del agua en el producto es gradual y que a medida que disminuye la temperatura la conductividad térmica del producto cambia de forma similar, tal como se muestra en la figura 2.3, conductividad térmica en función de la temperatura.

FIGURA 2.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.



Fuente: Singh y Heldman, 1997

La mayor parte del aumento producido en la conductividad térmica tiene lugar dentro del intervalo de 10°C por debajo de la temperatura inicial de congelación del producto. Si el producto contiene una estructura fibrosa, la conductividad térmica será menor cuando se mida en la dirección perpendicular a las fibras (Singh y Heldman, 1997).

En muchos alimentos el agua se comporta como un sólido y está inmovilizada dentro de la matriz sólida. La conductividad térmica de la mayoría de los alimentos está fuertemente influenciada por el contenido en humedad. Como se muestra en apéndices 4 y 5, datos de la conductividad térmica de algunos alimentos en relación de la humedad y temperatura (M. J. Lewis, 1993)

Existen modelos matemáticos propuestos para predecir la conductividad térmica de la carne se presenta en apéndices 6 y 7 estos modelos, además de considerar la composición de la carne tienen en cuenta su variación con la temperatura y la temperatura inicial de congelación. Sin embargo, es necesario incluir la temperatura donde finaliza el cambio de fase de los líquidos que hacen parte del material debido a que en este rango de temperaturas las propiedades termofísicas son afectadas por el cambio de fase del agua.

➤ **Conductividad termal de alimentos**

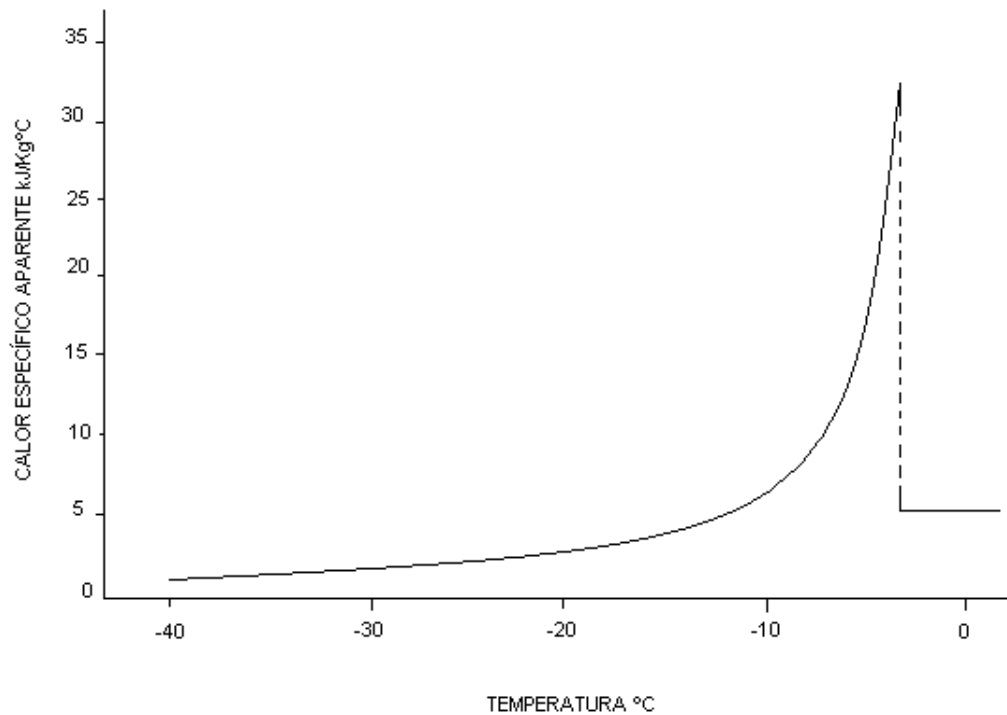
La mayoría de los alimentos son malos conductores de calor, y por ende los procesos de transferencia de calor en que la conducción es el mecanismo predominante son lentos; sin embargo, los procesos de calentamiento o enfriamiento pueden acortarse mediante operaciones de reducción de tamaño. La conductividad termal de un alimento está influenciada por su composición, al igual que el calor específico; el agua ejerce la mayor influencia. Otros factores que también afectan la conductividad termal son la presión (importante en los procesos de liofilización) y la temperatura, (Lewis, 1993).

2.3.4 CALOR ESPECÍFICO

El calor específico de un producto alimentario depende de la temperatura como se muestra en la figura 2.4. Esta representación muestra cómo el calor específico de un alimento congelado a temperatura 20 °C por debajo del punto inicial de congelación o inferiores no difiere significativamente del calor específico del producto sin congelar.

Nos muestra claramente el intervalo de temperatura donde se produce el cambio de fase del agua (Singh y Heldman, 1997).

FIGURA 2.4. CALOR ESPECÍFICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.



Fuente: Singh y Heldman, 1997

El calor específico es la cantidad de calor ganado o perdido por una unidad de peso de producto para provocar un determinado incremento de temperatura, sin que tenga un cambio de estado (Singh y Heldman, 1997).

$$C_p = \frac{Q}{M[\Delta T]} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

Q = es el calor ganado o perdido (KJ).

M = es la masa (Kg)

ΔT = es el incremento de temperatura del material ($^{\circ}\text{C}$)

C_p = es el calor específico (KJ/Kg. $^{\circ}\text{C}$)

El calor específico de un producto depende de su composición, humedad, temperatura y presión y el calor específico aumenta con la humedad como se puede observar en apéndices 8 y 9 el calor específico de carnes y productos cárnicos y de otros tipos de alimentos. En procesos ellos tiene lugar un cambio de fase, como por ejemplo la congelación, se utiliza un calor específico aparente. El calor específico también se puede calcular por medio de las ecuaciones empíricas que se muestran a continuación (Singh y Heldman, 1997).

Dickerson, propuso la siguiente expresión para productos cárnicos con un contenido en humedad entre el 26 y el 100%.

$$C_p = 1.675 + 0.025 W \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

w = es el contenido en agua (%).

Para productos de composición conocida puede ser la siguiente expresión.

$$C_p = 1.424m_c + 1.549m_p + 1.975m_f + 0.837m_a + 4.187m_m \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

m = es la fracción en peso

c = hidratos de carbono

p = proteínas

f = grasa

a = cenizas

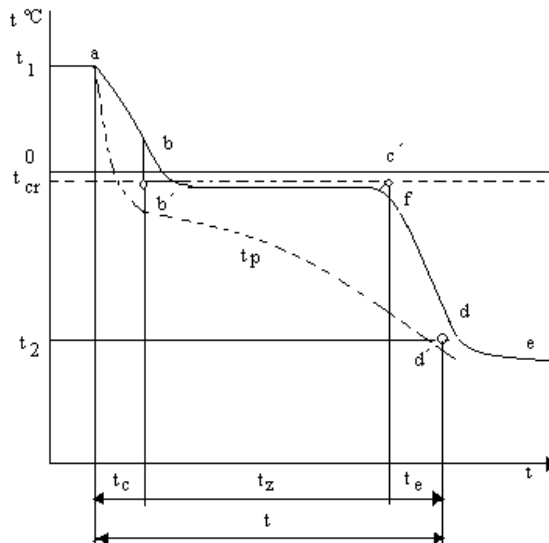
m = humedad.

El calor específico de la carne, igual que las demás propiedades, debe ser medido tanto a temperaturas inferiores a la temperatura de congelación como a temperaturas superiores a ella, debido a los cambios que provoca el paso del agua de su fase líquida a la fase sólida. En apéndices 10, se presentan modelos propuestos para calcular el valor del calor específico y el calor específico aparente para carnes (Medellin ene, 2006).

2.4 CURSO DEL PROCESO DE CONGEALCIÓN

Se expresa gráficamente en la figura 2.5, el proceso de congelación de alimentos. Este diagrama varía por los siguientes factores: método de congelación, tamaño, forma, composición química y propiedades físicas del producto, y tipo de envasado (o ausencia de este). De acuerdo a estés factores, la curva de congelación discurre más o menos empinada o bien se desvía hacia arriba o abajo. La congelación se determina por tres etapas, que corresponden a las fases del proceso congelador (Gruda y Postolski, 1986).

FIGURA 2.5. CURVAS DE CONGELACIÓN DE UN PRODUCTO ALIMENTICIO.



Fuente: Gruda y Postolski, 1986

En la primera fase, que corresponde al tramo a hasta b, se produce la refrigeración del artículo a congelar desde la temperatura inicial t_0 hasta la temperatura crioscópica t_{kr} . La disminución de la temperatura de congelación del jugo tisular en comparación con la congelación del agua químicamente pura. El tramo b a c corresponde a la congelación propiamente dicha. En teoría, este tramo tendría que discurrir horizontalmente. En la realidad, la concentración del jugo celular aumenta al incrementar la cantidad de agua congelada, disminuyendo a la vez constantemente el punto crioscópico. Así se genera una curva diferente de la horizontal. En el punto en que la curva comienza bruscamente a caer (punto c) se inicia una nueva fase, que es el pos enfriamiento del producto congelado. En esta fase (tramo desde c a d) disminuye la temperatura del artículo congelado y alcanza una magnitud de la que puede partirse en el proceso tecnológico (Gruda y Postolski, 1986).

La segunda fase (tramo b hasta c) y tercera fase (tramo c a d) es únicamente un convenio arbitrario. La sola determinación del punto c, que representa el final del propio proceso congelador, es muy difícil. De aquí se deduce que sea determinado a una temperatura de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que corresponde a la mayoría de los alimentos a una congelación aproximadamente del 73% de la cantidad total de agua. Como la congelación del agua prosigue hasta temperaturas muy bajas, ambas fases del proceso, la congelación propiamente dicha y el postenfriamiento, discurren por consiguiente de manera simultánea dentro del tramo de c hasta d. Para poder determinar en la práctica el momento en que concluye la congelación genuina, se toma el punto f, que se halla en la intersección de las prolongaciones del tramo b a c de d hasta c (Gruda y Postolski, 1986).

2.4.1 TEMPERATURA DE INICIO DE CONGELACIÓN, TC

A medida que se forma el hielo, el soluto se concentra en la fase líquida. (Este fenómeno es aprovechando en el proceso llamado “crioconcentración”). Así el punto de fusión de la solución desciende al mismo tiempo que aumenta la concentración, razón por la cual se habla de temperatura de inicio de congelación con el fin de

precisar que se trata del punto de fusión de la solución antes de que esta sea modificada por la crioconcentración.

Para calcular la temperatura inicial de congelación es expresada por la ley de Raoul de la siguiente forma:

$$T_C = -K_W * \frac{C}{M} \quad C' = \frac{1 - W}{W} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

K_W = Constante criogénica del agua: 18.6 C.G.S.

C = masa de soluto (en g) disuelta en 100 g de agua.

M = peso molecular del soluto.

W = cantidad de agua presente en los tejidos.

Según Chen (1985), se determina el peso molecular del soluto con la siguiente ecuación.

$$M = \frac{535,4}{W} \quad \text{Ec. 28}$$

2.5 CONGELACIÓN DE ALIMENTOS

La conservación de alimentos congelados se produce debido a diferentes mecanismos. La reducción de la temperatura del producto a niveles por debajo de 0 °C produce un descenso significativo en la velocidad de crecimiento de microorganismos y, por lo tanto, en el deterioro del producto debido a la actividad microbiana. La misma influencia de la temperatura puede aplicarse a la mayoría de

las reacciones que pudieran ocurrir en el producto, tales como las reacciones enzimáticas y de oxidación. Además, la formación de cristales de hielo dentro del producto disminuye la disponibilidad de agua para participar en dichas reacciones. Cuanto menor sea la temperatura y más agua pase al estado sólido, menos agua se encontrará disponible para intervenir en las reacciones que pueda causar el deterioro del producto (Singh y Heldman, 1997).

La congelación como medio de conservación produce generalmente un producto de alta calidad para el consumo, aunque dicha calidad depende finalmente tanto del proceso de congelación realizado como las condiciones de almacenamiento del producto congelado. La velocidad de congelación o tiempo necesario para que la temperatura del producto disminuya hasta alcanzar valores inferiores a la temperatura inicial de congelación influirá en la calidad del producto, aunque de diferente manera dependiendo del tipo de alimento. Algunos productos necesitan una congelación rápida (cortos tiempos de congelación) con el fin de asegurar la formación de cristales de hielo de pequeño tamaño dentro de la estructura del producto, ocasionando el mínimo daño en la textura del producto (Singh y Heldman, 1997).

La congelación supone un mayor descenso de la temperatura del alimento, hasta por debajo de su punto de congelación, teniendo en cuenta que en la mayoría de los alimentos la congelación se inicia a temperatura inferiores a los 0 °C. Para la conservación a largo plazo, los alimentos se congelan y mantienen habitualmente a -18 °C. La congelación implica no sólo un cambio en el calor sensible del alimento, sino que también es necesario eliminar el calor latente asociado al cambio de fase correspondiente a la formación de una parte del agua líquida en hielo. Como consecuencia de la formación de cristales de hielo, gran parte del agua se inmoviliza y no está disponible ni como disolvente ni reactivo y la difusión de las especies químicas está muy limitada. De esta forma, se detiene el crecimiento y la actividad de los microorganismos y se reduce notablemente la velocidad de las reacciones químicas y enzimáticas. Es decir, el efecto global de la congelación de una parte del agua del alimento es una disminución de la a_w , junto con las bajas temperaturas

empleadas, permite la conservación durante períodos de tiempo bastante largos (meses e incluso años) (Ordoñez, 1998).

2.5.1 TEORÍA DE LA CRISTALIZACIÓN

Una vez que el agua ha comenzado a congelarse, la cristalización es función de la velocidad de enfriamiento, al mismo tiempo que a la difusión del agua a partir de las disoluciones o geles que bañan la superficie de los cristales de hielo. Si la velocidad de congelación es lenta, los núcleos de cristalización serán muy pocos por lo que los cristales de hielo crecen ampliamente, los que pueden provocar un rompimiento de las células, ya que éstas están sometidas a una presión osmótica y pierden agua por difusión a través de las membranas plasmáticas ; en consecuencia, colapsan ya sea parcial o totalmente. Mientras que si la velocidad de congelación es mayor, el número de cristales aumenta y su tamaño disminuye, evitando de esta manera el gran daño en el producto. Una congelación muy lenta puede llevar a un excesivo exudado en la descongelación, mientras que una congelación rápida permite preservar la textura de ciertos productos (Ordoñez, 1998).

El rasgo más sobresaliente de la congelación es el cambio de estado, de líquido a sólido, que experimenta una parte del agua presente en los alimentos. Esto permite la conservación de los alimentos durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, la formación de cristales de hielo es una de las principales causas de algunas modificaciones indeseables de los alimentos durante su congelación (Ordoñez, 1998).

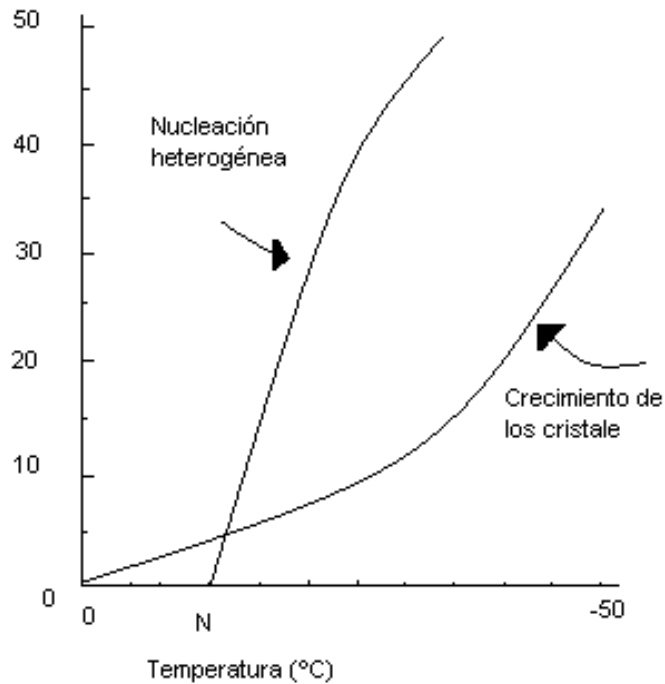
En la cristalización, o formación de una fase sólida organización sistemáticamente a partir de una solución, se pueden distinguir dos etapas: la nucleación y el crecimiento de los cristales. Durante la congelación estas dos etapas se solapan en el tiempo, pero es posible controlar la velocidad relativa de cada una de ellas y, de esa forma, modificar las características del sistema final (Ordoñez, 1998).

A) Nucleación

Consiste en la asociación de moléculas de agua para formar una pequeña partícula ordenada y estable. El punto de inicio de la congelación de un alimento (N) se puede definir como la temperatura a la que un diminuto cristal de hielo coexiste en equilibrio con la fase líquida. La temperatura de fusión del hielo puro es 0°C. En cambio, no comienza a formarse cristales de hielo cuando la temperatura del agua alcanza esta temperatura. La nucleación es un fenómeno difícil, porque las moléculas de agua en estado líquido no se asocian fácilmente entre ellas para formar un sólido. Para que ocurra esto es necesario que la temperatura sea inferior al punto al que se inicia la congelación (Ordoñez, 1998).

Es probable que durante este sobre enfriamiento se formen agregados cristalinos de tamaño diminuto y de carácter inestable que no llegan a alcanzar un tamaño crítico. Existen dos tipos de nucleación. La *nucleación homogénea* es la que tiene lugar en soluciones puras y, por lo tanto, es de poco interés en los alimentos. En la *nucleación heterogénea* los núcleos se forman sobre partículas extrañas suspendidas, sólidos insolubles, superficies de películas o paredes de envases, y es de mayor importancia en los alimentos y estructuras vivas. Estos agentes facilitan la organización de las moléculas de agua para formar núcleos estables. El impacto mecánico y las variaciones locales de solutos también contribuyen a la nucleación heterogénea. La nucleación comenzará cuando la temperatura alcance un valor crítico (N), como se aprecia en la figura 2.6, al disminuir la temperatura aumenta rápidamente la velocidad de formación de núcleos. Es decir, cuando más rápida sea la velocidad a la que se elimina el calor del alimento, mayor será el número de núcleos formados (Ordoñez, 1998).

FIGURA 2.6. INFLUENCIA DEL SOBREENFRIAMIENTO INICIAL Y DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA NUCLEACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE CRISTALES DE HIELO.



Fuente: Fennema, 1975

B) Crecimiento De Los Cristales

En esta etapa tiene lugar la adición organizada de moléculas de agua a los núcleos formados, que así aumentan de tamaño. El crecimiento de los cristales de hielo depende de la difusión y orientación de moléculas de agua en la superficie del núcleo. El número de moléculas de agua que se unen al núcleo ha de ser mayor que el que se alejan de él. A diferencia de la nucleación, el crecimiento de los cristales puede tener lugar a temperaturas muy cercanas al punto de fusión. De hecho, las moléculas de

agua tienen mayor tendencia a migrar y asociar con núcleos ya existentes que a formar nuevos núcleos. La velocidad de crecimiento de los cristales también depende de la velocidad de enfriamiento, aunque el efecto es más moderado que la nucleación (Ordoñez, 1998).

A temperaturas muy bajas (alrededor de los $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo llega a reducirse por la elevada viscosidad del medio a esas bajas temperaturas, limitando el movimiento de las moléculas de agua a los cristales. La presencia en los alimentos de diversos solutos y estructuras puede dificultar el crecimiento de los cristales de hielo en el mismo sentido (Ordoñez, 1998).

Si se compara las velocidades de nucleación y de crecimiento de los cristales en función de la velocidad de enfriamiento se deduce que es posible regular el tamaño de los cristales de hielo controlando la velocidad de transferencia de calor. Cuando esta es muy rápida, la velocidad de nucleación aumenta notablemente dando lugar a formación de muchos núcleos; pero no ocurre así con la velocidad de crecimiento de los cristales, por lo que estos serán de pequeño tamaño (Ordoñez, 1998).

El número, el tamaño y la forma de, los cristales pueden variar incluso de una zona a otra del alimento, especialmente en los productos sólidos o de gran viscosidad. En las partes periféricas que están en contacto con el medio de enfriamiento, donde la temperatura disminuye rápidamente, se formará un mayor número de cristales y de menor tamaño que en las zonas más profundas, en las que las transferencias de calor ocurren más lentamente. Esto es importante porque el número, tamaño y forma de los cristales influye notablemente en la calidad de los productos congelados (Ordoñez, 1998).

2.5.2 SISTEMAS DE CONGELACIÓN

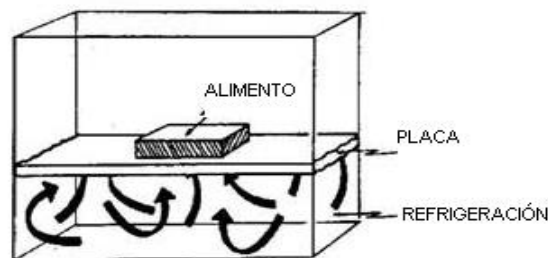
Para congelar un alimento, el producto debe exponerse a un medio de baja temperatura durante el tiempo suficiente para eliminar los calores sensible y latente

de fusión del producto. El proceso de congelación puede lograrse mediante sistemas de contacto directo e indirecto. En la mayoría de los casos, el tipo de sistema utilizado dependerá de las características del producto, tanto antes de la congelación como después de ella (Singh y Heldman, 1997).

2.5.2.1 SISTEMAS DE CONTACTO INDIRECTO

En numerosos sistemas de congelación de alimentos, el producto y el refrigerante están separados por una barrera durante todo el proceso de congelación. En la figura 2.7, se muestra de forma esquemática en qué consiste el funcionamiento del sistema del contacto indirecto (Singh y Heldman, 1997).

FIGURA 2.7. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE CONGELACIÓN DE CONTACTO INDIRECTO.

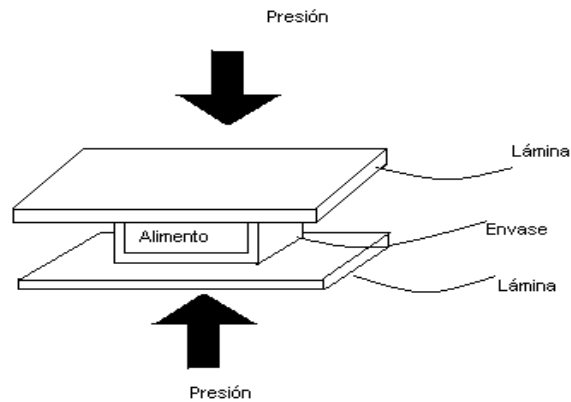


Aunque muchos sistemas utilizan una barrera impermeable entre el producto y el refrigerante, se considera incluido dentro de los sistemas de congelación indirecta cualquier sistema de contacto que no sea directo, como por ejemplo aquellos donde el material del envase hace de barrera (Singh y Heldman, 1997).

a) Congeladores de placas

Es el sistema de congelación indirecta más común es el congelación de placas como se muestra en la figura 2.8, tal como indica, el producto se congela mientras se mantiene entre dos placas refrigeradas.

FIGURA 2.8. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE CONGELACIÓN DE PLACAS



En la mayoría de los casos la barrera entre el producto y el refrigerante incluirá tanto la placa como el material del envase. La transmisión de calor a través de la barrera (placa y envase) puede aumentarse mediante la utilización de presión, como se muestra en la figura 2.8, con el fin de reducir la resistencia a la transmisión de calor a través de la barrera (Singh y Heldman, 1997).

Los sistemas de congelación de placas pueden operar de forma discontinua, con el producto colocado en las placas durante un determinado tiempo antes de ser retirado. En dicha situación, el tiempo de congelación es el tiempo de resistencia y representa el tiempo total necesario para reducir la temperatura del producto desde de la inicial hasta la temperatura de congelación deseada (Singh y Heldman, 1997).

El sistema de congelación de placas puede operar de modo continuo moviéndolas placas que sostienen el producto a través de un comportamiento cerrado. En un sistema de congelación de placas en continuo, el tiempo de congelación es el tiempo total que tarda el producto en ser transportado desde la entrada hasta la salida. La eliminación del calor latente y sensible necesario para alcanzar la temperatura de congelación deseada se realiza durante su estancia en el sistema (Singh y Heldman, 1997).

b) Congeladores por corriente de aire

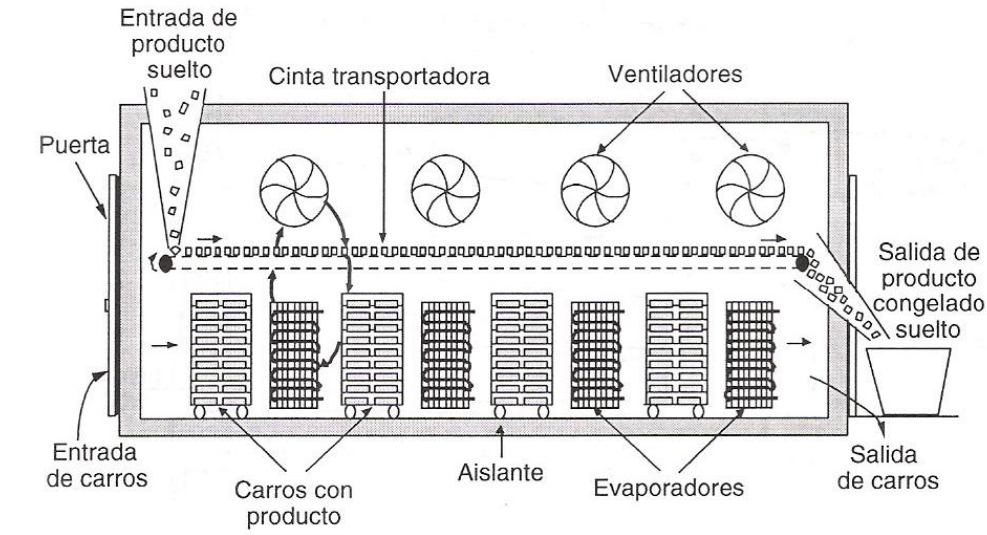
En muchas situaciones, el tamaño y/o la forma del producto hacen que el congelador de placas no sea práctico, pudiendo utilizarse alternativamente los sistemas de congelación por corriente de aire. En estos casos, el envase supone la barrera para la congelación indirecta siendo la fuente de la refrigeración una corriente de aire frío (Singh y Heldman, 1997).

Los congeladores por corriente de aire pueden ser de un diseño simple, como es el caso de una habitación refrigerada, donde se contactan el producto y el aire a baja temperatura, circula alrededor del producto durante el tiempo de residencia necesario para la congelación, suponiendo una operación discontinua y la habitación refrigerada puede actuar como almacén. Los tiempos de congelación serán altos debido a las bajas velocidades del aire alrededor del producto, la imposibilidad de alcanzar un buen contacto entre el producto y el aire frío y los menores gradientes de temperatura existentes entre el producto y el aire (Singh y Heldman, 1997).

Sin embargo, la mayoría de los congeladores por corriente de aire son continuos, como se muestra en la figura 2.9. En estos sistemas, el producto se coloca sobre una cinta transportadora que se mueve a través de una corriente de aire que circula a elevada velocidad. El tiempo de congelación o de residencia viene determinado por la longitud y velocidad de la cinta transportadora. Estos tiempos pueden ser

relativamente pequeños si se utiliza aire a muy baja temperatura, altas velocidades de aire y un buen contacto entre el producto y el aire frío (Singh y Heldman, 1997).

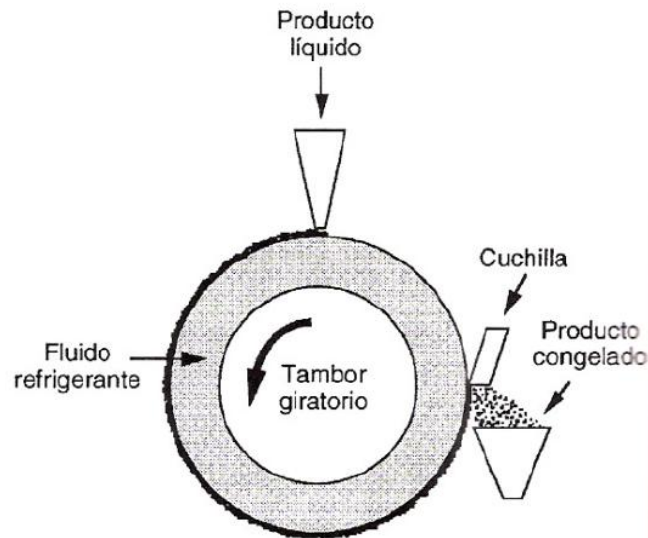
FIGURA 2.9. MÉTODO DE CONGELACIÓN POR AIRE



c) Congeladores para alimentos líquidos

En la congelación de alimentos líquidos, el tiempo de residencia del producto en el compartimento de congelación es el suficiente para reducir su temperatura varios grados por debajo de la temperatura inicial de formación de cristales. A estas temperaturas se ha eliminado entre el 60 y el 80% del calor latente del producto, de tal manera que éste forma una especie de suspensión helada. En estas condiciones, el producto fluye sin dificultad y puede envasarse para finalizar la congelación en un espacio refrigerado a baja temperatura. El cambiador de calor de superficie rascada asegura un adecuado intercambio de calor entre la suspensión y la superficie fría, como se muestra en la figura 2.10, el sistema básico consiste en un cambiador de calor de superficie rascada que utiliza un refrigerante como un medio de enfriamiento (Singh y Heldman, 1997).

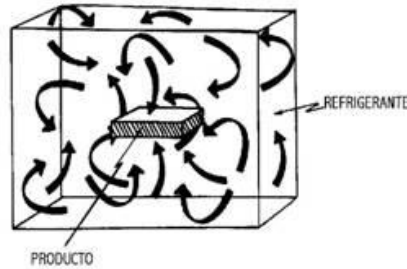
FIGURA 2.10. CONGELADOR PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS.



2.5.2.2 SISTEMAS DE CONTACTO DIRECTO

Existen varios sistemas de congelación que operan por medio del contacto directo entre el refrigerante y el producto, como se muestra en la figura 2.11. En la mayoría de las ocasiones, estos sistemas operarán más eficazmente si no existen barreras a la transmisión de calor entre el refrigerante y el producto. Los refrigerantes que se utilizan en estos sistemas pueden ser aire a baja temperatura y altas velocidades o líquidos refrigerantes que cambian de fase en contacto con la superficie del producto. En cualquier caso, los sistemas se diseñan para alcanzar una rápida congelación, aplicándose el término de congelación rápida individual (en inglés, individual quick freezing), IQF. (Singh y Heldman, 1997).

FIGURA 2.11. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE CONGELACIÓN DE CONTACTO DIRECTO.

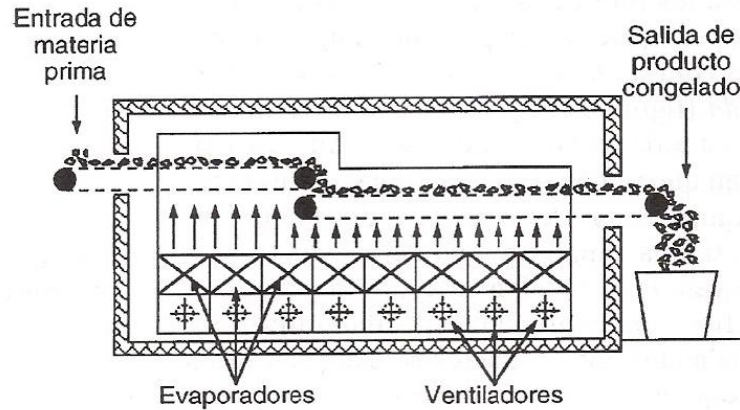


a) Corriente de aire

Una forma de IQF, cuando el producto es de pequeño tamaño, consiste en la utilización de corrientes de aire a bajas temperaturas y altas velocidades que entran en contacto directo con el producto. La combinación de aire a bajas temperaturas, elevados coeficientes de transmisión de calor por convección (alta velocidad del aire) y el pequeño tamaño del producto permiten la rápida congelación del mismo. En estos sistemas, el producto se mueve a través de la región de alta velocidad de aire en una cinta transportadora, de tal manera que ésta controlada el tiempo de resistencia del producto, los tipos de productos que pueden congelarse en estos sistemas se limitan aquellos de geometría apropiada y que necesitan una rápida congelación para alcanzar la máxima calidad (Singh y Heldman, 1997).

El sistema de congelación IQF de lecho fluidizado mostrado en la figura 2.12, es una modificación del sistema IQF de corriente de aire convencional. En estos sistemas, el aire a alta velocidad se inyecta verticalmente hacia arriba a través de una cinta transportadora con agujeros que mueve el producto a través del sistema. Mediante un cuidadoso ajuste de la velocidad del aire dependiendo del tamaño del producto, éste se mantiene suspendido en la superficie de la cinta transportadora mediante el aire a baja temperatura (Singh y Heldman, 1997).

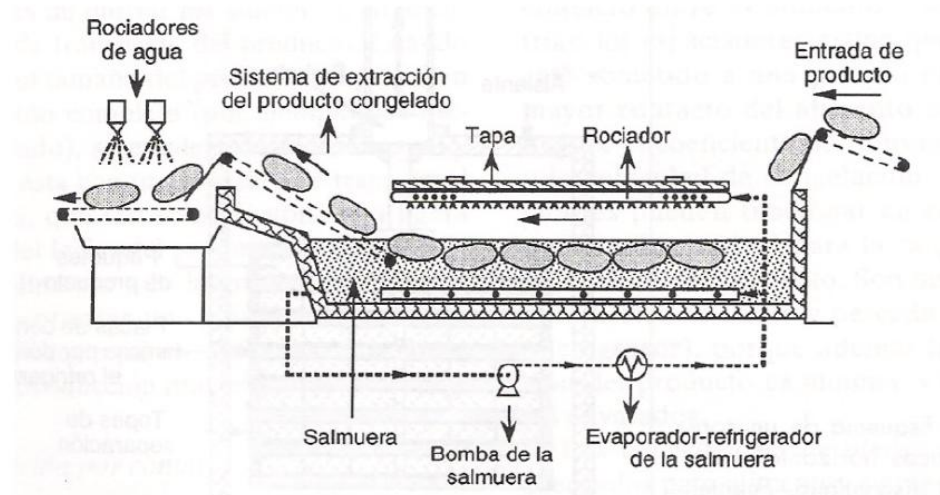
FIGURA 2.12. SISTEMA DE CONGELACIÓN DE LECHO FLUIDIZADO.



b) Inmersión

La superficie exterior del producto puede alcanzar temperaturas muy bajas sumergiendo el alimento dentro de un refrigerante líquido. Si el tamaño del producto es relativamente pequeño, el proceso de congelación se alcanza rápidamente en condiciones IQF. Para algunos productos concretos, con este sistema se consiguen menores tiempos de congelación que cuando se utilizan corrientes de aire o sistemas de lecho fluidizado, como se muestra en la figura 2.13, el producto se introduce en un baño líquido refrigerante y se transporta, mientras que el líquido refrigerante se evapora absorbiendo calor del producto. Los refrigerantes más comunes son el nitrógeno, el dióxido de carbono y el Freón. Una de las mayores desventajas de los sistemas de congelación por inmersión es el costo del refrigerante, ya que éste pasa del estado líquido a vapor mientras se produce la congelación del producto, resultando muy difícil recuperar los vapores que se escapan del compartimento (Singh y Heldman, 1997).

FIGURA 2.13. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE CONTACTO DIRECTO POR INVERSIÓN.



2.6 TIEMPO DE CONGELACIÓN

El tiempo de congelación requiere para un producto establece la capacidad del sistema, adecuado de influir de forma directa en la calidad del mismo. El método utilizado para calcular los tiempos de congelación es decisivo a la hora de seleccionar el sistema de congelación más adecuado para cada producto (Singh y Heldman, 1997).

2.6.1 ECUACIÓN DE PLAK

La primera ecuación, y la más utilizada, para calcular tiempos de congelación fueron propuestas por Plak y posteriormente adaptada al caso de alimentos. La ecuación es.

$$t_F = \frac{\rho H_L}{T_F - T_\infty} \left(\frac{P a}{h_c} + \frac{R a^2}{k} \right)$$

Ec. 29

Donde el tiempo de congelación t_F aumentará cuando aumente la densidad ρ , el calor latente de fusión H_L y la dimensión característica a . Por otro lado, el tiempo de congelación disminuirá al aumentar el gradiente de temperatura, el coeficiente de transmisión de calor por convección h_c y la conductividad térmica k del producto congelado. Las constantes P' y R' se utiliza para considerar el efecto de la forma del producto, siendo $P' = 1/2$, $R' = 1/8$ para láminas infinitas; $P' = 1/4$, $R' = 1/6$ para cilindros infinitos; y $P = 1/6$, $R = 1/24$ para esferas. La dimensión a es la anchura del producto para una lámina infinita, el diámetro para un cilindro infinito, y el diámetro para una esfera (Singh y Heldman, 1997).

2.6.1.1 OTROS MÉTODOS PARA CALCULAR TIEMPOS DE CONGELACIÓN

La temperatura inicial de congelación de la carne es inferior a la del agua pura, debido a que en el agua que hace parte de la carne se encuentran diluidos componentes menores como: carbohidratos, sodio, potasio, fósforo, calcio, magnesio, entre otros, que reducen su punto de congelación. Se hace referencia a una temperatura inicial de congelación porque el fenómeno de cambio de estado del agua en los alimentos se presenta en un rango de temperaturas, provocado por el aumento en la concentración de los solutos a medida que el agua cambia de la fase líquida a la sólida (Medellin ene, 2006).

Los valores de la temperatura inicial de congelación se han obtenido en forma experimental y utilizando herramientas estadísticas se derivan expresiones empíricas que relacionan su valor con alguno de sus componentes: la cantidad de agua, en la mayoría de los casos. Los primeros valores sobre este tema fueron presentados por Dickerson y Read, quienes publicaron valores para diferentes alimentos (Medellin ene, 2006).

Chang y Tao analizaron los datos publicados por Dickerson y presentaron una expresión empírica que trataba de explicar el comportamiento de la temperatura inicial de congelación en diferentes alimentos a partir de su contenido de humedad (Chang y Tao, 1981). La precisión de este modelo fue baja, debido a que se

utilizaron en el análisis valores de la temperatura de congelación de los alimentos en forma general, sin tener en cuenta las diferencias en el tipo de material ni en su estructura y composición (Medellin ene, 2006).

Posteriormente, Sanz realizó pruebas con carnes de diferentes animales y presentó una ecuación empírica para calcular su temperatura inicial de congelación a partir del contenido de humedad de la muestra. Este modelo presentó errores cercanos al 46%, debido a que no se consideró que las muestras provenían de diferentes especies de animales. Más tarde la expresión propuesta por Sanz fue revisada utilizando sólo los datos para la carne de bovino y se obtuvo un porcentaje de error del 24% (Medellin ene, 2006).

Rahman and Driscoll utilizaron un método para medir el punto de congelación el cual consistía en ubicar la muestra en un cilindro de acero inoxidable y luego colocar éste en un baño de etilen glicol a una temperatura de -20°C , la temperatura de la muestra era medida en intervalos de 1 minuto utilizando una termocupla. Con este procedimiento se midieron muestras de carnes, pescado y alimentos frescos de origen marino (Medellin ene, 2006)

Las expresiones propuestas hasta el año 1994 utilizaban el contenido de humedad como único parámetro para predecir la temperatura donde se inicia la congelación, luego Pham incluyó en la expresión otros componentes, como el porcentaje de carbohidratos y de cenizas presentes en la muestra y que se encuentran disueltos en el agua que hace parte de la carne, obteniendo una mejor precisión en la representación de los datos. En apéndices 11, se presentan las expresiones propuestas para predecir el valor de la temperatura inicial de congelación y en apéndices 12, los coeficientes utilizados por los diferentes modelos (Medellin ene, 2006) .

2.7 MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las medidas experimentales se utilizan cuando se necesita verificar tiempos de congelación o cuando su cálculo resulta extremadamente difícil. Estos experimentos se diseñan con el fin de simular lo más fehacientemente posible las condiciones reales, de tal manera que sea posible medir la evaluación de la temperatura al menos

en un punto, hasta que el proceso de congelación ha finalizado. Si solamente se mide la temperatura en un punto, el sensor debe estar localizado en el punto de enfriamiento más lento del producto o en una posición bien definida cerca de dicho punto. Las condiciones ambientales durante el experimento deben ser iguales a las existentes en la realidad, en términos de la temperatura del medio y de aquellos factores que afectan al valor del coeficiente de transmisión de calor por convección. Si la evolución de la temperatura durante el experimento es diferente al caso real, dicha variación debe registrarse, ya que las variables que afectan al tiempo de congelación pueden tomar valores diferentes al caso real (Singh y Heldman, 1997).

2.8 FACTORES QUE INFLUYAN EN EL TIEMPO DE CONGELACIÓN

Existen varios factores que afectan al tiempo de congelación, tal como se ha indicado en la ecuación de Plank, y que influyera en el diseño del equipo utilizado para la congelación de los alimentos. Uno de estos factores es la temperatura del medio de congelación, de tal manera que los tiempos de congelación disminuirán de manera significativa cuanto menor sea ésta. De acuerdo a la ecuación de Plank, el tamaño del producto afectará directamente al tiempo de congelación, aunque este factor no puede ser utilizado para modificar dichos tiempos, ya que depende de la forma del producto (Singh y Heldman, 1997).

El parámetro que más influye en el tiempo de congelación es el coeficiente de transmisión de calor de convección, h_c . Este parámetro puede utilizarse para varias los tiempos de congelación mediante modificaciones en el diseño del equipo, debiendo analizarse cuidadosamente su influencia. A valores bajos de dicho coeficiente, el tiempo de congelación se verá muy afectado por pequeños cambios en dicho coeficiente (Singh y Heldman, 1997).

2.9 VELOCIDAD DE CONGEALCIÓN

La velocidad de congelación ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) de un producto o envase se define como la diferencia entre la temperatura inicial y final dividida entre el tiempo de congelación. Teniendo en cuenta que la temperatura puede variar De diferente manera durante la congelación en distintos puntos del producto, se ha definido una velocidad local de congelación para un determinado punto, como la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura deseada dividida entre el tiempo transcurrido hasta que dicha temperatura se alcanza en dicho punto (Singh y Heldman, 1997).

CAPITULO III



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA CARNE DE LLAMA DURANTE EL PROCESO DE CONGELACIÓN

PROCEDIMIENTO EXPERIEMNTAL

El presente trabajo en su parte experimental se realizó en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Nacional Del Altiplano Escuela Profesional De Ingeniería Agroindustrial, en el departamento de PUNO – PERU; y el material experimental carne de llama se adquirió del matadero para ganado camélido “TURCO MARKA”, ubicada en el departamento de Oruro – Bolivia.

3.1 MATERIALES Y MÉTODO

A continuación se menciona los siguientes puntos.

3.1.1 MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada fue 5.500 – 6.900 kilogramos de carne por carcasa, clasificada como carne tierna entre 3 – 3.5 años de edad (machos), con una humedad de 70%. Se empleo cortes de filete, lomo y solomillo obtenidas del matadero de Turko Marca de la Provincia de Oruro – Bolivia.

3.1.1.1 EQUIPOS

Los equipos empleados en el estudio fueron:

a) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL

- 01 sistema de adquisición de datos Modelos NI USB 6008 de Nacional Instruments con 8 puertos y 12 bits, 10kS/s de salida multifunción I/O
- 01 SOFTWARE de adquisición de datos Lab VIEW versión 2007.
- 01 congelador industrial
- 01 PC Pentium IV

b) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TERMAL

- 01 Sistema de adquisición de datos Modelo NOVUS
- 01 Fuente de poder regulable.
- 01 Multímetro FUJITEC modelo DT-830B
- 01 Multímetro FUJITEC modelo DT-830 B.

- 01 PC Pentium IV.
- 01 congelador industrial

3.1.1.2 MATERIALES

Los materiales que se requieren para desarrollar el presente investigación.

a) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL

- 03 Cilindros de cobre de dimensiones: 200 mm de longitud y 52.25 mm de diámetro, con un espesor de pared igual a 1 mm.
- 06 Tapones de teflón de 50.25 mm de diámetro y 10.5 mm de espesor hacia el interior del cilindro, diámetro del tapón hacia el exterior es de 80 mm y 10.5 mm de altura.
- 04 Termocuplas tipo J

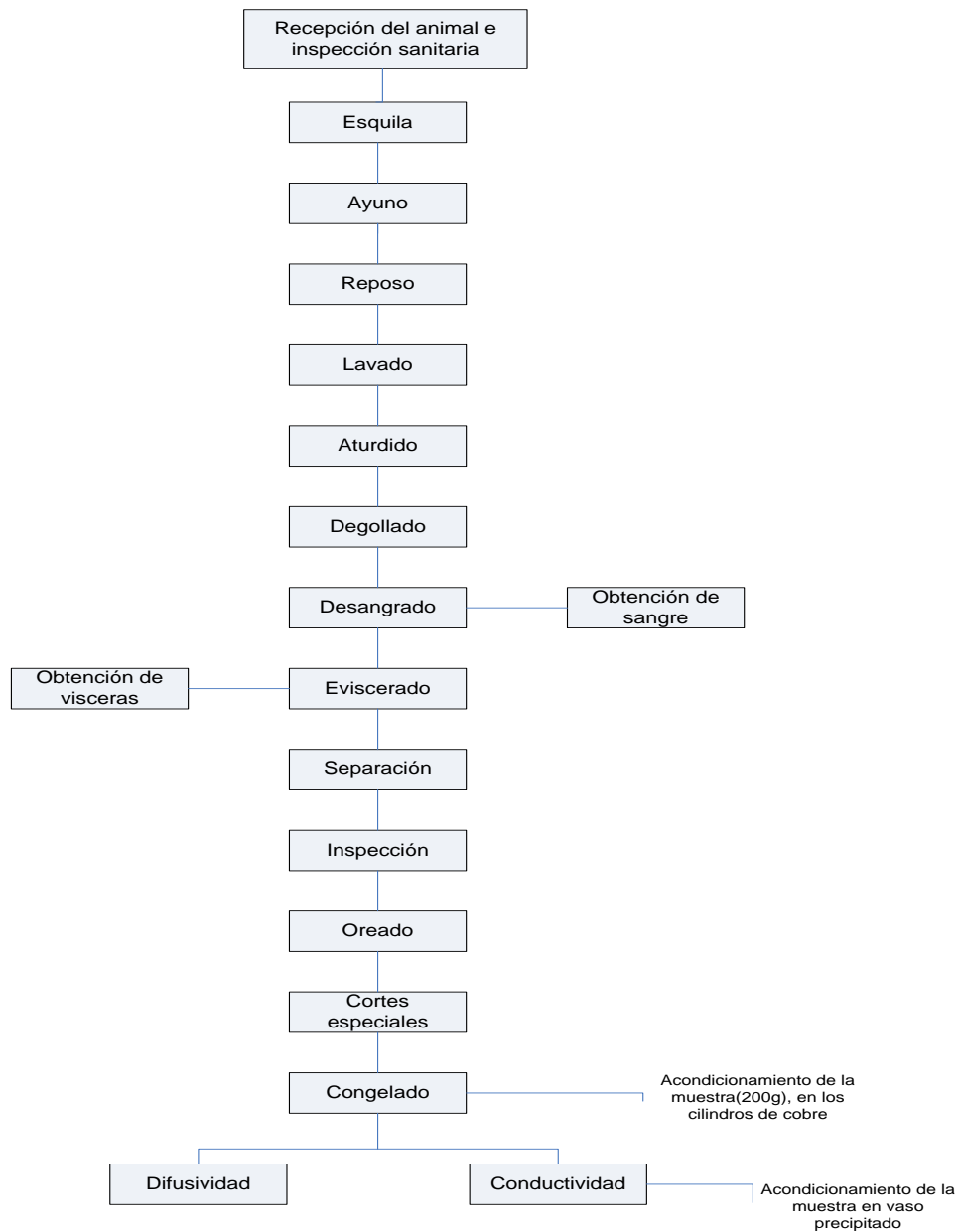
b) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TERMAL

- 01 cilindro de cobre.
- 01 aguja hipodérmica de 0.0502 m de longitud, y 0.00053 m de diámetro interno.
- Cables de Termocuplas tipo T
- Fuente de poder variable de 12 voltios

3.2 METODOLOGÍA

El trabajo comprendió la secuencia de operaciones presentadas en la figura 3.1, las cuales se describen a continuación.

FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMALES DE CARNE DE LLAMA (*LAMA GLAMA*); TIPO MACHO.



❖ **RECEPCIÓN**

Esta operación consistió en evaluar y clasificar la llama del matadero, eligiendo para ello animales de 3-3,5 años de edad (machos).

❖ **ESQUILA**

Proceso que se efectuó para separar la fibra de la piel de la llama y evitar la posible contaminación con ellos asegurando calidad higiénica y sanitaria, se realizó un día antes del faenado.

❖ **AYUNO**

La llama esquilada se sometió a ayuno por 24 horas suministrándose únicamente agua, para favorecer la evacuación intestinal y evita la deshidratación del animal logrando en las canales mejor rendimiento, jugosidad y terneza de la carne.

❖ **REPOSO**

Se realizó con la finalidad de facilitar una buena sangría y obtener una buena carcasa (Limpia y mayor tiempo de conservación de la carne), los camélidos de matanza deberán encontrarse sin stress (tranquilos), reposar de 12 a 16 horas.

❖ **LAVADO.-**

Se prosiguió a una limpieza mediante una ducha con agua fría a presión con la finalidad de retirar la contaminación localizada sobre la piel, la fibra y facilitar el sangrado disminuyendo el estrés.

❖ **ATURDIDO**

La llama una vez limpiada se sometió al proceso de insensibilidad utilizando un puñal, que consistió en penetrará al orificio entre los huesos atlas y cráneo alcanzando las ramificaciones nerviosas sensitivas (médula) suspendiendo de esa forma la comunicación nerviosa en el animal.

❖ **DEGOLLADO**

Se prosiguió al colgado del animal en el riel, con el fin de cortar a nivel del cuello cerca de la cabeza (corta las venas yugulares y carótidas), existente por lo tanto un buen desangrado, muriendo el animal por anemia aguda.

❖ **DESANGRADO**

El tiempo de desangrado fue de 12 a 15 minutos cuyo proceso ayuda a que no exista descomposición, permitiendo que la carne se conserve por mayor tiempo.

❖ **EVISCERADO**

El eviscerado consistió en sacar los órganos internos: panza, tripas, hígado, pulmones, corazón y diafragma, realizando un corte transversal en el pecho con una sierra manual, abriendo de extremo a extremo el canal.

❖ **SEPARACIÓN**

Este proceso consistió, en cortar por la mitad la carcasa con la ayuda de una sierra (tipo moto sierra), comenzando por la cola pasando por la columna terminando en el cuello, a continuación con la ayuda de una manguera de alta presión de agua fría se lavó los restos del aserrín que queda adherida a la carcasa, además permite disminuir la temperatura de la canal.

❖ **INSPECCIÓN**

La inspección consistió una revisión médica por un veterinario dando la autorización sanitaria.

❖ **OREADO**

Este proceso se realizó con el fin de transformar el músculo animal en un alimento cárnico con adecuadas condiciones nutricionales, organolépticas y microbiológicas.

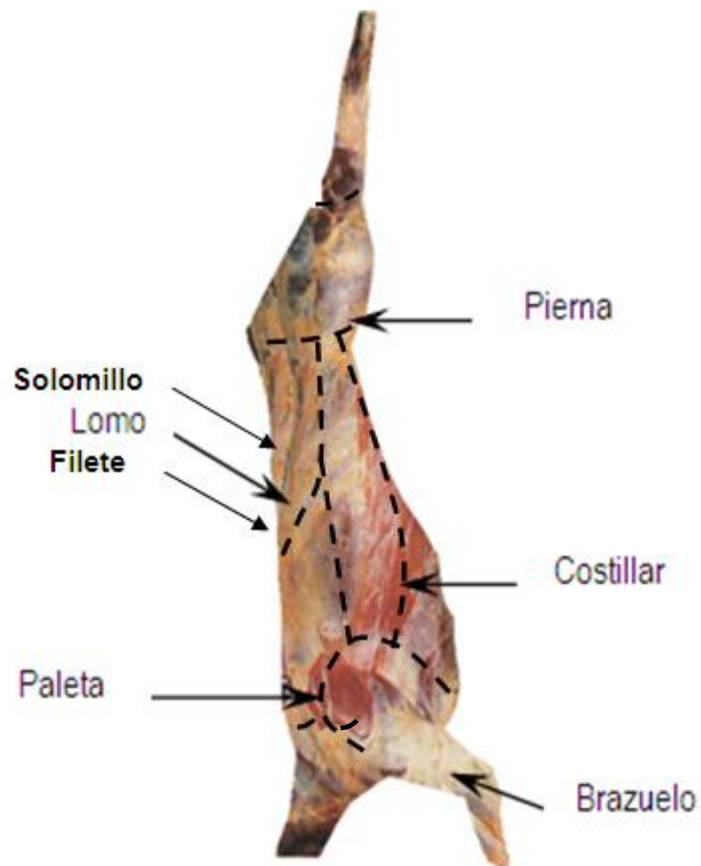
❖ CORTES ANATÓMICOS

Se prosiguió a los cortes anatómicos (lomo, filete y solomillo) se obtuvo de los cortes menores especiales, como se muestra en la figura 3.2, la descripción de las partes de la carcasa de la llama (macho).

❖ CONGELACIÓN

Este proceso de congelación siguió diferentes etapas como se muestra en la figura 3.1, la metodología empleada en la determinación de las propiedades termales de la carne de llama.

FIGURA 3.2. ESQUEMA Y DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES ANATÓMICAS DE LA CARCASA DE LLAMA (MACHO).



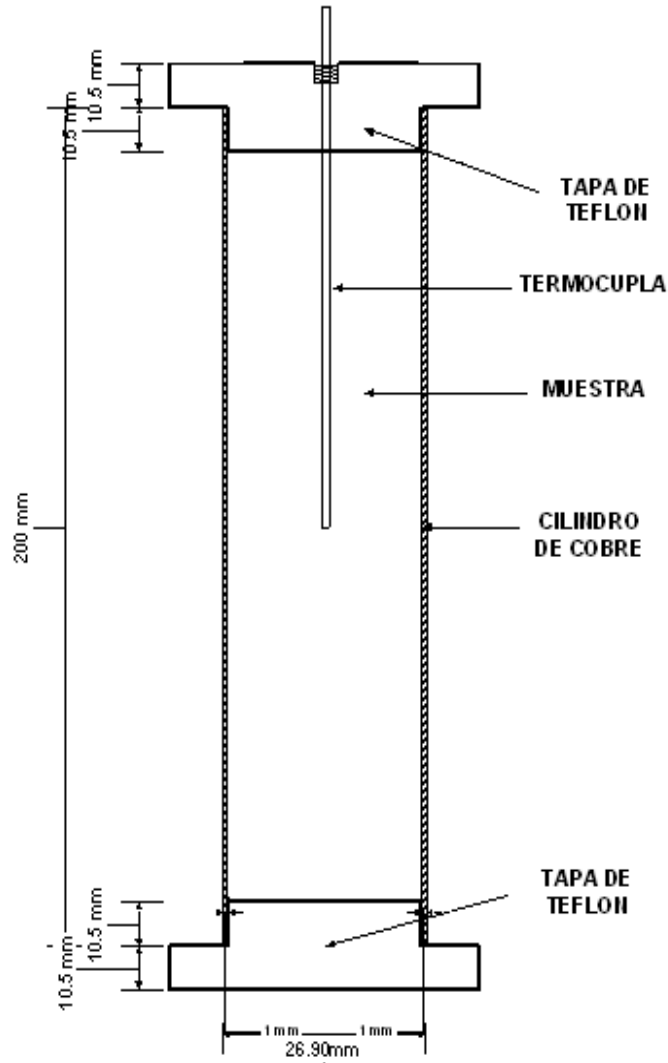
3.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMALES

A continuación se explica la metodología para determinar las propiedades térmicas (difusividad y conductividad).

3.2.1.1 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL

La difusividad termal de la carne de llama fue determinada en un equipo especialmente armado, considerando el diseño reportado por Poulsen (1982) y Gupta (1996). Este consiste de un cilindro hueco de cobre de 200 mm de longitud y 27.0 mm de diámetro, con un espesor de pared igual a 1 mm. En ambos extremos tiene tapones de teflón de 26.9 mm de diámetro y 10.5 mm de espesor hacia el interior del cilindro, el diámetro del tapón hacia el exterior es de 80 mm y 10.5 mm de altura. Ambos tapones son herméticos. Uno de los tapones tiene un agujero con hilo de tornillo en el centro, por donde se introduce y se sujeta la termocupla, cuyo extremo llega al centro geométrico del cilindro, y por donde se registra la temperatura de la muestra que es colocada en el interior del cilindro, que esta al interior del congelador cuya temperatura de congelación es de -18°C . En la figura 3.3, se muestra el esquema del cilindro para la determinación de difusividad térmica.

FIGURA 3.3. ESQUEMA DEL CILINDRO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL.



Fuente: Medina (2000).

Al momento de introducir el cilindro en el congelador, se comenzó a registrar la variación de la temperatura del centro del cilindro y la temperatura del congelador en función del tiempo, en el termómetro de precisión y computadora para encontrar el valor F_c , se usaron las termocuplas tipo J fueron para registrar las temperaturas en el interior de los cilindros. En la figura 3.4 y 3.5, se presenta el esquema de la

instalación utilizada para la determinación de la difusividad termal de la carne de llama en congelación.

FIGURA 3.4. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL.

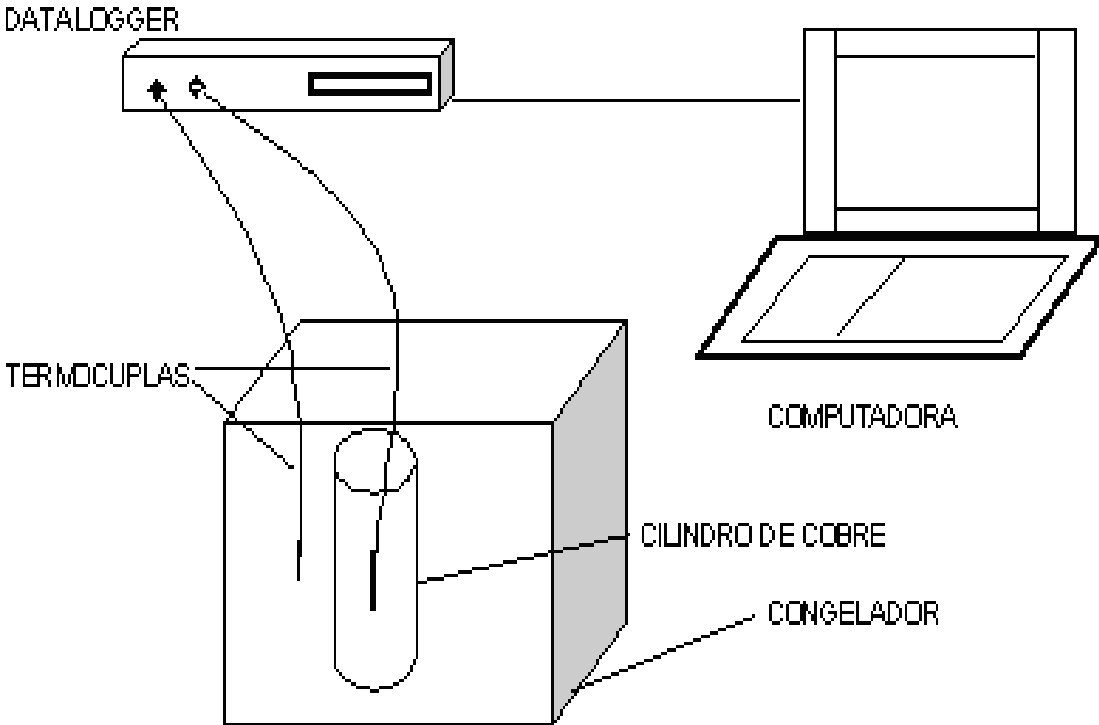


FIGURA 3.5. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TERMAL.



Con los datos obtenidos se construyó la curva tiempo (minutos) y logaritmo de la variación de la temperatura (°C) y utilizando la pendiente de ecuación, se obtuvo la difusividad de la ecuación citada por (Ball y Olson, 1957). Reemplazando en las ecuaciones (16) y (17).

$$t = 0.398 \frac{r^2}{\alpha} \log \left(1.6 \frac{T_a - T_o}{T_a - T} \right)$$

$$\alpha = \frac{0.398r^2}{fc \times 60}$$

Donde:

t = tiempo (min)

r = radio del cilindro (m)

α = difusividad Termal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

T_a = temperatura del congelador ($^{\circ}\text{C}$)

T_o = temperatura inicial de la muestra ($^{\circ}\text{C}$)

T = temperatura de la muestra en el tiempo ($^{\circ}\text{C}$)

fc = Pendiente de la recta

3.2.1.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TERMAL

La conductividad termal fue determinada utilizando el método propuesto por Sweat y Haugh (1974), el cual utiliza el principio de la teoría de la prueba de conductividad termal o técnica de la fuente lineal de calor. Una fuente lineal de calor (sonda o alambre caliente) es introducida en una muestra que tiene una

Temperatura constante. La fuente lineal es entonces calentada a una tasa constante y la temperatura adyacente a la fuente lineal de calor es registrada. Un gráfico de la temperatura en función del logaritmo natural del tiempo, muestra una tendencia lineal, y la pendiente de esa recta es utilizada para calcular la conductividad termal de la muestra, mediante la Ecuación (23).

$$k = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln \frac{t_2}{t_1}$$

Donde:

k = conductividad termal ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Q = potencia consumida por la fuente lineal de calor (W m^{-1})

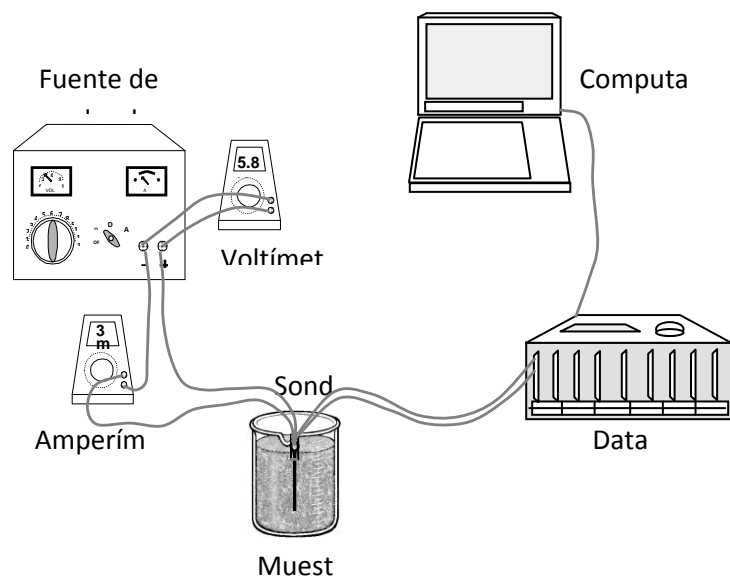
ΔT = variación de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = variación del tiempo (s)

La fuente lineal de calor es una aguja hipodérmica de 0.0502 m de longitud, y 0.00053 m de diámetro interno, la cual tiene colocada en el centro una termocupla tipo T (cobre constantano de 0.000127 m de diámetro). Se impide el contacto entre la termocupla y la pared interior de la aguja mediante una capa de epóxido. La aguja es energizada mediante un alambre de constantano que atraviesa su longitud y es soldada a la punta. La fuente de Poder ELECTRO-TECHNIC PRODUCTS Modelo N° 9230 entrega una corriente continua de 3 a 4 V.

La aguja es colocada al interior de la muestra de carne congelada de llama, se procede a energizarla y la variación de la temperatura en función del tiempo es registrada en el sistema de adquisición de datos Novus, mediante el módulo de expansión análoga de 8 canales, en la cual se colocó la tarjeta de termocuplas. La frecuencia de lecturas fue de 30 lecturas por segundo por un lapso de tiempo de 60 segundos. La intensidad y voltaje fueron leídos en dos multímetros marcas FUJITEC modelo DT - 830B. En la figura 3.5, se muestra el esquema del equipo para la determinación conductividad térmica.

FIGURA 3.5. ESQUEMA DEL EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD TERMAL.



3.3 DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA DE INICIO DE CONGELACIÓN, TC

Para poder determinar la temperatura de inicio de congelación se utilizó las ecuaciones (27) y (28) expresada por la ley de Raoul.

$$T_c = -K_w + \frac{C}{M} \qquad C' = \frac{1 - W}{W}$$

Donde:

K_w = Constante criogénica del agua: 18.6 C.G.S.

C = masa de soluto (en g) disuelta en 100 g de agua.

M = peso molecular del soluto.

W = cantidad de agua presente en los tejidos.

Se determina el peso molecular del soluto según Chen (1985), con la siguiente ecuación (28).

$$M = \frac{535,4}{W}$$

➤ CALCULO DE TEMPERATURA DE INICIO DE CONGELACIÓN, TC

Para calcular la temperatura de inicio de congelación se necesitó del porcentaje o cantidad de agua presente en los cortes de filete, lomo y solomillos, se realizó un análisis de composición nutricional, en la **INSTITUCIÓN NACIONAL DE LABORATORIO DE SALUD “INSALA”** La Paz-Bolivia, los resultados se puede observar en apéndices 13, por lo tanto dio como resultado 74, 31% de agua presente en 100 g. de muestra.

A continuación se muestra en el cuadro 3.1, el resultado de la temperatura de inicio de congelación.

CUADRO 3.1. RESULTADO DE TEMPERATURA DE INICIO DE CONGELACIÓN

ABREVIATURAS	DATOS	RESULTADO
Humedad	74,31	-----
M	7,20495223	-----
C	-0,98654286	-----
Kw	18,6	-----
Tc	-----	-2,546817333

3.4 ANALISIS ESTADISTICO

Para realizar el análisis se utilizo con un programa estadístico obteniendo lo siguientes resultados.

3.4.1 RESULTADOS DE DIFUSIVIDAD

Los resultados de la difusividad térmica para el filete, lomo y solomillo de carne de llama se presentan en el anexo 1,2,3 y en el Cuadro 3.2 se presenta el análisis de variancia para la difusividad térmica, donde se determino que existen diferencias estadísticas significativas al 95% de probabilidades en los cortes de filete, lomo y solomillo de carne de llama, esto muy posiblemente sea debido a su estructura celular y también la diferencia de tiempos de congelación en un determinado tamaño tanto para filete, lomo y solomillo. Determinándose también promedio de $9,72252E-9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ con una desviación en error estándar de $1,88105E-10$, bajo unos límites de confiabilidad de $LI(\text{filete})= 9,29922E-9$ hasta $LS(\text{filete})=, 1,01458E-8$, para filetes de llama, en tanto para lomo un promedio de $8,34622E-9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ con una desviación en error estándar de $1,88105E-10$, bajo unos límites de confiabilidad de $LI(\text{lomo})= 7,92293E-9$ hasta $LS(\text{lomo})= 8,76952E-9$, y para solomillo promedios de $9,23518E-9$

$m^2 s^{-1}$ con una desviación en error estándar de $1,88105E-10$, bajo unos límites de confiabilidad de $LI(\text{solomillo})= 8,81188E-9$ hasta $LS(\text{solomillo})= 9,65848E-9$.

Por el método de Duncan existe una diferencias entre los cortes demostrando de la siguiente manera: filete - lomo $*1,3763E-9$; filete – solomillo $4,8734E-10$; lomo – solomillo $*-8,88955E-10$.

CUADRO 3.2. ANALISIS DE VARIANCIA PARA LA CONDUCTIVIDAD TERMINA EN FILETE LOMO Y SOLOMILLO DE CARNE DE LLAMA.

F DE V	SC	GL	CMe	F-Ratio	P-Value
Entre cortes	0,0	2	0,0	13,76	0,0308
Dentro del corte	0,0	3	0,		
Total	0,0	5			

3.4.2 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD

Los resultados de la conductividad térmica para el filete, lomo y solomillo de carne de llama se puede observar en el anexo 3,4,5 y en el cuadro 3.3, se presenta el análisis de variancia para la conductividad térmica, donde se determino que no existen diferencias estadísticas significativas al 95% de probabilidades en los cortes de filete, lomo y solomillo de carne de llama, esto es posible debido a que la humead promedio tanto para filete, lomo y solomillo fue de 74,31%, como lo mencionan los siguientes autores Gabas (2003), Madrid y Gómez (1994) y Lewis (1993). Determinándose también promedio de $0,2543 \text{ wm}^2\text{c}$ con una desviación en error estándar de $0,014$, bajo unos límites de confiabilidad de $LI(\text{filete})= 0,229609$ hasta $LS(\text{filete})=0,279078$, para filetes de llama, en tanto para lomo un promedio de $0,2543 \text{ wm}^2\text{c}$ con una desviación en error estándar de $0,014$, bajo unos limites de confiabilidad de $LI(\text{lomo})= 0,2249$ hasta $LS(\text{lomo})=0,2744$, y para solomillo promedios de $0,2319 \text{ wm}^2\text{c}$ con una desviación en error estándar de $0,014$, bajo unos límites de confiabilidad de $LI(\text{solomillo})= 0,2072$ hasta $LS(\text{solomillo})=0,2567$.

**CUADRO 3.3. ANALISIS DE VARIANCIA PARA LA CONDUCTIVIDAD
TERMINA EN FILETE LOMO Y SOLOMILLO DE CARNE DE LLAMA.**

F DE V	SC	GL	CMe	F-Ratio	P-Value
Entre cortes	0,000836168	2	0,000418084	0,68	0,5409
Dentro del corte	0,00367849	6	0,000613082		
Total	0,00451466	8			

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIÓN

- No existe variación en la conductividad térmica entre los cortes de llama.
- La difusividad térmica es afectado por el tipo de corte con mayor difusividad, por el método de Duncan existe una diferencias entre los cortes demostrando de la siguiente manera: filete - lomo $*1,3763E-9$; filete – solomillo $4,8734E-10$; lomo – solomillo $*-8,88955E-10$.
- El tiempo inicio de congelación en promedio $-2,546817$ en los cortes de la carne de llama.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de conductividad y difusividad térmica considerando la especie sexo edad procedencia del animal.
- Se recomienda hacer estadios de congelación, para determinar el tiempo total de congelación.
- Estudios de cinética de congelación por fases y/o etapas.