



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**EFFECTIVIDAD DEL PROCESO DE CONGELACIÓN DE
PASTA DE CARNE DE GALLINA (*Gallus*) ENVASADA,
EMPLEANDO UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA EN
CASCADA DE CO₂/NH₃.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA :

HURTADO BAÑUELOS ALDO DAMIÁN

**I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS
I.A. MANUEL ALARCÓN LÓPEZ**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Efectividad del proceso de congelación de pasta de carne de gallina (gallus) envasada, empleando una instalación frigorífica en cascada de CO2/NH3

Que presenta el pasante: Aldo Damián Hurtado Bañuelos
Con número de cuenta: 304049343 para obtener el Título de: Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Agosto de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. José Jaime Flores Minutti	
VOCAL	I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas	
SECRETARIO	I.A. María Guadalupe López Franco	
1er. SUPLENTE	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	
2do. SUPLENTE	I.A. Arturo Munguía Sánchez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.

1.1. Conceptos termodinámicos aplicados a la congelación.	1
1.2. Congelación.	5
1.2.1. Descripción del proceso de congelación.	5
1.2.2. Velocidad de proceso de congelación.	8
1.2.3. Tiempo de congelación.	13
1.2.4. Mecanismos de transferencia de calor presentes en la congelación.	15
1.2.5. Métodos de congelación.	19
1.3. Técnicas de congelación de aves.	26
1.4. Efectos de la congelación en aves.	28
1.5. Envases empleados en congelación de cárnicos.	28
1.6. Sistema de producción de frío en cascada.	33

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO

2.1. Definición del problema y objetivos.	39
2.2. Desarrollo de actividades de investigación en campo.	40
2.2.1. Factores de estudio.	40
2.2.2. Secuencia de cálculo.	44

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización de la instalación frigorífica.	46
3.2. Caracterización del congelador.	53
3.3. Análisis del proceso de congelación.	67
3.4. Comparativo entre congelador de cajas de cartón “ <i>carton freezer</i> ” y congelador por ráfaga de aire “ <i>blast freezer</i> ”.	80

CONCLUSIONES	87
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA	89
--------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	Curva típica de congelación en el centro térmico de un alimento.	4
<i>Figura 2.</i>	Etapas del proceso de congelación.	7
<i>Figura 3.</i>	Cristales formados por congelación rápida.	9
<i>Figura 4.</i>	Cristales formados por congelación lenta.	10
<i>Figura 5.</i>	Esquema de congelador por ráfaga de aire “ <i>blast freezer</i> ”.	23
<i>Figura 6.</i>	Vista lateral de congelador de cajas de cartón “ <i>carton freezer</i> ”, niveles de la estiba.	24
<i>Figura 7.</i>	Vista completa de congelador de cajas de cartón “ <i>carton freezer</i> ”.	25
<i>Figura 8.</i>	Sistema de producción de frío en cascada.	36
<i>Figura 9.</i>	Diagrama entálpico NH ₃ doble etapa.	38
<i>Figura 10.</i>	Diagrama entálpico NH ₃ /CO ₂ .	38
<i>Figura 11.</i>	Diagrama de flujo de la instalación frigorífica en cascada CO ₂ /NH ₃ .	47
<i>Figura 12.</i>	Compresor de tornillo de la primera etapa de compresión.	48
<i>Figura 13.</i>	Paquete de producción de frío mediante CO ₂ .	49
<i>Figura 14.</i>	Recirculador vertical de amoníaco.	50
<i>Figura 15.</i>	Unidad recirculadora horizontal, sistema por bombas.	51
<i>Figura 16.</i>	Bombas empleadas para la recirculación del amoníaco.	51
<i>Figura 17.</i>	Compresores del paquete de CO ₂ .	52
<i>Figura 18.</i>	Compresor de tornillo segunda etapa.	52
<i>Figura 19.</i>	Vista del congelador por ráfaga de aire “ <i>blast freezer</i> ” con los túneles vacíos.	53
<i>Figura 20.</i>	Vista de un túnel de congelación mientras es abastecido con producto envasado.	54

<i>Figura 21.</i>	Ventiladores generadores de la ráfaga de aire frío.	55
<i>Figura 22.</i>	Evaporadores sobre los túneles de congelación.	55
<i>Figura 23.</i>	Estante cargado con producto envasado, espacio entre envases.	56
<i>Figura 24.</i>	Anemómetro empleado para la medición de propiedades del aire.	57
<i>Figura 25.</i>	Esquema de colocación del termopar en el producto envasado.	58
<i>Figura 26.</i>	Termopar empleado para monitorear la temperatura del producto.	59
<i>Figura 27.</i>	Vista lateral del acomodo a lo largo de producto dentro del túnel de congelación.	60
<i>Figura 28.</i>	Comportamiento de temperaturas en el centro del producto por cada zona.	60
<i>Figura 29.</i>	Esquema de productos monitoreados en diferentes niveles de la estiba.	62
<i>Figura 30.</i>	Comportamiento de temperaturas en el centro del producto por niveles de la estiba.	62
<i>Figura 31.</i>	Esquema de temperaturas del aire en los espacios intersticiales de la estiba.	64
<i>Figura 32.</i>	Esquema de velocidades del aire en los espacios intersticiales de la estiba.	66
<i>Figura 33.</i>	Diagrama de bloques de la elaboración de pasta de carne de gallina.	68
<i>Figura 34.</i>	Proceso de armado del envase para el producto terminado.	71
<i>Figura 35.</i>	Caja de plástico para estibar el producto a congelar envasado con bolsa de polietileno.	72
<i>Figura 36.</i>	Comportamiento de temperaturas en el producto envasado en cajas de plástico.	73
<i>Figura 37.</i>	Comportamiento de la temperatura en el centro de los productos envasados en cajas de diferentes materiales.	74
<i>Figura 38.</i>	Comportamiento de la temperatura en pechuga envasada en diferentes materiales.	76
<i>Figura 39.</i>	Velocidad de congelación por zonas en cajas de cartón.	77
<i>Figura 40.</i>	Velocidad de congelación en la zona B en envase de cartón.	77

<i>Figura 41.</i>	Velocidad de congelación en la zona B en envase de plástico.	78
<i>Figura 42.</i>	Vista frontal del congelador de cajas de cartón “ <i>carton freezer</i> ” sin estante.	80
<i>Figura 43.</i>	Llegada del producto envasado en cajas de cartón.	81
<i>Figura 44.</i>	Etiquetado de las cajas con producto para su rastreo.	81
<i>Figura 45.</i>	Espaciado de las cajas mediante un brazo mecánico.	81
<i>Figura 46.</i>	Producto sobre elevador mecánico para su acomodo por niveles.	82
<i>Figura 47.</i>	Evaporadores con potentes ventiladores para generar ráfagas de aire.	82
<i>Figura 48.</i>	Salida del producto congelado.	82
<i>Figura 49.</i>	Producto congelado en trayecto para ser estibado y almacenado.	83
<i>Figura 50.</i>	Vista interna del congelador por ráfaga de aire “ <i>blast freezer</i> ” con los 12 túneles de congelación.	83
<i>Figura 51.</i>	Ventiladores para generar ráfagas de viento dentro de los túneles.	84
<i>Figura 52.</i>	Evaporadores de CO ₂ .	85
<i>Figura 53.</i>	Producto envasado en cajas de cartón sin etiquetar.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Resistencia térmica de algunos materiales de envase.	32
Tabla 2.	Propiedades de los refrigerantes.	37
Tabla 3.	Áreas de la estiba dentro del túnel.	57
Tabla 4.	Flujos volumétricos de aire dentro del túnel.	58
Tabla 5.	Tiempos de congelación.	79

NOMENCLATURA

NH ₃	Amoniaco
a	Área (m ²)
A	Intercambiadores de calor
C	Compresores
CO ₂	Dióxido de carbono
C _p	Calor específico del producto (kcal/kgK)
D	Espesor del producto (m)
ρ	Densidad del aire (kg/m ³)
E	Energía eléctrica
EC	Condensadores
EV	Evaporadores
FR	Velocidad de congelación (°C/h)
HPRL	Recipiente de alta presión
h	Coefficiente convectivo (kcal/h m ² K)
k	Conductividad térmica (J/mK)
λ	Calor latente de fusión del agua (kJ/kg)
M1, M2	Enfriador de pastas
M3, M4, M5, M6	Enfriador de placas
M7	Fábrica de hielo
N	Dimensión característica del producto
Q	Flujo de calor (J/ m ²)
ΔT	Diferencial de temperaturas (°C)

t	Tiempo (h)
Ta	Temperatura del aire de congelación (°C)
Tf	Temperatura final del producto (°C)
Ti	Temperatura inicial del producto (°C)
Tm	Temperatura media logarítmica (°C)
VR-1	Recirculador Vertical 1
VR-2	Recirculador vertical 2
v	Velocidad del aire (m/s)
w	Avance del frente de hielo (cm/h)

INTRODUCCIÓN

La conservación de los alimentos ha sido una tarea de capital importancia para el ser humano desde la alborada de la humanidad.

La mayor parte de los alimentos que comemos contienen una fracción de agua de su masa. La congelación es a menudo una manera eficaz de preservar tales alimentos para el consumo futuro. Una mejor comprensión del proceso de congelación puede ayudar a los productores de alimentos congelados para alcanzar resultados mejores y más predecibles. Para ello se requiere un conocimiento amplio en el que participen el diseño, producción e instalación de maquinaria de congelación de alimentos y los sistemas de refrigeración que se requieren, esto ayudará a que la producción sea de mayor calidad y con ello se tengan consumidores más satisfechos.

Los avances de la termodinámica permitieron el enfriamiento de los alimentos para su conservación, primero mediante hielo natural y el uso de salmueras capaces de descender el punto crioscópico y luego mediante la producción artificial de hielo empleando refrigeración mecánica.

Uno de los grandes impulsores en el campo de la producción de frío fue el francés Sadi Carnot (1824), cuyos estudios sobre las máquinas térmicas permanecen vigentes en la actualidad (*Torrella, 1996*).

Sin embargo, la unidad de refrigeración empleando amoníaco como refrigerante nace de la patente de F. Carré de 1859 de una máquina de absorción que empleaba al amoníaco como refrigerante y agua como sumidero (*Miranda, 2012*).

La conservación de alimentos en fresco es una de las primeras aplicaciones del frío artificial. Pronto se reconoció que las temperaturas por encima de 0°C sólo garantizaban una muy

limitada prolongación de la duración de muchos productos alimenticios, por lo que ya hacia el año 1860 se pasó a la congelación, como consecuencia del interés asociado con el comercio mundial de carne congelada.

La comida congelada comenzó a hacerse popular más o menos al comienzo de la segunda guerra mundial. Puesto que la mayor parte de las personas no disponían de un congelador en aquel entonces, se crearon plantas centralizadas de compartimentos para comida congelada, de forma que cada familia pudiera disponer de su propio compartimento. La ventaja de la comida cuando se congela fresca, es que conserva ese estado de frescura hasta ser consumida (*William, et al., 2006*).

Se ha demostrado que la congelación rápida de los alimentos conserva la calidad inicial de los productos debido a la formación de pequeños cristales de hielo que respetan en gran medida la estructura original de los alimentos (*Madrid et al., 2003*).

A diferencia de otros métodos de conservación, la congelación es el único capaz de conseguir que el sabor natural, el olor y el aspecto de los productos apenas se diferencien de los del género fresco, además de que pueden conservarse por meses con dichas características, mientras que las condiciones de temperatura se mantengan constantes y una vez que los productos sean retirados de las condiciones de almacenamiento deben ser consumidos rápidamente antes de que pierdan sus características de frescura (*Plank, 2005*).

Los primeros sistemas de congelación eran "robustos" congeladores, los cuales eran simples habitaciones de gran tamaño con evaporadores (generalmente serpentines al descubierto), que alcanzaban desde -15 a -28 °C, donde los productos se dejaban durante muchas horas e incluso días, antes de que solidificara el agua contenida. El tiempo para la congelación obviamente dependía del tipo de envase, el tamaño, y el tipo de producto. Este tipo de congelación sigue trabajando hoy en día con bastante éxito en varias industrias.

La velocidad de congelación no ejerce influencia únicamente sobre la cantidad, sino también sobre la forma de los cristales de hielo generados (*Gruda, 1986*). Una velocidad de

congelación rápida se traduce en una mejor capacidad de retención de agua en los tejidos del alimento y por consiguiente una mejor textura (*Barreiro & Sandoval, 2006*). Dicha velocidad de congelación depende principalmente, entre otras variables, de las condiciones de operación tanto del sistema de producción de frío y del equipo; así como, de la manipulación y presentación del producto.

En los productos cárnicos la velocidad de congelación es más importante para la calidad del producto, si la carne no se congela con la suficiente rapidez, o se le permite llegar a una temperatura superior a la temperatura eutéctica de la sal (en el caso de congelación con salmuera) entonces pequeñas bolsas de solución de sal concentrada se pueden producir y difundir a través del producto. Estas sales pueden causar la ruptura celular y la descomposición acelerada de la carne.

Las carnes normalmente se congelan con aire frío. En los congeladores de aire forzado, se usa una temperatura del aire muy baja (-45°C) y una velocidad de flujo de 800 m/min. Aun así, se presenta el inconveniente de que la congelación es lenta, debido a la baja capacidad calórica y coeficiente de transferencia de calor del aire (*Amerling, 2001*).

La mayoría de los problemas de funcionamiento están relacionados con la posición inadecuada de las estibas o las carretillas en el congelador. Por lo tanto, es imperativo que el acomodo del producto sea apilado de manera que el aire tenga la libertad para moverse sobre todo el producto, es decir, que el método de apilamiento debe habilitar la circulación del aire frío entre las bandejas o cajas sin que tenga obstáculos, de lo contrario habrá regiones de largos tiempos de congelación.

Para congelación de productos envasados en cartón, deben implementarse espaciadores equivalentes al 50% del espesor del producto, para permitir que la velocidad del aire sea suficiente entre las cajas. La temperatura del aire debe ser al menos de -45°C , esto equivale a una temperatura de evaporación del refrigerante de -52°C .

Existen congeladores por aire forzado de tipo por lotes y mecanizados, los mecanizados también son conocidos como “*carton freezer*” y son continuos. El inconveniente de los túneles mecanizados es el requerimiento de mayores espacios y la capacidad de congelación se ve reducida por la congelación del evaporador. Por otro lado, los congeladores por lotes presentan mayores capacidades de congelación (*Dempsey y Bansal, 2011*).

Generalmente un producto envasado de un grosor de 3 cm requiere de 1 a 1.25 horas para congelar, mientras que un producto de 10 cm de grosor necesitará de 4 a 5 horas para congelar, esto obvio dependiendo del tipo de envase con que se esté protegiendo.

El intercambio de calor es a menudo complejo de evaluar en equipos de congelación. Cualquiera de los procedimientos de cálculo basados en extensas historias de datos de temperatura y tiempo, o la falta de precisión de las propiedades termo-físicas, o incluso las condiciones de procesamiento no uniformes a nivel industrial, se traduce en un aumento de la dificultad en el cálculo de los parámetros de intercambio de calor durante los procesos de congelación (*Amarante et al., 2003*).

En 2010, Dopazo y Fernández realizaron un estudio de la capacidad de congelación de un sistema de producción de frío en cascada y descubrieron que utilizando dióxido de carbono (CO₂) como principal refrigerante es fácil obtener temperaturas de evaporación de -52°C sin que represente grandes desplazamientos volumétricos para el compresor.

En el 2003, Amarante et al., realizaron un estudio de la medición de transferencia de calor en el proceso de congelación, utilizando anemómetros para medir las velocidades del aire dentro de un congelador estático y termopares para medir los cambios de temperatura en la superficie del producto a través del proceso de congelación.

Hoy en día a menudo se observa que los productos cárnicos que se comercializan a costos accesibles a lo largo y ancho del territorio nacional son de una mala calidad debida a que son sometidos a procesos frigoríficos deficientes o en el peor de los casos, no son sometidos a dichos procesos.

Un proceso de congelación deficiente sucede cuando un alimento es sometido a velocidades lentas de congelación y se forman cristales de gran tamaño y de formas irregulares que dañan la estructura celular del producto teniendo como consecuencia la pérdida de nutrientes, de contenido de humedad y por consiguiente pérdida importante de peso.

Por otro lado también se observa que existen en el mercado productos cárnicos de buena calidad, que cabe mencionar son minoría y que vienen acompañados de costos de adquisición más elevados debido a que el proceso frigorífico al que son sometidos resulta costoso porque no se lleva a cabo de manera adecuada por falta de información durante dichos procesos.

Como se mencionó anteriormente, un producto cárnico de mala calidad (cuando es congelado a velocidades lentas) tendrá un tiempo de vida útil corto en comparación con un producto de buena calidad (sometido a velocidades altas de congelación) en el que se le añade un valor agregado por cuestión del proceso frigorífico al que se ha sometido y que tendrá un tiempo de vida más prolongado. Esto se ve reflejado directamente en la calidad alimentaria de los consumidores que no tienen acceso a productos de buena calidad y en el bolsillo de aquellos que si tienen el acceso a productos con valor agregado.

Con la finalidad de aportar información de capital importancia a los productores de cárnicos congelados nacionales, se llevó a cabo el presente estudio, el cual pretende aportar información a futuros productores y los actuales para que tomen las medidas necesarias para mejorar sus procesos frigoríficos, reduciendo costos de operación y con ello se vean disminuidos los costos de sus productos en el mercado y un mayor número de consumidores tengan acceso a productos de buena calidad.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Conceptos termodinámicos aplicados a la congelación.

La industria de alimentos incluye en sus líneas de procesos: operaciones preliminares, de conversión, de conservación y técnicas auxiliares, las cuales fundamentan a la tecnología cuyo objetivo es buscar el máximo rendimiento de los recursos alimenticios (*AAPPA, 2003*).

El agua es el componente mayoritario en los alimentos; su contenido varía dependiendo de su composición, pero especialmente de la cantidad de grasa presente. Usualmente, a mayor cantidad de grasa menor será el contenido de agua.

Para carne de gallina y pescado depende también de la cantidad de grasa en la especie, hallándose normalmente en rangos entre 55 y 80% (*Barreiro & Sandoval, 2006*).

En los tejidos animales, el agua no está uniformemente distribuida debido a los complejos hidratados que se establecen con proteínas, hidratos de carbono, lípidos y otros constituyentes. En general, el contenido de humedad de un alimento se refiere a toda el agua en forma global, sin considerar que en la mayoría de los productos existen zonas o regiones microscópicas que debido a una alta acumulación de lípidos no permiten su presencia y la obligan a distribuirse en forma heterogénea.

Esta situación hace que existan diferentes estados energéticos y de comportamiento fisicoquímico de las moléculas de este disolvente. Es decir, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades, y esto se puede comprobar fácilmente por las diversas temperaturas de congelamiento que se llegan a observar; generalmente un alimento se congela a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero aun en estas condiciones una fracción del agua permanece líquida y requiere de temperaturas más bajas, por ejemplo $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, para que solidifique.

Este tipo de consideraciones ha llevado a que tradicionalmente se emplean términos como “agua ligada” y “agua libre”, para referirse a la forma y el estado energético que dicho líquido guarda en un alimento.

- a) Agua ligada: es aquella porción que no congela en las condiciones normales de congelamiento a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$; esta fracción de agua se encuentra adsorbida físicamente por puentes de hidrógeno en la superficie de las moléculas activas y cargadas como las de proteínas, aminoácidos, sales y azúcares. Así mismo, está ligada químicamente y no es capaz de sostener crecimiento microbiológico, ni de participar o ser vehículo en reacciones bioquímicas o químicas del alimento.

- b) Agua libre: es la que fácilmente volatiliza, se pierde en el calentamiento, es la primera que congela y la principal responsable de la actividad acuosa del alimento. Esta porción se compone del agua que se encuentra en el alimento pero no tiene ninguna interacción con este, está débilmente sostenida mediante fuerzas de Van der Waals y a diferencia del agua ligada, esta si es capaz de sostener crecimiento microbiano y sirve de vehículo y participa en reacciones químicas y bioquímicas dentro del alimento (*Badui, 1993; Barreiro & Sandoval, 2006*).

La producción de frío generalmente se lleva a cabo mediante un sistema de compresión. El frío se produce por un grupo frigorífico (refrigerante) con expansión directa del mismo fluido (caso más frecuente). Este ciclo comprende esencialmente 4 elementos: compresor, condensador, dispositivo de expansión y evaporador, donde se transmite el frío después de la expansión del fluido.

La principal carga térmica en una planta congeladora es la que se deriva de congelar el producto; disminuir la temperatura de dicho producto desde su punto inicial de congelación hasta una temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, por ejemplo, es relativamente fácil, lo que realmente cuesta trabajo y energía es disminuir la temperatura inicial hasta el punto inicial de congelación.

Por el contrario, cualquier anomalía en la planta congeladora, o grave sobrecarga, etc., es probable que signifique que algunos lotes de producto no se congelen o lo hagan de forma deficiente (*Ranken, 2003*).

Un refrigerante es una sustancia que puede ser cambiada fácilmente a vapor, haciéndola entrar en ebullición, y luego cambiada al estado líquido, haciéndola condensarse. El refrigerante debe ser capaz de sufrir este cambio de manera repetida sin que sus características se vean alteradas (*William, et al., 2006*).

Calor sensible, es aquel calor que es evidente al tacto, midiéndose por medio del termómetro, que puede ser del tipo normal para establecer la temperatura en el instante en que se mide, o bien los llamados de máxima y mínima, que sirven para determinar la temperatura más elevada y la más baja que se han conseguido durante un determinado periodo de tiempo.

Calor latente es la cantidad de calor necesario para cambiar el estado de agregación de un cuerpo sin alterar su temperatura. Es ley fundamental que cuando un cuerpo cambia su estado de sólido a líquido, o bien de líquido a vapor, este proceso, aunque no va acompañado de un cambio de temperatura perceptible, tiene por resultado la absorción de cierta cantidad de calor. Este calor permanece oculto o latente, y de ahí su denominación (*Alarcón, 1998*).

El centro térmico de una masa de producto, es el punto del interior de la misma que presenta la temperatura más alta o más baja con respecto del resto del producto, y que en un proceso de transferencia de calor es el último en alcanzar la misma temperatura que el resto de la masa (*Madrid et al., 2003*).

Los alimentos se clasifican como formas geométricas regulares dependiendo del tamaño de sus lados y de su figura. Los de forma rectangular son considerados como placas y cualquier punto en el plano medio es considerado como el centro geométrico por ser el área más grande de contacto con el aire frío, y a partir de este punto las distancias hacia los extremos del producto son iguales y la transferencia de calor ocurrirá de manera simultánea.

La figura 1 muestra las curvas típicas de congelación de carne con ráfagas de aire. La sección plana (A) representa el largo tiempo que se necesita para congelar el agua en el centro térmico de la carne.

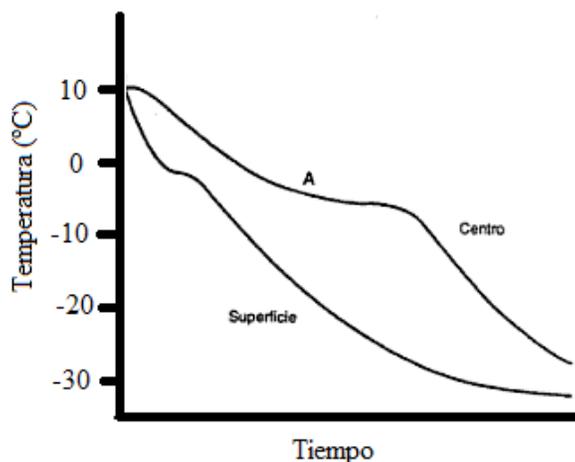


Figura 1. Curva típica de congelación en el centro térmico de un alimento (Ranken, 2003).

La temperatura del punto inicial de congelación es aquella en la que empiezan a formarse los primeros cristales de hielo; es decir, la temperatura en la que coexisten en equilibrio cristales de hielo y agua líquida. Para el agua pura esta temperatura corresponde a 0 °C. Sin embargo, el agua de los alimentos contiene sólidos solubles, y es conocido que el efecto de estos sólidos hace descender el punto de congelación del agua (Ibarz, 2005).

La carne congelada, es aquella que, además de las manipulaciones propias de la carne fresca, ha sido sometida a la acción del frío industrial hasta conseguir en el centro de la masa muscular una temperatura de -18 °C como mínimo, según la especie, la técnica y el tiempo de conservación previsible (Madrid et al., 2003).

1.2. Congelación.

1.2.1. Descripción del proceso de congelación.

La congelación es un proceso de conservación mediante el cual se retira calor sensible de un alimento hasta llegar a la formación del primer cristal de hielo, lo que se conoce como punto inicial de congelación, posteriormente la temperatura seguirá disminuyendo hasta extraer el calor latente del alimento y lograr que la mayor parte del contenido acuoso del alimento se haya transformado en hielo y conseguir una temperatura constante en un punto dado (*IIF, 1990*).

El proceso de congelación se caracteriza por el cambio de fase del agua presente en los alimentos del estado líquido al estado sólido. Los otros componentes usuales en los alimentos, como carbohidratos, proteínas, grasas y minerales, no llevan a cabo este cambio de fase marcado; sólo los lípidos pueden también solidificar en este proceso (*Barreiro & Sandoval, 2006*).

A diferencia de otros métodos de conservación, la congelación es el único capaz de conseguir que el sabor natural, el olor y el aspecto de los productos apenas se diferencien de los del género fresco, además de que pueden conservarse por meses con dichas características mientras que las condiciones de temperatura se mantengan constantes y una vez que los productos sean retirados de las condiciones de almacenamiento deben ser consumidos rápidamente mientras conservan sus características de frescura (*Plank, 2005*).

El proceso de congelación normalmente es estudiado en el denominado centro térmico del alimento, es decir, el punto más caliente o del que se remueve calor más lentamente en el proceso. La congelación del centro térmico implica la congelación del resto del alimento a temperaturas inferiores a la de éste, existiendo para tiempos un gradiente de temperatura entre el frente de remoción de calor en el alimento, normalmente la superficie de éste y el centro térmico.

Durante el proceso de congelación ocurre la cristalización de las moléculas de agua, pasando del estado líquido al sólido. Los fenómenos que tienen lugar en el proceso de cristalización son de importancia práctica en la congelación de alimentos, ya que ello incide sobre factores organolépticos y de calidad, en especial la textura y la capacidad de retención de agua de los tejidos.

Los cristales de hielo se forman alrededor de un núcleo de cristalización, al cual se agregan moléculas de agua adecuadamente orientadas en la estructura cristalina que hacen crecer el cristal a medida que el proceso de congelación avanza. En este proceso son importantes dos factores: la velocidad de formación de los núcleos de cristalización y la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo.

Se ha encontrado que la velocidad de formación de núcleos cristalinos aumenta al disminuir la temperatura, es decir, al incrementar la velocidad de congelación el número de cristales de hielo formados es mayor. Algunos investigadores han encontrado que a temperaturas de congelación bajas esta cifra alcanza un máximo para luego disminuir nuevamente.

Con relación a la velocidad de crecimiento de los cristales, se ha encontrado que ésta alcanza un máximo a temperaturas inferiores, pero cercanas al punto de congelación del alimento, para luego disminuir a medida que la temperatura de congelación disminuye.

De lo anterior se puede deducir que si los cristales de hielo se forman lentamente, cuando se forman a velocidades lentas de congelación, se producirá un número relativamente pequeño de centros de nucleación y por ende de cristales de hielo, los cuales tendrán una velocidad de crecimiento elevada. Con la congelación lenta se generan pocos cristales de hielo pero de gran tamaño. Con la congelación a velocidades altas ocurrirá lo contrario, esto es, se formará un gran número de cristales de hielo pero de menor tamaño.

Los cristales formados a velocidades lentas de congelación forman estructuras cristalinas grandes, en forma de aguja, mientras en la congelación a velocidades rápidas se tiende a formar cristales esféricos, transparentes y de tamaño muy pequeño.

El tamaño y el número de los cristales de hielo formados influyen considerablemente en la textura del producto. Los cristales grandes perjudican la calidad de los alimentos, debiéndose su formación a tres causas fundamentales que siempre deben tenerse presentes para evitarlas:

- Velocidad de congelación lenta
- Almacenamiento del producto congelado a temperaturas relativamente altas por tiempos largos
- Fluctuaciones en la temperatura de almacenamiento (± 5 °C).

Las dos últimas causas se explican por el fenómeno de recrystalización que tiene lugar al almacenar el alimento por periodos largos a temperaturas relativamente elevadas, aun cuando haya sido congelado en forma rápida o por fluctuaciones de la temperatura en el almacén frío.

El proceso de congelación de alimentos normalmente incluye cuatro fases como lo muestra la figura 2: (a) Enfriamiento que extrae el calor sensible del producto hasta alcanzar el punto inicial de congelación; (b) Extracción de calor latente de congelación y sensible del producto, debido a la sucesión de estados de aumento de concentración de la solución y el abatimiento del punto de congelación de la misma, hasta alcanzar el punto eutéctico; (c) Extracción de calor latente de congelación; (d) Continuación del proceso de extracción de calor sensible del producto hasta obtener la temperatura optima de almacenamiento en congelación (*Johnson & Controls, 2012*).

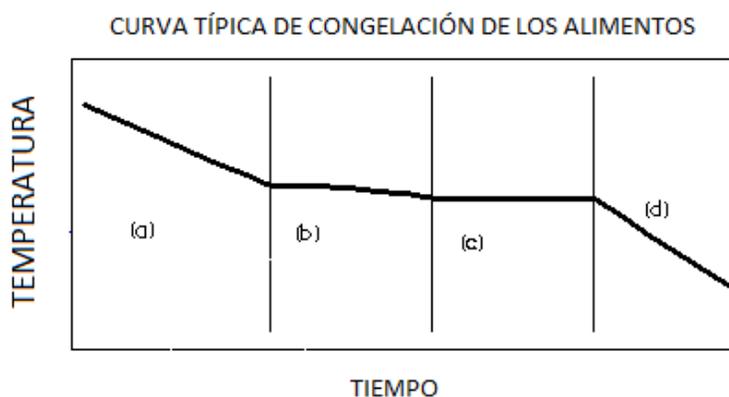


Figura 2. Etapas del proceso de congelación (Johnson & Controls, 2012).

Los alimentos no muestran un punto de congelación definido, como lo tienen las sustancias puras, sino que congelan en un rango apreciable de temperatura, aun cuando normalmente la mayoría del agua presente lo hace en un rango más estrecho (usualmente entre -1 y -5 °C para la mayoría de los alimentos) (*Barreiro, Sandoval, 2006*).

1.2.2. Velocidad del proceso de congelación

La velocidad de congelación es la velocidad con que la temperatura del producto disminuye desde su temperatura inicial hasta conseguir la congelación en el centro térmico del producto y se expresa en °C/h.

Se consiguen buenos resultados de congelación cuando dicha velocidad se encuentra entre 2 y 5 °C/h por debajo de 2 °C/h se considera una congelación lenta y por encima de 5 °C/h una congelación rápida.

Para la mayor parte de los artículos congelados falta hasta ahora una velocidad de congelación inequívocamente determinada y mínimamente admisible. En el pasado se atribuyó una influencia exageradamente buena a esta velocidad sobre la calidad de los congelados. Por ello se ha observado recientemente la tendencia a renunciar a una velocidad media en general obligada de más de 1 °C/h, surgiendo la pretensión de que el artículo a congelar en un aparato adecuado a sus características sea congelado a una temperatura interna en el centro térmico de menos de -18 °C (*Gruda, 1986*).

Ahora bien, se pueden realizar dos tipos de congelación que se presentan a continuación:

- Congelación rápida; provoca cristales más pequeños, dando como resultado pocas pérdidas de líquido celular por exudación y bajo ablandamiento de los tejidos durante la descongelación.

Este tipo de congelación se lleva a una temperatura de -30 °C y un tiempo de 12-18 horas. Presenta la desventaja de que el color en la superficie de la carne se torna más

claro de lo normal debido a la reflexión de la luz por los cristales pequeños y que se encuentran distribuidos uniformemente (Amerling, 2001). Para tener estos resultados se requiere que al menos se encuentre por encima de 2 °C/h de velocidad de congelación (López, 2004).

Este tipo de congelación forma muchos cristales de hielo de pequeño tamaño, principalmente dentro de las fibras musculares, situación que reduce la migración de agua y la concentración de las soluciones celulares (López, 2004).

Una ultra-congelación, como es el caso de la inmersión en nitrógeno líquido, puede provocar contracciones musculares en productos animales que dañarían la calidad del producto.

Una congelación demasiado rápida no es siempre necesaria, dependiendo del producto y, en ciertos casos, una congelación que alcance las 24 horas es aceptable. Siempre deben evitarse tiempos de congelación demasiado prolongados, ya que el centro térmico podría mantenerse por encima de los 0 °C pudiendo resultar deteriorado en gran medida (IIF, 1990).



Figura 3. Cristales formados por congelación rápida (Ranken, 2003).

- Congelación lenta; provoca cristales de hielo de gran tamaño, dando como resultado un producto de baja calidad, por la elevada pérdida de exudado durante la descongelación (Amerling, 2001). Por debajo de 2 °C/h se considera lenta (López, 2004). En la congelación lenta la temperatura se mantiene en el rango de 0 a -40 °C.

Ya que la circulación del aire es por lo general por convección natural, la transferencia de calor del producto puede ser desde 3 horas hasta 3 días, dependiendo del volumen del producto y de las condiciones del congelador (Dossat, 1980).

En este tipo de congelación los cristales de hielo que se forman son de geometría irregular y de un tamaño que provoca que las paredes celulares se rompan y arrastren agua ligada a las proteínas, arrastrando sustancias hidrosolubles y provocan cambios en la textura de la carne y pierda valor nutritivo.

Una congelación lenta facilita la separación de las soluciones y la migración del agua, lo que aumenta el tamaño de los cristales incipientes; los músculos son desgarrados y las soluciones celulares se concentran, situaciones que dificultan la adecuada reversibilidad del proceso cuando se produzca la descongelación (López, 2004).



Figura 4. Cristales formados por congelación lenta (Ranken, 2003).

El proceso de congelación termina en la práctica cuando la mayor parte del agua congelable se transforma en hielo en el centro térmico del producto; para la mayoría de los productos, la temperatura del centro térmico coincide en ese momento con la temperatura de

almacenamiento. Si el producto se retira del congelador antes de ese momento, puede resultar una congelación muy lenta en el centro del mismo y en consecuencia una pérdida de su calidad; además, la introducción en el frigorífico de un producto insuficientemente enfriado puede perjudicar a los otros productos que ya se encontraban allí; es preferible proseguir el enfriamiento hasta descender a una temperatura de equilibrio de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IIF, 1990).

Para alcanzar la temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ o más baja en su centro, el producto debe pasar a través del intervalo de temperatura de máxima cristalización, entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La velocidad de congelación determina el tiempo de paso por este intervalo, lo que representa un factor muy importante ya que la calidad de la carne congelada depende principalmente del tamaño de los cristales de hielo que se forman, que son más grandes cuando menos es la velocidad de congelación. Es por lo tanto indispensable orientar este proceso, controlando la velocidad de congelación, para mantener lo mejor posible la calidad organoléptica de la carne (López, 2004).

La velocidad de congelación utilizada debe ser sólo suficientemente alta, con lo que no se producen indeseables reacciones bioquímicas y microbianas durante el proceso de congelación, sobre todo en la fase inicial, cuando la temperatura del artículo a congelar es relativamente alta.

En la conservación por congelación a escala industrial se consideran suficientes velocidades de congelación superiores a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ para productos envasados individualmente, y velocidades de $5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ para productos a granel. Al congelar artículos de grandes dimensiones, no son objetables bajas velocidades de congelación del orden de $< 0.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, que se utilizan con frecuencia (Gruda, 1986).

En cuanto a productos animales, las intensidades límites de enfriamiento recomendadas se sitúan entre 0.3 y $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, cuando se produce la formación extracelular de hielo, suponiendo en la práctica un avance en el frente de hielo próximo a 2.2 cm/h (Ramírez, 2000).

Teniendo en cuenta las prescripciones de velocidad de congelación, los alimentos pueden clasificarse en cuatro grupos:

- Alimentos sobre los que no ejercen influencia las más diversas velocidades de congelación (p.ej. guisantes verdes).
- Alimentos sobre los que no influyen cambios notables en el avance del frente de hielo, con la excepción de un avance muy bajo ($w = 0.1 - 0.3$ cm/h), (p. ej. El pescado).
- Alimentos cuya calidad mejora al incrementar la velocidad de congelación (p. ej. Fresas, en particular sobremaduras), así como alimentos en los que se logra una buena calidad con las congelaciones rápida y ultrarrápida ($FR \geq 8$ °C/h), como sucede por ejemplo en tomates, pepinos y espárragos.
- Alimentos inadecuados para ser congelados por procedimientos demasiado rápidos por estallar durante el proceso de congelación (alimentos de grandes dimensiones, cuartos y medias canales de vaca, así como peces grandes congelados enteros, ciruelas y tomates).

Una consecuencia esencial del proceso de congelación es el aumento de volumen del alimento. Al contrario de lo que sucede en la mayoría de los líquidos, que disminuyen de volumen al pasar al estado sólido, el volumen del agua aumenta durante la congelación aproximadamente en un 9 %. En la práctica es menor el aumento de volumen de los productos congelados y asciende a un 6% (*Gruda, 1986*).

Las velocidades de congelación se pueden determinar de acuerdo a la ecuación (1) según la definición dada por el Instituto Internacional del Frío:

$$FR = \frac{T_f - T_i}{t_2 - t_1} \quad (\text{Olivera y Salvadori, 2008}). \quad (1)$$

Dónde:

T_f= temperatura final del producto congelado.

T_i= temperatura inicial del producto sin congelar.

(t₂-t₁)= tiempo transcurrido entre el inicio y el final del proceso de congelación (*Olivera y Salvadori, 2008*).

1.2.3. Tiempo de congelación.

El tiempo de congelación es directamente proporcional a la dimensión característica del producto, por lo tanto para disminuir los tiempos de congelación se deberá reducir su espesor o su diámetro. La forma del producto ejercerá una gran influencia sobre el tiempo de congelación, ya que la velocidad de congelación de una esfera es mayor que la del cilindro del mismo diámetro y que la de la placa del mismo espesor (*López, 2004*).

Los tiempos de congelación para un determinado producto pueden ser medidos experimentalmente observando las temperaturas del producto. Los cálculos son difíciles a causa de los numerosos y diversos parámetros que intervienen (*IIF, 1990*).

La duración de la congelación depende de diversos factores, entre los que destacan, las dimensiones del producto, envase, colocación del producto dentro del congelador, diferencia de temperaturas entre el producto y el medio de congelación, sistema de enfriamiento, coeficiente de transmisión superficial del producto, coeficiente de conductividad, entre otros (*Rapín, 2002*).

Las técnicas de aproximación del tiempo de congelación se agrupan en dos categorías generales:

- la estimación del tiempo de enfriamiento: técnicas que proporcionan información de tiempo y temperatura del sistema de enfriamiento, pero sólo se aplican por encima y por debajo de la temperatura de congelación del producto y sirven para estimar el calor sensible.
- la estimación del tiempo de congelación: técnicas que proporcionan información con respecto al tiempo que tarda el centro térmico del alimento en alcanzar una cierta temperatura por debajo de la temperatura de congelación inicial, pero no proporcionan información sobre la distribución espacial de la temperatura en el resto del alimento durante este proceso.

La falta de información de temperatura en el resto del alimento puede conducir a una subestimación de la producción de frío necesario para congelar un producto a una temperatura en el núcleo específica, ya que tanto la temperatura en la superficie y en el resto del alimento son generalmente más bajas que la temperatura del centro térmico durante un proceso de congelación rápida.

Otro factor a considerar en el proceso de congelación es el salto térmico entre la temperatura del medio enfriador y la de congelación del producto. Para reducir el tiempo de congelación se puede actuar sobre la temperatura del medio enfriador haciéndola tan baja como sea posible.

Cuanto más bajo sea el coeficiente de transmisión de calor por convección del sistema de congelación empleado, más necesario será que la temperatura del agente enfriador sea baja, si se pretenden velocidades altas de congelación (*López, 2004*).

Junto a esto desempeñan también un papel importante la humedad relativa, la clase de embalaje, la densidad de apilado, la acción de la luz, entre otros factores (*Plank, 2005*).

El tiempo de congelación depende de diversos factores, unos relativos al producto a congelar y otros al equipo utilizado, de los que los más importantes son:

- Dimensiones y forma del producto.
- Temperatura inicial y final del producto.
- Temperatura del refrigerante con el cual se enfría el aire de congelación.
- Coeficiente de transferencia de calor superficial del producto.
- Variación de entalpía.
- Conductividad térmica de producto.
- Embalaje del producto (*IIF, 1990*).

Plank estableció una ecuación que permite calcular el tiempo de congelación de un producto considerando los factores que influyen en el tiempo que tarda en congelar el centro térmico de productos con formas regulares, tal ecuación se describe a continuación:

$$t = \left(\frac{\lambda \rho}{\Delta T} \right) \left(\frac{ND}{h} + \frac{ND^2}{k} \right), \text{ (Sears y Salinger, 2002.)} \quad (2)$$

Donde λ se refiere al calor latente de fusión del agua, ρ es la densidad del producto, ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura mínima requerida de congelación que es $-18\text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura del medio de congelación, N es un coeficiente que depende de la geometría del producto a congelar, D es el espesor del producto en metros, h el coeficiente convectivo del sistema y k es la conductividad térmica del envase del producto.

Los análisis tradicionales de los procesos de congelación de alimentos a menudo han utilizado técnicas tradicionales en las cuales se asigna una media a las propiedades específicas del producto, tales como la temperatura y el contenido de agua del alimento que se está congelado. En realidad, las propiedades de cualquier alimento que contiene cantidades significativas de agua varían considerablemente durante el proceso de congelación. Esto añade un nivel de complicación el cual hace que el análisis exacto extremadamente difícil.

1.2.4. Mecanismos de transferencia de calor presentes en la congelación

La transferencia de energía calorífica es uno de los fenómenos de transporte primordiales en los procesos agroalimentarios. En prácticamente todos los procesos existen etapas en las que los elementos se enfrían o calientan, tanto en procesado primario, secundario o terciario (*Corbín et. al., 2006*).

La transferencia de calor depende de las dimensiones y la forma del producto, especialmente de su espesor, de su conductividad térmica y del coeficiente de película que se consiga entre el producto y el aire. Este coeficiente aumenta con la velocidad del aire, por lo que incrementando ésta se mejora la eficiencia del congelador (*López, et al., 2004*).

En el proceso de congelación intervienen dos mecanismos de transmisión de calor: transmisión de calor por convección desde el medio enfriador hasta la superficie del producto (salvo en el caso de congelación por contacto), transmisión de calor por conducción en la masa del producto. El peso relativo de cada mecanismo dependerá en cada caso del tamaño del producto: cuando el espesor del producto es pequeño, el mayor peso lo tendrá el proceso de

convección y será la conducción la que tenga el mayor peso en el caso de productos de gran espesor (López, 2004).

a) Conducción

La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor es transportado desde las regiones de alta temperatura a las regiones de baja temperatura de una sustancia. La propiedad que caracteriza la capacidad de un material para transferir calor es la conductividad térmica. Se define mejor por medio de la expresión

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Pearson, 2003}). \quad (3)$$

Donde q representa el flujo de calor, o sea, calor que atraviesa la unidad de área (perpendicular a la dirección del flujo de calor) por unidad de tiempo, k es la conductividad térmica y dT/dx es el gradiente de temperatura a través del medio conductor.

Las unidades de q y k son W/m^2 y $W/m K$, respectivamente. La ecuación (3) es válida sólo en el caso del flujo de calor estacionario, o sea, para situaciones en las cuales el flujo de calor no cambia con el tiempo. Además, el signo menos en la expresión indica que la dirección del flujo de calor es desde caliente a frío, o sea, en sentido contrario al gradiente de temperatura.

El calor en los materiales sólidos es transportado por vibraciones de la red y por electrones libres. Cada uno de estos mecanismos está asociado a una conductividad térmica, y la conductividad total es la suma de estas dos contribuciones, o sea,

$$k = k_l + k_c, \quad (\text{Callister, 1996}). \quad (4)$$

Donde k_l y k_c representan las conductividades térmicas vibracionales y electrónicas, respectivamente: normalmente predomina uno u otro mecanismo.

La energía térmica asociada con las vibraciones de la red es transportada en la dirección de su movimiento. La contribución de k_l resulta de un movimiento neto de la red desde las regiones de temperaturas altas a las regiones de temperaturas bajas de un cuerpo en el cual existe un gradiente de temperatura.

Los electrones libres o de conducción participan en la conducción térmica electrónica. Los electrones libres en una región caliente de un material ganan energía cinética. Entonces migran a las regiones más frías en donde parte de esa energía cinética es transferida a los propios átomos como consecuencia de las colisiones con la misma red u otras imperfecciones en el material. La contribución relativa de k_c a la conductividad térmica total aumenta con el aumento en la concentración de electrones libres, puesto que más electrones están disponibles para participar en este proceso de transferencia (*Callister, 1996*).

La ley de Fourier (ecuación 3) es fenomenológica, es decir, se desarrolla a partir de los fenómenos observados más que de los conceptos básicos. Por ello se observa, el modelo como una generalización que se basa en pruebas experimentales (*Corbin, 2006*).

b) Convección

En general, en comparación con los sólidos, los líquidos y los gases no son buenos conductores térmicos. Sin embargo, la movilidad de las moléculas de los fluidos permite la transferencia de calor por otro proceso: convección.

La transferencia desde el seno del producto hasta el medio enfriador se da por convección. La convección es el proceso en el cual la transmisión de calor está asociada al movimiento de materia. Esta se caracteriza por el movimiento de un fluido, mediante el cual se transporta calor asociado a un transporte de masa. Por lo tanto se habla de convección cuando al menos uno de los cuerpos involucrados en el intercambio calórico es un fluido.

En resumen, el intercambio de calor por convección se produce cuando un fluido a cierta temperatura barre una superficie con distinta temperatura, arrastrando una determinada cantidad de energía. Partiendo de la ley de enfriamiento de Newton es posible describir este flujo de calor como:

$$Q=h a (T_s -T_f), \text{ (Chamarro, 2005).} \quad (5)$$

Sea un fluido, con una temperatura T_f en su seno, en contacto con un sólido a temperatura T_s , a través de una superficie de contacto a . Por esta superficie se transmite un caudal de calor Q (kcal/h).

Se define el coeficiente individual de transmisión de calor h , (kcal/h m^2 °C), como:

$$h = \frac{C_p \rho v (T_i - T_f)}{T_m}, \text{ (Bozzo, 2011).} \quad (6)$$

dónde:

C_p = calor específico del producto (kcal/kgK)

ρ = densidad del aire (kg/m^3)

v = velocidad del aire (m/s)

T_i = temperatura inicial del producto (°C)

T_f = temperatura final del producto (°C)

T_m = temperatura media logarítmica (°C)

h = coeficiente convectivo (Kcal/h m^2 K)

La temperatura media logarítmica se calcula a partir de la ecuación

$$T_m = \frac{T_i - T_f}{\ln \frac{T_a - T_i}{T_a - T_f}}, \text{ (Bozzo, 2011).} \quad (7)$$

T_a = temperatura del aire de congelación (°C) (Bozzo, 2011).

Se puede distinguir entre convección natural y forzada. La convección natural es provocada por la diferencia de densidad del fluido debida a la diferencia de temperaturas, mientras que la forzada es provocada por factores externos que imprimen movimiento al fluido, como por ejemplo bombas y ventiladores. El orden de magnitud del coeficiente convectivo varía mucho. Para convección natural de aire va de alrededor de 2,000 Jm^2/K hasta 30,000 Jm^2/K aproximadamente, y para convección forzada superando los 30,000 Jm^2/K hasta alrededor de 300,000 Jm^2/K (Yarke, 2005).

1.2.5. Métodos de congelación.

No es posible describir todos los métodos de congelación que han aparecido en estos últimos 30 años. De manera más didáctica se sintetizan dichos métodos a continuación (Lage, 1989):

- i. Natural, esta tiene lugar cuando cualquier objeto alcanza una temperatura de congelación debido a las condiciones climáticas del sitio donde se localiza. Es decir, que si en un sitio en particular, las temperaturas ambientales se encuentran por debajo de los 0 °C, el contenido de agua de dicho alimento se solidificará pasado un tiempo.
- ii. Líquidos, frigorígenos y criogénicos. La aplicación de estos líquidos puede ser por inmersión o aspersión. Para los productos de forma irregular, tales como pescados y pollos, se obtiene una buena transferencia térmica congelando con un medio líquido. El líquido frío es, por ejemplo, una solución acuosa de sal, de azúcar, de alcohol o de otras sustancias no tóxicas como el nitrógeno o dióxido de carbono, estos últimos mejor conocidos como fluidos criogénicos. El producto es sumergido en dicho líquido o rociado con la solución para disminuir su temperatura hasta solidificar el agua contenida.
- iii. Por contacto, La congelación por contacto se da en equipos de placas, en las cuales circula en su interior un refrigerante a menor temperatura, el cual retira el calor sensible y latente del producto hasta congelarlo. Por lo general se utiliza en productos que no sobrepasan los 60 mm de espesor y que son mecánicamente resistentes.
- iv. Aire, La congelación por aire, se efectúa a una temperatura de -30 °C o menos, en lo cual se logran tiempos de congelación de productos de tamaño medio que va desde 3 horas hasta 3 días, dependiendo de la velocidad del aire empleado. La velocidad del aire se puede manipular con ayuda de ventiladores. Si la temperatura aumenta, los tiempos de congelación se duplican (*Alarcón, 1998*). En este apartado se explicará de forma más detallada la congelación por aire debido a que es punto fundamental en este estudio.

El aire es el método más ampliamente utilizado para la congelación de alimentos. En ciertos casos, los géneros de gran masa (tales como cuartos de res o grandes cajas de producto destinados a transformación ulterior) se congelan en las cámaras de circulación de aire por convección natural o forzada. Si la cámara no ha sido concebida para la congelación y equipada de refrigeradores y ventiladores adecuados, la congelación es muy lenta, con una calidad inferior para numerosos productos. En el caso de que la cámara sólo haya sido prevista para el almacenamiento, la potencia frigorífica es insuficiente para enfriar los productos; la temperatura del aire se eleva, si el producto a congelar no está cubierto, la escarcha se acumula rápidamente sobre los evaporadores, disminuyendo entonces la potencia, y haciéndose la situación todavía más crítica.

La congelación por aire forzado se efectúa en buenas condiciones en equipos especialmente concebidos: túneles, congeladores de correa, congeladores de lecho fluidizado, congeladores de apilado vertical o disposición en espiral, etc. (*IIF, 1990*).

La velocidad del aire varía de acuerdo con la clase y espesor del género, así como también según las ideas que sobre el embalaje del producto tenga el usuario, cuando se trata de paquetes congelados. Sin embargo, cuando se requiere una congelación rápida, es necesario circular un fuerte volumen de aire para obtener un aumento de temperatura lo más pequeño posible cuando el aire pasa sobre el producto. Las velocidades de aire empleadas van desde 2 a 16 m/s, y es difícil establecer cuál es la velocidad de más frecuente aplicación (*Alarcón, 1998*).

También el movimiento del aire ejerce influencia sobre la calidad y conservación del producto en la refrigeración, congelación y almacenamiento. Por lo que se refiere a las pérdidas de peso, la evaporación del agua tiene lugar más rápidamente con circulación de aire. Para el transporte de materia son válidas las mismas leyes que para el transporte de calor, por lo que en los procesos de refrigeración y congelación la mayor pérdida de sustancia por unidad de tiempo, con circulación de aire, queda más que suficientemente compensada por el más corto tiempo de refrigeración o congelación. Es útil, por ello, el empleo de altas velocidades de circulación de aire en el orden de los 10 m/s. (*Plank, 2005*).

Las carnes normalmente se congelan con aire frío. En los congeladores de aire forzado, se usa una temperatura del aire muy baja ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) y una velocidad de flujo de 800 m/min . Aun así se presenta el inconveniente de que la congelación es lenta, debido a la conductividad térmica del aire y el mal manejo de los productos durante el proceso (*Amerling, 2001*).

Una congelación más rápida se puede lograr mediante la reducción de la temperatura del aire o, en túneles de congelación, mediante el aumento de la velocidad del aire. Sin embargo, estas dos medidas tienen un efecto negativo significativo en la eficiencia. El consumo de energía aumenta en un 3% por cada grado centígrado por cual se reduce la temperatura ($1,75\%$ por cada grado Fahrenheit). Así mismo, la alimentación del ventilador generalmente contribuye a la carga de refrigeración, por lo que se tiene con ello una penalización más para la eficiencia del congelador. Existe por lo tanto un fuerte imperativo para disminuir la temperatura del aire y aumentar la velocidad del aire por tanto como sea posible.

Los congeladores de aire forzado son los más empleados en la industria de alimentos, ya que la gran mayoría de los productos alimenticios son de forma irregular y algunos se congelan una vez que ya se han envasado.

Entre las técnicas de congelación por aire se tienen:

- a) Cámaras de congelación. Son salas de almacenamiento en frío que se basan en la circulación del aire por convección natural y el movimiento del aire baja de los ventiladores del evaporador para que circule lentamente sobre el producto, lo que resulta en tiempos largos de congelación. Este sistema se utiliza a veces para productos como mantequilla, carne de res y pescado en almacenamiento, pero no dentro del procesado del alimento. El aire en la cámara debe circular a alta velocidad, entre 2 y 4 m/s , e incluso 6 m/s . La humedad relativa debe ser muy alta, de 90% o más (*López, 2004*).
- b) Túneles de congelación: el aire enfriado se hace circular por grandes ventiladores sobre el producto confinado en un espacio cerrado aislado. Las canales de animal están

soportadas por medio de ganchos suspendidos de un transportador o en bastidores diseñados especialmente. Las bandejas o espaciadores están dispuestos para proporcionar un espacio de aire entre cada capa de bandejas. El aire puede hacerse circular de manera paralela o contracorriente, en función del túnel de congelación. La mayoría de los túneles de congelación están dispuestos en celdas múltiples, de modo que cada uno se puede cargar con refrigeración externa. El producto puede ser congelado en bastidores o estibas. Cuando se utilizan estibas, los envases deben ser apilados en estantes o colocar tiras de madera entre uno y otro para que el aire pueda pasar fácilmente a través de los paquetes.

Dependiendo su operación hay varios tipos de túneles de congelación:

- a) Túnel por lotes: el producto se apila en estibas, o colgados en ganchos para el caso de canales de res. El túnel es cargado utilizando grúas, horquillas o montacargas y está equipado de grandes ventiladores que impulsan corrientes de aire frío a través del túnel. Estos ventiladores son activados una vez que se ha cargado completamente de producto el túnel y este se retira el producto cuando la congelación ha concluido. El congelador por ráfaga de aire, mejor conocido como “*blast freezer*” es probablemente el congelador de alimentos más antiguos y más frecuente. Generalmente, este tipo de congelador consisten en un recinto aislado y el serpentín del evaporador es por lo general una batería de aletas, un ventilador de alta presión (generalmente axial), y algunos deflectores dispuestas para dirigir el aire sobre el producto envasado a ser congelado. Los parámetros de diseño se suelen pedir de 8 a 15 m/s para la velocidad del aire sobre el producto, y la temperatura del aire de -20 a -40 °C (IIF, 1990).

Los congeladores por ráfaga de aire “*blast freezer*” son muy eficientes cuando la producción de una planta no sobrepasa de los 4,000 kg/h de producto envasado para la congelación y que además dichos envases no sean de grandes dimensiones, de esta manera no se necesitarán grandes tiempos de operación del sistema frigorífico. En la figura 5 se muestra un esquema simple de la configuración de un congelador por ráfaga de air “*blast freezer*” con el producto estibado en carros dentro del túnel y el flujo del aire dentro del congelador.

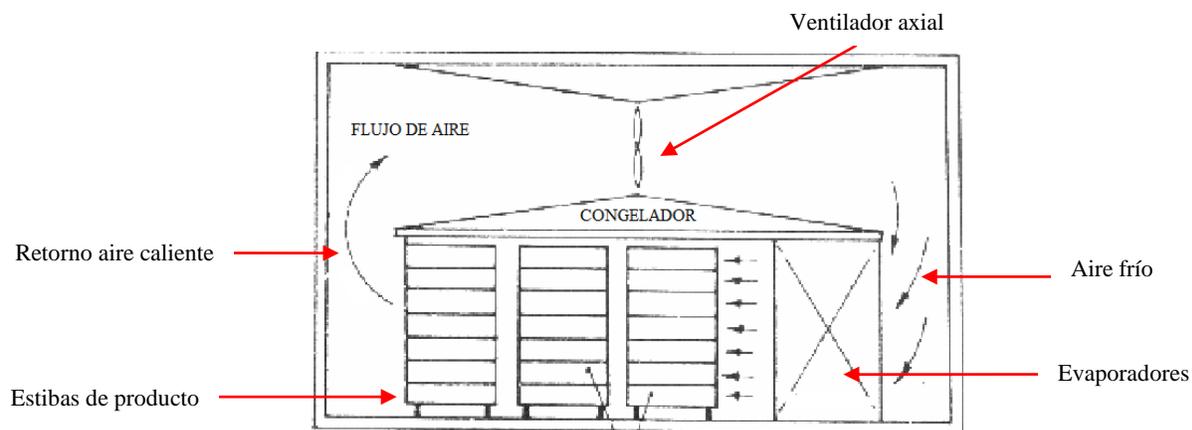


Figura 5. Esquema de congelador por ráfaga de aire “blast freezer” (GEA, 2012).

- b) Túnel mecanizado: los estantes de producto estibado están equipados con rodillos. Los bastidores por lo general son movidos en los carriles por un mecanismo de empuje, que por lo general es accionado hidráulicamente. Estos congeladores están diseñados para productos envasados o para canales. Una de las ventajas de estos equipos es que permiten una mejor circulación del aire sobre el producto, ya que se mueve a un ritmo constante a través del túnel, los costos laborales son reducidos debido a que la carga y descarga son mecanizadas (Dempsey, Bansal, 2011).

Se han desarrollado túneles de congelación para producto envasado en cajas de cartón conocidos como “carton freezer” que por su modo de operación se les denomina “VRT” (tiempo de retención variable) por sus siglas en inglés. Como su nombre lo indica, tienen la capacidad de congelar gran cantidad de productos envasados en cajas de cartón sin importar el tipo de contenido o su densidad, ya que mediante sistemas de “PLC” (lógica de control programable) mantienen dentro del túnel al producto el tiempo que sea necesario hasta que éste haya congelado completamente. Estos túneles están equipados con simples sistemas mecanizados que ayudan a la colocación de las cajas de cartón dentro de la estiba de producto correspondiente para asegurar que el tiempo de estancia dentro del túnel sea el adecuado.

Este tipo de congeladores cuentan con diversos niveles para estibar el producto a congelar y esto a su vez permite tener niveles tanto para enfriar como para congelar simultáneamente con ayuda del sistema VRT, el cual determina el tiempo de residencia de cada bloque de producto

envasado. En la figura 6 se observa un congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” visto de lado donde se aprecian distintos niveles en el mismo estante, la charola que sobresale de lado izquierdo de la imagen es la que se encarga de estibar el producto en el nivel correspondiente y es operada por un sistema mecánico controlado por micro-procesadores. Así mismo estos equipos cuentan con charolas mecánicas que retiran el producto congelado y lo llevan hasta un almacén para ser estibado ya sea mecánica o manualmente dependiendo de las necesidades del usuario.

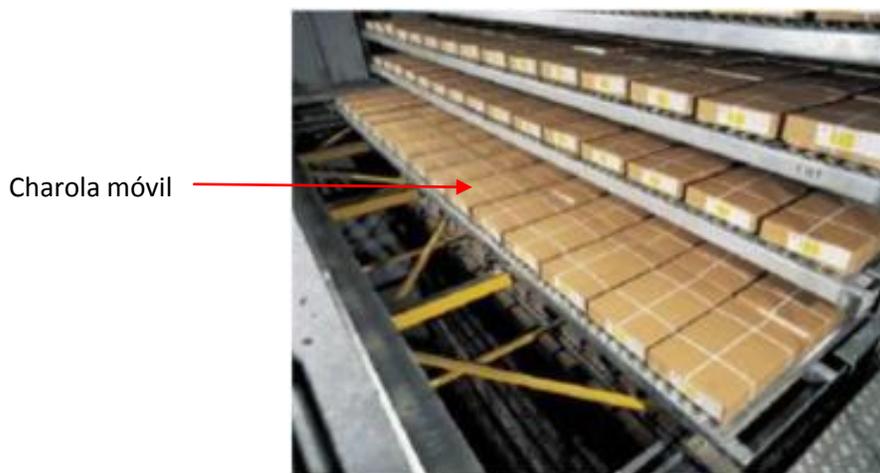


Figura 6. Vista lateral de congelador de cajas de cartón “*carton freezer*”, niveles de la estiba (GEA, 2012).

El “*carton freezer*” es aplicado comúnmente a productos cárnicos envasados en caja de cartón, los cuales entran a una temperatura de 5-10 °C y al finalizar el proceso de congelación tienen una temperatura en el centro térmico de -18 °C, en ciclos que van desde las 10 a 24 horas dependiendo del espesor y densidad del producto.

Es importante respetar conceptos básicos de diseño en estos congeladores, ya que si no se consideran los costos energéticos podrían elevarse y dejarían de ser eficientes. Dichos conceptos se enlistan a continuación:

- Para aprovechar al máximo el espacio disponible es necesario concebir el mecanismo en forma de cubo, ya que el producto a manejar puede tener grandes dimensiones y de esta forma se explota más el espacio.
- El manejo del producto dentro del congelador debe ser por mecanismos controlados con microprocesadores, así se evita al máximo la contaminación por la mano del hombre sobre el producto
- El flujo del producto dentro del congelador debe ser a contra flujo con respecto al aire que lo está congelando, de esta manera se incrementa el valor del coeficiente de transferencia.
- La orientación del producto envasado debe ser con el lado más angosto en forma paralela al flujo del aire, de esta manera se reduce la resistencia al flujo del aire y con ello disminuyen los caballos de fuerza (HP) requeridos en los ventiladores.
- El congelador debe ser diseñado para congelar el producto más tardado de congelar y a partir de ahí se programan los demás tiempos de retención (GEA, 2012).

En la figura 7 se muestra un congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” con sus principales componentes, es importante mencionar que siguiendo los lineamientos anteriores se aprecia que los evaporadores y ventiladores deben situarse por la misma cara del cubo por la cual sale el producto congelado para garantizar el régimen de contraflujo.

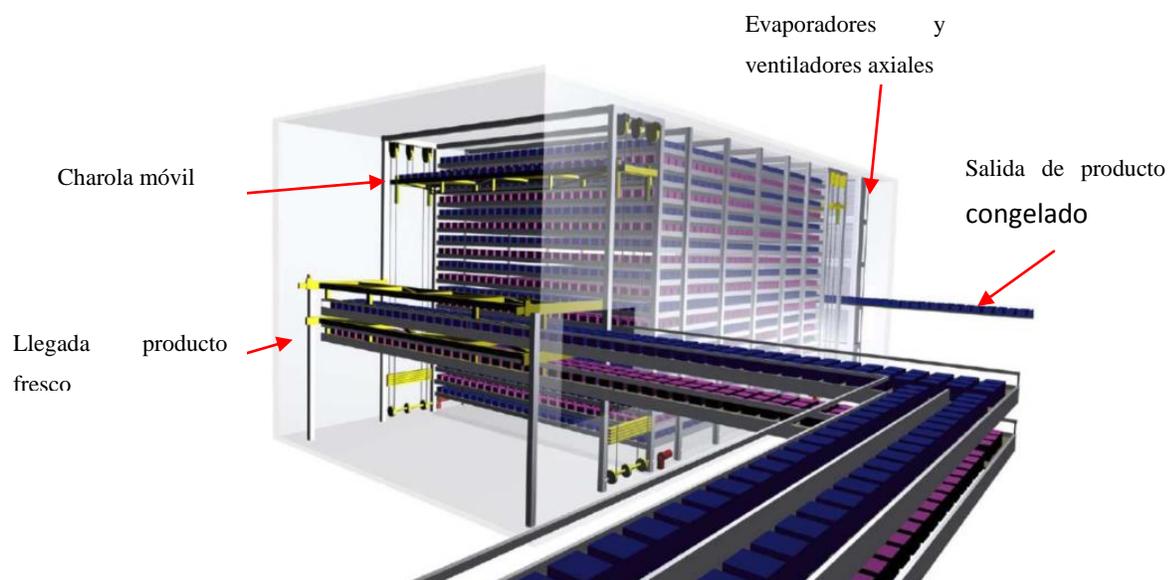


Figura 7. Vista completa de congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” (GEA, 2012).

1.3. Técnicas de congelación de aves.

Las aves domésticas: pollos, gallinas, gallos, pavos, patos, pintadas, ocas y sus derivados como; las pastas, harinas, concentrados, o la ave en piezas son frecuentemente conservadas por congelación.

Parece evidente que la alimentación, sobre todo en el mes previo al sacrificio, puede influir sobre la duración de la conservación del producto; así es que los alimentos que contienen ácidos grasos insaturados, incluso en débil cantidad, pueden acelerar la aparición del enranciamiento y reducir la estabilidad en el almacenamiento en estado congelado.

De una manera general, las aves con bajo contenido de grasa (pollos, gallinas, gallos y pintadas) son más estables en estado congelado que las aves más grasas, tales como patos y ocas.

En la congelación de aves, luego del sacrificio, eviscerado y refrigeración de las canales, éstas son envasadas en cajas de cartón perforadas o en hojas de polietileno encogibles y se hacen pasar por túneles de funcionamiento continuo en donde se produce el congelado del producto a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante la utilización de aire a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el tiempo de congelación es de aproximadamente 3-4 horas.

Para la congelación de canales de ave mediante inmersión en líquidos o aspersion directa sobre el producto empacado, se utilizan soluciones acuosas de sales de cloruro de sodio o calcio (NaCl , CaCl_2) o compuestos orgánicos como propilenglicol o alcohol etílico.

Las soluciones salinas, aunque proporcionan una transferencia de calor más efectiva a bajas temperaturas, son más corrosivas que los compuestos orgánicos. El tiempo de congelación mediante la inmersión en líquidos refrigerantes varía desde unos minutos hasta algunas horas.

Obviamente que, cualquiera que sea el líquido de inmersión, las canales de ave deben ser protegidas del contacto directo con el refrigerante. Para esto se utilizan envolturas de papel

metalizado y hojas plásticas encogibles, totalmente impermeables, las cuales deben adherirse completamente a la superficie de la canal con la finalidad de evitar la obstrucción del aire, lo cual retrasaría la congelación.

La congelación de las aves puede realizarse en dos etapas. En una primera fase se lleva a cabo la congelación mediante un proceso de inmersión en salmuera a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 20 a 40 minutos. A continuación se produce un lavado con aspersión de agua y subsiguiente secado de la superficie a temperatura ambiente. Finalmente se lleva a cabo la segunda etapa, la cual consiste en un post enfriamiento de las canales en túneles de congelación por corriente de aire forzado. Esta técnica de congelación mixta permite incrementar el rendimiento de los túneles de congelación existentes y permite obtener buenas propiedades organolépticas en el producto congelado, ya que en la primera etapa se congelan las capas superficiales de las aves, lo cual actúa como una capa protectora del producto (*Barreiro y Sandoval, 2006*).

En los congeladores de aire forzado clásicos, para activar la extracción de calor se dejan en general las cajas de cartón sin tapadera, fijándose por armazones o encoladuras después de la congelación. Algunas veces las tapaderas son puestas en su sitio antes de la congelación; se utilizan entonces cartones muy taladrados de agujeros para facilitar la circulación del aire interior. Más frecuentemente la congelación se efectúa en congeladores automáticos donde el aire a $-30/-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ es circulado a velocidad de 6 a 10 m/s.

En las grandes instalaciones podría intentarse la congelación de las aves individualmente; por ejemplo, sobre bandejas; este procedimiento no es práctico porque las aves, una vez endurecidas, son difíciles de disponer convenientemente en las cajas de cartón. Las piezas de aves se congelan generalmente de la misma manera que las aves enteras, colocando los paquetes en cajas de cartón.

En general, se puede decir que la velocidad de congelación no tiene más que una pequeña influencia sobre la calidad del producto final, salvo dos excepciones: el color blancuzco obtenido por la rápida congelación superficial y la coloración anormal de los huesos resultante de una congelación lenta (*IIF, 1990*).

1.4. Efectos de congelación en aves.

Los daños por frío en el producto es el resultado de la sublimación del hielo desde una superficie no protegida de la carne del ave. En las fases tempranas del proceso hay pequeñas manchas blancas o áreas grises. Este cambio de coloración puede desaparecer cuando el producto se descongela y la superficie se rehidrata. Si la quemadura del congelador es grave, no desaparecerá al descongelar.

Estos daños físicos no son nocivos, pero afectan la apariencia y calidad del producto. Cuando se presentan quemaduras de congelación también se suelen producir pérdidas de peso.

La carne blanca de aves es roja castaña si se congela lentamente y de color crema a blanca si es congelada rápidamente. Estos colores revierten al crema al descongelar. Los colores oscuros son habitualmente tomados como un signo de que la carne de ave ha sido descongelada y lentamente re congelada con malas prácticas.

Se sabe ahora que las pérdidas por exudación de la carne que está congelada y luego descongelada, y por tanto las pérdidas potenciales cuando la carne es cocida, están en gran parte afectadas por la velocidad de congelación. Cuando más rápido se congela la carne, más bajas son las pérdidas de peso por exudación (*Ranken, 2003*).

1.5. Envases empleados en congelación de cárnicos.

El envase es una materia que se interpone entre el medio refrigerante y el producto que se desea congelar ofrece por tanto una resistencia al paso del calor o a la penetración del frío, que viene a ser lo mismo.

Esta resistencia depende del coeficiente de conductividad del material de que se esté confeccionando el envase y de su espesor (*Ramírez, 2000*).

El envase de productos alimentarios juega un papel muy importante, no tanto en llamar la atención del consumidor como en la protección de la salud. Los envases evitan igualmente el desarrollo de reacciones químicas, bioquímicas y físicas, manteniendo el producto protegido y en condiciones higiénicas (*Cervera, 2003*).

Si el producto se envuelve en un embalaje impermeable al vapor de agua antes de la congelación, no se pierde ninguna humedad del producto envasado, pero cuando entre el producto y el envase se forma una bolsa de aire del orden de unos cuantos milímetros, el agua evaporada se deposita dentro del envase en forma de escarcha (*IIF, 1990*).

El envasado de la carne antes de su congelación es muy importante por diversas causas (*Madrid et al., 2003*):

- El envase protege a la carne de posibles pérdidas de humedad.
- El envase evita que se transmitan malos olores o sabores a la carne.
- El envase evita que el aire oxide a la carne.
- El envase evita infecciones bacterianas

El envase puede ser tan diverso como el producto que contiene y protege; debe soportar una temperatura baja y satisfacer las exigencias de los envases alimentarios:

- No contener sustancias tóxicas que puedan pasar al alimento.
- Ser químicamente inerte y estable. El material debe soportar $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y además tolerar temperaturas elevadas; por ejemplo, la de un horno o el agua hirviendo (para el recalentamiento del producto en su envoltorio); el material debe ser por tanto resistente en un amplio margen de temperaturas (el aparato de transporte puede ser enfriado con dióxido de carbono líquido o sólido, implicando una temperatura de $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- No deberá transferir al alimento malos sabores u olores. Ciertos alimentos son especialmente sensibles (los ricos en grasa, chocolate, las especias). El material de envase debe ser cuidadosamente probado (utilizando ensayos acelerados).

- Proteger contra la contaminación bacteriana y de la suciedad.
- Ser impermeables (o casi) al vapor de agua, al oxígeno y a las otras sustancias volátiles, así como a todo olor del ambiente. Numerosos productos están sujetos a deshidratación en el curso del almacenamiento en ausencia de un envoltorio bastante impermeable y estrechamente ajustado. Ciertos alimentos son particularmente sensibles (productos cárnicos y de confitería).
- Ser utilizable por máquinas automáticas de envasar. Es cada vez más importante que el envase se adapte a las cadenas de gran rendimiento; los cartones se prestan generalmente mejor que los sacos de polietileno a las empacadoras automáticas, aunque las técnicas para darles forma, plegado y precintado pueden ser utilizadas con los citados sacos.
- Ofrecer dimensiones y formas convenientes para la presentación en los expositores de venta. Los paquetes están concebidos para que las inscripciones que llevan sean fácilmente legibles donde se expongan al público; las dimensiones de los paquetes permiten generalmente que el volumen del mueble sea utilizado de la mejor manera posible, ofreciendo una gran superficie de presentación.
- Los contenedores de paquetes deben tener las dimensiones y formas que permitan el acoplamiento máximo en las estibas; dado el coste creciente de la mecanización y de la construcción de almacenes frigoríficos, conviene que estos contenedores faciliten las configuraciones más eficaces de estibado en las cámaras.
- Facilidad de apertura y de cierre. El interés de los dispositivos de fácil apertura de los paquetes es siempre un discutido problema. Aumentan de forma marginal el coste del material de envase y reducen la resistencia del paquete, aunque sean, de forma comprensible, apreciados por el consumidor. La utilización de paquetes que puedan cerrarse de nuevo y replegarse permite utilizar mejor el volumen de los compartimentos para alimentos congelados en los frigoríficos y refrigeradores caseros.

Además de las características indicadas, los envases para alimentos congelados deben ajustarse a otras consideraciones:

- Permitir la congelación rápida del contenido de los paquetes (exigencia que evidentemente no se aplica a los productos congelados individualmente).
- Resistir al agua, a los ácidos débiles y productos oleosos.
- No adherirse al contenido congelado.
- Ofrecer un cierto aislamiento térmico, importante en los sorbetes.
- Proteger contra la sublimación del hielo y la deshidratación; numerosos alimentos son sensibles a estos defectos y es particularmente difícil evitar la escarcha en las ventanas cuando los envases lo toleran.
- Adherirse estrechamente al producto para evitar al máximo las bolsas de aire que favorecen la sublimación en el almacenamiento.
- Ser tan opaco a la luz como sea posible.
- Ser reflectante, para reducir la penetración de calor por radiaciones en los expositores.
- Permitir una buena penetración de las micro-ondas para los casos en que la normalización de la temperatura o el recalentamiento se efectúe en un horno.

Son muy diversos los materiales que se utilizan para embalar los alimentos congelados: papel, cartón parafinado o plastificado, hojas de aluminio, moldes de aluminio, plásticos formados térmicamente y combinaciones laminadas de estos diversos materiales.

Los papeles y cartones son clasificados habitualmente en tres categorías según su espesor (inferior a 3 mm, de 3 a 11 mm, superior a 11 mm), todos se fabrican a partir de pulpa de madera, ya sea virgen o procedente de reciclaje de papeles viejos.

El papel y el cartón delgado ofrecen una superficie lisa que permite una impresión de calidad. Los sacos de papel, frecuentemente utilizados como envoltorio exterior, están compuestos por muchos pliegos de papel barato.

El cartón medio forma embalajes plegables o rígidos. Está frecuentemente construido por muchas capas de naturaleza diferente; un tipo muy utilizado está compuesto de una capa muy blanca (obtenida a partir de pulpa de madera escaldada) y de una capa gris conteniendo una

gran porción de papel de recuperación. Este material presenta un bello aspecto y es menos costoso que el cartón “totalmente blanco” de pasta virgen.

Los materiales gruesos se utilizan para las cajas de cartón. El material puede ser compacto, fabricado esencialmente a partir de papel de recuperación con una capa exterior resistente de papel kraft. Puede también estar constituido por un cartón ondulado en sándwich entre dos capas de papel kraft; se utilizan a veces “planchas” de gran resistencia formadas por dos o tres cartones ondulados, por ejemplo, para soportes de ángulo de las estibas.

Los cartones, como los plásticos, son laminados frecuentemente con ceras, plásticos o con hojas de aluminio (*IIF, 1990*).

Cuanto más finas y conductoras sean las materias constitutivas de los embalajes y más pegadas estén a los productos, evitando la formación de una capa intermedia de aire, menor será su influencia negativa sobre las condiciones de congelación.

A continuación se presenta una tabla con valores de conductividad térmica de algunos materiales empleados para envases:

Tabla 1. Resistencia térmica de algunos materiales de envase (*Ramírez, 2000*).

Material	k (J/mK)
Papel parafinado y encerado	0.0058
Celofán y polietileno	0.0046
Lámina de aluminio recubierta de polietileno	0.0174
Cartón parafinado plegado (0.54 mm de espesor) cubierto con papel de parafina	0.0203
Cajas de cartón purificadas abiertas de 1.5 mm de espesor	0.0203
Cajas de cartón purificadas abiertas con envoltura de polietileno	0.0494
Cajas de fibra ondulada 5 mm de espesor	0.1767

En términos generales, los costos por unidad son más altos cuanto más eficaz es la acción protectora del envase. Debido a que el artículo congelado es una mercancía cada vez más difundida y que el precio de su envase debe guardar una relación económica razonable con el

precio del propio producto, razones dinerarias inducen frecuentemente a utilizar materiales de envasado más baratos, pero que también es frecuente que resulten menos eficaces (*Gruda, 1986*).

1.6. Sistema de producción de frío en cascada.

Actualmente, la industria frigorífica está siendo testigo de importantes cambios debido al hecho de que los refrigerantes sintéticos, que tienen un impacto negativo sobre la capa de ozono o considerados responsables del calentamiento global, han sido prohibidos o están en el proceso de ser restringidos a corto plazo.

El amoníaco es un refrigerante antiguo de disponibilidad natural que se comenzó a utilizar a mitad de la década de 1800 en sistemas frigoríficos de compresión. Tiene excelentes propiedades termodinámicas y de transporte como refrigerante, pero trae consigo algunas limitaciones, tales como la toxicidad e inflamabilidad. En la actualidad, el amoníaco es el refrigerante natural más utilizado en sistemas frigoríficos de bajas temperaturas, pero cuando es utilizado en aplicaciones inferiores a los $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, los requisitos de desplazamiento volumétrico por parte del compresor son relativamente mayores y la presión de evaporación son tan bajas que podrían provocar infiltraciones de aire al sistema.

Para considerar que el amoníaco es inflamable se deben cumplir algunas condiciones:

- Límites de inflamabilidad en el aire seco a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Límite inferior: 150,000 ppm (9.2% en peso)
 - Límite superior: 302,000 ppm (20.1% en peso)
- La temperatura de ignición es de $630\text{ }^{\circ}\text{C}$. la llama se extingue cuando se retira la fuente de ignición (*Miranda, 2012*).

A principios del siglo pasado otra sustancia natural, dióxido de carbono (CO_2), fue utilizada como refrigerante. Este fue remplazado a mitad de la década de 1900 por refrigerantes artificiales que actualmente están prohibidos. En 2005 Pearson realizó una investigación con la finalidad de recomenzar el empleo de CO_2 como refrigerante, ya que ofrece alto potencial

cuando se usa en sistemas frigoríficos de muy bajas temperaturas, además de ser amigable con el ambiente, no es tóxico, no es explosivo, es de fácil disponibilidad y además es compatible con los aceites comúnmente usados en los sistemas frigoríficos (*Dopazo y Fernández, 2010*).

Como se mencionó anteriormente, cuando se emplean temperaturas de evaporación demasiado bajas ($-35\text{ }^{\circ}\text{C}$) en instalaciones que utilizan amoníaco (NH_3) se necesitan por consiguiente presiones de evaporación muy bajas que son perturbadoras para el funcionamiento de la instalación, dicha presión oscila alrededor de 0.06 bar (*Rapin, 1997*).

Cuando es necesario obtener temperaturas muy bajas en una instalación frigorífica podrían conseguirse teóricamente aumentando el número de etapas de compresión, haciendo que el fluido fuese recorriéndolas una tras otra desde la temperatura de evaporación más baja.

Este procedimiento supone que, a medida que va descendiendo la temperatura de evaporación, el volumen específico del gas aspirado aumenta rápidamente, es decir, se necesitan más metros cúbicos por kg de refrigerante y, por tanto, será necesario manejar mayores volúmenes, que en ocasiones pueden resultar excesivos.

Por otro lado, existe una limitación en la temperatura de evaporación más baja que puede conseguirse con cada refrigerante utilizado.

Por estos motivos, existe una limitación para utilizar máquinas de compresión por etapas y no hay más remedio que, en estos casos, recurrir a varias máquinas de compresión simple o por etapas utilizando fluidos diferentes y conectados en cascada (*Ramírez, 2000*).

El sistema en cascada se compone de dos sistemas de una sola etapa de compresión conectados por un intercambiador de calor (intercambiador de calor en cascada). El CO_2 se utiliza como refrigerante en la etapa de baja temperatura y el NH_3 es el refrigerante para la etapa de alta temperatura (*Dopazo y Fernández, 2010*).

En la etapa de baja temperatura el CO₂ pasa por un evaporador a presión alrededor de 5.1 bar, de donde es succionado por el compresor que lo expulsa a una presión de condensación y lo envía a un intercambiador de calor en cascada. En el intercambiador de calor en cascada entra en contacto indirecto con el amoníaco (NH₃) quien absorbe el calor sensible y latente del vapor de CO₂. Una vez que el amoníaco ha absorbido el calor latente del CO₂, este va a una válvula de expansión ya en forma líquida en donde baja su presión de condensación hasta la presión de evaporación y posteriormente entra de nuevo al evaporador.

Mientras tanto, en el intercambiador de calor en cascada, en donde el amoníaco absorbió los calores del CO₂, el amoníaco se transforma en vapor y es succionado por un compresor que lo expulsa a una presión de condensación y lo envía a un condensador convencional, que puede operar con corrientes de agua, aire o combinados. En el condensador del lado de alta temperatura se retira el calor absorbido por el NH₃ tanto en la compresión como en el intercambiador de calor en cascada.

Ya que el calor ha sido retirado del NH₃, es enviado a una válvula de expansión donde la presión es bajada hasta una presión de evaporación. Posteriormente entra al intercambiador en cascada para reiniciar el ciclo de producción de frío en cascada (*Torrella, 1996*).

El sistema en cascada posee algunas ventajas sobre los sistemas de dos etapas que utilizan un solo refrigerante, ya que elimina el vapor generado por la expansión del refrigerante en estado líquido, a dicho vapor se le conoce más comúnmente como “*flash gas*”, no requiere altos desplazamientos volumétricos por parte del compresor, por lo que se requieren compresores de menor tamaño. Por otro lado, se ahorra espacio en la instalación ya que el condensador del refrigerante de baja temperatura, comparte un intercambiador con el evaporador del refrigerante de alta temperatura (*Jhonson Controls, 2012*).

A continuación se presenta un diagrama simple de una instalación en cascada con los componentes básicos:

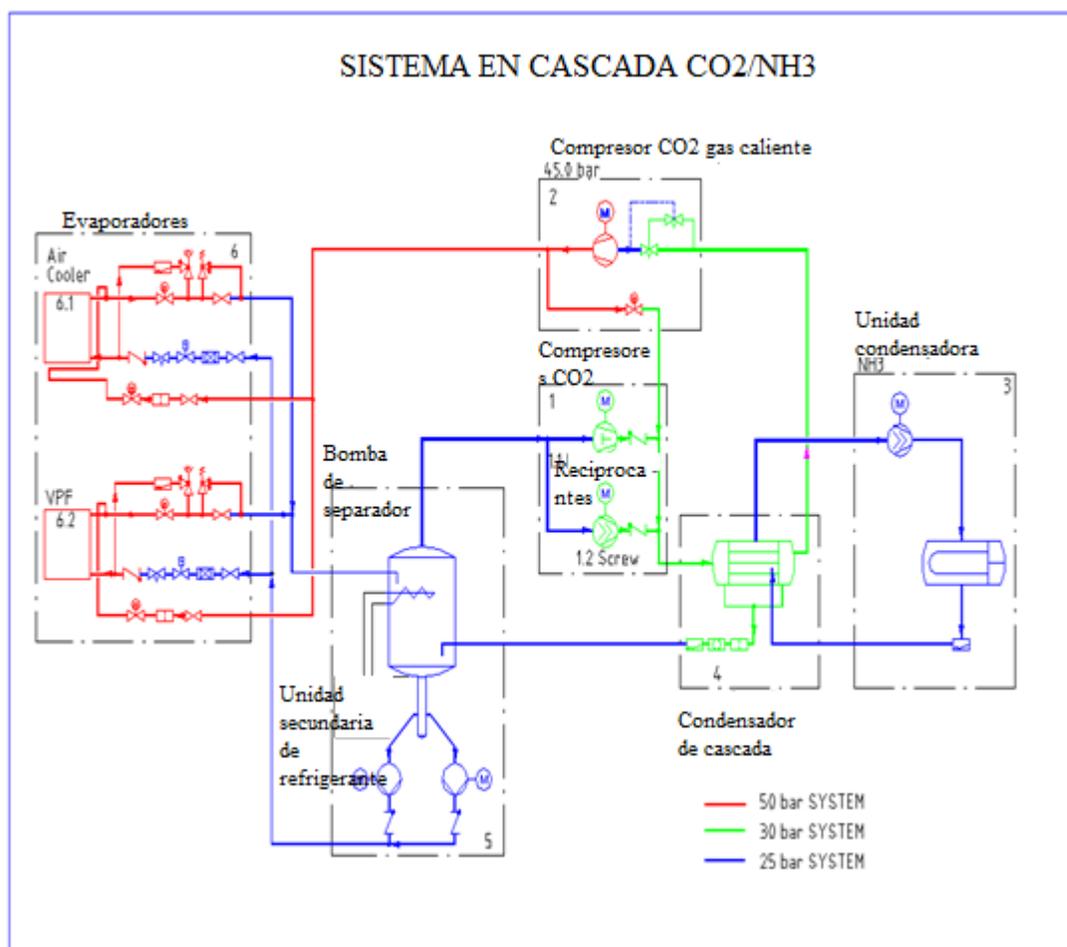


Figura 8. Sistema de producción de frío en cascada (Johnson Controls, 2012).

Otras notables ventajas del uso de CO₂ en instalaciones de producción de frío son:

- c) Es una sustancia natural que se encuentra en una porción volumétrica de 0.04 % en el aire.
- d) Es un refrigerante clasificado como no tóxico y no inflamable.
- e) Los refrigerantes CFC (cloro fluor carbonados) están prohibidos por el protocolo de Kioto por su alto ODP (destrucción potencial del ozono). Sin embargo en muchos países se continúan empleando, debido a que el proceso para realizar el cambio de un refrigerante a otro es tardado por el costo elevado de inversión que se requiere.
- f) Los HFC (hidro fluor carbonados) tienen un ODP cero pero un alto GWP (calentamiento global potencial).
- g) El NH₃ y el CO₂ no tienen problemas con ODP y GWP.

- h) Tras una fuga no contamina el producto.
- i) Algunos circuitos en cascada tienen un mejor COP (coeficiente de rendimiento) que una instalación de NH₃ por sí solo.
- j) El mismo compresor empleado en la instalación puede brindar hasta 8 veces más capacidad.
- k) Los diámetros de la tubería de aspiración son menores.
- l) Los procesos de enfriamiento y congelación son más eficientes.
- m) Representa un bajo costo de refrigerante.

A continuación se presenta una tabla que expone las ventajas de los diversos refrigerantes empleados en la industria y que justifica el uso de circuitos en cascada, principalmente de NH₃/CO₂, pues son los más amigables con el ambiente.

Tabla 2. Propiedades de los refrigerantes (GEA, 2012).

Refrigerante	R12	R22	R404A	R507	NH ₃	CO ₂
Tipo sustancia	CFC	HCFC	HFC	HFC	Natural	Natural
Potencial Destrucción Ozono (ODP)	1	0,055	0	0	0	0
Potencial calentamiento global (GWP)	8100	1500	3260	3300	0	1
Punto crítico	bar	41,15	49,36	37,31	113	73.6
	°C	112	96,2	72,07	132.4	31.1
Punto triple	bar	0,00010	0,000024	0,028	0,03	0.06
	°C	-157	-150,00	-100	-100	-77.7
Explosivo o inflamable	NO	NO	NO	NO	NO(*)	NO
Tóxico	NO	NO	NO	NO	SI	NO

(*) en concentraciones bajas

En una instalación de NH₃ con doble etapa de compresión se alcanzan presiones de evaporación de hasta 0.5 bar y temperaturas de -45 °C como se muestra en la figura 9.

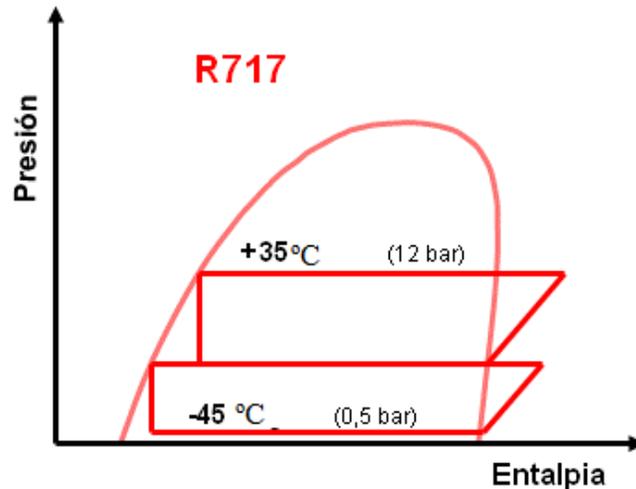


Figura 9. Diagrama entálpico NH₃ doble etapa (GEA, 2012).

En la figura anterior se representa gráficamente el problema explicado en párrafos anteriores con respecto a las bajas presiones de evaporación asociadas a altos desplazamientos volumétricos de refrigerante por los compresores. Ahora bien, por otro lado se presenta en la figura 10 un diagrama entálpico de una instalación en cascada NH₃/CO₂

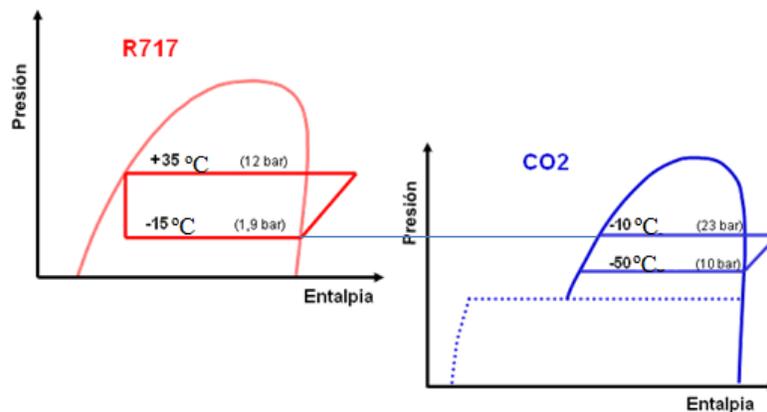


Figura 10. Diagrama entálpico NH₃/CO₂ (GEA, 2012).

En la figura anterior se aprecia una presión de evaporación de 10 bar en el ciclo de CO₂ y una temperatura de -50 °C, y en el ciclo de NH₃ de 1,9 bar de presión de evaporación y una temperatura de -15 °C, lo que se traduce en menores volúmenes de refrigerante y compresores más pequeños y procesos de enfriamiento mucho más eficientes.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO

2.1. Definición del problema y objetivos

La calidad final de productos congelados, como la carne de gallina, depende en gran medida de la velocidad de congelación con que fue tratada. Dicha velocidad de congelación depende principalmente, entre otras variables, de las condiciones de operación tanto del sistema de producción de frío y del equipo, así como de la manipulación y presentación del producto.

Recientemente se han desarrollado nuevas alternativas de diseño de instalaciones frigoríficas, con la finalidad de alcanzar temperaturas más bajas con respecto a las tecnologías existentes y con ello aumentar la velocidad de congelación de los productos. Aun así, se presenta el inconveniente de que la congelación es lenta, debido a la baja capacidad calórica y coeficiente convectivo del aire. Es por tal motivo que resulta de gran importancia efectuar un estudio de los parámetros que afectan la velocidad de congelación, para poder ajustarlos y conseguir menores tiempos de congelación, así como menores costos de operación.

OBJETIVO GENERAL: Evaluar la efectividad del proceso de congelación de carne de gallina, utilizando una instalación frigorífica en cascada que garantice una velocidad de congelación aceptable del producto.

OBJETIVO PARTICULAR 1: Determinar la capacidad de producción de frío de la instalación aplicando un análisis termodinámico de acuerdo a las condiciones de trabajo.

OBJETIVO PARTICULAR 2: Determinar la velocidad de congelación, a través de un análisis de las condiciones de operación y manejo de producto dentro del equipo en el proceso de congelación.

OBJETIVO PARTICULAR 3: Estimar la efectividad del sistema de congelación relacionando la capacidad de producción de frío con la velocidad de congelación obtenida en el proceso.

OBJETIVO PARTICULAR 4: Contrastar las condiciones operativas y efectividad entre las técnicas de congelación a chorro de aire por lote y la congelación continua en cajas de cartón, ambas aplicadas a pasta de carne de gallina envasada.

2.2. Desarrollo de actividades de investigación en campo

2.2.1. Factores de estudio

El estudio de la problemática expuesta en la introducción, se realiza mediante una investigación de campo, en una planta productora de carne de gallina (*Gallus*) envasada, la cual se encuentra en operación y que por tal motivo no es posible modificar ninguna condición de operación, simplemente el estudio se limita a recopilar datos operacionales y posteriormente efectuar un análisis pertinente del fenómeno de estudio.

El estudio de la problemática se efectúa en tres etapas que a continuación se mencionan en el mismo orden que son desarrolladas:

a) Etapa 1: Caracterización de la instalación frigorífica.

Consiste en recopilar datos operacionales de los equipos involucrados en la producción de frío dentro de la instalación en cascada, así como; la elaboración del diagrama de flujo completo de toda la instalación incluyendo las demás aplicaciones de frío. Lo que se pretende en esta etapa de la investigación de campo es evaluar la capacidad que presenta la instalación para producir frío y cuáles son sus limitantes.

Para la recopilación de estos datos es necesario realizar el levantamiento en sitio de la instalación y registrar los siguientes puntos:

- Aplicaciones involucradas en la instalación frigorífica.
- Método de alimentación a evaporadores en cada aplicación.
- Numero de etapas de enfriamiento.
- Tipo de compresores involucrados en cada etapa.
- Régimen de operación de la instalación.
- Tipo de interenfriador.
- Tipo de condensador.
- Tipo de enfriamiento de aceite de los compresores.

Con los datos obtenidos del levantamiento en sitio se elabora un diagrama de flujo con todas las características de la instalación frigorífica.

b) Etapa 2: Caracterización del congelador.

Esta etapa consiste en la medición de las características físicas y operativas del congelador, tales como: dimensiones del congelador, número y características de evaporadores, distribución y manejo del producto, cantidad de producto a congelar, temperatura, velocidad y distribución del aire.

La finalidad de esta etapa de investigación es determinar las capacidades y limitaciones del equipo de congelación, así como; los criterios que se usan en la planta de producción en cuanto al manejo y distribución del producto en el proceso de congelación, ya que generalmente, las deficiencias que existen en la congelación de productos envasados por medio de corrientes de aire suceden por una mala distribución y orientación de los productos al momento del proceso mismo de congelación.

Para la medición de las características dentro del congelador se han propuesto diversos instrumentos y técnicas que a continuación de mencionan:

- Distribución del producto: Se elabora un esquema del congelador, considerando las dimensiones internas del mismo, la distribución del producto y espacios

entre los productos con el fin de ubicar los puntos donde son medidas las propiedades del aire de congelación.

- Medición de temperatura del medio: se emplea un termómetro digital con capacidad de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se toman lecturas de temperatura del aire en el sitio donde se coloque el producto dentro del congelador, procurando registrar las temperaturas en el área del producto más próxima a los evaporadores, ya que es ahí donde el aire es más frío.
- Medición de la velocidad y flujo del aire de congelación: en los mismos puntos donde se tomó la temperatura se registran la velocidad y flujo de aire con la ayuda de un anemómetro.
- Área del producto más expuesta al aire frío: se calcula el área total de la cara del producto en donde el aire más frío choca y el área libre de producto por donde circula el aire frío, esto con la finalidad de conocer la cantidad de aire que se hace circular a través de cada túnel.

c) Etapa 3: Análisis del proceso de congelación.

En esta última etapa del trabajo de investigación en campo se pretende estudiar el proceso de congelación mediante la medición de los parámetros involucrados.

Los valores obtenidos son integrados a las ecuaciones pertinentes para el cálculo de tiempos y velocidades de congelación, y de manera paralela se mide el tiempo real que tarda el proceso y estos valores se comparan para determinar si la congelación es eficiente o presenta deficiencias.

A continuación se enuncian las técnicas o instrumentos que se emplean para la medición de los parámetros involucrados en la congelación:

- Medición de tiempo de residencia del producto: se emplea un cronómetro digital, comenzando el conteo al momento que comienza a funcionar el congelador con el producto dentro y terminando hasta que ese producto es retirado del congelador.
- Medición de temperatura del producto: se utilizan medidores digitales de temperaturas, que registran el cambio de la misma cada 5 minutos.
Se considera como temperatura de congelación a la temperatura mínima constante que alcanza el centro geométrico del producto.
- Medición de la cantidad de producto: se determina matemáticamente, multiplicando el número de productos envasados por el peso promedio de cada producto, mismo que se determina con una balanza o en su defecto ese dato lo proporciona el productor.
- Medición del espesor del envase: se considera el espesor estándar especificado por el fabricante del envase empleado para envasar el producto.

Para la medición de los parámetros mencionados es necesario obtener los siguientes datos:

- i) Espesor vertical del producto envasado.
- ii) Área de transferencia de calor (cara del envase más expuesta a la ráfaga de aire).
- iii) Calor específico del producto.
- iv) Peso del producto envasado.
- v) Temperatura del producto a la entrada al congelador.
- vi) Temperatura final del producto después del ciclo de congelación.
- vii) Temperatura del aire dentro del congelador.
- viii) Temperatura media logarítmica.

Estos parámetros son necesarios para realizar la estimación del tiempo de congelación de acuerdo a las condiciones reales del proceso, posteriormente se compara con el tiempo real y el teórico para determinar la eficiencia del proceso.

2.2.2. Secuencia de cálculo

Los parámetros de estudio son principalmente tres: el tiempo de congelación, velocidad de congelación y flujo de calor.

Para el estudio del tiempo de congelación se toman en cuenta tres distintos tiempos: el tiempo teórico que se obtiene de datos bibliográficos, el tiempo calculado que se obtiene mediante ecuaciones que involucren variables medibles dentro del congelador mismas que son obtenidas en la tercera parte de las actividades de investigación y por último el tiempo real de congelación que es medido con ayuda de termopares digitales colocados en el centro térmico del producto durante el proceso de congelación.

El tiempo calculado es determinado mediante la ecuación 2 revisada en el capítulo 1.2.3. y se obtiene el resultado en horas:

$$t = \left(\frac{\lambda \rho}{\Delta T} \right) \left(\frac{ND}{h} + \frac{ND^2}{K} \right), \text{ (Sears y Salinger, 2002.)}$$

Dónde la densidad ρ se calcula mediante la ecuación 8 y su resultado es en kg/m^3 :

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ (Bramon et al., 2003).} \quad (8)$$

El coeficiente convectivo lo obtenemos a partir de la ecuación 6 revisada en el capítulo 1.2.4.:

$$h = \frac{Cp \rho v (Ti - Tf)}{Tm}, \text{ (Bozzo, 2011).}$$

Dónde Tm es la temperatura logarítmica y se calcula mediante la ecuación 7 revisada en el capítulo 1.2.4.:

$$Tm = \frac{Ti - Tf}{\ln \frac{Ta - Ti}{Ta - Tf}}, \text{ (Bozzo, 2011).}$$

Y Cp se refiere al calor específico del producto, el cual se calcula mediante la ecuación 9 y el resultado está dado por las unidades kJ/kgK :

$$Cp = 0.8X_{H_2O} + 0.2, \text{ (Seese y Daub, 2005).} \quad (9)$$

Donde X_{H_2O} se refiere a la fracción de contenido de agua del producto.

De la ecuación 7 se tiene que T_a es la temperatura del aire, T_i es la temperatura inicial del producto al entrar al congelador y T_f es la temperatura final al término del proceso de congelación.

El coeficiente N está dado por el mismo Plank donde se tiene que para una placa equivale a 2, para un cilindro a 4 y para una esfera a 6.

El valor de la conductividad térmica está dada por el fabricante y para este caso en específico el material es cartón corrugado y parafinado de 5.4 mm de espesor con una conductividad térmica de $0.0203 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$.

Para el cálculo de la velocidad de congelación se utiliza la ecuación 2 y el resultado es en $^\circ\text{C}/\text{h}$:

$$FR = \frac{T_f - T_i}{\Delta t}, \text{ (Olivera y Salvadori, 2008).}$$

Donde Δt es el tiempo que dura el proceso de congelación, T_f y T_i son las temperaturas final e inicial del producto respectivamente.

Para determinar el flujo de calor se utiliza la ecuación 5:

$$Q = h a (T_s - T_f), \text{ (Chamarro, 2005).}$$

Con el cálculo de estas variables será posible determinar la eficiencia del proceso de congelación en la planta.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

La ejecución de la parte práctica de la investigación en campo se llevó a cabo en una planta productora de aves de nombre “Procesadora de Aves Tapa S. A. de C. V. (PATE)”, con dirección en Potrero Blanco No. 100, San José de Gracia, Tepatitlán, Jalisco.

En esta planta se producen 15 subproductos diferentes a partir de la gallina viva, mismos que son comercializados dentro y fuera de la República Mexicana. Tales productos son: canal entera eviscerada y desplumada, pierna, pata, pechuga, ala, cresta, pescuezo, pasta de pechuga congelada, pasta salada, harinas para ganado, grasa, grasa refinada, muslo, piel y chicharrón (residuos de la grasa refinada).

3.1. Caracterización de la instalación frigorífica

Con los datos obtenidos del funcionamiento de la instalación frigorífica se elaboró un diagrama de flujo que se presenta en la figura 11 y se obtuvo información de los equipos.

La instalación frigorífica de la empresa PATE se encuentra dividida en dos etapas de compresión para mantener diferentes temperaturas en diferentes áreas de la planta.

Las diferentes áreas de la planta se encuentran a diferentes temperaturas dependiendo el proceso que en ella se desarrolle, tal como se menciona a continuación:

- cámara de deshuese, sala de pastas, sala de frescos y cámara de preparación de estibas que se encuentran a una temperatura de entre 7 y 9 °C.
- almacén de producto congelado que se encuentra a -25 °C.
- antecámara de congelación se encuentra a -5 °C.
- cámara de congelación de CO₂ se encuentra a -45 °C

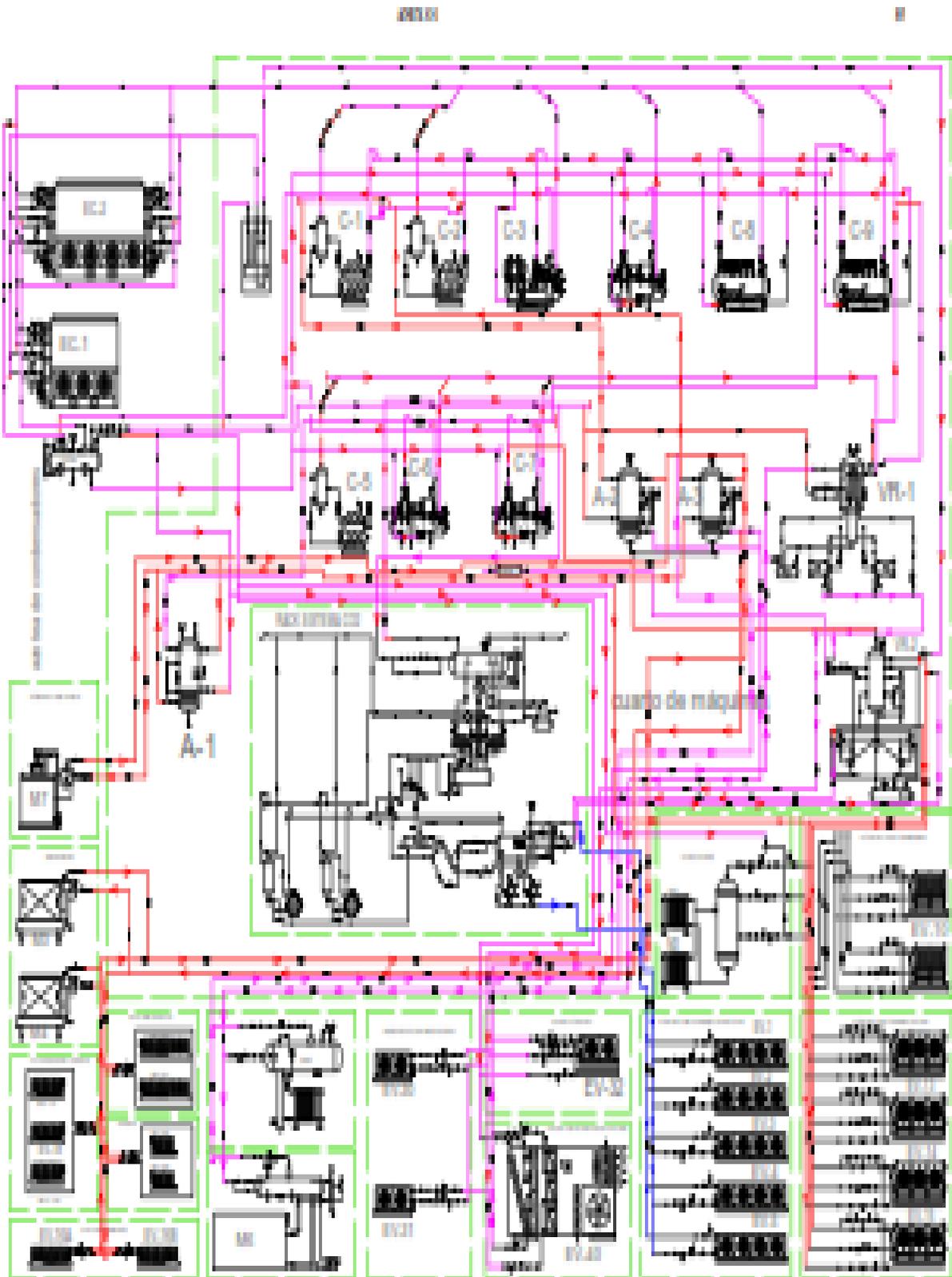


Figura 11. Diagrama de flujo de la instalación frigorífica en cascada CO_2/NH_3 .

La figura 11 se observa el diagrama de la instalación frigorífica. Como se mencionó anteriormente la instalación tiene 2 etapas de compresión en las líneas de amoníaco, sin embargo existe otra etapa de compresión que pertenece al paquete de CO₂ la cual es la más importante para el presente estudio ya que de esta depende la temperatura del aire en la cámara de congelación por ráfaga.

La primera etapa de compresión de amoníaco se compone de 3 compresores de los cuales C-6 y C-7 son de tornillo y tienen una capacidad de 223 toneladas de refrigeración operando a una presión de succión de 9.0 psig, mientras que el C-5 es un compresor recíprocante con capacidad de 82 toneladas de refrigeración operando a 9.0 psig que corresponde a -23 °C de evaporación en la fábrica de hielo (M-7), el paquete de CO₂ y el recirculador vertical (VR-2), el cual recibe amoníaco de los evaporadores de la cámara antigua de congelación.



Figura 12. Compresor de tornillo de la primera etapa de compresión.

El paquete de CO₂ abastece exclusivamente a los evaporadores de la ráfaga de congelación (EV-1 al EV-5) los cuales reciben CO₂ en estado líquido a una temperatura de evaporación de -50 °C, la cual brinda temperaturas de aire en la cámara de congelación de hasta -40 °C.



Figura 13. Paquete de producción de frío mediante CO₂.

El paquete de CO₂ cuenta con 2 compresores recíprocos (C-A y C-B) que succionan el vapor a -40 °C y lo envían a 2 intercambiadores de placas a -19 °C en donde se lleva a cabo la condensación del CO₂ en estado de vapor empleando NH₃ a una presión de 9.0 psig correspondiente a -23 °C. El amoníaco evaporado pasa a los compresores C-5, C-6 y C-7 en donde es descargado hacia el recirculador VR-1.

Al recirculador VR-1 llega la descarga de los compresores de primera etapa, al igual que vapor a alta presión proveniente del recipiente HPRL y vapor proveniente del retorno del evaporador de la 32 de la antecámara y de ahí parte a la línea de succión de los compresores de segunda etapa.

En el intercambiador A-1 entra amoníaco líquido a alta presión proveniente del recipiente HPRL y es enviado a la fábrica de hielo M-7 a través de un serpentín de sub enfriamiento.

El intercambiador A-2 recibe amoníaco líquido del recipiente HPRL a través de un serpentín de sub-enfriado y una parte es enviada a los enfriadores de placas M-5 y M-6. El retorno del amoníaco en forma de vapor es regresado a los intercambiadores A-2 y A-3 por fuera del serpentín y es enviado a la fábrica de hielo.

La otra parte del amoníaco líquido proveniente del intercambiador A-2 es enviada a través de un serpentín de sub-enfriamiento dentro del intercambiador A-3 y va dirigida a la fábrica de hielo junto con el líquido del intercambiador A-1. El retorno es dirigido a los intercambiadores A-2 y A-3 por fuera del serpentín para ser succionado hacia los compresores de la segunda etapa.

Los evaporadores de la sala de producto fresco, la cámara de preparación de estibas, la sala de deshuese y despiece, la sala de pastas, la cámara de hielo, los enfriadores de placas del área de proceso y los enfriadores M5 y M6 descargan el vapor y lo envían a los intercambiadores A-2 y A-3.



Figura 14. Recirculador vertical de amoníaco.

El recirculador VR-2 provee de amoníaco líquido a los evaporadores de la antigua cámara de congelación y envía una parte a ser sub-enfriada en un serpentín dentro de la unidad recirculadora horizontal ubicada en el paquete de CO₂.



Figura 15. Unidad recirculadora horizontal, sistema por bombas.



Figura 16. Bombas empleadas para la recirculación del amoníaco.



Figura 17. Compresores del paquete de CO₂.

La segunda etapa de compresión se compone de cuatro compresores de tornillo. De los cuales C-8 y C-9 tienen una capacidad de 436 toneladas de refrigeración, C-4 tiene capacidad de 422 toneladas de refrigeración y C-3 tiene capacidad para 180 toneladas de refrigeración, todos operan a una presión de succión de 39.0 psig correspondiente a una temperatura de -3 °C. Así mismo la segunda etapa de compresión cuenta con dos compresores recíprocos C-1 y C-2 ambos con capacidad de 73 toneladas de refrigeración y operan a presión de 39.0 psig en la succión de vapor.



Figura 18. Compresor de tornillo segunda etapa.

La línea de succión de los compresores de segunda etapa recibe amoníaco principalmente de la unidad recirculadora VR-1, de una línea de bypass proveniente de los compresores de primera etapa y los compresores recíprocos en particular reciben una línea de amoníaco proveniente de los intercambiadores A-2 y A-3. Posteriormente los compresores descargan el vapor sobrecalentado a dos condensadores evaporativos EC-1 con capacidad de rechazo de calor de 506 toneladas de refrigeración a 32.2 °C y EC-2 con capacidad de rechazo de calor de 659 toneladas de refrigeración a 32.2 °C.

3.2. Caracterización del congelador.

Para la caracterización del congelador primero se elaboró un diagrama de la distribución y manejo del producto dentro del congelador y así se ubicaron los puntos donde se midieron las propiedades del aire.

En la figura 19 se presenta una vista del interior de la cámara de congelación donde se aprecia la distribución de los doce túneles aun sin producto.



Figura 19. Vista del congelador por ráfaga de aire “blast freezer” con los túneles vacíos.

En la figura 20 se muestra una vista dentro del congelador donde se observa que el producto envasado es estibado en carros de estructura metálica, mismos que son introducidos en túneles con capacidad para seis carros completamente abastecidos con el producto. El congelador se

divide en 12 túneles y le da servicio una instalación frigorífica en cascada de CO_2/NH_3 que opera en un rango de $-37\text{ }^\circ\text{C}$ a $-45\text{ }^\circ\text{C}$. Cada túnel está equipado con cuatro ventiladores en la cara del fondo para generar la ráfaga de aire frío. En cada túnel se introducen 3 carros cargados con producto en la parte inferior y otros tres en la parte superior. Así mismo en la parte superior de los túneles se encuentran los evaporadores, los cuales cuentan con una guarda que direcciona el aire frío hacia la entrada de cada túnel.



Figura 20. Vista de un túnel de congelación mientras es abastecido con producto envasado.



Figura 21. Ventiladores generadores de la ráfaga de aire frío.



Figura 22. Evaporadores sobre los túneles de congelación.

Cada carro tiene tres columnas de cajas llenas de producto a lo largo, dos columnas a lo ancho y diez filas de abajo hacia arriba, lo que da un total de 60 cajas con 25 kg de producto. De esta manera por cada carro se tienen 1,500 kg y por cada túnel 9,000 kg de producto en un

volumen de aproximadamente 85 m^3 por cada túnel. De manera que si el congelador se llena a la máxima capacidad se tendrá 108,000 kg de producto a congelar, aunque cabe señalar que los primeros tres túneles se utilizaban como almacén y los nueve restantes eran operados de forma separada, es decir, conforme a la producción de la planta se iban llenando los túneles y esto hacía que los evaporadores y ventiladores de la cámara de congelación se encendieran en tiempos distintos y la cámara no operaba a su máxima capacidad.

La figura 23 muestra uno de los carros cargados con producto envasado con los espacios donde se midió el área libre por donde circula el aire y las dimensiones de la estiba:

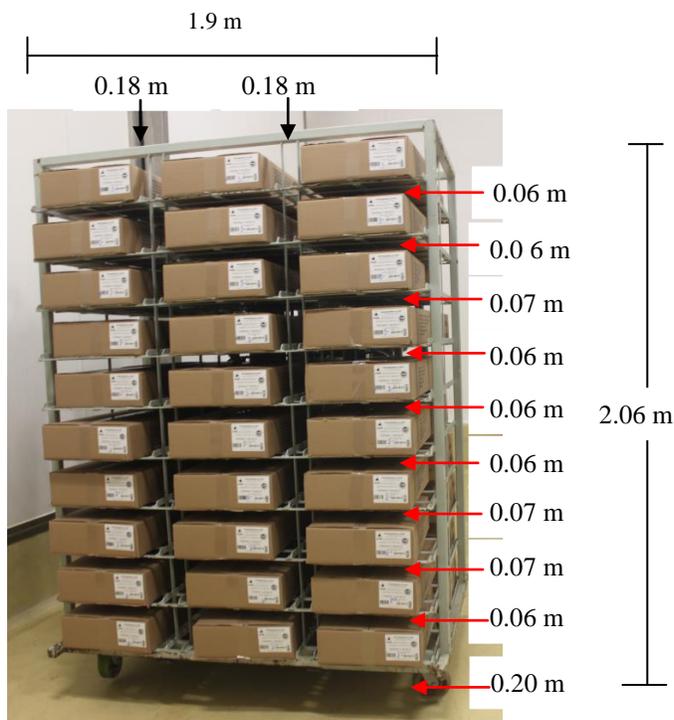


Figura 23. Estante cargado con producto envasado, espacios entre envases.

Con las dimensiones obtenidas de los espacios entre los productos por donde circula el aire frío se hicieron los cálculos pertinentes para obtener el total del área de producto expuesta a la ráfaga de aire, los resultados se presentan en la tabla 3. Es necesario mencionar que siguiendo con las recomendaciones de diseño para la construcción de túneles de congelación el producto es orientado hacia los ventiladores con la cara más angosta de la placa para disminuir la resistencia al flujo del aire y con ello minimizar la penalización de la carga térmica

correspondiente a los hp de ventiladores, por tal razón no es posible incrementar el área de contacto.

Tabla 3. Áreas de la estiba dentro del túnel.

ÁREA TOTAL (m ²)	ÁREA DE CONTACTO (m ²)	ÁREA LIBRE (m ²)
3.914	1.9082	2.0058

En la tabla anterior se presenta un área total de 3.914 m², de los cuales solamente 1.9082 m² choca directamente con la columna de productos que se encuentran más próximos a la salida del estante, el resto de los productos que están más adentrados en el túnel reciben el aire de forma que fluye en paralelo a la superficie del empaque y por esa razón tarda más tiempo en congelar que los productos que están en las orillas de las estibas.

Para la medición de propiedades del aire como velocidad, temperatura y flujo se utilizó un anemómetro de hilo caliente como el que se muestra en la siguiente figura:



Figura 24. Anemómetro empleado para la medición de propiedades del aire.

Tabla 4. Flujos volumétricos del aire dentro del túnel.

FLUJO TOTAL (m ³)	FLUJO DE CONTACTO DIRECTO (m ³)	FLUJO DENTRO DE LA ESTIBA (m ³)
26.2903	13.4729	12.8173

En la tabla 4 se muestran los flujos volumétricos de aire correspondientes a las áreas existentes en la estiba, el correspondiente al contacto directo con el producto y el que fluye a través de los espacios vacíos.

Si se considera que la cara frontal de la estiba que se encuentra en la entrada del túnel (zona A) solo expone 30 productos envasados a un choque directo con un flujo de aire de 13.4729 m³, entonces para las otras 2 estibas que se localizan detrás de este muro se deberán repartir 12.8173 m³ de aire frío, por lo tanto queda comprobado que la zona de menor congelación es la zona B, ya que zona C igualmente presenta un buen flujo de aire debido a que se encuentra junto a los ventiladores, caso contrario que la zona B que se encuentra obstruida por ambos flancos y recibe una mínima cantidad de aire frío a lo largo y ancho de sus productos.

El producto es envasado en bolsas de polietileno atoxico calibre 400 como envase primario y cajas de cartón corrugado parafinado de 5.4 mm de espesor como envase secundario. El monitoreo de la temperatura del producto se efectuó con ayuda de termopares digitales que se colocaron en el producto envasado como muestra la figura 25.

Termopar colocado en el centro de la caja

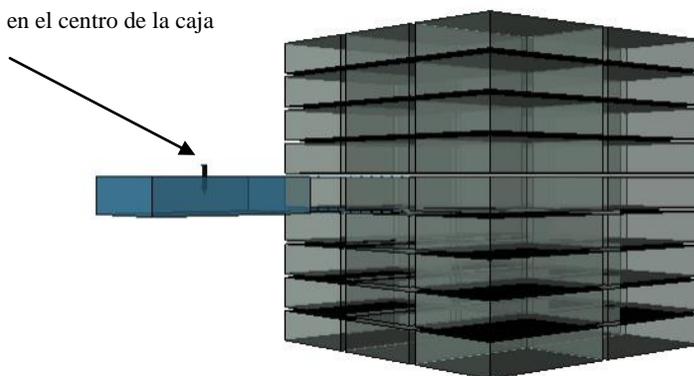


Figura 25. Esquema de colocación del termopar en el producto envasado.



Figura 26. Termopar empleado para monitorear la temperatura del producto.

Analizando la distribución del producto dentro del congelador se entiende que cada uno de los túneles por tener las mismas dimensiones y por ser asistido por evaporadores de la misma capacidad el fenómeno de congelación es igual en cada túnel. Así mismo, dentro de cada túnel se tienen dos niveles de carros cargados de producto y cada nivel cuenta con dos ventiladores, es por ello que el estudio del proceso de congelación se efectuó en el primer nivel de solo un túnel en diferentes ocasiones, cada una con distinto propósito.

Antes de proseguir a la medición de las propiedades del aire y monitorear la temperatura de los productos, se planteó como actividad preliminar la localización de la zona que más tiempo tarda en congelar el producto, para ello se colocaron tres termopares en diferentes productos dentro del túnel procurando que estos se encontraran en los espacios donde aparentemente la incidencia del aire es menor, la figura 27 muestra la colocación de los termopares dentro del túnel.

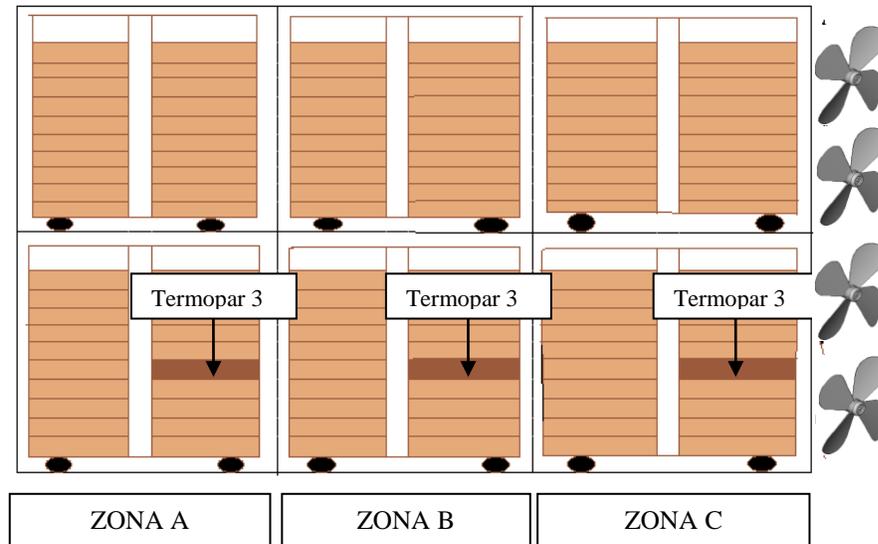


Figura 27. Vista lateral del acomodo a lo largo de producto dentro del túnel de congelación.

Para un mejor análisis del estudio de congelación se definieron zonas de congelación correspondientes a cada carro colocado a lo ancho del túnel, tal como lo muestra la figura 27 y se monitorearon las temperaturas de esos productos durante 14 horas que dura el proceso de congelación, los termopares se programaron para tomar lecturas de la temperatura cada 5 minutos, la figura 28 muestra los resultados:

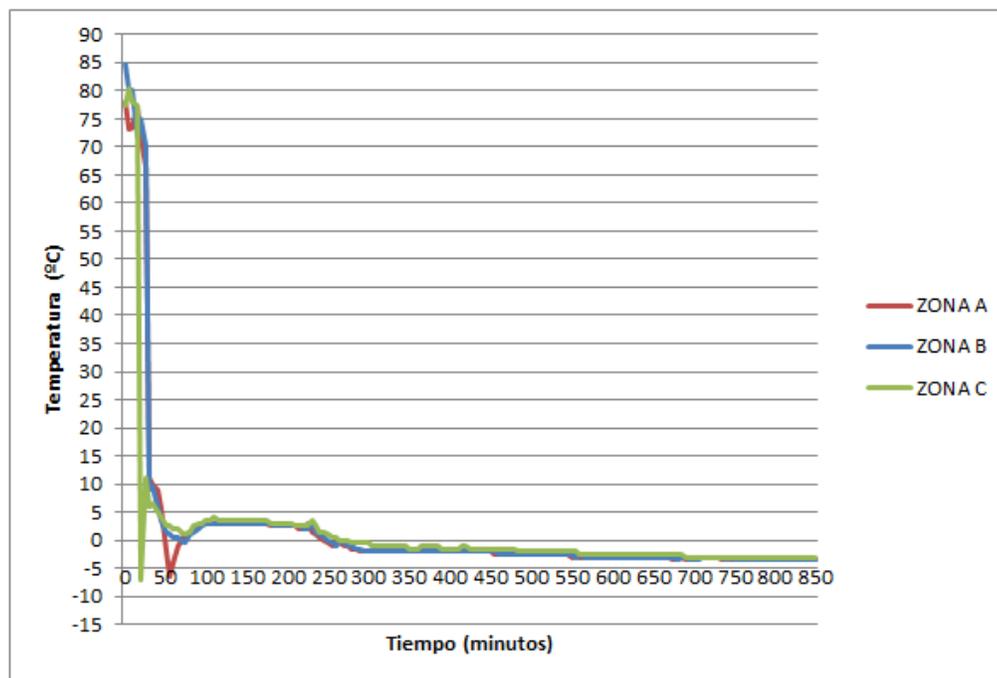


Figura 28. Comportamiento de temperaturas en el centro del producto por cada zona.

Como se puede observar en la figura 28, no existe una diferencia significativa que indique de forma específica cuál es la zona que más tiempo tarda en congelar, pero la serie de datos indica que es la zona B la que tarda más tiempo en alcanzar determinada temperatura, pues al minuto 850 las zonas A y C han alcanzado $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la zona B apenas se encuentra en $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y alcanza la misma temperatura que las zonas A y C únicamente 5 minutos después, es por ello que no existe alguna diferencia importante en cuanto al tiempo de congelación entre una zona y otra. Aun así; por esa pequeña diferencia se considera que la zona B es la de menor congelación y es por esto que las siguientes actividades se realizaron en dicha zona.

Para este caso, según datos bibliográficos el producto en una cámara de congelación tardaría en congelar aproximadamente 10 horas, mientras que el tiempo calculado con la ecuación de Plank dice que el tiempo estimado son 11.7 horas para alcanzar una temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se observa que en 14 horas solo llegó el producto a una temperatura de $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La razón principal por la cual el tiempo de congelación del proceso en cuestión es mayor a los datos bibliográficos y cálculos es porque tanto la bibliografía como el proceso de cálculo consideran un flujo abundante de aire sobre el producto a congelar incluso si se tiene el producto envasado. Mencionan Barreiro y Sandoval en su estudio de 2006 que los productos cárnicos obtenidos de aves son envasados en cajas de cartón con múltiples perforaciones para facilitar el flujo continuo de aire, mientras que en el proceso de estudio las cajas de cartón estaban completamente cerradas convirtiéndose en un aislante térmico.

Con los datos obtenidos se puede presumir que las deficiencias en el proceso de congelación particularmente en este caso son consecuencia de un mal manejo y la aplicación de un envase no apropiado del producto.

Con la zona de menor congelación localizada se prosiguió con la segunda actividad preliminar que fue; ubicar el nivel de la estiba que tardaba más tiempo para congelar, la figura 29 señala con flechas las cajas de producto en diferentes niveles en los cuales se monitoreó la temperatura en la estiba correspondiente a la zona B que fue la de menor congelación



Figura 29. Esquema de productos monitoreados en diferentes niveles de la estiba.

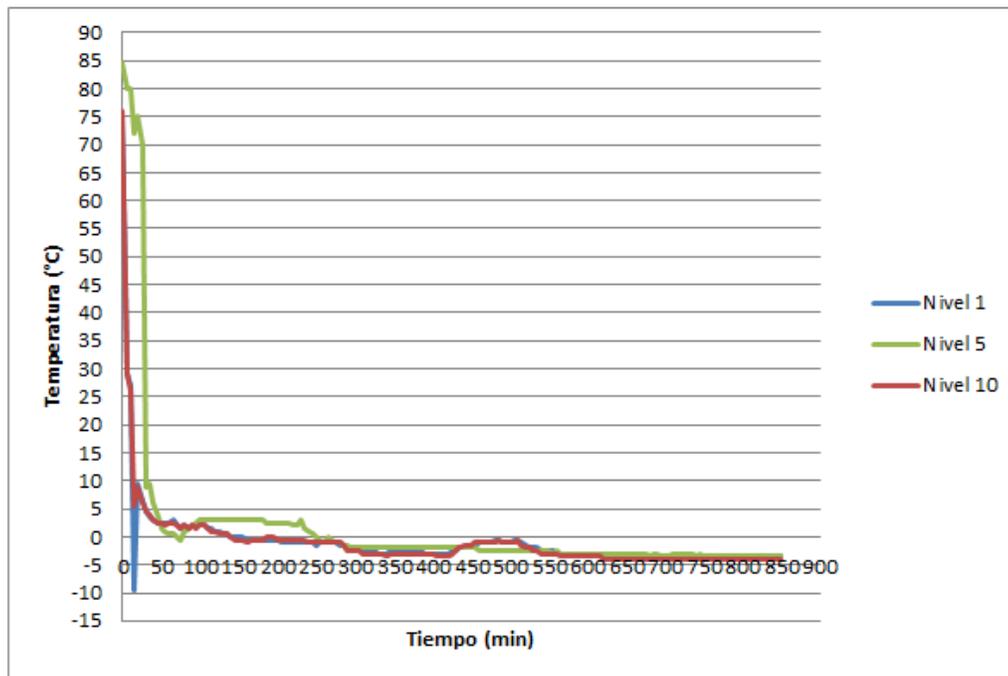


Figura 30. Comportamiento de temperaturas en el centro del producto por niveles de la estiba.

En figura 30 se observa que la línea que representa al nivel 5 de la estiba es el que demora más tiempo en comenzar a disminuir su temperatura, esto se debe a que con respecto del nivel 1 y nivel 10, el flujo de aire es menor, ya que el espacio libre que existe alrededor del producto es menos que en los otros niveles y por consiguiente el flujo de calor es menor.

Una de las razones por las cuales se observa este comportamiento es que los estantes no fueron fabricados con la misma distancia entre un soporte y el otro, además; en el nivel 1 existe un espacio entre el producto y el piso equivalente al triple de la distancia que hay entre el producto del nivel 5 y el del nivel 4, y de manera análoga el producto del nivel 10 cuenta con un espacio de 35 cm entre la parte superior del envase y la base del producto del nivel 1 de la estiba superior del túnel, por consiguiente existe un flujo de aire mayor en un 300 % con respecto del que existe entre el producto del nivel 5 y el nivel 6.

Esto trae como consecuencia un aumento en el valor del coeficiente convectivo en esa región de la estiba y un menor tiempo de enfriamiento.

Es necesario mencionar algunos detalles, como el hecho de que el ciclo de 14 horas con la ráfaga de aire trabajando casi a su máxima capacidad, no es suficiente para alcanzar una temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro del producto, simplemente la disminuye hasta una temperatura promedio de $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, esta temperatura ni siquiera ha rebasado el rango teórico de mayor índice de cristalización en los alimentos comprendida entre -1 y $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (López, 2004), lo cual trae como consecuencia que el agua libre que no ha sido congelada formará cristales de geometría irregular y de gran tamaño que dañará las células del producto en la descongelación y como resultado habrá mayor exudado y un producto de mala calidad. Posteriormente el producto pasa a una cámara de almacenamiento con una temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y ahí es donde alcanza su temperatura de conservación óptima que por norma es $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Una vez concluidas las actividades preliminares se continuó con la medición de las propiedades del aire dentro del congelador, tales mediciones se realizaron en la entrada del túnel, donde el aire es más frío y fluye a una mayor velocidad, en la figura 31 se muestran los resultados obtenidos al medir la temperatura del aire y se esquematiza los sitios donde se colocó el termómetro para dicho fin.

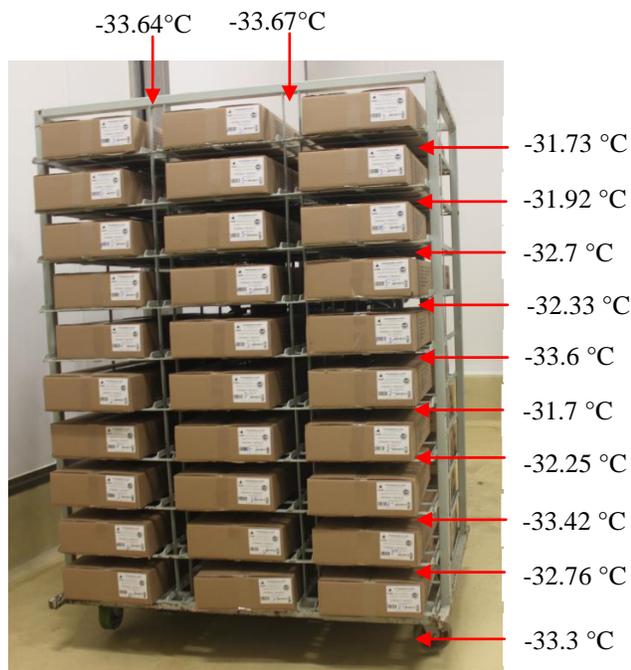


Figura 31. Esquema de temperaturas del aire en los espacios intersticiales de la estiba.

La diferencia de temperatura entre un nivel y otro se debe a que las mediciones no se realizaron de manera continua en el mismo día, debido a que por las muy bajas temperaturas, resulta demasiado complicado y las normas de seguridad no permiten permanecer dentro del túnel de congelación por más de 5 minutos, por tal razón, las mediciones de la temperatura del aire se registraron en distintos momentos, por lo que con el abrir y cerrar de puertas y las personas entrando y saliendo, se presentan variaciones en las temperaturas entre una lectura y otra.

Como se puede observar en la figura 31 todas las temperaturas se encuentran en un rango de $-33.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mínima y de $-31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ la máxima, y este rango no corresponde a las especificaciones del plan HACCP de la producción de pasta, el cual dice que la cámara de congelación debe enfriar el aire a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ como mínima y como máxima $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta deficiencia se debe a que, en la puerta de entrada al congelador se encuentra un monitor que registra la temperatura dentro de la cámara con el fin de conocer como está operando la instalación. Dicho monitor por lo regular muestra temperaturas por debajo de los $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero el inconveniente es que los sensores de temperatura se encuentran a la salida de los

evaporadores, mismos que se encuentran en la parte superior de los túneles de congelación, es por ello que cuando se tomaron las lecturas de temperaturas a nivel de la estiba el aire presenta una temperatura más elevada.

Entre la temperatura registrada a la salida de los evaporadores y las temperaturas registradas con el termómetro digital al nivel de la estiba, se obtienen en promedio temperaturas de 1 a 3 grados por encima de la registrada por el monitor del congelador, tal diferencia se debe a que el aire de congelación eleva su temperatura al llegar a la estiba por que comienza a retirar calor del aire de intercambio que entra al congelador en el abrir y cerrar de puertas, el calor generado por los montacargas y el generado por el mismo personal que transita dentro del congelador.

Posteriormente se midió la velocidad del aire en los mismos espacios en donde se tomaron las lecturas de la temperatura del aire, con la finalidad de conocer el coeficiente convectivo promedio que se presenta entre los productos de la estiba, pues según la teoría indica que al aumentar dicho coeficiente de superficie aumentará la velocidad de congelación.

Para la medición de la velocidad del aire se utilizó el mismo anemómetro empleado para la medición del flujo del aire, dicho instrumento opera en un rango de temperaturas de -20 a 100 °C, lo cual representó un inconveniente ya que la cámara de congelación cuando se encontraba en operación alcanzaba temperaturas inferiores a los -20 °C y el anemómetro no lograba detectar ningún parámetro, por tal razón la medición de las propiedades del aire se realizó en las mañanas cuando los evaporadores de la cámara se encontraban apagados, solamente se encendían los ventiladores de uno de los túneles que se encontrara aún cargado con producto y así la temperatura de la cámara se encontraba alrededor de los -16 °C, de este modo el anemómetro arrojaba valores confiables. La figura 32 muestra los valores de la velocidad del aire y esquematiza los espacios donde se midió tal parámetro.

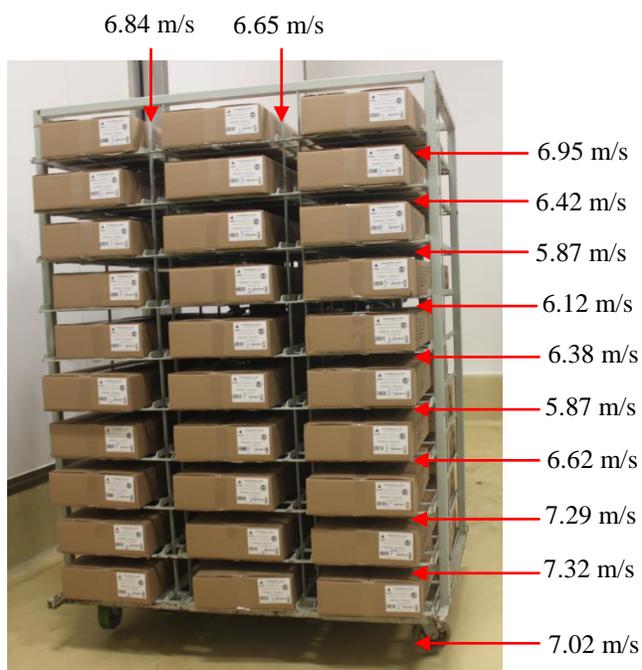


Figura 32. Esquema de velocidades del aire en los espacios intersticiales de la estiba.

En la figura anterior se puede observar que de un nivel a otro se presentan algunas variaciones en la velocidad del aire, esto principalmente se debe a que las lecturas al igual que las de la temperatura del aire, no se realizaron al mismo tiempo y el aire se encuentra en constante movimiento debido a una diferencia de densidades provocada por el cambio de temperatura en la salida del evaporador y en la entrada del estante, por eso en ocasiones la velocidad del aire disminuye y es porque es aire con mayor temperatura que tiende a elevarse antes de que sea succionado por los ventiladores del túnel.

Así mismo, existen diferencias que se deben a los errores de paralaje al momento de su lectura, pero con el análisis estadístico que se aplicó a los datos se sabe que siguen siendo confiables. Como resultado de un promedio de las velocidades del aire en los espacios intersticiales de la estiba se obtuvo que a la entrada del túnel se tiene una velocidad de 6.71 m/s, lo que se considera apropiado para los fines de congelación, ya que según Alarcón en su trabajo de 1998, menciona que las velocidades apropiadas de aire para congelar un producto de tamaño medio es de 3 m/s, pero tomando en cuenta que la pasta envasada pesa 25 kg de

producto neto más el envase, entonces se considera un producto de tamaño grande y la velocidad promedio del aire se considera que es apropiada.

3.3. Análisis del proceso de congelación.

Para la ejecución de la etapa tres de la metodología de investigación en campo se propusieron varias actividades; la primera fue medir el tiempo de residencia del producto dentro del congelador, la segunda trata de la medición de las temperaturas del producto durante el proceso de congelación, la tercera se refiere a la medición de la cantidad de producto que se introduce al túnel de congelación y la última indica la medición del espesor del envase del producto.

El estudio del proceso de congelación se realizó en la pasta de carne de gallina debido a que es uno de los productos donde se presentan más problemas para congelar en tiempo y forma. La pasta salada se comercializa en combos de 900 kg, pero representaría un costo muy elevado congelar el combo completo, es por esa razón que se elabora con un alto contenido de sal como método de conservación.

El ciclo de congelación de un lote de producto, cualquiera que sea este, dura 14 horas dentro del túnel con los ventiladores encendidos a su máxima potencia, aunque su residencia neta no es la misma, es decir, el producto se introduce al túnel una vez que un carrito ha sido completado con producto envasado, y puede tardar ahí dentro hasta 1 a 2 horas hasta que el túnel se ha cargado por completo y entonces se encienden los ventiladores, mientras esto sucede la cámara de congelación se encuentra en modo de conservación a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin que el aire frío sea forzado.

Una vez lleno un túnel se encienden los ventiladores de este y los evaporadores comienzan su trabajo, descendiendo la temperatura de la cámara hasta los $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Acto seguido los operadores de los montacargas continúan su labor de llenado de los demás túneles de manera intermitente y conforme van abasteciendo cada celda van encendiendo los ventiladores, lo que provoca que se tengan productos congelados de manera no homogénea.

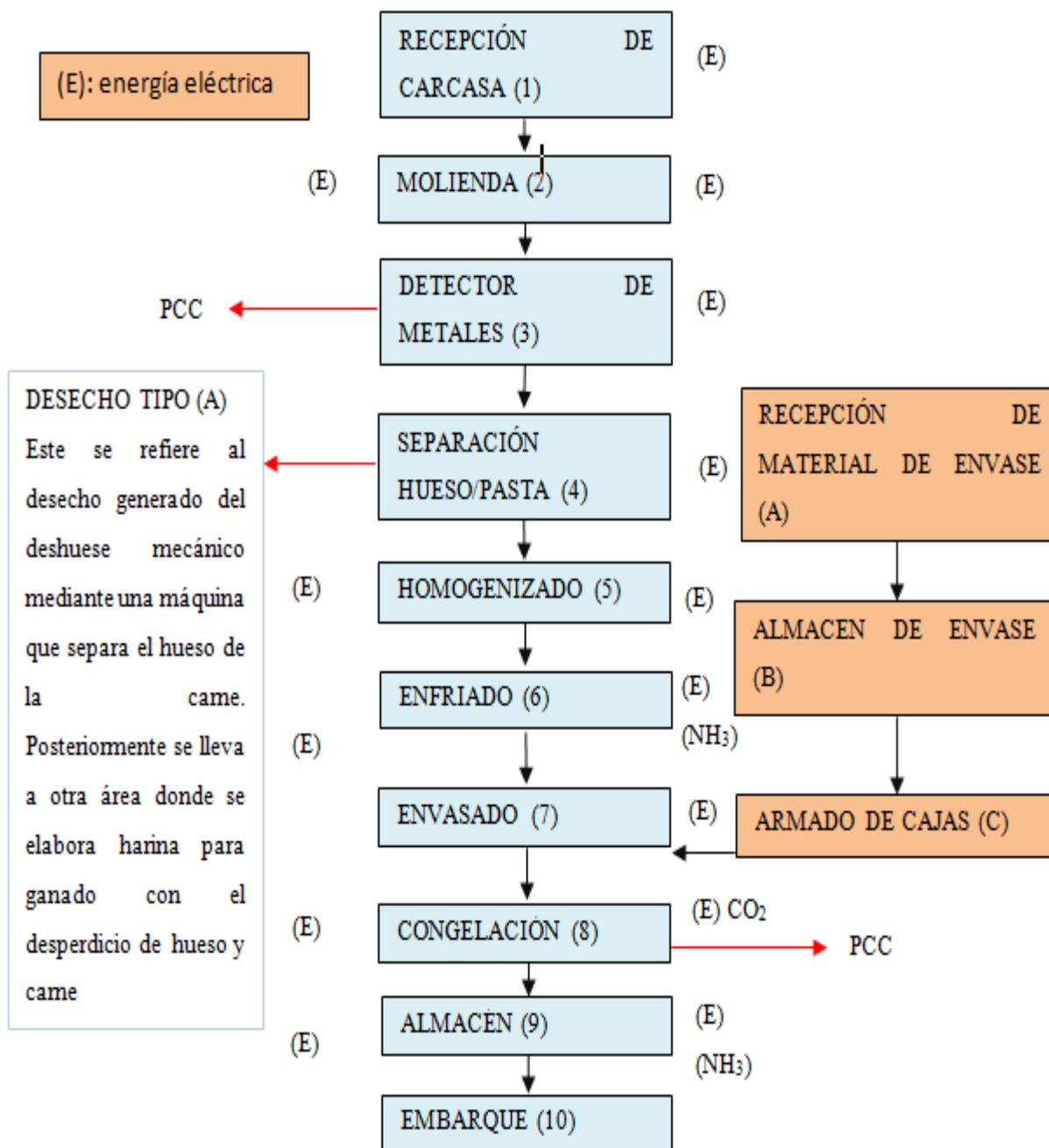


Figura 33. Diagrama de bloques de la elaboración de pasta de carne de gallina.

A continuación se describe cada una de las etapas enunciadas en el diagrama de bloques de la figura 33:

Recepción de Carcasa: A esta operación le anteceden operaciones como: sacrificio, degollado, desplumado y eviscerado, entonces se obtiene la carcasa y llega por medio de una banda

transportadora al área de producción de la pasta de carne de gallina. Allí se introduce a un molino.

Molienda: La carcasa entera se introduce en un molino marca “*weiler*” donde se tritura la carcasa con todo y hueso por un tiempo de 10 a 15 minutos, procurando un tamaño de partícula no mayor a 0.5 mm de diámetro.

Detector de metales: Posterior a la molienda el producto se introduce al detector de metales, en caso de existir impurezas el producto se debe rechazar y es enviado al material de decomiso, destinado a elaboración de harinas para ganado.

Separador de hueso y pasta: En esta etapa se realiza una separación entre el producto cárnico molido y libre de impurezas y el hueso que sobrepase el tamaño de partícula estandarizado resultante de la molienda, para tal objetivo se utiliza un equipo de marca “*beehive*”.

Homogenizado: Ya que se obtiene una masa con un tamaño promedio de partícula de 0.5 mm, sin impurezas metálicas y sin partículas óseas con tamaño excedente, se introduce en equipos mezcladores con paletas giratorias con el propósito de homogenizar la masa y obtener un producto con las características finales que deberá cumplir el producto terminado. Este proceso tarda aproximadamente de 10 a 15 minutos.

Enfriado: El producto homogenizado se hace fluir por medio de bombas a través de dos equipos marca “*votator*”, donde el primero está destinado a reducir la temperatura con la que sale del homogeneizador, que es aproximadamente de 10 °C. El segundo es para reducir aún más la temperatura hasta la adecuada de 1.0 °C a 4.0 °C, que es a la temperatura a la que debe realizarse el envasado en polietileno.

Envasado: El producto es colocado en bolsa de polietileno atóxico calibre 400 y a su vez es introducido en un envase secundario de caja de cartón corrugado, si el cliente lo requiere se empaca en caja encerado para omitir la bolsa de polietileno.

Congelación: El producto ya envasado es llevado en carros convertidores a la antecámara de congelación. Cada carro tiene una capacidad de soporte de 60 cajas de 25 kg cada una, lo que da un total de 1.5 toneladas de producto. En la antecámara de congelación permanece un tiempo de 5 a 10 minutos mientras los operadores cargan el túnel con los 6 carros.

Una vez dentro del congelador, el producto permanece hasta 2 horas a una temperatura de -25 °C antes de que comience su ciclo de congelación, mismo que dura 14 horas a -45 °C y el producto debe salir del congelador al terminar su ciclo con una temperatura máxima de -2 °C según lo establecido en el plan HACCP elaborado por el departamento de control de calidad de la planta PATE.

Almacén: El producto es entarimado y emplallado con cinta elástica de poliestireno y trasladado a la cámara de almacenamiento de producto congelado, en el almacén el producto se encuentra a una temperatura de -20 °C, y es en esta cámara donde el producto alcanza la temperatura de congelación apropiada indicada por norma de -18 °C en su centro térmico. El producto permanece en el almacén hasta su embarque.

Embarque: El producto es cargado en tráiler refrigerado para la conservación de la temperatura y es llevado directamente a las instalaciones de los clientes.

El desecho tipo A se refiere al desecho generado del deshuese mecánico mediante un equipo que separa el hueso de la carne. Este desecho es trasladado al pasillo de embarque para posteriormente ser depositado en un contenedor de montacargas y es depositado en la tolva de rendimientos, misma que va destinada a elaborar harina para ganado.

El diagrama de flujo del material de envasado se explica por separado:

Recepción de material de envase: Antes de ingresar el material de envase se revisa que está en óptimas condiciones (que el cartón no esté golpeado y que las bolsas tengan protección) y se revisa el vehículo que lo transporta que esté en condiciones óptimas de limpieza (caja limpia, y sin presencia de fauna nociva).

El material no debe de venir pegado a la pared del cajón del vehículo. Se debe de determinar las condiciones del vehículo y el material (rechazo y/o aceptación del mismo).

El material de envase viene preformado y plegado, con el objetivo de ahorrar espacio en su transporte hasta la planta, es ensamblado en el área de envasado junto a la salida de los equipos “votator”, en ésta área la temperatura es de 7 °C en promedio.



Figura 34. Proceso de armado del envase para el producto terminado.

Cada caja de producto contenía 25 kg de pasta de carne de gallina, con un envase primario de polietileno atóxico calibre 400, cada estiba tiene capacidad para 60 cajas y a cada túnel le caben 6 estibas, lo que da como resultado 9 toneladas de producto envasado por túnel (sin considerar el peso del envase) en cajas de cartón de 60 cm de largo, 39 cm de ancho, 13.5 cm de alto y 5.4 mm de espesor, las cuales eran sometidas a ciclos de 14 horas de congelación a una temperatura promedio de -37 °C con una velocidad de aire promedio de 6.71 m/s.

En las actividades de la caracterización del congelador ya se había monitoreado la temperatura del producto envasado en cajas de cartón en 3 niveles diferentes de la estiba y se mostraron los resultados en el apartado 3.2 en la figura 30, ahora se presentarán resultados de otras pruebas que se hicieron con el mismo producto en los mismos niveles dentro del túnel pero envasado en cajas de plástico con numerosos por donde circulaba el aire con mayor libertad orificios tal como menciona Dempsey y Bansal en su estudio de 2006 y existía un contacto casi directo del aire con el producto excepto por su envase de bolsa de plástico que contenía a la pasta de carne de gallina.

La figura 35 muestra una caja de plástico que se utilizó para esta etapa.



Figura 35. Caja de plástico para estibar el producto a congelar envasado con bolsa de polietileno.

En la figura 36 se presenta un gráfico en donde se muestran los resultados de las pruebas en cajas de plástico en los mismos niveles donde se monitoreó la temperatura del producto envasado en cajas de cartón completamente cerradas:

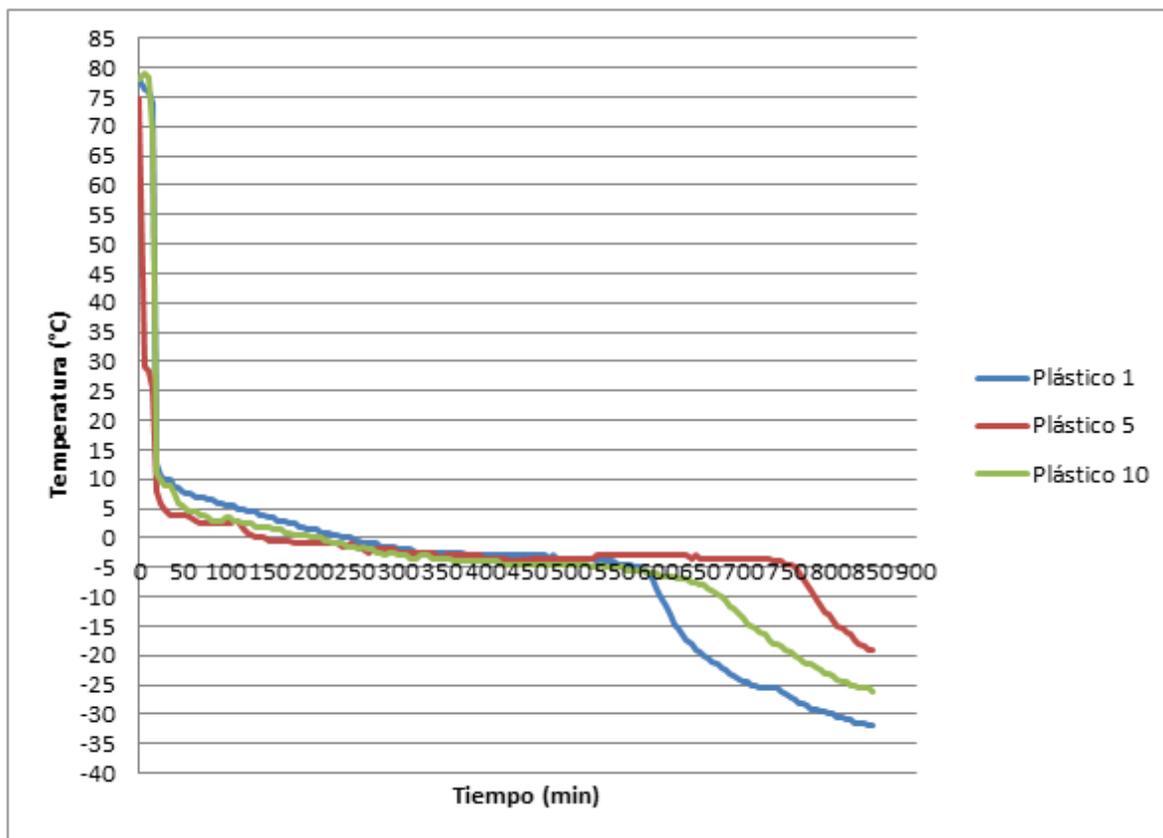


Figura 36. Comportamiento de temperaturas en el producto envasado en cajas de plástico.

En la figura 36 se observa con mayor claridad que el nivel 5 es el que tarda más tiempo en alcanzar la temperatura más baja obtenida, esto confirma lo explicado anteriormente en donde se menciona que el nivel 5 presenta tiempos más prolongados para alcanzar determinada temperatura debido a que existe un menor flujo de aire frío en las zonas intermedias de la estiba a comparación de los niveles más externos.

En las pruebas realizadas en cajas de plástico se observó que el centro del producto si alcanza la misma temperatura que tiene el aire de congelación, al contrario que las pruebas realizadas en las cajas de cartón en donde durante 14 horas solo se obtenían temperaturas de $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que las cajas de cartón no presentan ningún orificio por donde circule el aire frío, esto provoca que cuando el ciclo de la ráfaga termina el producto aún posee determinada cantidad de carga térmica que tendrá que ser retirada por los evaporadores de la cámara de almacenamiento y esto provocará un aumento en los costos por gastos energéticos.

En este caso de las cajas de plástico, en un tiempo aproximado de 12 horas se alcanza una temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que significa que cuando el producto sea traspasado a la cámara de almacenamiento su carga térmica será despreciable y el gasto energético de los evaporadores en dicha cámara disminuirá considerablemente. Estos tiempos se obtuvieron cuando el congelador operaba a $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio durante todo el ciclo, pero si se consiguiera operar el congelador a su capacidad máxima de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el tiempo de congelación disminuirá de forma considerable y el ahorro energético será mayor.

A continuación se presenta un comparativo de un producto congelado en envase de cartón y otro en envase de plástico, ambos situados en el nivel 5 de la estiba, ya que es en ese nivel donde la temperatura tarda mayor tiempo en descender.

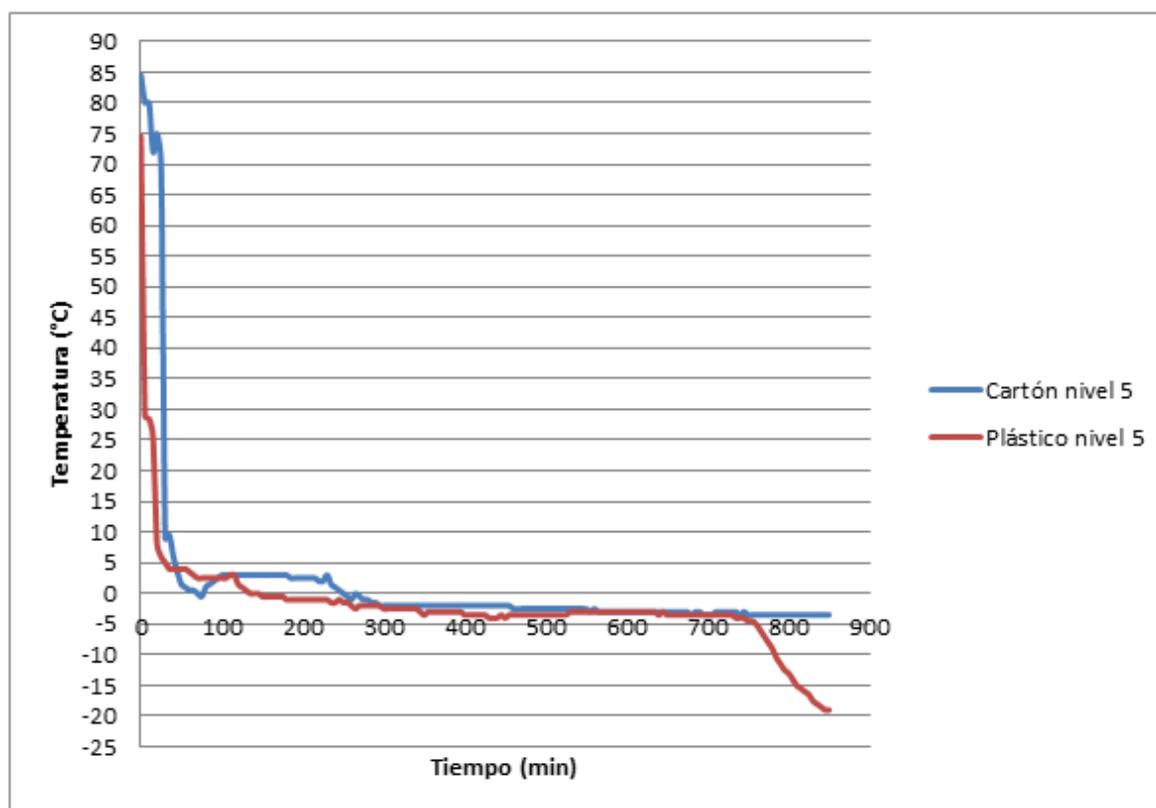


Figura 37. Comportamiento de la temperatura en el centro de los productos envasados en cajas de diferentes materiales.

En la figura 37 se puede observar que el producto congelado en caja de cartón en un tiempo de 800 minutos equivalentes a 13 horas solamente alcanza una temperatura de $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que en producto congelado en cajas de plástico en un tiempo de 13 horas alcanza una temperatura de $-17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y posteriormente comienza a descender la temperatura con una velocidad de congelación de $2.04\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, mientras que en las cajas de cartón se alcanza una velocidad de congelación de $0.61\text{ }^{\circ}\text{C/h}$.

Al término del ciclo de congelación que consta de 14 horas el producto congelado en cajas de plástico alcanzó una temperatura de $-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero cabe señalar que; el producto permanece dentro del congelador un tiempo aproximado de 5 horas después de haber concluido su ciclo, ya que este termina alrededor de las 4 a.m. y los operadores de los montacargas comienzan a laborar a las 8 a.m. y entonces trasladan el producto a las cámaras de almacenamiento, por eso es que el tiempo se extiende hasta 19 horas, cuando la temperatura ha llegado a los $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las cajas de plástico.

Con esto queda comprobado que si se emplean únicamente cajas de plástico para el proceso de congelación del producto, al término del ciclo la temperatura llegará a los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (o incluso menos) que indican las normas referentes a comercialización de productos congelados y no será necesario mantener el producto en las cámaras de almacenamiento hasta que alcancen dicha temperatura o en el caso que fuera necesario por cuestiones de logística, las cámaras de almacenamiento no tendrían cargas térmicas tan elevadas y representaría una disminución en los costos por gasto energético de los evaporadores del almacén y por consiguiente de compresores y condensadores.

De manera complementaria se realizó una prueba en pechuga envasada ya que éste es otro de los productos que tardan demasiado tiempo en congelar, tal prueba se realizó en caja de cartón y otra en caja de plástico, ambas en el nivel 5 de la estiba correspondiente a la zona B, considerando que según los resultados obtenidos es en esta región donde el producto tarda más tiempo en congelar, los resultados se muestran a continuación:

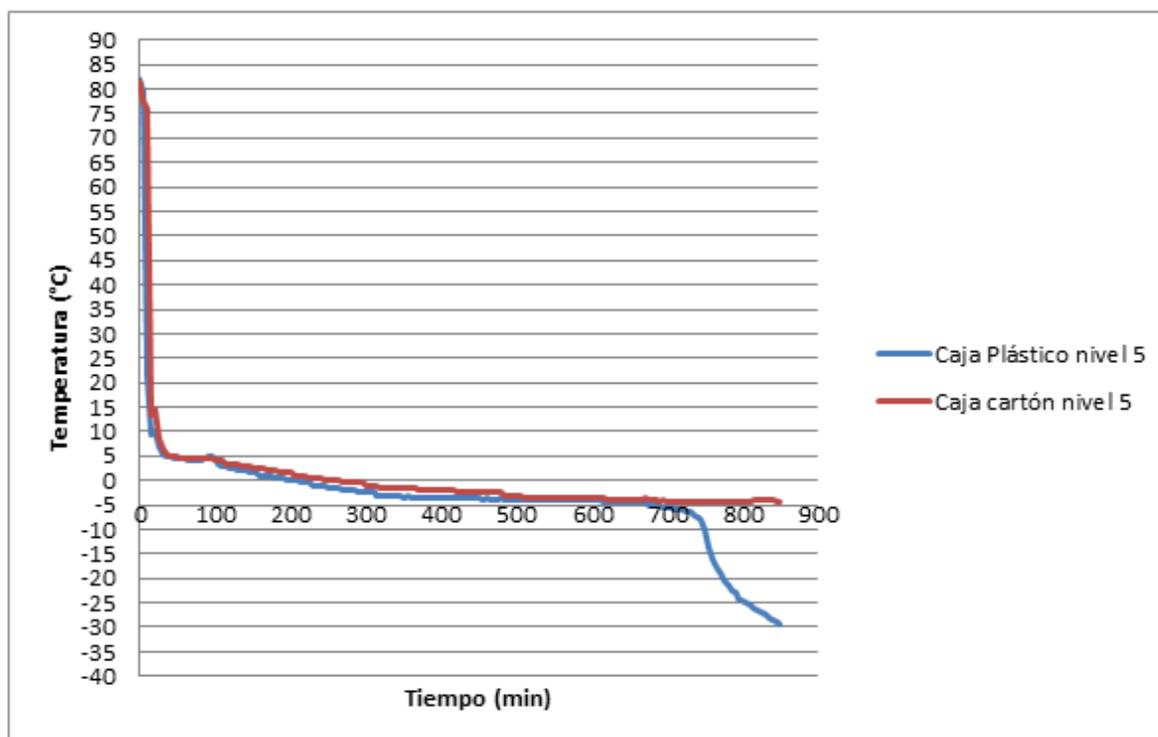


Figura 38. Comportamiento de la temperatura en pechuga envasada en diferentes materiales.

Como se observa en la figura 38, la pechuga que se estibó en caja de plástico tardó un tiempo menor en llegar a la temperatura de congelación en su centro térmico, en tan solo 13 horas alcanzó $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la pechuga envasada en caja de cartón alcanzó tan solo $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al término del ciclo de 14 horas, presentando una velocidad de congelación de $1.23\text{ }^{\circ}\text{C/h}$.

Posterior a esto, una vez que el ciclo concluye, la temperatura de la cámara aumenta y el termómetro se posiciona en $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para que la cámara cumpla la función de almacén de producto congelado, con esto se observa un ligero incremento en la temperatura de la pechuga envasada en cartón, por el contrario a lo que se observa en el producto envasado en plástico que continúa descendiendo su temperatura hasta llegar a la misma que el aire dentro de la cámara, es decir, aproximadamente $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ahora se muestran las velocidades de congelación alcanzadas en cada uno de los procesos monitoreados:

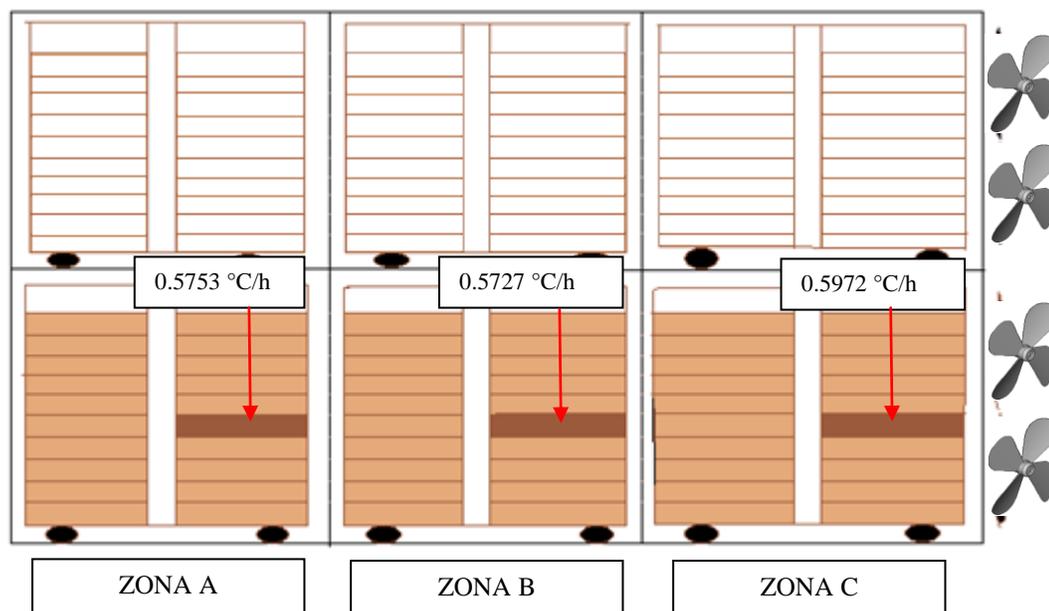


Figura 39. Velocidad de congelación por zonas en cajas de cartón.

En la figura 39 se muestran las velocidades de congelación que presentó la pasta de carne de gallina en las diferentes zonas dentro del túnel, la zona de menor congelación es la zona B teniendo una diferencia que no se aprecia con facilidad en el caso de las pruebas realizadas en envases de cartón.



Figura 40. Velocidad de congelación en la zona B en envase de cartón.

En la figura 40 se observa que el nivel 5 y el nivel 10 presentan la misma velocidad de congelación, esto es porque la ecuación para calcular dicha velocidad, solo considera las temperaturas y tiempos inicial y final, omitiendo todo el resto del proceso, que es donde se percibe con mayor claridad la diferencia, tal como se podrá observar en la figura 41:



Figura 41. Velocidad de congelación en la zona B en envase de plástico.

En la figura 41 si se logra distinguir la diferencia de las velocidades de congelación en los diferentes niveles, causadas por la diferencia que existe entre los espacios que hay alrededor de cada una de las cajas, mientras mayor sea el espacio que lo rodea, mayor será el flujo de aire que lo envuelve y menor el tiempo que tarde en descender su temperatura.

Es importante mencionar otro factor que a pesar de no influir directamente sobre el producto durante el proceso de congelación afecta la calidad del aire que se emplea para dicho fin. Nos referimos a la humedad propia del aire, la cual se condensa en forma de escarcha dentro del congelador y también de manera despreciable sobre el producto sin que llegue a afectar su proceso.

Este contenido de humedad es variable dependiendo de los recambios de aire causados por la constante apertura de puertas propia del tránsito de montacargas encargados del acomodo del

producto dentro de los túneles. De manera que el aire dentro del congelador es enfriado hasta el punto que las partículas de agua en forma de vapor se condensan y el contenido de humedad disminuye hasta que se presenta una apertura de puertas y se filtra aire caliente del exterior de la cámara de congelación con un contenido de vapor de agua elevado, es entonces cuando el contenido de humedad se eleva y se presenta de nuevo la condensación del agua y con ello la escarcha.

Una vez hecho el estudio de las propiedades del producto, propiedades del aire, características del proceso de congelación y características del envase se hicieron los cálculos pertinentes para determinar el tiempo estimado de congelación para contrastarlo con los tiempos reales y los bibliográficos.

En la tabla 5 se muestran los tiempos de congelación de pasta de pechuga de gallina.

Tabla 5. Tiempos de congelación.

Tiempo recomendado (<i>Amerling, 2001</i>) (hr)	Tiempo calculado (hr)	Tiempo real con envase de cartón (hr)	Tiempo real con envase de plástico (hr)
12	11.7	36	13.9

Revisando los tiempos obtenidos en el estudio del proceso de congelación se observó que cuando el producto es envasado en cajas de cartón sin entradas de aire presenta una eficiencia del 32.5 % con respecto al tiempo calculado con la ecuación de Plank y cuando el producto es envasado en cajas de plástico con múltiples perforaciones para la circulación del aire presenta el 84.2 % de eficiencia con respecto al tiempo calculado.

El tiempo citado de 36 horas que tarda en congelar el producto envasado en cajas de cartón se obtuvo monitoreando el producto después de que este es retirado del congelador y llevado a la cámara de almacenamiento que mantiene una temperatura de -25 °C. Es necesario señalar que por la forma en que es acomodado el producto dentro del almacén no fue posible introducir el termopar en el producto para continuar monitoreando el descenso de la temperatura, además de que un vez ahí dentro el producto está a la espera de ser embarcado respetando un sistema

de “PEPS” (primeras entradas primeras salidas) y por cuestiones de sanidad no fue posible conseguir la autorización para continuar con el estudio en esta etapa del proceso. Sin embargo solo fue posible continuar revisando el producto hasta que este se solidificara por completo

3.4. Comparativo entre congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” y congelador por ráfaga de aire “*blast freezer*”.

Para dar cumplimiento al objetivo particular 4 se hará una descripción general de un sistema de congelación de cajas de cartón mejor conocido como “*carton freezer*”, el cual opera mediante estibadores robotizados que progresivamente van apilando los productos envasados en un estante que cuenta con diversos niveles a lo alto, cada nivel cuenta con una banda transportadora que es impulsada ya sea mediante rodillos mecanizados y programados mediante computadora, o bien, que se desplaza conforme una nueva fila de producto envasado es ingresado para congelar a ese nivel al mismo tiempo que otra fila de productos congelados sale del estante del lado opuesto al cual entró el producto fresco. La figura 42 muestra un esquema general de un “*carton freezer*” cargado con producto envasado en cajas cartón.

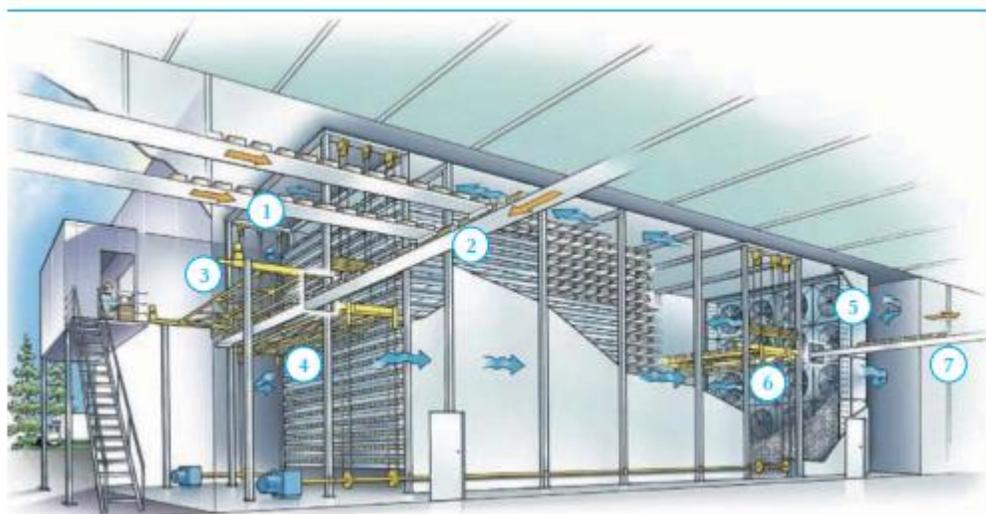


Figura 42. Vista frontal del congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” sin estante (GEA, 2012).

En la figura 42 se aprecian 7 números que representan etapas durante el proceso de congelación en un congelador de cajas de cartón “*carton freezer*”, dichas etapas se describen a continuación:

- 1) Los lotes se acumulan por especificación del producto o por el tiempo de retención en transportadores totalmente automatizados.



Figura 43. Llegada del producto envasado en cajas de cartón (GEA, 2012).

- 2) El producto seleccionado es trasladado al interior del congelador VRT y comienza el seguimiento de los paquetes, lo que permite la captura de datos para inventarios más detallados.



Figura 44. Etiquetado de las cajas con producto para su rastreo (GEA, 2012).

- 3) Después el producto es separado suavemente mediante un brazo mecánico para conseguir espacio suficiente para el flujo óptimo del aire frío entre las cajas.



Figura 45. Espaciado de las cajas mediante un brazo mecánico (GEA, 2012).

- 4) La charola con producto se coloca en un elevador mecánico para ser depositado en el nivel designado según las características del lote sin que éste haya sido maltratado.



Figura 46. Producto sobre elevador mecánico para su acomodo por niveles (GEA, 2012).

- 5) Los paquetes viajan a través del congelador VRT mientras los potentes ventiladores proporcionan la correcta distribución y velocidad del aire que asegure una transferencia de calor eficiente.



Figura 47. Evaporadores con potentes ventiladores para generar ráfagas de aire (GEA, 2012).

- 6) Cuando el producto ha cumplido el tiempo de retención requerido para alcanzar el perfil de temperatura previamente establecido es descargado del estante mediante una charola de descarga vacía.



Figura 48. Salida del producto congelado (GEA, 2012).

- 7) El producto es transferido a la charola transportadora de salida cuando ha completado su ciclo de congelación o enfriamiento y es enviado a un sistema de estibado mecanizado o manual dependiendo las necesidades del usuario.



Figura 49. Producto congelado en trayecto para ser estibado y almacenado (GEA, 2012).

Un congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” como el que se observa en la figura 42 puede llegar a tener dimensiones de hasta un edificio al igual que un congelador por ráfaga de aire “*blast freezer*” la cual se estudió en este trabajo, con tiempos de operación de hasta 24 horas, pudiendo programarse los tiempos dependiendo de las necesidades de la planta. Por otro lado en el presente estudio se hizo la caracterización de un “*blast freezer*” el cual está dividido en 12 túneles con capacidad de congelación de 9 toneladas de producto por cada túnel para un total de 108 toneladas por toda la cámara.



Figura 50. Vista interna del congelador por ráfaga de aire “*blast freezer*” con los 12 túneles de congelación.

Para dar cumplimiento a los criterios de diseño recomendados en la bibliografía cada túnel cuenta con 4 ventiladores que generan ráfagas de aire frío de hasta 6.71 m/s según la caracterización del congelador, velocidad que se considera aceptable para congelar en un ciclo de 14 horas de operación, pero siendo estrictos con los resultados del estudio, aparentemente esta velocidad de aire es insuficiente para lograr que el producto termine el ciclo con el centro térmico congelado.



Figura 51. Ventiladores para generar ráfagas de viento dentro de los túneles.

En la figura anterior se observan los ventiladores durante el proceso de construcción de los túneles antes de ser instaladas las paredes que delimitarán cada túnel.

Así mismo la cámara de congelación cuenta con 5 evaporadores de CO₂ distribuidos uniformemente para dar servicio a los 12 túneles y que en operación alcanzan una temperatura del aire de -47 °C.



Figura 52. Evaporadores de CO₂.

En la figura 52 se aprecia la instalación de los evaporadores y ventiladores que darán servicio a las 12 ráfagas de congelación.

Como se mencionó anteriormente el producto es envasado en bolsa de polietileno atóxico y a su vez en cajas de cartón, las cuales no cuentan con ninguna entrada de aire para facilitar el tránsito de las corrientes de aire como lo sugiere la bibliografía. En la figura 51 se aprecian todos los ángulos de las cajas empleadas para envasar el producto.



Figura 53. Producto envasado en cajas de cartón sin etiquetar.

Con la información citada en los párrafos anteriores se sabe que la mejor opción para congelar la producción de la planta PATE es el uso de un “*carton freezer*” preferentemente con un sistema de VRT acoplado, debido a que fabrican 16 subproductos diferentes tanto química como físicamente y los congelan ya envasados.

Lamentablemente el presupuesto destinado para la construcción de un congelador que soportara la producción de la planta fue limitado en su momento, lo que llevó a la decisión de construir un “*blast freezer*” que se dividiera en 12 secciones para disminuir la carga térmica de cada ráfaga e incrementar la eficiencia de la instalación frigorífica. Aunado a esto se decidió por la implementación de un sistema frigorífico en cascada de CO₂/ NH₃ dicha decisión representó la instalación de compresores de menor tamaño debido a que por las características de diseño se requiere menos desplazamiento volumétrico de refrigerante, alcanzando menores temperaturas en el aire de congelación de hasta -50 °C operando a su máxima capacidad. Al disminuir la temperatura del aire el diferencial de temperatura entre el producto y el aire incrementa, así mismo se implementaron ventiladores axiales que generan ráfagas de aire con velocidades de hasta 6.71 m/s, reduciendo con esto el tiempo requerido para su congelación.

CONCLUSIONES

Se concluye que la instalación frigorífica tiene capacidad para enfriar el aire a -45°C a su máxima capacidad mediante el uso de 9 compresores de los cuales tres son reciprocantes y seis de tornillo, de ellos solo dos reciprocantes y uno de tornillo son los que dan servicio al congelador por ráfaga de aire “*blast freezer*” en el cual se realizó el estudio. Es necesario mencionar que la instalación no operó a su máxima capacidad durante el tiempo en el cual se llevó a cabo el estudio por problemas técnicos en uno de los compresores de primera etapa.

La velocidad de congelación con envase de cartón es de 0.616°C/h , mientras que con envase de plástico perforado la velocidad de congelación es de 2.3408°C/h , ambas velocidades calculadas con las temperaturas registradas en el nivel 1 de la estiba, que es justo donde el flujo de aire frío es mayor. Cabe mencionar que la velocidad de congelación del producto con envase de plástico es 380 % mayor que con envase de cartón, lo cual indica que la mejor opción para congelar el producto es con envase de plástico y esto reducirá en gran cantidad el costo energético por operación de la instalación frigorífica.

El sistema de congelación no es efectivo. Esto debido a que aunque la instalación frigorífica si tiene la capacidad de producir el frío suficiente para que el proceso sea eficiente, el envase con el que el producto es introducido al congelador no es el indicado y representa un gasto excesivo e insuficiente de energía durante los ciclos de congelación.

La mejor opción habría sido el uso de un congelador de cajas de cartón “*carton freezer*” por sus capacidades, características de diseño y automatización.

En la planta PATE, donde se llevó a cabo el presente estudio, se decidió por la implementación de un congelador por ráfaga de aire “*blast freezer*” el cual fue optimizado mediante el uso de una instalación frigorífica en cascada de CO_2/NH_3 para alcanzar

temperaturas más bajas, la instalación de potentes ventiladores que incrementaran la velocidad del aire frío y con esto el coeficiente de transferencia. La deficiencia del proceso no es debida a las condiciones de diseño, sino al manejo del producto envasado, cuestión que representa una inversión mínima para corregirla y optimizar el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Academia del área de plantas piloto de alimentos (AAPPA) (2003). *Introducción a la tecnología de alimentos* (2ª ed.). México: Limusa.
- Alarcón, J. (1998). Refrigerantes. J. Alarcón C. (Ed.), *Tratado práctico de refrigeración automática*. (pp. 42). Barcelona: Marcombo.
- Amarante, A., Lanoisellé, J. y Ramírez, A. (2003). Direct measurement of heat transfer rates and coefficients in freezing processes by the use of heat flux sensors. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(9), 1105-1112. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:8080/science/article/pii/S0263876203724046>.
- Amerling, C. (2001). *Tecnología de la carne: antología* (1ª ed.). Recuperado de <http://books.google.com.mx/books?id=9NweMkWe9VEC&pg=PA39&dq=tipos+de+congelacion&hl=es&sa=X&ei=SwJYT5bBDsaBsgLllezbdQ&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=tipos%20de%20congelacion&f=false>
- Badui, S. (1993). *Química de los alimentos* (3ª ed.). México: Pearson Educación.
- Barreiro, J. y Sandoval, A. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas* (1ª ed.). Venezuela: Equinoccio.
- Bozzo, F. (2011). *Determinación de coeficientes convectivo en el exterior de evaporadores de refrigeración mediante simulación*. Tesis de ingeniería civil mecánica. Chile,

- recuperado de http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-bozzo_fm/pdfAmont/cf-bozzo_fm.pdf.
- Bramón, A., Casas, J., Llebot, J. y López, F. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (5ª ed.). España: Reverté.
- Callister, W. (1996). *Introducción a la ciencia de los materiales* (1ª ed.). España: REVERTÉ.
- Chamarro, M. (2005). *Fundamentos de transmisión de calor* (1ª ed.). España: UB
- Cervera, A. (2003). *Envase y embalaje: la venta silenciosa* (2ª ed.). España: Esic.
- Corbín, J., Mulet, A., Cárcel, J. & Clemente, G. (2006). *Transferencia de calor en ingeniería de alimentos* (1ª ed.). Valencia: Reproval.
- Dempsey, P. y Bansal, P. (2011). The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations. *Applied Thermal Engineering*, 30(1), 1-13. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:8080/science/article/pii/S1359431111007101>
- Dopazo, J. y Fernández, J. (2010). Experimental evaluation of a cascade refrigeration system prototype with CO₂ and NH₃ for freezing process applications. *International Journal of Refrigeration*, 34(1), 257-267. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:8080/science/article/pii/S0140700710001568>.
- Dossat, R. (1980). *Principios de refrigeración* (reimpresión). EU: Editorial Continental.
- Esplugas, S. & Chamarro, M. (2005). *Fundamentos de transmisión de calor* (1ª ed.). Barcelona: Universidad de Barcelona.

- Fellows, P. (2000). *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica* (2ª ed.). España: Acribia.
- GEA Refrigeration technologies (2012). *Descripción de congeladores de cajas con tiempo de retención variable o fija*.
- GEA Refrigeration technologies (2012). *Circuitos con CO₂ como refrigerante*.
- Granados, R. (1984). *Química avanzada; ciencia de la alimentación*. (1ª ed.). España: Editorial Reverté.
- Gruda, Z. y Postolski, J. (1986). *Tecnología de la congelación de los alimentos* (1ª ed.). España: Acribia.
- Ibarz, A., Barbosa, G. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de los alimentos* (1ª ed.). España: Mundi-Prensa.
- Instituto Internacional del Frío (IIF), (1990). *Alimentos congelados; procesado y distribución* (1ª ed.). España: Acribia.
- Johnson & Controls (Productor). (2012). *Cascade systems* [presentación visual]. México: UNAM.
- Lage, J. (1989). *Panorama sistemático de las aplicaciones de la tecnología de bajas temperaturas a los alimentos* (1ª ed.). México: UNAM.
- López, R. y Casp, A. (2004). *Tecnología de mataderos* (1ª ed.). España: Mundi-prensa.
- Madrid, A., Gómez, J.M., Santiago, F., Madrid, J.M., y Cenzano, J.M. (2003). *Refrigeración, congelación y envasado de los alimentos* (1ª ed.). España: Mundi-prensa.

- Miranda, A. (2012). *Manual técnico de refrigerantes* (2ª ed.). España: Marcombo.
- Morsel, H. (1973). *Vademécum del frigorista* (2ª ed.). España: Acribia.
- Olivera, D. y Salvadori, V. (2008). Effect on freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 271-276. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877408003300>.
- Plank, R. (2005). *El empleo del frío en la industria de la alimentación* (2ª ed.). España: Reverté.
- Ramírez, J. (2000). *Refrigeración* (1ª ed.). España: Ceac.
- Ranken, M. (2003). *Manual de industrias de la carne* (1ª ed.). EU: Mundi-Prensa.
- Rapin, P. y Jacquard, P. (1997). *Instalaciones frigoríficas: física aplicada* (1ª ed.). España: Marcombo.
- Rapin, P. (2002). *Prontuario del frío* (3ª ed.). España: Reverté.
- Sears, F. y Salinger, G. (2002). *Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística* (2ª ed.). España: Reverté.
- Seese, W. y Daub, W. (2005). *Química* (8ª ed.). EU: Pearson Educación.
- Torrella, E. (1996). *La producción de frío* (1ª ed.). España: Reproval.
- Whitman, C., William, C., y Johnson, M. (2006). *Tecnología de refrigeración y aire acondicionado* (1ª ed.). España: THOMSON-PARANINFO.

Wilson, J. y Burra, A. (2003). *Física* (5^a ed.). México, PEARSON.

Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios* (1^a ed.). Argentina: Nobuko.