



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**ESCUELA SUPERIOR DE APAN**

**TESIS**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE  
CÁMARAS FRIGORÍFICAS PARA LA  
CONSERVACIÓN DE CARNE AVÍCOLA  
MEDIANTE SIMULACIÓN.**

**Para obtener el título de  
Licenciada en Ingeniería en Tecnología del Frío**

**PRESENTA**

Maria Guadalupe De Santiago Herrera

**Director (a)**

Dr. Julio Valle Hernández

**Comité tutorial**

Dr. Raúl Román Aguilar

Dr. José Esteban Aparicio Burgos

Mtra. Wendy Montserrath Delgadillo Ávila

Dr. Alejandro Pacheco Reyes



10 de junio del 2024, Apan, Hidalgo, México.

**Autorización de impresión de Tesis**

**Dr. Julio Valle Hernández**

Coordinador de Licenciatura en Ingeniería en Tecnología del Frío

**Presente**

Primeramente, permítame saludarle e informarle que de acuerdo a: **La ley orgánica de la Universidad** en su Título primero: Capítulo II artículo 3 y fracciones I, II, III; del Estatuto General Título primero: Capítulo I artículo 2 fracciones II, XIV; Capítulo II artículo 4; Capítulo III artículo 9. Titulo quinto: Capítulo II artículo 114 fracción IX; Capítulo V artículo 137 fracción V; además del **Reglamento de Titulación** en su Título cuarto y Capítulo I artículo 36, artículo 37, artículo 38, artículo 39, artículo 40 y artículo 41, los abajo firmantes, integrantes del jurado para el examen recepcional del trabajo titulado:

**"Diseño y Evaluación Energética de Cámaras Frigoríficas para la Conservación de Carne Avícola mediante Simulación".**

Realizado por la estudiante: Maria Guadalupe De Santiago Herrera

Una vez revisado el trabajo y atendidas las recomendaciones por el sustentante, tiene a bien emitir su voto favorable para la impresión de la tesis.

Nombramiento	Nombre	Firma
Presidente.	<b>Dr. Raúl Román Aguilar</b>	
Secretario.	<b>Dr. José Esteban Aparicio Burgos</b>	
Primer Vocal.	<b>Dr. Julio Valle Hernández</b>	
Segundo Vocal.	<b>Mtra. Wendy Montserrat Delgadillo Ávila</b>	
Tercer Vocal.	<b>Dr. Alejandro Pacheco Reyes</b>	



## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a mi director de Tesis el Dr. Julio Valle Hernández, por creer en mi para llevar a cabo este proyecto, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación, paciencia, perseverancia y tolerancia, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Sus consejos y enseñanzas fueron siempre útiles para mi formación y así lograr lo que hoy soy.*

*A mis padres Camelia Herrera Rodríguez y Tomas De Santiago Canseco ustedes junto a mi hijo Jose Mateo De Santiago Herrera han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado siendo mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro amados padres, como una meta más conquistada. Orgullosa de tenerlos como padres y que estén a mi lado en este momento tan importante. “Gracias por ser quienes son y por creer en mí”*

*A mis hermanas Amalia De Santiago Herrera y Johana de Santiago Herrera hoy toca cerrar un capítulo en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo, consejos y motivación al estar en las horas más difíciles y por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre allí.*

*A los docentes de la Licenciatura en Tecnología del Frío de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por mi formación profesional. Gracias profesores parte de mis conocimientos académicos se los debo a ustedes, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes les debo parte de mis conocimientos académicos.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>13</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
1.1.    Cámaras Frigoríficas .....	13
1.1.1.    Tipos de Cámaras Frigoríficas .....	13
1.1.2.    Componentes de una Cámara Frigorífica.....	14
1.1.3.    Materiales de Construcción .....	15
1.1.3.1.    Materiales Aislantes .....	15
1.1.3.2.    Cortinas .....	18
1.2.    Ciclos de Refrigeración.....	19
1.2.1.    Ciclo de Refrigeración Simple .....	20
1.2.2.    Ciclo de Refrigeración en Cascada .....	22
1.2.3.    Ciclo de Refrigeración con Cámara Flash.....	23
1.2.4.    Ciclo de Refrigeración con Sub-Enfriamiento Líquido-Vapor .....	25
1.2.5.    Ciclo Simple con Acumulador de Preenfriamiento.....	26
1.3.    Refrigerantes .....	28
1.3.1.    Halocarbonados .....	28
1.3.2.    Inorgánicos.....	29
1.3.3.    Orgánicos .....	29
1.3.4.    Refrigerantes más utilizados para contenedores frigoríficos.....	29
1.4.    Carga Térmica en una Cámara de Refrigeración .....	30
1.4.1.    Ganancia de Calor a través de Paredes.....	31
1.4.2.    Ganancia de Calor por Infiltración.....	31
1.4.3.    Ganancia de Calor debido a Equipo Eléctrico.....	31
1.4.4.    Ganancia de Calor debido a Ocupantes.....	31

1.4.5.	Ganancia de Calor por Producto .....	32
1.5.	Productos Perecederos.....	32
1.5.1.	Alimentos .....	32
1.5.2.	Vacunas .....	33
1.5.3.	Muestras Biológicas .....	33
1.5.4.	Germoplasma .....	34
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>		<b>34</b>
<b>POLLO COMO PRODUCTO BIOLÓGICO PERECEDERO.....</b>		<b>34</b>
2.1.	Proceso de Producción de Carne de Pollo.....	36
2.2.	Carne de Pollo de Engorda.....	37
2.2.1.	Factores Antemortem .....	37
2.2.2.	Factores Postmortem .....	38
2.2.3.	Proceso de Rigor Mortis.....	39
2.3.	Parámetros Fisicoquímicos de la Carne de Pollo .....	39
2.3.1.	Capacidad de Retención de Agua.....	39
2.3.2.	pH y Tipo de Músculo.....	40
2.4.	Parámetros de Calidad.....	40
2.4.1.	Calidad Sensorial.....	40
2.4.2.	Calidad Microbiológica.....	41
2.5.	Empaquetamiento.....	41
2.5.1.	Charola de Espuma de Poliestireno Convencional.....	42
2.5.2.	Sistemas al Vacío .....	42
2.5.3.	Atmósferas Modificadas .....	43
2.6.	Almacenamiento en Condiciones Óptimas .....	44
2.6.1.	Preenfriamiento y Ecurrido.....	44
2.6.2.	Refrigeración.....	44
2.6.3.	Congelación.....	44
2.7.	Vida Útil de la Carne de Pollo .....	44
2.8.	Normas de Sanidad.....	45
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>47</b>
<b>METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA CÁMARA FRIGORÍFICA .....</b>		<b>47</b>

3.1.	Consideraciones para el Diseño de una Cámara Frigorífica .....	47
3.2.	Ubicación Geográfica y Condiciones Climáticas.....	47
3.2.1.	Temperatura .....	47
3.2.2.	Humedad .....	48
3.2.3.	Viento.....	48
3.2.4.	Radiación Solar .....	48
3.3.	Características del Producto a Almacenar.....	48
3.3.1.	Naturaleza del Producto .....	49
3.3.2.	Cantidad de Producto a Almacenar .....	49
3.4.	Características de la Cámara .....	49
3.4.1.	Dimensiones de la Cámara Frigorífica.....	49
3.4.2.	Materiales para la Construcción de la Cámara.....	50
3.5.	Cálculo de Cargas Térmicas.....	50
3.5.1.	Carga Térmica Debida a la Refrigeración del Producto.....	50
3.5.2.	Carga Térmica Debida a las Perdidas por Transmisión por Paredes y Puerta .....	50
3.5.3.	Cálculo de Carga Sensible de Personas.....	50
3.5.4.	Carga Térmica Producido por Lámparas.....	51
3.5.5.	Carga Térmica por Infiltración de Aire Exterior.....	51
3.6.	Elección del Ciclo de Refrigeración.....	51
3.6.1.	Análisis Termodinámico del Ciclo de Refrigeración .....	51
3.7.	Fuente de Suministro de Energía.....	52

**CAPÍTULO 4 ..... 53**

**DESARROLLO DE LOS MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA CÁMARA ..... 53**

4.1.	Modelado de Cargas Térmicas.....	53
4.1.1.	Carga Térmica Debida a la Refrigeración del Producto.....	53
4.1.2.	Carga Térmica Debida a las Perdidas por Transmisión por Paredes y Puerta .....	53
4.1.3.	Carga Sensible Debido a Ocupantes .....	55
4.1.4.	Carga Térmica Producida por Lámparas.....	55
4.1.5.	Carga Térmica por Infiltración de Aire Exterior.....	55
4.1.6.	Carga Térmica Total.....	56
4.2.	Modelado de la Cámara sin Refrigeración.....	57
4.3.	Modelado del Ciclo de Refrigeración .....	58

4.4.	Modelo del Sistema de Alimentación de Energía .....	59
4.5.	Implementación de los Modelos en el Simulador .....	62
4.5.1.	Módulo de Cargas Térmicas .....	62
4.5.2.	Módulo de Cámara sin Refrigeración .....	63
4.5.3.	Módulo del Sistema de Refrigeración .....	63
4.5.4.	Módulo de Suministro de Energía.....	64
4.5.5.	Integración de los Módulos del Sistema.....	65
 <b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>67</b>
<b>EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA CÁMARA MEDIANTE SIMULACIÓN ...</b>		<b>67</b>
5.1.	Caso de Estudio.....	67
5.1.1.	Producción de Carne de Pollo .....	67
5.1.2.	Condiciones Climáticas de Apan .....	69
5.1.2.1.	Temperatura .....	69
5.1.2.2.	Humedad .....	70
5.1.2.3.	Viento .....	70
5.1.2.4.	Energía Solar .....	70
5.1.3.	Características del Proceso de Almacenamiento.....	71
5.2.	Dimensionamiento de la Cámara Frigorífica .....	72
5.2.1.	Materiales para la Construcción de la Cámara.....	72
5.2.2.	Propuesta del Sistema de Refrigeración .....	73
5.3.	Simulación de la Cámara Frigorífica.....	74
5.3.1.	Variables de Entrada .....	74
5.3.2.	Variables de Salida.....	74
5.4.	Resultados de la Simulación .....	75
5.4.1.	Simulación de Cargas Térmicas .....	75
5.4.2.	Simulación del Interior de la Cámara sin Ciclo de Refrigeración.....	77
5.4.3.	Simulación del Ciclo de Refrigeración por Compresión Simple .....	78
5.4.4.	Simulación del Producto Refrigerado .....	80
5.4.5.	Simulación de la Energía Eléctrica Suministrada por el Sistema Fotovoltaico .....	80
 <b>CONCLUSIÓN .....</b>		<b>82</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>84</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I</b> Características de los gases refrigerantes.....	29
<b>Tabla II.</b> Calidad nutricional .....	35
<b>Tabla III.</b> Calidad nutricional (continuación) .....	35
<b>Tabla IV.</b> Peso promedio de la carcasa .....	36
<b>Tabla V.</b> Vida útil del pollo.....	45
<b>Tabla VI.</b> Normas de sanidad.....	45
<b>Tabla VII.</b> Tamaño de la producción de pollo .....	68
<b>Tabla VIII.</b> Tamaño de producción en el municipio de Apan Hidalgo. ....	68
<b>Tabla IX.</b> Producción de cabezas promedio al 3% respecto al día .....	69
<b>Tabla X.</b> Características termodinámicas del producto cárnico .....	69
<b>Tabla XI.</b> Irradiancia descendente de onda corta de superficie de todo el cielo. ....	71
<b>Tabla XII.</b> Condiciones de diseño.....	72
<b>Tabla XIII.</b> Dimensiones internas.....	72
<b>Tabla XIV.</b> Materias de construcción de la cámara frigorífica. ....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Cámara frigorífica.....	13
<b>Figura 2.</b> Material aislante.....	15
<b>Figura 3.</b> Ciclo de refrigeración convencional.....	20
<b>Figura 4.</b> Ciclo de refrigeración en cascada. ....	22
<b>Figura 5.</b> Ciclo de refrigeración con cámara flash .....	24
<b>Figura 6.</b> Ciclo de refrigeración con sub-enfriamiento líquido-vapor.....	26
<b>Figura 7.</b> Ciclo de refrigeración con con acumulador de preenfriamiento.....	27
<b>Figura 8.</b> Muslo entero empacado en charola de espuma de poliestireno .....	42
<b>Figura 9.</b> Pechugas de pollo al vacío .....	43
<b>Figura 10.</b> Atmosferas modificadas .....	43
<b>Figura 11.</b> Módulo de cargas térmicas. ....	62
<b>Figura 12.</b> Módulo de cámara sin refrigeración. ....	63
<b>Figura 13.</b> Módulo de ciclo de refrigeración.....	64
<b>Figura 14.</b> Módulo del suministro de energía. ....	65
<b>Figura 15.</b> Simulador de la cámara frigorífica. ....	66
<b>Figura 16.</b> Diagrama del ciclo de refrigeración simple .....	73
<b>Figura 17.</b> Diagrama del arreglo fotovoltaico para alimentar eléctricamente el sistema .....	74
<b>Figura 18.</b> Cargas térmicas totales .....	75
<b>Figura 19.</b> Cargas térmicas .....	76
<b>Figura 20.</b> Cargas térmicas.....	77
<b>Figura 21.</b> Temperatura del aire en la cámara .....	77
<b>Figura 22.</b> Trabajo del compresor .....	78
<b>Figura 23.</b> Ciclados a lo largo del día .....	79



<b>Figura 24.</b> Calor disipado por el proceso de condensación .....	79
<b>Figura 25.</b> Temperatura del producto dentro de la cámara frigorífica. ....	80
<b>Figura 26.</b> Potencia eléctrica suministrada por el panel.....	81
<b>Figura 27.</b> Potencia suministrada por los paneles y requerida por sistema .....	81

## INTRODUCCIÓN

La ingesta de carne de pollo es fuente de proteínas de alta calidad al contener aminoácidos esenciales que nuestro organismo es capaz de sintetizar con facilidad, además de contener ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, que son benéficas para la salud por su función cardioprotectora [15]. Así mismo, esta carne es una buena fuente de fósforo, hierro y potasio, que por su alta digestibilidad se aconseja su consumo para personas de todas las edades. Debido a todos sus beneficios es importante asegurar que la ingesta de carne de pollo cumpla con las normas sanitarias necesarias, desde la crianza de las aves hasta la venta al consumidor final.

Las condiciones higiénico-sanitarias de las aves en las granjas son controladas a lo largo de todo el proceso de crianza por veterinarios, y supervisores de SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). Los pollos deben criarse en un ambiente libre de estrés y en perfectas condiciones ambientales para que su desarrollo sea correcto [15]. Una vez cumplido el periodo de crianza se pasa al sacrificio y almacenamiento del animal, siempre y cuando no se consuma in situ, y es aquí donde las condiciones de conservación son primordiales para mantener las propiedades organolépticas del producto.

Las características principales para la conservación de la carne de pollo son; humedad relativa de entre 85% a 90 %; temperatura de refrigeración de entre 0° C a 4° C y temperatura de congelación de entre -18° C a -22° C [16]. Una cámara frigorífica es fundamental para lograr este fin, ya que permite tener un manejo de temperatura controlado para mantener las características organolépticas de la carne de pollo en condiciones óptimas y alargando su vida útil.

Las cámaras frigoríficas son diseñadas para proporcionar el aislamiento necesario y mantener constante las condiciones internas, especialmente la temperatura en un rango de 5° C a -18° C. Una capa aislante de baja dispersión de calor controla eficazmente la temperatura, la humedad y la atmósfera interna, proporcionando un ambiente adecuado para almacenar y preservar los productos. Sin embargo, para determinar si un diseño o

implementación de una cámara frigorífica es viable debe realizarse una evaluación energética del funcionamiento de la misma [1].

El objetivo general de este proyecto es desarrollar una herramienta que permita analizar el comportamiento de cámaras frigoríficas mediante la simulación del proceso de refrigeración, evaluando sus condiciones de operación y estimando el consumo energético, para determinar su viabilidad técnica y la factibilidad en la implementación de tecnologías que reduzcan el impacto económico ambiental de su funcionamiento.

El simulador desarrollado en la presente tesis permite predecir el comportamiento del interior de la cámara frigorífica en condiciones nominales de operación, además de proponer el dimensionamiento de un arreglo fotovoltaico que satisfaga la demanda de energía del sistema. El diseño del simulador se realizó mediante el modelado matemático de las variables de estado, el cálculo de cargas térmicas y el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración. Como variables de entrada se requieren las características del producto, las condiciones climáticas del lugar, las propiedades de los materiales de construcción de la cámara y la cantidad de individuos que ingresarán al recinto.

El simulador resuelve las ecuaciones diferenciales correspondientes al modelo matemático y entrega como resultados: la temperatura del producto, el trabajo ejercido por el compresor, el número de ciclados, el calor desechado por el condensador, el coeficiente de desempeño (COP), la cantidad de energía que consume a lo largo del día y el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico para satisfacer la demanda energética de la cámara frigorífica. El uso de energía solar para satisfacer la demanda de energía requerida por la cámara aportaría al desarrollo sustentable de estos sistemas, debido a que no emiten contaminantes al aire y reducen la dependencia del consumo de la red eléctrica.

El poder reproducir los procesos y estudiar su comportamiento mediante la simulación permite analizar el impacto de los posibles cambios que tenga el sistema, o comparar diferentes alternativas de diseño, sin el alto coste de los experimentos a escala real. En el presente proyecto de tesis se tomó como caso de estudio la simulación de una cámara frigorífica para la conservación de carne de pollo, en el municipio de Apan Hidalgo.

La tesis se divide en cinco capítulos que muestran el desarrollo del proyecto, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo 1. Marco teórico, se presentan los conceptos básicos requeridos para el desarrollo del proyecto; tipos y componentes de cámaras frigoríficas, ciclos de refrigeración, clasificación de los fluidos refrigerantes que pueden ser utilizados en estos sistemas, concepto de cargas térmicas y características de los productos perecederos.

En el capítulo 2. Pollo como producto biológico perecedero, se describe el proceso de producción de la carne de pollo, los factores antemortem, los factores postmortem, las propiedades organolépticas y las características fisicoquímicas, de conservación y almacenamiento, para mantener la calidad de este producto.

En el capítulo 3. Metodología para el diseño de cámaras frigoríficas, se describen los pasos propuestos que se llevan a cabo para el diseño de cámaras frigoríficas; la ubicación geográfica donde se instalará la cámara, el producto a almacenar, las características de operación de la cámara, las cargas térmicas involucradas y la selección del sistema de refrigeración a emplear.

El capítulo 4. Desarrollo de los modelos para la simulación de la cámara, aquí se presenta el modelado matemático de las variables de estado y su implementación en los módulos que conforman el simulador; modelo de cargas térmicas, modelo de cámara sin refrigeración, modelo del ciclo de refrigeración y modelo del sistema de alimentación de energía. El simulador resuelve las ecuaciones diferenciales correspondientes, obteniendo la carga térmica total, la temperatura del producto, el calor desechado, el trabajo del compresor y la energía eléctrica consumida por la cámara y suministrada por el arreglo fotovoltaico a lo largo del día.

En el capítulo 5. Simulación de la operación de la cámara para su evaluación, se propone un caso de estudio que consiste en el diseño de una cámara frigorífica de carne de pollo, en la región de Apan, Hidalgo. El simulador debe comportarse de manera similar a como lo haría la cámara, para poder determinar la factibilidad de los equipos y materiales seleccionados para su construcción, obteniendo como resultados el comportamiento de la operación del sistema lo más semejante a la realidad.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Cámaras Frigoríficas

Las cámaras frigoríficas son utilizadas para la conservación, la refrigeración o la congelación de productos, especialmente alimentos, en los que debe mantenerse una temperatura estable y preestablecida; este grado de temperatura depende de la función de la cámara y puede variar de los +18 °C para la maduración a los -28 °C para congelación del producto [2]. Las cámaras frigoríficas con temperatura inferior a los 10 °C se usan para la refrigeración y la congelación de productos perecederos. La estructura puede ser fija o móvil, y en su interior, puede necesitar una atmósfera controlada [3].

Las cámaras frigoríficas favorecen un ambiente adecuado para la conservación y la congelación del producto con un eficaz control de temperatura, humedad y atmósfera interna, gracias a los revestimientos aislantes de baja transmitancia y dispersión térmica, en la figura 1 se muestra una imagen representativa de una cámara frigorífica.



*Figura 1. Cámara frigorífica [4].*

#### 1.1.1. Tipos de Cámaras Frigoríficas

Existe una variedad de tipos y tamaños de cámaras frigoríficas para adaptarse a diferentes necesidades y aplicaciones [1].

- Las cámaras de conservación se utilizan para mantener los productos a temperaturas ligeramente por encima del punto de congelación.
- Las cámaras de congelación son ideales para conservar los productos a temperaturas de -18 °C.
- Las cámaras de congelación rápida reducen la temperatura de los alimentos a tasas mucho más altas que los métodos de conservación convencionales. Esto ayuda a evitar la formación de grandes cristales de hielo que podrían dañar la estructura celular de los alimentos, lo que ayuda a conservar su calidad y textura.

La elección del tipo adecuado de cámara frigorífica depende de factores como la temperatura requerida, el tipo de productos a almacenar y las necesidades específicas de la industria o aplicación.

### **1.1.2. Componentes de una Cámara Frigorífica**

Una cámara frigorífica está compuesta por elementos esenciales que trabajan juntos para mantener el ambiente frío y controlado, donde el diseño y la configuración específica de estos puede variar según sea el propósito de la cámara y los requisitos de temperatura de los productos almacenados [9].

- El sistema de refrigeración es el principal elemento de la cámara frigorífica y consta de varios componentes, incluye el compresor, el condensador, el evaporador y la válvula de expansión, entre otros. Juntos, estos componentes trabajan para disminuir la temperatura del aire dentro de la cámara y mantener una temperatura constante.
- Los paneles aislantes que forman las paredes, techos y suelos de la cámara frigorífica. Están hechos de materiales de alta densidad, que ayudan a mantener la temperatura deseada con la menor transferencia de calor posible.
- Las puertas de la cámara frigorífica son especialmente diseñadas para mantener la temperatura interna y evitar fugas de calor.
- Los controladores y sensores son dispositivos que monitorean y regulan la temperatura y otros parámetros dentro de la cámara frigorífica.

- La iluminación se utiliza para facilitar la visualización y el acceso a los productos almacenados. Estas luces suelen ser de bajo consumo y están diseñadas para funcionar en ambientes de baja temperatura.

### 1.1.3. Materiales de Construcción

Los materiales de construcción de una cámara frigorífica son fundamentales para asegurar un funcionamiento eficiente y mantener la temperatura deseada en el interior. Los materiales utilizados deben ser aislantes térmicos de alta calidad que minimicen la transferencia de calor desde el exterior para asegurar un rendimiento óptimo y una temperatura de conservación adecuada.

#### 1.1.3.1. Materiales Aislantes

Para los ambientes con temperatura controlada se emplean sobre todo paneles aislantes con espumas de poliuretano, que están diseñados para la industria alimentaria y médica, ya que combinan propiedades aislantes y un óptimo comportamiento contra el fuego, en la figura 2 se muestra los tipos de materiales aislantes utilizados para cámaras frigoríficas.

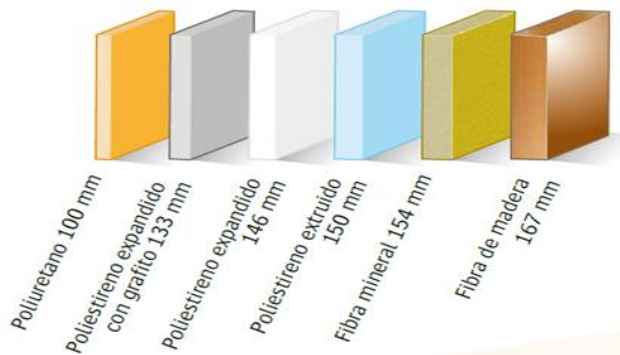


Figura 2. Material aislante [5].

- **Poliuretano**

La composición básica del poliuretano es el petróleo y el azúcar, permite la formación de una espuma rígida ligera con más del 90 % de las celdas cerradas y con un coeficiente de conductividad térmica son entre 0.022 y 0.035 W/m K [7].

Como características de este producto está la rigidez estructural, la gran adherencia sobre cualquier superficie, amortigua vibraciones, no absorbe humedad ambiental y la relación precio y capacidad aislante es buena [5].

El poliuretano es el producto más empleado como aislamiento en los últimos años, aunque está sufriendo un descenso en su utilización debido principalmente al alto grado de combustión del mismo por lo que se está sustituyendo por otros productos como las lanas minerales.

- **Poliestireno**

El poliestireno es un plástico duro y sólido, se usa frecuentemente en productos que requieren transparencia, tales como envases de alimentos y equipos de laboratorio.

- Poliestireno extruido

El Poliestireno Extruido (XPS), es un aislante duradero, resistente al agua, de elevadas presiones mecánicas, no se pudre y además de aislar protege la lámina impermeable mejorando la durabilidad de ésta [5].

Este material posee una conductividad térmica entre 0.033 W/mK y 0.036 W/mK [7], presenta una baja absorción de agua, presiones mecánicas entre 200 kPa y 700 kPa, además de una densidad de 33 kg/m<sup>3</sup>. Existen varias opciones en el Poliestireno extruido atendiendo a espesores desde 30 mm a 100 mm, a mayor espesor mayor capacidad de aislamiento térmico [6].

- Poliestireno expandido

El poliestireno expandido (EPS), es un material plástico espumado, derivado del poliestireno.

En el sector de la construcción es conocido como Corcho Blanco o Techopan y se utiliza como material de aligeramiento y aislamiento térmico. Puede tener gran variedad de espesores, placas de 2 metros de largo por 1.2 metros de ancho, con espesores de 20, 30 y 40 cm, con densidades que oscilan entre 10 kg/m<sup>3</sup> a 25 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica entre 0.06 W/m K y 0.03 W/m K [7].

El poliestireno expandido comparte muchas características con el poliestireno extruido, su composición química es idéntica: aproximadamente un 95% de poliestireno y un 5% de gas. La diferencia radica únicamente en el proceso de conformación, ya que el extruido



produce una estructura de burbuja cerrada, lo que convierte al poliestireno extruido en el único aislante térmico capaz de mojarse sin perder sus propiedades.

- **Fibra mineral**

La fibra mineral es un material flexible de fibras inorgánicas constituido por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que contiene y mantiene el aire en estado inmóvil, esta estructura permite conseguir productos muy ligeros con alto nivel de protección y aislamiento térmico, acústica y contra el fuego [5].

La lana mineral puede encontrarse en cubiertas, forjados, fachadas, suelos, falsos techos, tabiques divisorios, conductos de aire acondicionado, protección de estructuras, puertas, mamparas y cerramientos exteriores. La composición básica de la lana mineral determina si se trata de una lana de roca o una lana de vidrio.

- Lana de roca

Los paneles de lana de roca están compuestos en un 98 % de roca de origen volcánico (basalto) y un 2% de ligante orgánico, teniendo una densidad entre  $4.8 \text{ kg/m}^3$  a  $3.2 \text{ kg/m}^3$ , y una conductividad térmica de  $0.040 \text{ W/m K}$  [6].

Los productos de lana de roca no retienen el agua, poseen una estructura no capilar, además de ofrecer una fuerte permeabilidad al vapor de agua.

- Lana de roca proyectada (mortero tecwool)

Es mortero compuesto de lana de roca y cemento blanco, concebido como aislamiento térmico proyectado, sin puentes térmicos, incombustible y de una gran rapidez de aplicación. Además de sus cualidades como protección al fuego, aporta una excelente absorción acústica, este producto no es tóxico, no contiene yeso, escayola, tampoco contiene cal, ni emite gases tóxicos. Es un material imputrescible, tiene una conductividad térmica de  $0.003 \text{ W/m K}$  y espesores de hasta 70 mm [6].

- Lana de vidrio

Los paneles de lana de vidrio están compuestos principalmente por arena de sílice, carbonato de calcio y de magnesio que le confiere resistencia a la humedad. Se obtiene por

un proceso similar a la lana de roca, tiene una densidad de  $56 \text{ kg/m}^3$  a  $72 \text{ kg/m}^3$  y una conductividad térmica entre  $0.038 \text{ W/mK}$  a  $0.039 \text{ W/mK}$  [6].

Los productos de lana de vidrio no retienen el agua, poseen una estructura de fibras cruzadas desordenadamente y gracias a la porosidad abierta, la lana mineral de vidrio permite que el aire quede ocluido en el interior de sus poros, ofreciendo una escasa conductividad, con la consiguiente capacidad como aislamiento térmico y acústico.

### **1.1.3.2. Cortinas**

Las cortinas en las cámaras frigoríficas sirven como una barrera contra diferentes problemas como los son la salida del aire frío, la entrada del aire caliente, la entrada de agentes nocivos y patógenos, siendo una barrera que impide que el ambiente interior se contamine o pierda cualidades térmicas.

- **Cortinas de lamas de PVC**

Las cortinas de lamas PVC son elementos ampliamente utilizados en las instalaciones de cámaras frigoríficas, así como en otros sectores industriales, donde es necesaria una separación de ambientes con excelentes beneficios y ventajas, como pueden ser, el ahorro energético, aislamiento acústico, separaciones para mantener ambientes higiénicamente aislados y unas óptimas condiciones de visibilidad. Para salas donde se trabaja con temperaturas refrigeradas o climatizadas, las cortinas de lamas de PVC, consiguen reducir de una manera importante las posibles pérdidas o transferencias no deseadas de temperatura [8].

Las cortinas de lamas PVC son elementos de instalación muy sencilla, de muy fácil mantenimiento y con un precio ventajoso, no requieren de un mantenimiento específico, la mayoría de fabricantes suministran rollos individuales para la sustitución de aquellas lamas en mal estado o con deterioro muy evidente.

Las características más destacables de las cortinas de lamas PVC son:

- Flexibles y blandas, lo que permite un paso sencillo para personas carros o pequeña maquinaria.
- Aíslan del calor y el ruido.

- Resistentes a golpes y desgarros.
- Reciclables y económicas.
- Fácil mantenimiento, permitiendo ahorro en los costos en este apartado.
- Soportan temperaturas de uso, según sectores y acabados de entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Cortina de aire mural**

Las cortinas de aire son elementos de recirculación forzada de aire, con el fin de establecer una barrera invisible para establecer una separación de ambientes diferentes, de tal manera que se produzca un aprovechamiento eficiente y a su vez, permitiendo, el paso físico de personas y mercancías.

El funcionamiento de estos elementos está basado en la inyección de aire a alta velocidad mediante un ventilador centrífugo, que cubre todo el hueco de apertura o paso, lo que permite mantener la temperatura y las condiciones de la estancia a proteger [9].

Para conseguir un efecto-cortina lo más óptimo posible, es importante tener en cuenta algunas cuestiones:

- Cubrir el paso en toda su altura y anchura.
- Las cortinas de aire se deben instalar siempre lo más cerca posible del hueco.
- Se pueden instalar varias unidades seguidas.

## **1.2. Ciclos de Refrigeración**

Los sistemas de refrigeración están diseñados primordialmente para disminuir la temperatura del producto almacenado en cámaras frigoríficas, o cámaras de refrigeración, las cuales pueden contener una variedad de alimentos o compuestos químicos, conforme especificaciones.

Los diferentes ciclos de refrigeración tienen la misma función, pero unos son más eficientes que otros, considerando algunos componentes extras [10].

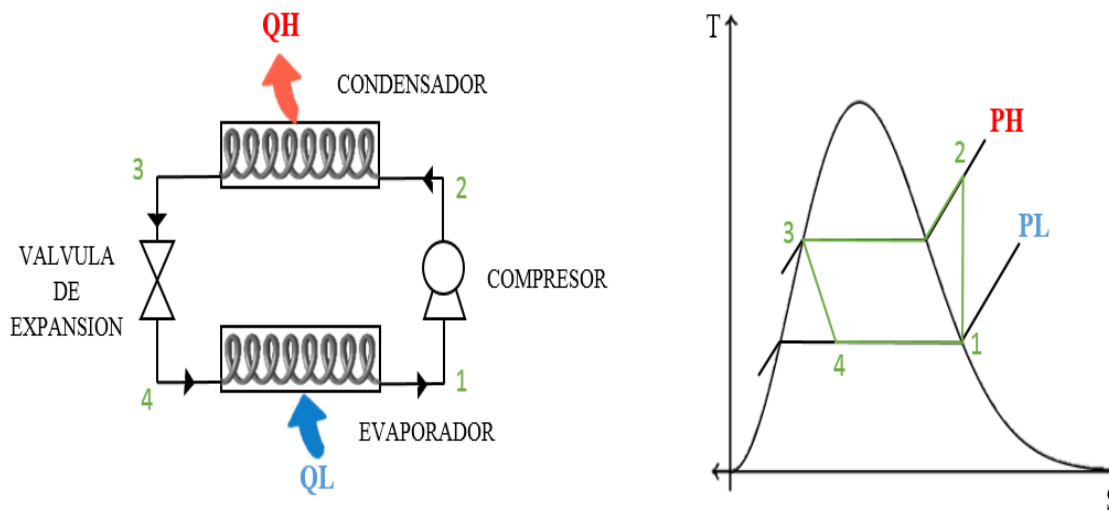
Los ciclos constan de cuatro procesos esenciales los cuales son:

- Evaporación: En esta etapa el gas refrigerante absorbe el calor del espacio que lo rodea y por consiguiente lo enfría.

- Compresión: Después de evaporarse el refrigerante a la salida del evaporador pasa al compresor en donde se comprime incrementando su presión y temperatura.
- Condensación: Aquí el gas refrigerante a alta presión y alta temperatura, rechaza calor hacia el medio, cambiando de gas a líquido a alta presión.
- Expansión: Esta etapa es desarrollada por un mecanismo de control de flujo, donde el refrigerante a baja presión regresa al evaporador para absorber calor y comenzar un nuevo ciclo.

### 1.2.1. Ciclo de Refrigeración Simple

El ciclo de refrigeración simple por compresión de vapor se utiliza en refrigeradores convencionales, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. Se compone de los cuatro procesos; evaporación, compresión, condensación y expansión [11]. En la figura 3 se muestra el diagrama temperatura-entropía de este ciclo y los componentes que lo conforman.



*Figura 3. Ciclo de refrigeración convencional. [49]*

Características principales del ciclo:

- La entropía del estado 1 al estado 2 permanece constante.
- La entalpía del estado 3 al estado 4 se mantiene constante.
- El estado 1 es vapor saturado.
- El estado 2 es vapor sobrecalentado.

- El estado 3 es líquido saturado.
- El estado 4 es mezcla.

El coeficiente de desempeño (COP), para un sistema de refrigeración convencional, se obtiene como:

$$COP = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}} \quad (1.1)$$

Los parámetros  $\dot{Q}_l$ ,  $\dot{W}_C$  y  $\dot{m}_R$  se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{Q}_l}{h_1 - h_4} \quad (1.2)$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_R (h_1 - h_4) \quad (1.3)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}_R (h_2 - h_1) \quad (1.4)$$

Donde:

$\dot{Q}_l$  es calor o carga a refrigerar.

$\dot{W}_C$  es el trabajo del compresor.

$\dot{m}_R$  es el flujo másico del refrigerante.

## 1.2.2. Ciclo de Refrigeración en Cascada

Un ciclo de refrigeración en cascada consiste en dos etapas, estas etapas se conectan por medio de un intercambiador de calor, el cual sirve como evaporador para la etapa superior y como condensador en la etapa inferior [11].

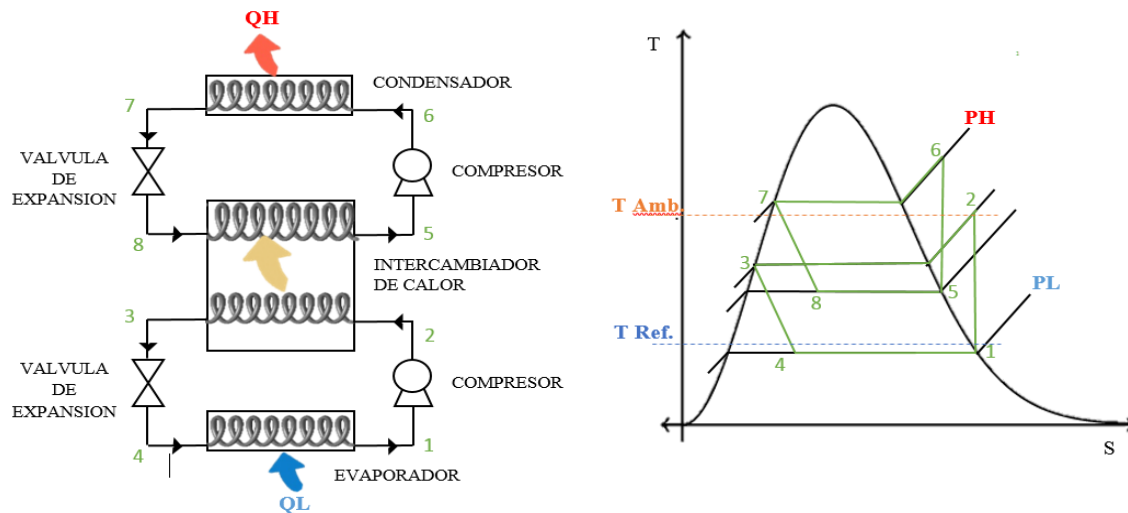


Figura 4. Ciclo de refrigeración en cascada. [49].

En este ciclo se pueden emplear dos tipos o más de refrigerante según las etapas que tenga, las múltiples etapas permiten tener una disminución del trabajo de compresión y un aumento en la capacidad de enfriamiento  $\dot{Q}_l$ , sin embargo, necesita un mayor mantenimiento puesto que tiene múltiples equipos. En la figura 4 se muestra el diagrama temperatura-entropía de este ciclo y los componentes que lo conforman.

Características principales del ciclo:

1.ª Etapa

- La entropía del estado 1 al estado 2 permanece constante.
- La entalpía del estado 3 al estado 4 se mantiene constante.
- El estado 1 es vapor saturado.
- El estado 2 es vapor sobrecalentado.
- El estado 3 es líquido saturado.
- El estado 4 es mezcla.
- La temperatura en el estado 3 es mayor a la temperatura de los estados 8 y 5, en este proceso se da el intercambio de calor.

## 2.<sup>a</sup> Etapa

- La entropía del estado 5 al estado 6 permanece constante.
- La entalpía del estado 7 al estado 8 se mantiene constante.
- El estado 5 es vapor saturado.
- El estado 6 es vapor sobrecalentado.
- El estado 7 es líquido saturado.
- El estado 8 es mezcla.

El coeficiente de desempeño (COP), para un sistema en cascada, se obtiene como:

$$COP = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}_T} \quad (1.5)$$

Los parámetros  $\dot{Q}_l$ ,  $\dot{W}_T$  y  $\dot{m}_R$  calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_R = \frac{h_5 - h_8}{h_2 - h_3} \quad (1.6)$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_R (h_1 - h_4)$$

$$\dot{W}_{C.1} = \dot{m}_R (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{C.2} = \dot{m}_R (h_6 - h_5) \quad (1.7)$$

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{C.1} + \dot{W}_{C.2} \quad (1.8)$$

Donde:

$\dot{W}_{C.1}$  es el trabajo del compresor de la 1.<sup>a</sup> etapa.

$\dot{W}_{C.2}$  es el trabajo del compresor de la 2.<sup>a</sup> etapa.

$\dot{W}_T$  es el trabajo total requerido por los compresores.

### 1.2.3. Ciclo de Refrigeración con Cámara Flash

Este ciclo consta de una cámara Flash que separa el vapor y el líquido de la mezcla, el vapor pasa directamente al compresor por medio de una tubería y el líquido se va hacia el evaporador con la finalidad de extraer la carga térmica [11]. Debido a que el refrigerante entra en fase líquida al evaporador se puede obtener una mayor capacidad de enfriamiento.

En la figura 5, se muestra el diagrama temperatura-entropía de este ciclo y los componentes que lo conforman.

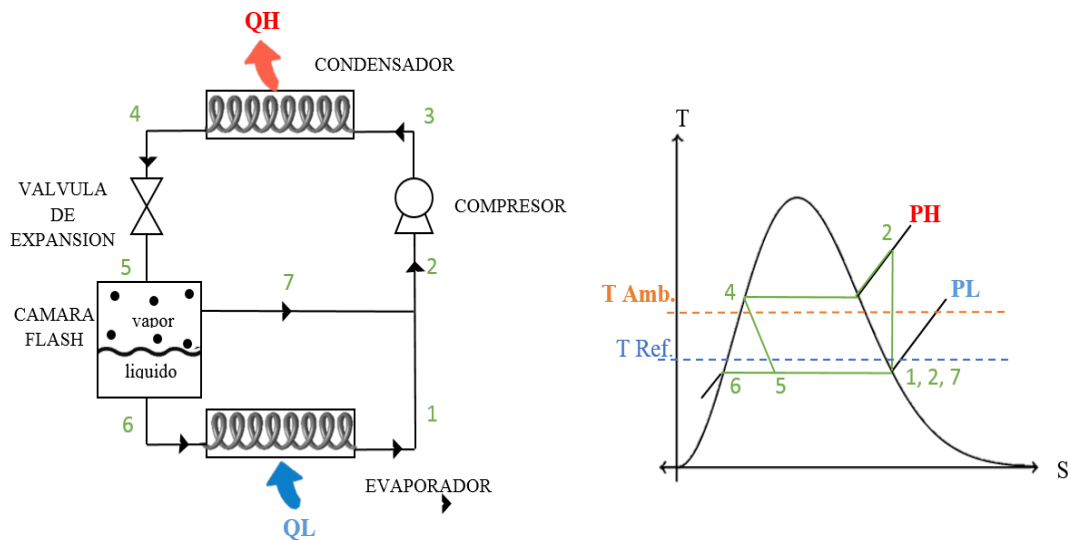


Figura 5. Ciclo de refrigeración con cámara flash. [49]

Características principales de este ciclo:

- La entropía del estado 1 al estado 2 permanece constante.
- La entalpía del estado 4 al estado 5 se mantiene constante.
- Los estados 1, 2 y 7 son vapor saturado.
- El estado 3 es vapor sobrecalentado.
- El estado 4 y 6 son líquido saturado.
- El estado 5 es mezcla.
- El estado 6 es líquido saturado.

Los parámetros  $\dot{Q}_l$ ,  $\dot{W}_C$  y  $\dot{m}_R$  calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_R - \dot{m} \quad (1.9)$$

$$\dot{m}_V = X * \dot{m}_R \quad (1.10)$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_L (h_1 - h_6) \quad (1.11)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}_R (h_3 - h_2) \quad (1.12)$$

$$\dot{m}_R = \dot{m}_V + \dot{m}_L \quad (1.13)$$

Donde:

$\dot{m}_L$  es el flujo másico del refrigerante líquido.



$\dot{m}_v$  es el flujo másico del refrigerante vapor.

$X$  es la calidad.

#### 1.2.4. Ciclo de Refrigeración con Sub-Enfriamiento Líquido-Vapor

Este ciclo consta de un intercambiador de calor, para generar subenfriamiento, que trabaja en conjunto con un ciclo de refrigeración simple. El proceso de subenfriamiento provoca que el refrigerante pase de líquido saturado, a la salida del condensador, a líquido comprimido, antes de la válvula de expansión, generando mayor capacidad de enfriamiento. Así mismo, la mezcla de refrigerante que sale del evaporador es calentada por el intercambiador de calor de subenfriamiento, hasta vapor saturado a una presión mayor, lo que resulta en una disminución del trabajo del compresor [11]. En la figura 6, se muestra el diagrama temperatura-entropía de este ciclo y los componentes que lo conforman.

Características principales de este ciclo:

- La entropía del estado 1, 2 y 6 permanece constante.
- La entalpía del estado 4 al 5 se mantiene constante.
- El estado 1 es vapor saturado.
- El estado 2 es vapor sobrecalentado.
- El estado 3 es líquido saturado.
- El estado 4 es líquido comprimido.
- Los estados 5 y 6 son mezcla.

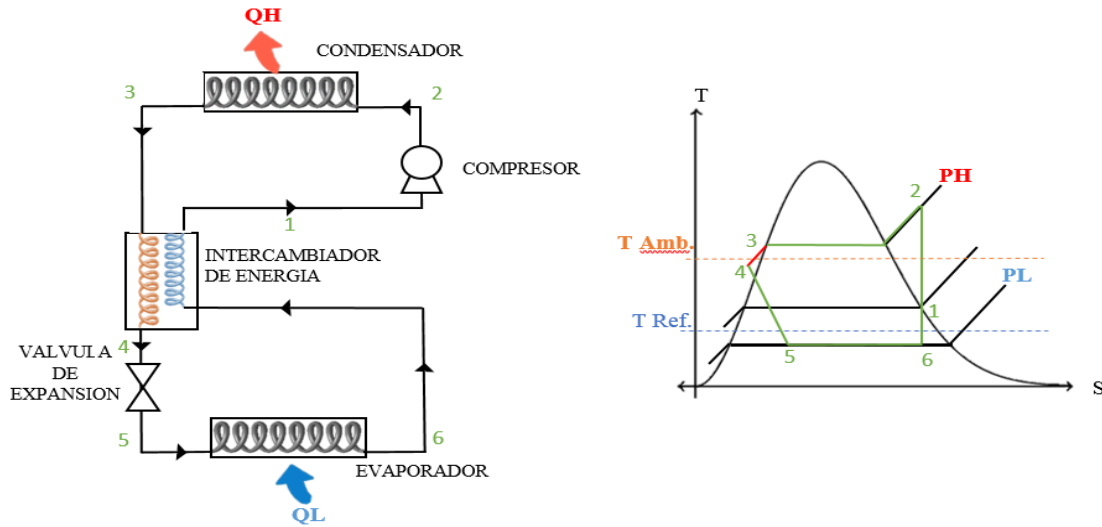


Figura 6. Ciclo de refrigeración con sub-enfriamiento líquido-vapor [49]

Los parámetros  $\dot{Q}_l$ ,  $\dot{W}_C$  y  $\dot{m}_R$  calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_T - \dot{m}_V$$

$$\dot{m}_V = X * \dot{m}_T$$

$$X = \frac{h-h_f}{h_{fg}} \quad (1.14)$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_T (h_6 - h_5) \quad (1.15)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}_T (h_2 - h_1) \quad (1.16)$$

Donde:

$h$  es la entalpía en zona mezcla.

$h_f$  es la entalpía específica del líquido saturado.

$h_{fg}$  es el calor latente de evaporación.

### 1.2.5. Ciclo Simple con Acumulador de Preenfriamiento

El sistema consta de un ciclo de refrigeración simple conectado a un acumulador de preenfriamiento que está compuesto por una cámara flash y una bomba. En este ciclo el acumulador mejora la capacidad de enfriamiento, debido a que la mezcla de refrigerante a la salida de la válvula de expansión es dividida en vapor saturado y líquido comprimido, el vapor se envía directamente al proceso de compresión y la bomba succiona el líquido para

llegar al evaporador como líquido saturado a baja presión y absorber mayor cantidad de calor que si fuese mezcla [11]. En la figura 7 se muestra el diagrama temperatura-entropía de este ciclo y los componentes que lo conforman.

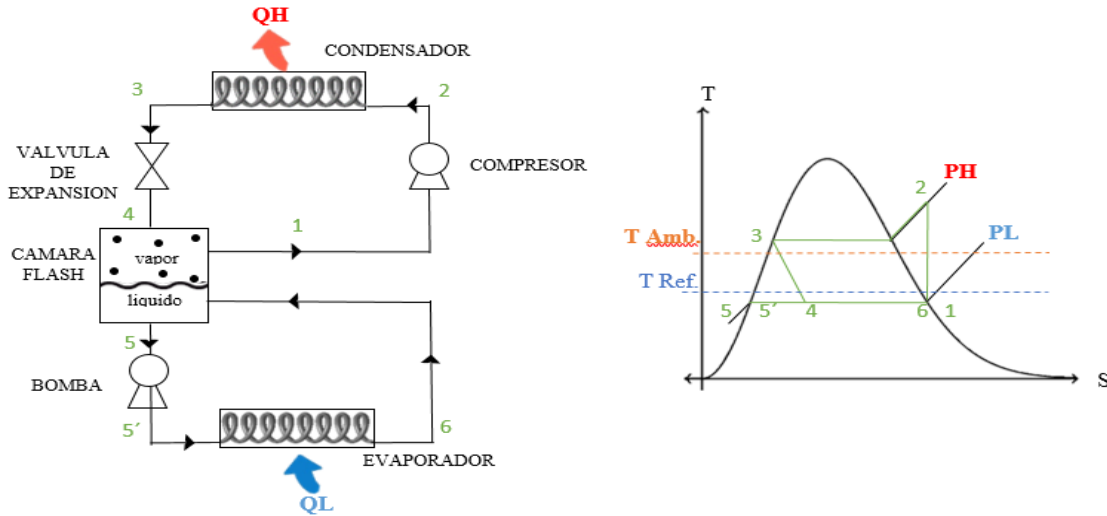


Figura 7. Ciclo de refrigeración con acumulador de preenfriamiento. [49]

Características principales de este ciclo

- La entropía del estado 1 al estado 2 permanece constante.
- La entalpía del estado 3 al estado 4 se mantiene constante.
- los estados 3, 5 y 5' son líquido saturado.
- El estado 4 es mezcla.
- los estados 1 y 6 son vapor saturado.

Los parámetros  $\dot{Q}_l$ ,  $\dot{W}_T$  y  $m_R$  calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_T - \dot{m}_V$$

$$\dot{m}_V = X * \dot{m}_T$$

$$X = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_L (h_1 - h_5) \tag{1.17}$$

$$\dot{W}_T = W_C + W_B \tag{1.18}$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}_V (h_2 - h_1) \tag{1.19}$$

$$\dot{W}_B = \dot{m}_L (h_{5'} - h_5) \quad (1.20)$$

Donde:

$\dot{W}_B$  es el trabajo de la bomba.

### 1.3. Refrigerantes

Un fluido refrigerante es una sustancia que puede absorber y transportar grandes cantidades de calor, el refrigerante en fase líquida absorbe el calor estando a baja presión, lo cual genera un cambio de fase; el calor es liberado por el vapor a una mayor presión volviendo a la fase líquida.

Los fluidos refrigerantes se pueden clasificar en: halocarbonados, inorgánicos y orgánicos.

#### 1.3.1. Halocarbonados

Son compuestos químicos conformados de una estructura de carbono a la que se unen átomos del grupo VII A de la tabla periódica, conocidos como halógenos (flúor, cloro y/o bromo) [10].

Los refrigerantes pertenecientes a este grupo son:

- Clorofluorocarbonos CFC: son refrigerantes halogenados compuestos por cloro, flúor y carbono. Son volátiles, afectan a la capa de ozono y su ODP es alto. Actualmente su uso está prohibido a nivel mundial. Los refrigerantes de esta clasificación son: R-11, R-113, R-114, R-115, R-12, R-13, R-400, R-500, R-502 y R-503 [10].
- Hidroclorofluorocarbonos HCFC: Son refrigerantes halogenados que además de cloro, flúor y carbono tienen hidrógeno. Fueron los sustitutos a mediano plazo de los CFC. Los refrigerantes de esta clasificación son: R-123, R-124 y R-22 [12].
- Hidrofluorocarbonos HFC: Son refrigerantes halogenados que sólo contienen hidrógeno, flúor y carbono. Se diseñaron para sustituir a los CFC y a los HCFC. Al ser sus moléculas menos estables que la de los otros dos grupos, y como no tienen cloro en su composición, no dañan a la capa de ozono, sin embargo, son gases de efecto invernadero. Los refrigerantes de esta clasificación son: R-16, R-125, R-

134a, R-143a, R-152a, R-227ea, R-23, R-236ea, R-236fa, R-245fa, R-32, R-234yf y R-1234ze [12].

- Mezclas. Este tipo de refrigerantes se dividen en dos grupos:

**Zeotrópicas:** se comportan como refrigerantes puros, en este tipo de refrigerantes los procesos de evaporación y condensación son a diferentes temperaturas y presiones. Los refrigerantes de esta clasificación son: R-401A, R-401B, R-401C, R-402, R-402B, R-403A, R-403B, entre otros.

**Azeotrópicas:** en este tipo de mezclas los procesos de evaporación y condensación son a la misma temperatura y presión. Los refrigerantes de esta clasificación son: R-404A, R-407A, R-407B, R-407C, R-407D, R-407E, R-410A, R-413A, entre otros [12].

### 1.3.2. Inorgánicos

Estos refrigerantes son compuestos químicos o combinaciones de los elementos de la tabla periódica que no contienen carbono, excepto el CO<sub>2</sub>. Estos refrigerantes no poseen enlaces carbono-hidrógeno en su estructura. Se caracterizan por tener un bajo costo y por tener un ODP bajo. Los refrigerantes pertenecientes a este grupo son: R-718, R-717, R-744, R-702, R-704, R-729 y R-764 [1].

### 1.3.3. Orgánicos

Estos refrigerantes son compuestos químicos o combinaciones de los elementos de la tabla periódica que contienen carbono, excepto el R-744. Los refrigerantes orgánicos más comunes son los hidrocarburos HC los halocarbonados y combinaciones entre ellos. Los refrigerantes pertenecientes a este grupo son: R-170, R-290 y R-600a [12].

### 1.3.4. Refrigerantes más utilizados para contenedores frigoríficos.

En la tabla I se muestran las características termodinámicas de los refrigerantes utilizados para los sistemas de refrigeración.

*Tabla I Características de los gases refrigerantes [12], [13] y [14].*

REFRIGERANTE	R_12	R_123	R_134a	R_404A	R_290
--------------	------	-------	--------	--------	-------

<b>Nombre químico</b>	Diclorodifluorometano	2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	R-125/143a/134a (44/52/4)	propano
<b>Formula química</b>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> -CHCl <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>		CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH
<b>GWP</b>	10900	93	1430	3922	3
<b>ODO</b>	1	0.02	-	-	-
<b>Punto de ebullición (°C)</b>	-29.8	27.85	-26.5	-46.5	-41.1
<b>Punto de congelación (°C)</b>	-158	-107	-103	-	-187.7
<b>Temperatura crítica (°C)</b>	112	183.68	101.1	72.1	96.74
<b>Densidad crítica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	552	550	0.51	485	220.
<b>Presión crítica (MPa)</b>	4137	3668	4067	3730	4248
<b>Grupo de seguridad</b>	A1	B3	A1	A1	A3
<b>Aplicaciones</b>	-Refrigeración doméstica y comercial -Aire acondicionado	-Sistemas de refrigeración -Aire acondicionado	-Refrigeración comercial -Aire acondicionado automoción -Chillers -Refrigeración industrial -Transportes frigoríficos	-Vehículos refrigerados -Frío industrial y comercia	-Climatización en equipos portátiles. -Refrigeración comercial (conservación y congelación) -Refrigeración industrial

## 1.4. Carga Térmica en una Cámara de Refrigeración

La carga térmica es la cantidad de calor que debe extraerse con la finalidad de mantener la temperatura deseada en la cámara de refrigeración, para conservar el producto almacenado en condiciones óptimas.

Las cargas térmicas consideradas en una cámara frigorífica son:

- Ganancia de calor a través de paredes
- Ganancia de calor por infiltración

- Ganancia de calor debido a equipo eléctrico
- Ganancia de calor debido a ocupantes
- Ganancia de calor por producto

#### **1.4.1. Ganancia de Calor a través de Paredes**

La carga térmica por ganancias de calor a través de las paredes depende de tres factores:

- La superficie total exterior de la cámara frigorífica.
- El aislamiento empleado.
- La diferencia de temperatura entre el ambiente exterior donde sea instalada la cámara frigorífica y la temperatura de operación en su interior.

Cuanto mayor sea la superficie total exterior, mayor será la cantidad de calor que se debe extraer, si el aislamiento es de mayor espesor, menores serán las ganancias de calor a través del mismo [15].

#### **1.4.2. Ganancia de Calor por Infiltración**

La cantidad de calor que entra en la cámara frigorífica o refrigerador por infiltración depende de varios factores, como la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, el área de la puerta, el número de veces que se abra la puerta y la permeabilidad del material de construcción [15].

#### **1.4.3. Ganancia de Calor debido a Equipo Eléctrico**

La ganancia de calor debido a equipos eléctricos se refiere al calor disipado por estos dispositivos. Para calcular esta carga térmica se debe determinar la potencia eléctrica nominal de cada equipo y multiplicarla por un factor de conversión, que representa la fracción de la potencia eléctrica que se convierte en calor en lugar de realizar trabajo útil [15].

#### **1.4.4. Ganancia de Calor debido a Ocupantes**

La carga térmica por ocupantes se refiere a la cantidad de calor que generan las personas dentro de un espacio cerrado. Esta carga térmica es el resultado de la actividad metabólica de los ocupantes, que producen calor como subproducto. Cuantas más personas haya en un espacio y más activas estén, mayor será la carga térmica [15].

### **1.4.5. Ganancia de Calor por Producto**

Para obtener dicho valor, cuando se trate de la conservación de productos a temperaturas bajas, deben conocerse los factores siguientes:

- La cantidad de kilogramos de producto que entra diariamente en la cámara.
- La diferencia de temperatura del producto a la entrada y la del interior.
- El calor específico del producto a enfriar.
- El tiempo en que se enfriara el producto.

La entrada diaria de producto es un dato importante, por lo que es conveniente hacer una estimación extrema de la cantidad de producto y así evitar un cálculo erróneo de las ganancias de calor [15].

## **1.5. Productos Perecederos**

Los productos perecederos son aquellos que tienen una vida útil limitada que pueden destruirse, degradarse o volverse no aptos para el consumo humano si se manipulan incorrectamente o se almacenan durante demasiado tiempo

La clasificación de estos productos es fundamental para la gestión de la cadena de suministro de frío, el almacenamiento y la distribución de estos productos, ya que se deben tomar precauciones esenciales para mantener su frescura y calidad hasta llegar al consumidor.

### **1.5.1. Alimentos**

Los alimentos comienzan una descomposición de forma sencilla, agentes como la temperatura, la humedad o la presión son determinantes para que el alimento comience su deterioro, ejemplos de estos alimentos son:

- Mayor perecibilidad: los derivados de los animales, los vegetales y las frutas
- Menor perecibilidad: la leche y carnes ya que se conservan en refrigeración.

Los alimentos perecederos necesitan ser refrigerados a 5 °C, o congelados a -18 °C para retardar o detener el crecimiento de bacterias, que ocurre rápidamente en alimentos como carne, mariscos y productos lácteos cuando no se almacenan adecuadamente. Las mercancías enlatadas o selladas al vacío que incluyen carne o productos lácteos, una vez



abiertas, se consideran perecederas y deben ser almacenadas a bajas temperaturas [16]. De igual manera los alimentos cocinados se consideran alimentos perecederos, para almacenar estos alimentos por un período de tiempo deben mantenerse a temperaturas bajas.

### **1.5.2. Vacunas**

Las vacunas se consideran productos perecederos debido a su naturaleza biológica y a la necesidad de mantener su eficacia y seguridad a lo largo del tiempo. Las vacunas son productos que contienen componentes biológicos, como proteínas, virus atenuados o inactivados, que son necesarios para estimular una respuesta inmunológica en el cuerpo humano. La degradación de estos componentes puede afectar la capacidad de la vacuna para generar una respuesta inmune adecuada.

La cadena de frío es un componente fundamental en la distribución de vacunas, ya que las mantiene a temperaturas controladas desde el momento de su fabricación hasta el momento en que se administran a los pacientes. Las vacunas deben conservarse en refrigeración entre 2 °C a 8 °C. Las vacunas producidas con cepas víricas y/o liofilizadas pueden almacenarse a temperaturas entre -15 °C y -25 °C [17].

### **1.5.3. Muestras Biológicas**

Las muestras biológicas también se consideran productos perecederos, ya que su integridad y calidad pueden deteriorarse con el tiempo si no se almacenan y manejan adecuadamente. Aunque no se descompongan como los alimentos, las muestras biológicas pueden sufrir cambios químicos, biológicos o físicos que prosperen su utilidad y precisión en análisis posteriores.

Las moléculas biológicas, como el ADN, las proteínas y los ácidos nucleicos, pueden degradarse con el tiempo debido a la exposición a la temperatura, la luz y otros factores ambientales. Pueden contaminarse con microorganismos u otras sustancias, lo que puede afectar la validez de los resultados y la seguridad de los investigadores que trabajan con ellas. Para garantizar la integridad y la utilidad de las muestras biológicas, se deben seguir las estrictas normas de manejo, almacenamiento y transporte. Para la conservación de muestras biológicas a baja temperatura, en ultracongelación se debe llegar a una temperatura de -40 °C a -86 °C en un corto periodo de tiempo menor a cuatro horas, en

crioconservación a temperaturas tan bajas de  $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$  lo que suspende por completo la actividad biológica en la muestra, evitando los procesos de degradación. Además, se pueden utilizar refrigeradores con temperatura entre  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  o en congelación entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [18].

#### **1.5.4. Germoplasma**

El germoplasma se refiere al material genético almacenado en forma de semillas, esporas, tejidos u otros componentes biológicos, y se utiliza para preservar la diversidad genética de plantas, animales y microorganismos. Se puede considerar como producto percedero en términos de su viabilidad y capacidad para germinar o reproducirse en un corto lapso. Con el paso del tiempo, las semillas y otros componentes del germoplasma pueden perder su capacidad para germinar o reproducirse debido a la degradación genética y bioquímica. Si el germoplasma no se almacena adecuadamente y se maneja con precaución, puede haber riesgo de contaminación genética o cruzamiento no deseado con otras variedades o especies, lo que podría alterar sus características originales.

Para prevenir la pérdida de viabilidad y la degradación genética, las instituciones y bancos de germoplasma siguen prácticas de conservación específicas. Estas prácticas pueden incluir la conservación a bajas temperaturas como la criopreservación o almacenamiento en frío. Las temperaturas de conservación del germoplasma son a temperatura ambiente entre  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en congelación a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y crioconservación con nitrógeno líquido a  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  [19].

## **CAPÍTULO 2**

### **POLLO COMO PRODUCTO BIOLÓGICO PERECEDERO**

El pollo es un ave de corral que tiene la capacidad de adaptarse a una amplia variedad de ambientes, por lo cual la cría de este tipo de especies para la producción y comercialización de su carne se ha extendido por todos los continentes del mundo.

Actualmente, la carne de pollo es considerada uno de los alimentos más saludables para el consumo humano, esto se debe su alto aporte proteico (22%) y bajo contenido de lípidos (4 a 5%), que sumado a un precio relativamente más bajo frente a las demás carnes hacen del pollo la segunda carne más preferida, luego del cerdo, a nivel mundial [20].

Según la pieza del pollo las características nutricionales van a variar ligeramente. En la tabla II Y III se muestran los valores de calidad nutricional por pieza de pollo, en donde se muestran datos equivalentes a la composición de filamentos de 100 gramos de porción comestible.

Tabla II. Calidad nutricional [21].

Calidad nutricional		Alas c/piel	Carne c/piel	Carne s/piel	Corazón	Hígado	Molleja	Muslo c/piel	Muslo s/piel	Pechuga c/piel	Pierna c/piel	Visceras o menudos
Agua	%	66.2	65.5	75.5	73.6	76.5	79.3	67.7	62.9	69.5	69.9	69.8
Energía	Kcal.	222	216	119	153	116	94	211	209	172	187	168
Proteína	g	18.3	17.1	21.4	15.6	16.9	17.7	17.3	25.9	20.9	18.2	17.9
Grasa total	g	16	16	3.1	9.3	4.8	2.1	15	11	9.3	12	9.2
Carbohidratos	g	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0	2.1
Ceniza	g	0.69	0.87	0.96	0.85	1.06	0.95	0.81	0.95	1.01	0.85	0.97
Calcio	mg	12	10	12	12	8	11	10	12	11	10	10
Fosforo	mg	132	166	173	177	297	148	145	183	174	149	198
Hierro	mg	0.95	1.01	0.89	5.96	8.99	2.49	0.99	1.31	0.74	1.01	5.93
Tiamina	mg	0.05	0.06	0.07	0.15	0.31	0.03	0.06	0.07	0.06	0.07	0.1
Riboflavina	mg	0.09	0.12	0.14	0.73	1.78	0.23	0.15	0.23	0.09	0.16	1.11

Tabla III. Calidad nutricional (continuación) [21].

Calidad nutricional		Alas c/piel	Carne c/piel	Carne s/piel	Corazón	Hígado	Molleja	Muslo c/piel	Muslo s/piel	Pechuga c/piel	Pierna c/piel	Visceras o menudos
Niacina	mg	5.93	6.57	8.24	4.88	9.73	3.68	5.43	6.53	9.91	5.43	8.53
Vitamina C.	mg	1	0	2	3	18	4	2	0	0	3	11
Retinol	mcg	44	38	16	9	33	19	44	20	25	37	32
Á.C. grasos mono-insat.	g	6.35	6.64	0.9	2.37	1.25	0.51	6.51	4.15	3.82	4.89	2.75
Á.C. grasos poli-insat.	g	3.4	3.4	0.8	2.7	0.8	0.4	3.4	2.5	2	2.7	2.1
Á.C. grasos saturados	g	4.5	4.5	0.8	2.7	1.6	0.5	4.4	3	2.7	3.4	2.6
Colesterol	mg	77	73	70	136	345	240	84	95	64	83	240
Potasio	mg	156	196	229	176	230	237	192	238	220	198	226
Sodio	mg	73	68	77	74	71	69	76	88	63	79	77
Zinc	mg	1.33	1.07	1.54	6.59	2.67	2.72	1.6	2.57	0.8	1.77	3.01

Magnesio	mg	18	19	25	15	19	15	20	24	25	21	18
Vitamina B6.	mg	0.35	0.32	0.43	0.36	0.85	0.11	0.26	0.35	0.53	0.29	0.52
Vitamina B12.	mcg	0.32	0.31	0.37	7.29	16.6	1.21	0.3	0.31	0.34	0.32	10.8
Folato Equiv. FD	mcg	4	6	7	72	588	5	8	8	4	11	350
Fracción comestible	%	0.54	0.72	0.48	1	1	1	0.79	0.65	0.8	0.73	1

El pollo es sacrificado entre las 5 y 12 semanas de vida, suele alcanzar un peso de entre 1 kg a 3 kg. En la tabla IV se muestra el tamaño de distintos cortes de pollo por unidad (peso bruto y neto), en base a pollos de 1,800 kg y 2,500 kg [16].

*Tabla IV. Peso promedio de la carcasa [16].*

Corte por unidad	Pollo de 1,800 kg		Pollo de 2,500 kg	
	Peso Bruto (g)	Peso Neto (g)	Peso Bruto (g)	Peso Neto (g)
Pechuga filete	250	170	350	250
Cuarto trasero	400	-	600	-
Pata-muslo	300	200	450	300
pata	150	80	200	115
muslo	150	100	250	150
ala	100	50	130	80

## 2.1. Proceso de Producción de Carne de Pollo

La producción de carne de pollo consta de varias etapas; la planta de incubación se encarga del manejo del huevo incubable y del nacimiento de los pollos; la granja de engorde está a cargo de su crecimiento; la planta de procesamiento se ocupa de los pollos terminados y de sus canales.

Las fases de transición críticas para el productor son las siguientes [22]:

- I. Nacimiento del pollo.
- II. Cosecha, almacenamiento y transporte del pollo recién nacido.
- III. Desarrollo del apetito en el pollo joven.
- IV. Cambio de los sistemas suplementarios de alimentación y agua de bebida al sistema permanente de la granja.
- V. Captura y transporte del pollo al final de la etapa de engorde en granja.

Entre cada una de estas etapas existe una fase de transición, la cual se debe manejar con un mínimo de estrés para las aves.

## 2.2. Carne de Pollo de Engorda

Para el pollo de engorde su ingesta de alimentos consta de vitaminas y proteínas, además de una vacunación que permita su correcto desarrollo y que al final del proceso tenga un mayor peso. Lo anterior permite el aumento de la producción en la granja avícola y por lo tanto el incremento de mercado.

Para la obtención de carne de pollo de calidad es necesario un procesamiento de los pollos terminados y de sus canales, donde se involucran factores antemortem y postmortem.

### 2.2.1. Factores Antemortem

- **Ayuno.** Cuando los pollos alcanzan la edad adecuada durante su crecimiento pasan a la planta de procesamiento, donde los pollos son sometidos a un periodo de ayuno antes del sacrificio, garantizando agua durante las primeras cuatro horas de este ayuno se contribuye a la evacuación de la mayor parte del contenido gastrointestinal con la finalidad de reducir la contaminación de canales al momento de la evisceración [20].
- **Captura.** Este proceso se puede dar de dos formas: mecánica o manual, aunque la mecánica no es muy recomendada puesto que los pollos pueden ser golpeados y la carne perjudicada; la técnica manual también llamada convencional es el método más utilizado, debido a que es una técnica que maltrata menos a las aves al momento de su enjaule en cajas de transporte [20].
- **Espera en andén.** Es el tiempo en que las aves llegan a la planta de procesamiento hasta la descarga del vehículo; se sugiere que la espera de andén sea en salas cubiertas, ventiladas y climatizadas en un rango de entre 17 °C y 28 °C [20].
- **Descarga y colgado.** Los pollos son descargados y liberados de su jaula hacia el área de colgado, se pueden utilizar bandas de transporte automáticas o puede ser manual hasta ubicarlos en la cadena de procesamiento. El lugar donde se cuelgan las aves en los ganchos es un aspecto importante, el lugar debe ser oscuro ya que contribuye a mantenerlas tranquilas y reduce golpes innecesarios [20].

- Insensibilización o aturdimiento. El objetivo de este punto es causar la inconsciencia de las aves antes del sacrificio, puede ser mediante, un shock eléctrico [20].
- Degüello. Las formas que existen para el degüello de aves son diversas, la más utilizada es interno, se corta la vena yugular y la arteria carótida en la cavidad bucal con una navaja en forma de gancho [20].

### **2.2.2. Factores Postmortem**

- Desangrado. En esta fase finalmente se causa la muerte del ave durante un periodo aproximado de 2 a 3 minutos, si se rebasa ese tiempo el pollo presenta un estrés que posteriormente puede reflejarse en el endurecimiento de los folículos provocando una rigidez cadavérica con efectos negativos para la carne [20].
- Escaldado. El escaldado por inmersión consiste en hacer pasar los canales desangrados a un tanque con agua caliente, facilitando la eliminación de plumas y mejorando la higiene [20].
- Desplume. Esta etapa tiene la finalidad de remover las plumas de los canales, se realiza por medio del roce de dedos de goma sobre las plumas mientras los canales escaldados pasan a través de la desplumadora [20].
- Desprendimiento de cabeza, corte de patas y lavado previo a evisceración. El desprendimiento de cabeza se requiere cuando las aves tuvieron un degüello externo, el corte de patas debe ser un centímetro por debajo de la articulación del corvejón (entre la pata y el muslo), este corte se hace para evitar que la piel se retraiga durante el proceso de evisceración y facilitar la manipulación posterior de la carcasa. El lavado antes de la evisceración ayuda a remover cualquier suciedad, plumas sueltas, restos de sangre u otras impurezas que puedan estar presentes en la superficie de la piel [20].
- Evisceración. Una vez que el ave está colgada se debe retirar las vísceras contenidas en el abdomen, evitando la ruptura del aparato digestivo que pudiese contaminar a la carcasa. Por esto es de suma importancia el ayuno de las aves [20].

- Enfriamiento. Las aves se colocan en tanques o recipientes llenos de agua fría, este proceso se encarga de extraer el calor del cuerpo de las aves, lo que ayuda a reducir su temperatura interna. La temperatura del agua debe mantenerse por debajo de los 10 ° C para garantizar un enfriamiento efectivo [20].
- Despresado y deshuesado. Generalmente, las aves se despresan después de que han sido enfriadas y están listas para ser deshuesadas. Para el despresado, las aves se colocan en una línea de producción donde se utilizan cuchillas para separar la carne de la carcasa, posteriormente las piezas de carne despresadas se transfieren a una estación de deshuesado donde se lleva a cabo esta operación [20].

### **2.2.3. Proceso de Rigor Mortis**

Después de que el pollo es sacrificado, los músculos pasan por una serie de cambios bioquímicos que causan rigidez en el cuerpo. Este proceso comienza aproximadamente dentro de las primeras 6 horas después de la muerte y puede durar hasta 24 horas, dependiendo de varios factores como la edad del pollo, la temperatura ambiente y otros relacionados con la manipulación del animal.

Durante el rigor mortis, los músculos se contraen y se vuelven rígidos debido a la falta de adenosina trifosfato (ATP), que es necesaria para relajar los músculos, por lo tanto, en el rigor mortis el pH desciende de forma gradual debido a la acumulación de ácido láctico en los tejidos musculares.

## **2.3. Parámetros Físicoquímicos de la Carne de Pollo**

Los parámetros físicoquímicos de la carne pueden variar dependiendo de varios factores, como la edad del ave, la alimentación, el manejo postmortem, entre otros. Sin embargo, algunos de los parámetros físicoquímicos comunes que se suelen analizar en la carne de pollo son: la capacidad de retención de agua, el pH y el tipo de músculo.

### **2.3.1. Capacidad de Retención de Agua**

La capacidad de retención de agua (CRA) en el pollo fresco es de  $17.60 \pm 2.587$  [23], sin embargo, la CRA de la carne es altamente variable cuando se somete a fuerzas externas

como cortes, calentamiento o molido. La ganancia o pérdida de agua del músculo durante el procesamiento depende tanto de las características del animal como del manejo al que fue sometido previo a la matanza.

### **2.3.2. pH y Tipo de Músculo**

El valor normal de pH del pollo vivo es cercano a la neutralidad de 7 a 7.2, en las 3 o 4 primeras horas del pollo sacrificado desciende a cifras de 6.15 en la pechuga y 6.40 en otro músculo, llegando a valores finales de 5.70 en la pechuga y 5.90 en otro músculo a las 24 horas post mortem. El descenso de pH produce en último término la liberación de enzimas lisosómicas, fundamentalmente proteolíticas que actuarán en la maduración de la carne [24].

El tipo de musculo se puede clasificar a partir de su pH, como:

- Tipo A: Músculo con PH entre 6.9 – 7.1, una hora después de haber sido sacrificado; estos músculos se logran con pollos que fueron bien alimentados, descansados y tuvieron un mínimo esfuerzo, lo que da como resultado un músculo más suave [24].
- Tipo B: Músculos con pH menor a 6.9, esto se logra con pollos que tuvieron mucha actividad y esfuerzo durante su muerte, lo que da como resultado músculos con altas concentraciones de ácido láctico y de una dureza mayor [24].

## **2.4. Parámetros de Calidad**

Existen varios factores que determinan la calidad de la carne desde la forma de criar al ave hasta el tipo de procesamiento al que ha sido sometida para su matanza. Los parámetros de calidad de la carne son una combinación de propiedades físicas, químicas y sensoriales que determinan la seguridad alimentaria y la aceptabilidad del consumidor.

### **2.4.1. Calidad Sensorial**

La calidad sensorial se refiere a cómo se perciben las características de la carne a través de los sentidos; la vista, el olfato, el gusto y el tacto. Estas particularidades son fundamentales para determinar la aceptabilidad y la preferencia del consumidor.



- Color: La carne cruda del pollo puede variar de blanco, azulado o amarillo, todos estos colores son normales y están directamente relacionados con la especie, el ejercicio, la edad o dieta. Las aves más jóvenes tienen menos grasa debajo de la piel, lo cual puede resultar en un color azul y una piel amarilla que puede ser el resultado de pigmentos en la alimentación [25].
- Sabor y olor: La carne cruda presenta un ligero olor a suero y un ligero sabor metálico [23]. Los olores anormales, como el olor a amoníaco o añejo, pueden indicar deterioro o contaminación bacteriana.
- Textura. La carne de pollo debe ser tierna pero firme, con una estructura suave, jugosa y elástica al tacto [25].

### 2.4.2. Calidad Microbiológica

En la carne de pollo la mayoría de las bacterias patógenas se encuentran usualmente en la piel. La contaminación de la carne ocurre durante la matanza, el sacrificio, el desplume, el proceso de preenfriamiento o en las perforaciones del tracto digestivo durante la evisceración.

Para la carne de pollo en refrigeración, los límites de recuento bacteriano varían según las normativas, en México, la regulación de la calidad microbiológica de la carne de pollo en refrigeración está establecida principalmente en la Norma Oficial Mexicana (NOM) [26], por lo que los límites microbiológicos para la carne de pollo son:

- Recuento de aerobios mesófilos: Límite aceptable: El  $10^6$  UFC/g.
- *Escherichia coli*: No debe exceder de 100 UFC/g.
- *Salmonella spp*: Debe estar ausente en 25 g de muestra.
- *Staphylococcus aureus*: No debe exceder de 100 UFC/g.
- *Listeria monocytogenes*: Debe estar ausente en 25 g.

## 2.5. Empaquetamiento

El empaque está pensado para llevar productos de un sitio a otro de forma segura y sin sufrir algún daño. El consumidor juzga la calidad de la carne de acuerdo a algunas

características que evalúa, tales como el color y la apariencia general que puede ser percibida aún en carne empacada. Posteriormente, al retirar el empaque se evalúan parámetros como textura, olor y sabor.

Algunos de los empaques utilizados para la carne de pollo son la charola de espuma de poliestireno convencional, el sistema al vacío, la atmosfera modificada, entre otros [27].

### 2.5.1. Charola de Espuma de Poliestireno Convencional

La charola de espuma de poliestireno convencional, con o sin almohadilla absorbente y película envolvente de cloruro de polivinilo, es una técnica comúnmente encontrada en el mercado mexicano debido a la facilidad de su utilización, tecnología sencilla y bajo costo. Sin embargo, la vida útil del producto no se prolonga considerablemente debido a que facilita la proliferación de microorganismos, aunque por otra parte para los productos procesados, sobre todo para los de baja humedad, este empaque resulta ser adecuado. En la figura 8 se muestra una imagen representativa del empaquetamiento en charolas de espuma de poliestireno.



*Figura 8. Muslo entero empacado en charola de espuma de poliestireno [28].*

### 2.5.2. Sistemas al Vacío

El hecho de mantener la carne bajo condiciones libres de  $O_2$  extiende su vida de anaquel. Empacar al vacío no ha sido un método exitoso para la venta de carne, debido a que ésta adquiere un color púrpura oscuro y con presencia de exudado visible en el empaque. Esta técnica se ha mejorado usando doble película, donde la superficie es impermeable y la

interior permite la penetración de  $O_2$ , por lo que la carne adquiere un color rojo brillante [27] como se muestra en la figura 9.



*Figura 9. Pechugas de pollo al vacío [29].*

### **2.5.3. Atmósferas Modificadas**

Este método consiste en eliminar el aire dentro del empaque que contiene al producto, para posteriormente inyectar un gas o mezcla de gases. La vida útil de la carne empacada en atmósferas modificadas aumenta entre 10% y 15% cuando se utiliza una película con permeabilidad, teniendo precaución de que la carne empacada no sea expuesta a altas concentraciones de  $O_2$ , ya que acelera el crecimiento de microorganismos aerobios y favorece la oxidación de lípidos y mioglobina [27]. En la figura 10 se muestra la carne empacada mediante atmosferas modificadas.



*Figura 10. Atmosferas modificadas [30]*

## **2.6. Almacenamiento en Condiciones Óptimas**

El almacenamiento de carne avícola en condiciones óptimas es crucial para preservar su calidad, seguridad alimentaria y frescura. Los procedimientos de enfriamiento, congelación y almacenamiento de las carcasas, deberán asegurar la calidad de la carne.

### **2.6.1. Preenfriamiento y Escurrido**

El método más comúnmente utilizado por las plantas de sacrificio para el enfriamiento del canal, es la inmersión en agua con hielo, ya que es el más económico y eficiente. En el proceso las aves se introducen en un contenedor con agua helada a una temperatura aproximada de 10 °C durante 30 a 45 minutos aproximadamente y son sometidas a una agitación constante para que su enfriamiento sea homogéneo. Una vez que el canal sale del enfriador es colocado inmediatamente, por uno de sus muslos o alas, en ganchos de un transportador aéreo de escurrimiento para drenar el agua que se halla depositado en los bolsillos que se forman en la cavidad abdominal, la piel o entre la carne.

### **2.6.2. Refrigeración**

Después del proceso de sacrificio, no deberá haber demora en el enfriamiento de la carcasa hasta lograr una temperatura interna entre 0 °C y 5 °C [31]. Si el corte de la carne se efectúa antes de este proceso, se debe bajar la temperatura dentro de la primera hora. Si el corte se efectúa después del enfriamiento no se deberá permitir que la temperatura interna de la carcasa y las partes exceda los 10 °C [31].

### **2.6.3. Congelación**

La temperatura de congelación óptima para las carcasas es de -12 °C a -18 °C. El agua que pierde el producto es irrecuperable y afecta a la calidad del mismo, por esta razón, para una buena conservación se recomiendan humedades relativas del 85 al 95 % [32].

## **2.7. Vida Útil de la Carne de Pollo**

Para predecir el tiempo de la vida útil de la carne de pollo y poder colocar la fecha de vencimiento es necesario emplear la velocidad de deterioro como una función de las

condiciones ambientales, los cambios físicos, químicos y microbiológicos que se producen en la carne, para evitar el deterioro es esencial reducir la temperatura de la carne después del sacrificio.

La vida útil del pollo depende de la temperatura de almacenamiento, las bacterias presentes luego del procesamiento y la pieza del pollo que se esté evaluando, en la tabla V se muestra la vida útil del pollo a temperatura de refrigeración a -4 °C y a temperatura de congelación de -18 °C.

*Tabla V. Vida útil del pollo [33].*

	Tiempo máximo en refrigeración	Tiempo máximo en congelación
Pollo entero	1 a 2 días	1 año
Pollo en presas	1 a 2 días	9 meses
Menudencias	1 a 2 días	3 a 4 meses

## 2.8. Normas de Sanidad

En México, la producción de carne de pollo está sujeta a diversas normativas y regulaciones sanitarias para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública. En la tabla VI se muestran las normas de calidad que se requieren para la producción y almacenamiento de cárnicos para mantener la carne en condiciones óptimas.

*Tabla VI. Normas de sanidad [49].*

Norma oficial mexicana	Nombre	Objetivo
NOM-213-SSA1-2002	Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.	Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones sanitarias que deben cumplir los productos cárnicos procesados. Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en el territorio nacional para las personas físicas o morales que se dedican a su proceso o importación [34].
NOM-092-SSA1-1994	Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa	Esta Norma Oficial Mexicana establece el método para estimar la cantidad de microorganismos viables presentes en un alimento, agua potable y agua purificada, por la cuenta de colonias en un medio sólido, incubadas aeróbicamente [35].
NOM-092-SSA1-1994	Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa	Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en el Territorio Nacional para las personas físicas o morales que requieran efectuar este método en productos nacionales y de importación, para fines oficiales [36]
NOM-009-ZOO-1994	Proceso sanitario de la carne.	La presente Norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objeto, establecer los procedimientos que deben cumplir los establecimientos destinados al sacrificio de animales y los que industrialicen, procesen, empaquen, refrigerar productos o subproductos cárnicos para consumo humano, con el propósito de obtener productos de óptima calidad higiénico-sanitaria [37].
	Especificaciones zoosanitarias para la construcción y equipamiento de	Esta Norma es aplicable a todos los establecimientos que se dedican al sacrificio de animales de abasto, frigoríficos,

<b>NOM-008-ZOO-1994</b>	establecimientos para el sacrificio de animales y los dedicados a la industrialización de productos cárnicos.	empacadoras y plantas industrializadoras de productos y subproductos cárnicos [38].
<b>NOM-CCA-022-ECOL/1993</b>	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de matanza de animales y empaqueo de cárnicos.	Indica los límites máximos permisibles para el pH, DBO, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, nitrógeno amoniacal y conformes totales en efluentes de la industria de matanza de animales y empaqueo de cárnicos [39].
<b>NOM-194-SSA1-2004</b>	Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos.	Esta Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer las especificaciones sanitarias que deben cumplir los establecimientos que se dedican al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio de sus productos. Así como las especificaciones sanitarias que deben cumplir los productos [40].
<b>NOM-033-ZOO-1995</b>	Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres.	Esta norma establece los requisitos sanitarios mínimos que deben cumplir las instalaciones y equipos utilizados en la producción, industrialización, almacenamiento y transporte de carne de ave [4].
<b>NOM-033-SAG/ZOO-2014</b>	Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres	Esta norma establece los requisitos para la prevención y control de la influenza aviar en granjas avícolas comerciales, así como para la vigilancia epidemiológica y el control sanitario de esta enfermedad en aves de corral en México [42]
<b>NOM-251-SSA1-2009</b>	Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.	Establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los establecimientos dedicados al sacrificio y procesamiento de productos de origen animal, incluyendo carne de pollo. Define criterios de higiene y buenas prácticas de manufactura para garantizar la inocuidad de los productos cárnicos [43]

## **CAPÍTULO 3**

# **METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA CÁMARA FRIGORÍFICA**

El diseño de cámaras frigoríficas es un proceso que implica una serie de pasos y consideraciones para crear un entorno óptimo de almacenamiento a bajas temperaturas, se requiere conocer las características del lugar de su implementación y las necesidades específicas del producto.

### **3.1. Consideraciones para el Diseño de una Cámara Frigorífica**

El diseño de una cámara frigorífica es de suma importancia para mantener la temperatura y las condiciones adecuadas para la conservación de productos perecederos, como alimentos, medicamentos o productos químicos sensibles al incremento de temperatura. El diseño debe adaptarse a las necesidades específicas de su aplicación, ya que los requisitos pueden variar según el tipo de productos a almacenar y las características ambientales de su ubicación. La importancia de considerar tanto el producto a refrigerar como las condiciones climáticas del lugar a instalar la cámara, permite tener un diseño que asegure las condiciones óptimas de operación, mejore el rendimiento y el consumo energético.

### **3.2. Ubicación Geográfica y Condiciones Climáticas**

Como se mencionó anteriormente, las características climáticas del lugar donde se instalará la cámara son de suma importancia para el diseño y operación de la misma. Las principales condiciones climáticas a tomar en cuenta son la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación solar.

#### **3.2.1. Temperatura**

La temperatura del ambiente de la ubicación geográfica afecta la cantidad de energía necesaria para mantener la temperatura deseada en la cámara frigorífica, ya que, depende de que el sistema se encuentra en el exterior o en el interior de un establecimiento. En climas cálidos, se requiere más energía para enfriar el interior de la cámara y mantenerla a

una temperatura baja. En climas fríos, se puede aprovechar la temperatura exterior baja para reducir la carga de enfriamiento y mejorar la eficiencia energética.

### **3.2.2. Humedad**

La humedad del ambiente puede influir en la humedad relativa dentro de la cámara, dado que, en climas secos, la humedad puede disminuir, lo que puede provocar una deshidratación de los productos almacenados, por otro lado, en climas húmedos, la humedad relativa puede ser alta, por lo que debe controlarse para evitar la formación de hielo en las superficies frías y proteger los productos.

### **3.2.3. Viento**

El viento puede influir en la pérdida de calor o frío a través de las paredes de la cámara frigorífica. Las corrientes de aire pueden afectar la eficiencia del aislamiento térmico y, por lo tanto, la carga de enfriamiento requerida. Por otro lado, puede ser un factor a considerar al ubicar las tomas de aire y salidas de aire en el sistema de la cámara frigorífica para asegurar una distribución uniforme del aire frío.

### **3.2.4. Radiación Solar**

La radiación solar puede calentar las superficies exteriores de las paredes de las cámaras frigoríficas, lo que aumenta la carga térmica y puede afectar la eficiencia del sistema de refrigeración. Es importante considerar la orientación de la cámara frigorífica en relación con la exposición al sol y utilizar técnicas de sombreado para reducir la absorción de calor. Por otro lado, al estar la cámara frigorífica al interior de un establecimiento, la radiación solar no será una consideración para el diseño de estos sistemas de refrigeración.

## **3.3. Características del Producto a Almacenar**

Las características de los productos son fundamentales para determinar los requisitos de almacenamiento y las condiciones de diseño de la cámara. Algunas de las características claves de los productos que se almacenan son la naturaleza del producto, la cantidad de almacenamiento, la temperatura de conservación, embalaje, etc.



### **3.3.1. Naturaleza del Producto**

Conocer la naturaleza del producto que se quiere almacenar tiene un impacto significativo en las condiciones de almacenamiento requeridas. Mantener la humedad relativa en un rango adecuado puede prevenir la deshidratación del producto y mantener su calidad. Además, es importante llevar a cabo inspecciones periódicas y controles de calidad para garantizar que el producto cumpla con los estándares de seguridad alimentaria.

### **3.3.2. Cantidad de Producto a Almacenar**

El tamaño de producto a almacenar es un factor importante a considerar para diseñar la cámara frigorífica, ya que el diseño se debe adaptar al tamaño de la producción, permitiendo optimizar el consumo de energía. Si la cámara es demasiado grande en relación con la producción, podría funcionar con una carga parcial, lo que aumentaría los costos de refrigeración. Por otro lado, si es demasiado pequeña, podría estar sobrecargada y requerir un mayor consumo de energía para mantener la temperatura adecuada. Además, si la capacidad de almacenamiento es insuficiente, puede resultar en la falta de espacio para mantener los productos congelados o refrigerados, lo que puede dar lugar a problemas de logística y almacenamiento inadecuados.

## **3.4. Características de la Cámara**

Las características de una cámara frigorífica tienen un impacto directo en la calidad, la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de la operación de almacenamiento de productos perecederos, mantener las características adecuadas es fundamental para garantizar que los productos se mantengan en las mejores condiciones.

### **3.4.1. Dimensiones de la Cámara Frigorífica**

El dimensionamiento adecuado de cámaras frigoríficas permite utilizar de manera eficiente recursos como la energía, el espacio y el refrigerante. Una cámara frigorífica sobredimensionada podría llevar a ciclos de enfriamiento más cortos y menos eficientes. El dimensionamiento correcto garantiza que la cámara se adapte a la carga térmica esperada, lo que mejora la eficiencia energética del sistema. Al evitar un exceso de capacidad, se reducen los costos operativos, como los de electricidad, mantenimiento y reparaciones, lo que beneficia a la rentabilidad a largo plazo.

### **3.4.2. Materiales para la Construcción de la Cámara**

La elección de los materiales para la construcción de una cámara frigorífica es de vital importancia, ya que estos materiales desempeñan un papel fundamental en la eficiencia, la durabilidad y la seguridad del sistema. Los materiales de aislamiento térmico, como los núcleos de poliuretano o poliestireno, se utilizan para minimizar la transferencia de calor entre el interior y el exterior de la cámara. Un buen aislamiento asegura que se mantengan las condiciones de temperatura necesarias en el interior y evite la pérdida de frío. Los materiales deben ser resistentes a la corrosión y la humedad, ya que sistemas suelen operar en ambientes fríos y húmedos.

## **3.5. Cálculo de Cargas Térmicas**

La carga térmica es la cantidad de calor que debe ser retirada del sitio a refrigerar hasta llegar a la temperatura deseada.

### **3.5.1. Carga Térmica Debida a la Refrigeración del Producto**

El cálculo de la carga térmica del producto que está relacionado con la cantidad de calor que debe ser eliminado o absorbido para llevar la carne de una temperatura inicial (en el preenfriamiento) a una temperatura de refrigeración específica en un determinado tiempo.

### **3.5.2. Carga Térmica Debida a las Pérdidas por Transmisión por Paredes y Puerta**

La carga térmica por pérdidas de transmisión es directamente proporcional al coeficiente global de transferencia de calor, al área superficial de las paredes y la puerta y a la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y el interior de la cámara. Cuanto mayor sea el coeficiente de transferencia, el área o la diferencia de temperaturas, mayor será la carga térmica debida a las pérdidas por transmisión.

### **3.5.3. Cálculo de Carga Sensible de Personas**

El cálculo de la carga sensible de las personas en un espacio cerrado, se define como la cantidad de calor generado por la presencia de las personas que ingresan al entorno, debido a que este calor sensible se produce como resultado de procesos metabólicos y actividad

muscular que generan calor en el cuerpo. Cuantas más personas ingresen a un espacio, mayor será la carga sensible debido a su presencia.

#### **3.5.4. Carga Térmica Producido por Lámparas**

La determinación de la carga térmica generada por la presencia de lámparas en el interior de una cámara frigorífica es debido a que las lámparas emiten calor en forma de energía radiante y térmica como resultado de su funcionamiento. La cantidad de calor liberado depende de la potencia eléctrica de las lámparas, lo que se traduce en la generación de calor en el ambiente circundante.

#### **3.5.5. Carga Térmica por Infiltración de Aire Exterior**

La infiltración de aire exterior se refiere a la entrada de aire no controlado desde el entorno exterior a la cámara fría. La infiltración de aire exterior introduce calor no deseado, lo que puede comprometer la capacidad de enfriamiento de la cámara para mantener temperaturas constantes, la entrada de aire exterior no solo introduce calor, sino también humedad.

### **3.6. Elección del Ciclo de Refrigeración**

La elección del ciclo de refrigeración es una etapa crucial en el diseño de las cámaras frigoríficas, ya que tiene un impacto significativo en la eficiencia energética del sistema. Al seleccionar el ciclo óptimo, se puede maximizar la eficiencia teniendo un menor consumo de energía y, por lo tanto, ahorros de costos operativos.

Algunos ciclos de refrigeración pueden utilizar refrigerantes que son menos dañinos para el medio ambiente, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de las regulaciones ambientales.

#### **3.6.1. Análisis Termodinámico del Ciclo de Refrigeración**

El análisis termodinámico permite evaluar la eficiencia del ciclo de refrigeración, permitiendo diseñar y ajustar el ciclo de refrigeración de manera que se adapte a las necesidades específicas de la aplicación. Esto puede conducir a la selección de componentes y condiciones de operación.

Un ciclo de refrigeración eficiente, basado en un análisis termodinámico adecuado, puede llevar a una reducción significativa de los costos operativos a lo largo del tiempo. Esto incluye el consumo de energía, los costos de mantenimiento y las reparaciones.

### **3.7. Fuente de Suministro de Energía**

Las fuentes de suministro de energía pueden variar ampliamente en función del tipo de energía requerida y la aplicación.

- Energía solar puede ser aprovechada mediante paneles solares, que se encargan de convertir la luz solar en electricidad y son utilizados en aplicaciones de energía solar fotovoltaica para generar electricidad limpia y sostenible.
- Los aerogeneradores o turbinas eólicas capturan la energía cinética del viento y la convierten en electricidad. Se utilizan en parques eólicos y aplicaciones de energía eólica.
- Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía cinética del agua en movimiento, como ríos y embalses, para generar electricidad.
- La biomasa se refiere a la materia orgánica, como madera, residuos agrícolas o biogás, que se quema o procesa para generar calor o electricidad. Es una fuente de energía renovable.
- El hidrógeno se puede utilizar como fuente de energía para la generación de electricidad o como combustible en celdas de combustible.

La elección de la fuente de suministro de energía depende de la aplicación, las condiciones ambientales, la disponibilidad de recursos y las consideraciones económicas. En muchos casos, se busca utilizar fuentes de energía más limpias y sostenibles para reducir el impacto ambiental y promover la eficiencia energética.

Una evaluación energética permite determinar qué tan eficiente es el sistema de refrigeración, buscando la sostenibilidad del mismo al reducir el gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es esencial para reducir el consumo de energía y, por lo tanto, los costos operativos.

## CAPÍTULO 4

# DESARROLLO DE LOS MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA CÁMARA

El desarrollo de los modelos matemáticos se lleva a cabo mediante la formulación de ecuaciones diferenciales y la definición de parámetros claves que describen el comportamiento del sistema. Estos modelos matemáticos se programarán gráficamente en la herramienta Simulink de Matlab. La utilización de un simulador facilita la resolución numérica de estas ecuaciones permitiendo prever el comportamiento dinámico de la cámara frigorífica a lo largo del día y bajo diferentes condiciones de operación.

### 4.1. Modelado de Cargas Térmicas

El modelado de cargas térmicas consiste en la integración de ecuaciones que permitan predecir la cantidad de calor que debe ser retirado del interior de la cámara, para llegar a la temperatura deseada, donde se consideran las siguientes cargas térmicas.

#### 4.1.1. Carga Térmica Debida a la Refrigeración del Producto

La carga térmica debida a la refrigeración del producto [44], se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_p = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{t} \quad (4.1)$$

Donde:

$m$  es la cantidad de masa del producto.

$C_p$  es el calor específico del producto.

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas, inicial y final del producto.

$t$  es el tiempo en que se enfriara el producto.

#### 4.1.2. Carga Térmica Debida a las Perdidas por Transmisión por Paredes y Puerta

La carga térmica debida a las pérdidas por transmisión en paredes [44], la cual se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{T1} = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

Donde:

$U_1$  es el coeficiente global de transferencia de calor en las paredes.

$A_1$  es el área superficial de la cámara frigorífica.

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas, temperatura del aire exterior menos la temperatura del aire interior.

El coeficiente global de transferencia de calor en las paredes, se obtiene como:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{h_2}} \quad (4.3)$$

Donde:

$e_1$  es el espesor del aislante.

$e_2$  es el espesor del ladrillo.

$e_3$  es el espesor del mortero.

$h_1$  es el coeficiente convectivo en el interior de la cámara frigorífica.

$h_2$  es el coeficiente convectivo en el exterior de la cámara frigorífica.

$k_1$  es la conductividad térmica del aislante.

$k_2$  es la conductividad térmica del ladrillo.

$k_3$  es la conductividad térmica del mortero.

La carga térmica debida a las pérdidas por transmisión en la [44], se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{T2} = U_2 * A_2 * \Delta T \quad (4.4)$$

Donde:

$U_2$  es el coeficiente global de transferencia de calor en la puerta.

$A_2$  es el área de la puerta.

El coeficiente global de transferencia de calor en la puerta, se obtiene como:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_2}} \quad (4.5)$$

Donde:

$e_4$  es el espesor del aluminio.

$k_4$  es la conductividad térmica del aluminio.

### 4.1.3. Carga Sensible Debido a Ocupantes

El cálculo de carga sensible debido a las personas [44], se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_e = N_e * Q_{s_e} \quad (4.6)$$

Donde:

$N_e$  es el número de personas que ingresan a la cámara frigorífica.

$Q_{s_e}$  es el calor sensible por persona.

### 4.1.4. Carga Térmica Producida por Lámparas

La carga térmica producida por lámparas [44], se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_l = N_l * P \quad (4.7)$$

Donde:

$N_l$  es el número total de lámparas.

$P$  es la potencia de la lámpara.

### 4.1.5. Carga Térmica por Infiltración de Aire Exterior

La carga térmica por infiltración de aire exterior [44], se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_l = Q_1 + Q_2 \quad (4.8)$$

Donde:

$Q_l$  es el calor infiltrado debida a renovaciones técnicas de aire.

$Q_2$  es el calor infiltrado debida a las renovaciones equivalentes del aire.

El calor infiltrado debida a renovaciones técnicas de aire ( $Q_1$ ), se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_1 = m * \Delta h \quad (4.9)$$

$$m = V * \rho * n \quad (4.10)$$

Donde:

$m$  es la masa del aire.

$\Delta h$  es la diferencia de entalpia del aire, interior y exterior de la cámara frigorífica.

$V$  es el volumen de la cámara frigorífica.

$\rho$  es la densidad media del aire entre las condiciones exteriores e interiores.

$n$  es el número de renovaciones técnicas del aire, renovaciones/día.

El calor infiltrado debida a las renovaciones equivalentes del aire ( $Q_2$ ), se obtiene mediante la ecuación de Tamm:

$$Q_2 = \theta \left[ \frac{1}{3} * \rho_i * A * \sqrt{H \left( 1 - \frac{\rho_e}{\rho_i} \right)} \right] * \Delta h \quad (4.11)$$

En la ecuación el volumen de aire que penetra en la cámara frigorífica por la apertura de la puerta se calcula como:

$$V = \frac{1}{3} * A * \sqrt{H \left( 1 - \frac{\rho_e}{\rho_i} \right)} \quad (4.12)$$

Siendo

$$m = \theta * V * \rho_i \quad (4.13)$$

Posteriormente, Fritzsche y Lilirblum establecieron un factor de corrección de la ecuación de Tamm:

$$K = 0.48 + 0.004 * \Delta T \quad (4.14)$$

Donde:

$\theta$  es el tiempo de apertura de la puerta, horas en 24 horas.

$\rho_i$  es la densidad del aire interior.

$\rho_e$  es la densidad del aire exterior.

$A$  es el área de la puerta.

$H$  es el alto de la puerta.

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas del aire interior y exterior.

#### 4.1.6. Carga Térmica Total

En la cámara frigorífica, la carga térmica total resulta de la suma de las cargas térmicas involucradas en el proceso de refrigeración.

$$Q_L = Q_e + Q_l + Q_p + Q_{T,1} + Q_{T,2} + Q_1 \quad (4.15)$$



## 4.2. Modelado de la Cámara sin Refrigeración

Este modelo permite predecir el comportamiento de la temperatura del aire en el interior de la cámara sin considerar el sistema de refrigeración. El cambio en la temperatura de la cámara depende principalmente de las condiciones climáticas del lugar, a partir de las cargas térmicas por infiltración, y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{U_1 * A_1 + U_2 * A_2}{m_a * C_{p_a}} (T_e - T_i) \quad (4.16)$$

Donde:

$m_a$  es la masa del aire dentro de la cámara.

$C_{p_a}$  es el calor específico del aire.

Otras consideraciones importantes para determinar la temperatura en el interior de la cámara frigorífica, son el calor generado por las personas que ingresan a ella y las lámparas en el interior, las cuales se determinan con las ecuaciones (4.6) y (4.7). Adicionalmente a estas cargas, se debe considerar la transferencia de calor del producto al aire del interior de la cámara frigorífica, el cual se puede estimar a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_p = h * A * \Delta T \quad (4.17)$$

Donde:

$h$  es el coeficiente convectivo al interior de la cámara.

$A$  es el área total promedio del producto.

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas del producto y del aire dentro de la cámara frigorífica.

El cambio de la temperatura del producto que ingresa a la cámara, se obtiene como:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_p}{m_p * C_{p_p}} \quad (4.18)$$

Donde:

$\dot{Q}_p$  es el calor generado por el producto.

La temperatura del producto dentro de la cámara frigorífica, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$T = \left( \frac{P_t - P_e}{P_t} * T_c \right) + \left( \frac{P_e}{P_t} * T_p \right) \quad (4.19)$$

Donde:

$P_t$  es la cantidad de producto total.

$P_e$  es la cantidad de producto que entra.

$T_c$  es la temperatura del aire dentro de la cámara.

$T_p$  es la temperatura del producto que entra.

### 4.3. Modelado del Ciclo de Refrigeración

El modelo del ciclo de refrigeración permite conocer el comportamiento del sistema, considerando un ciclo simple de compresión de vapor. El modelo del ciclo de refrigeración nos permite obtener parámetros como el flujo másico de refrigerante, el calor desechado por el condensador, el trabajo del compresor y el Coeficiente de Desempeño (COP).

El flujo másico se obtiene como:

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{\dot{Q}_L}{h_1 - h_4} \quad (4.20)$$

Donde:

$h_1$  es la entalpía a la salida del evaporador.

$h_4$  es la entalpía a la entrada del evaporador.

El calor desechado por el condensador, se obtiene como:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_R (h_2 - h_3) \quad (4.21)$$

Donde:

$h_2$  es la entalpía a la salida del compresor.

$h_3$  es la entalpía a la salida del condensador.

La potencia que requiere el compresor para aumentar la presión del fluido refrigerante, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{W} = \dot{m}_R (h_2 - h_1) \quad (4.22)$$

Si los estados termodinámicos se encuentran dentro de la región de mezcla en el diagrama T-S se debe determinar la calidad X, la cual varía de 0 a 1. Este cálculo se determina a partir de la ecuación (1.15), y la entalpía en estado mezcla ( $h_m$ ), se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$h_m = X (h_g - h_f) + h_f$$

Donde:

$h_g$  es la entalpía de vapor saturado.

$h_f$  es la entalpía de líquido saturado.

El coeficiente de desempeño (COP) para un sistema de refrigeración convencional, se obtiene mediante la ecuación (1.1).

#### 4.4. Modelo del Sistema de Alimentación de Energía

Para determinar el consumo eléctrico del sistema frigorífico se debe considerar la eficiencia del compresor, la energía eléctrica consumida a lo largo del día por el compresor, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$EE_c = \frac{\dot{W} * N}{\eta_c} \quad (4.23)$$

Donde:

$\dot{W}$  es el trabajo requerido por el compresor.

$N$  es el tiempo de operación/día.

$\eta_c$  es la eficiencia del compresor.

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico será calculado por el simulador y dependerá de la cantidad de energía eléctrica que se necesita para satisfacer el funcionamiento del sistema frigorífico, en cuanto al trabajo que realiza el compresor.

La energía generada por el sistema fotovoltaico se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$EE_{sist} = \frac{EE_c}{\eta_{R.C.} * \eta_{Iv.} * F.D_{Bat.}} \quad (4.24)$$

Donde:

$EE_c$  es la energía eléctrica requerida por el compresor.

$\eta_{R.C.}$  es la eficiencia del regulador de carga.

$\eta_{Iv.}$  es la eficiencia del inversor.

$F.D_{Bat}$  es el factor de descarga de la batería.

Para determinar el número de paneles fotovoltaicos el simulador emplea datos promedio de la irradiancia para la región de interés. El cálculo del número de paneles se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$N.p = \frac{EE_{sist}}{EE_{F.V.}} \quad (4.25)$$

Donde:

$EE_{F.V}$  es la energía eléctrica generada por panel fotovoltaico.

La energía eléctrica generada por cada panel fotovoltaico ( $EE_{F.V}$ ) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$EE_{F.V} = P_p * R_s \quad (4.26)$$

Donde:

$P_p$  es la potencia del panel.

$R_s$  son las horas del recurso solar de la zona.

La potencia del panel se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$P_p = 1000 \frac{W}{m^2} * \eta_p * A \quad (4.27)$$

Donde:

$1000 \frac{W}{m^2}$  es la intensidad promedio de la radiación solar.

$\eta_p$  es la eficiencia del panel.

$A$  es el área del panel.

El número de baterías se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$N_{Bat} = \frac{C_c}{C_d} \quad (4.28)$$

Donde:

$C_c$  es la capacidad de carga eléctrica requerida.

$C_d$  es la capacidad de descarga eléctrica de la batería.

La capacidad de carga eléctrica de las baterías se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{EE_a}{V} \quad (4.29)$$

Donde:

$EE_a$  es la energía eléctrica almacenada.

$V$  es el voltaje de la batería.

La energía eléctrica almacenada se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$EE_a = \frac{EE_c}{\eta_{lv} * F.D_{Bat}} \quad (4.30)$$

Donde:

$EE_c$  es la energía eléctrica del compresor.

$F.D_{Bat}$  es el factor de descarga de la batería.

## 4.5. Implementación de los Modelos en el Simulador

Los modelos matemáticos desarrollados anteriormente se implementan en la plataforma de programación gráfica de Matlab donde son integrados en bloques y sub bloques, donde cada bloque representa un proceso dentro del sistema y cada sub bloque un parámetro de interés, que en conjunto describen el comportamiento de la operación de la cámara.

### 4.5.1. Módulo de Cargas Térmicas

Este módulo permite al simulador calcular la carga térmica total a partir de sub bloques que representan cada una de las cargas térmicas involucradas en el proceso de enfriamiento. El módulo requiere de trece variables de entrada, las cuales se pueden modificar dependiendo de las necesidades del cliente, y arroja cinco variables de salida correspondientes a cada una de las cargas térmicas. El comportamiento de las cargas térmicas se grafica en función del tiempo, a lo largo de un día de operación, de forma individual o total. En la figura 11 se muestra los bloques que integran este módulo.

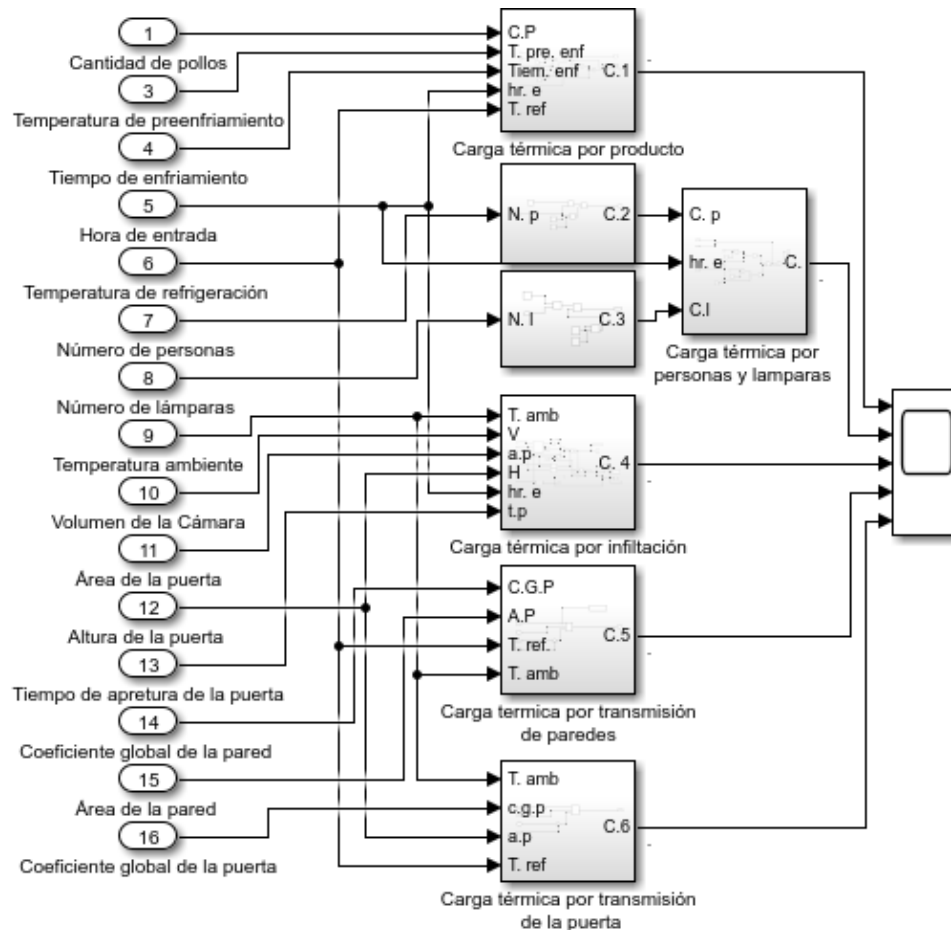


Figura 11. Módulo de cargas térmicas. [49]

#### 4.5.2. Módulo de Cámara sin Refrigeración

El módulo de la cámara sin refrigeración está diseñado para simular el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara a lo largo del día, y nos permite verificar el comportamiento del sistema, para ello se consideran veinte entradas, que pueden ser variadas por el usuario. Como variables de salida se obtienen el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara, el cambio en la temperatura del producto que entra y de todo el producto almacenado, como se muestra en la figura 12.

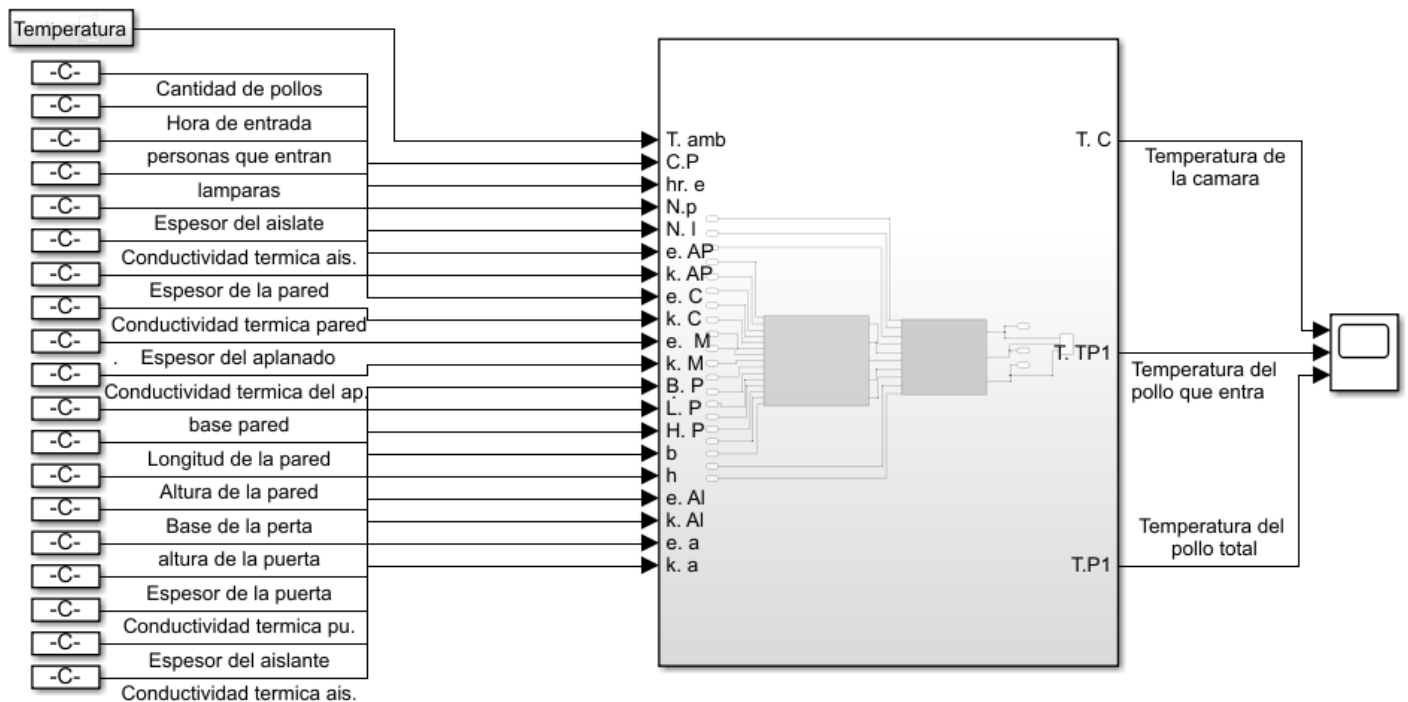


Figura 12. Módulo de cámara sin refrigeración. [49]

#### 4.5.3. Módulo del Sistema de Refrigeración

El módulo del sistema de refrigeración está diseñado para simular el comportamiento del ciclo de refrigeración a lo largo del día, teniendo como variables de entrada la temperatura ambiente, el flujo másico de refrigerante y la eficiencia del compresor, las cuales pueden ser variadas por el usuario, entregando como resultados el calor disipado por el

condensador, el trabajo del compresor, el número de ciclos del sistema a lo largo del día y la energía eléctrica requerida por el sistema como se muestra en la figura 13.

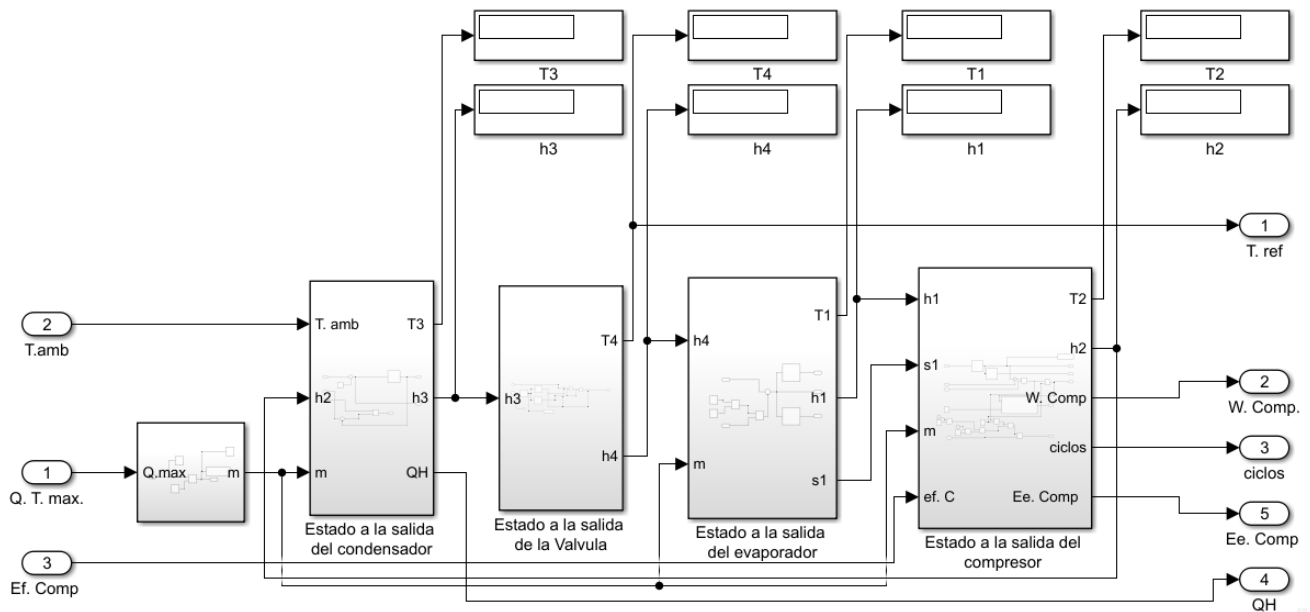


Figura 13. Módulo de ciclo de refrigeración. [49]

#### 4.5.4. Módulo de Suministro de Energía

Este módulo permite determinar el dimensionamiento fotovoltaico que satisface el suministro de energía requerida por la cámara frigorífica, teniendo doce variables de entrada; las dimensiones del panel, la carga eléctrica, el voltaje suministrado, y las eficiencias de cada uno de los componentes, entre otros. Las variables de salida son el número de paneles fotovoltaicos requeridos, la energía eléctrica suministrada por los paneles y el número de baterías. En la figura 14 se muestran los bloques que integran este módulo.



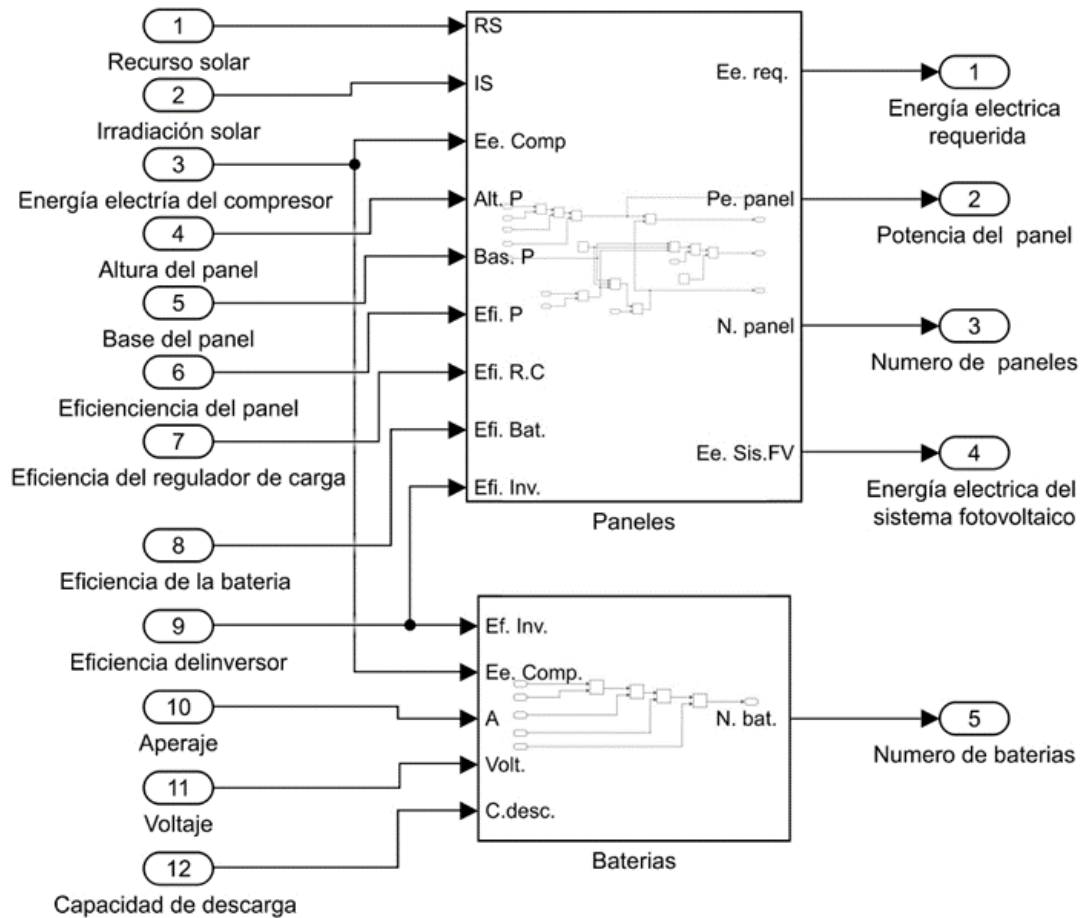


Figura 14. Módulo del suministro de energía. [49]

#### 4.5.5. Integración de los Módulos del Sistema

En la figura 15 se muestran los módulos que conforman el simulador de la cámara frigorífica. El módulo de la cámara frigorífica está compuesto por el módulo de cargas térmicas acoplado al módulo de la cámara sin refrigerar e interconectado al módulo del sistema de refrigeración. La integración modular se realiza a partir de las variables de entrada y salida de cada uno de los sistemas involucrados. Finalmente, el módulo de suministro de energía se integra a los anteriores, completando el proceso. El sistema integrado permite conocer el comportamiento global de la cámara a partir de diferentes condiciones de operación, especificadas por el usuario, generando como resultado el comportamiento de las variables de interés; la carga térmica, la temperatura del producto, el calor desechado, el trabajo del compresor y la energía eléctrica consumida por la cámara y suministrada por el arreglo fotovoltaico.

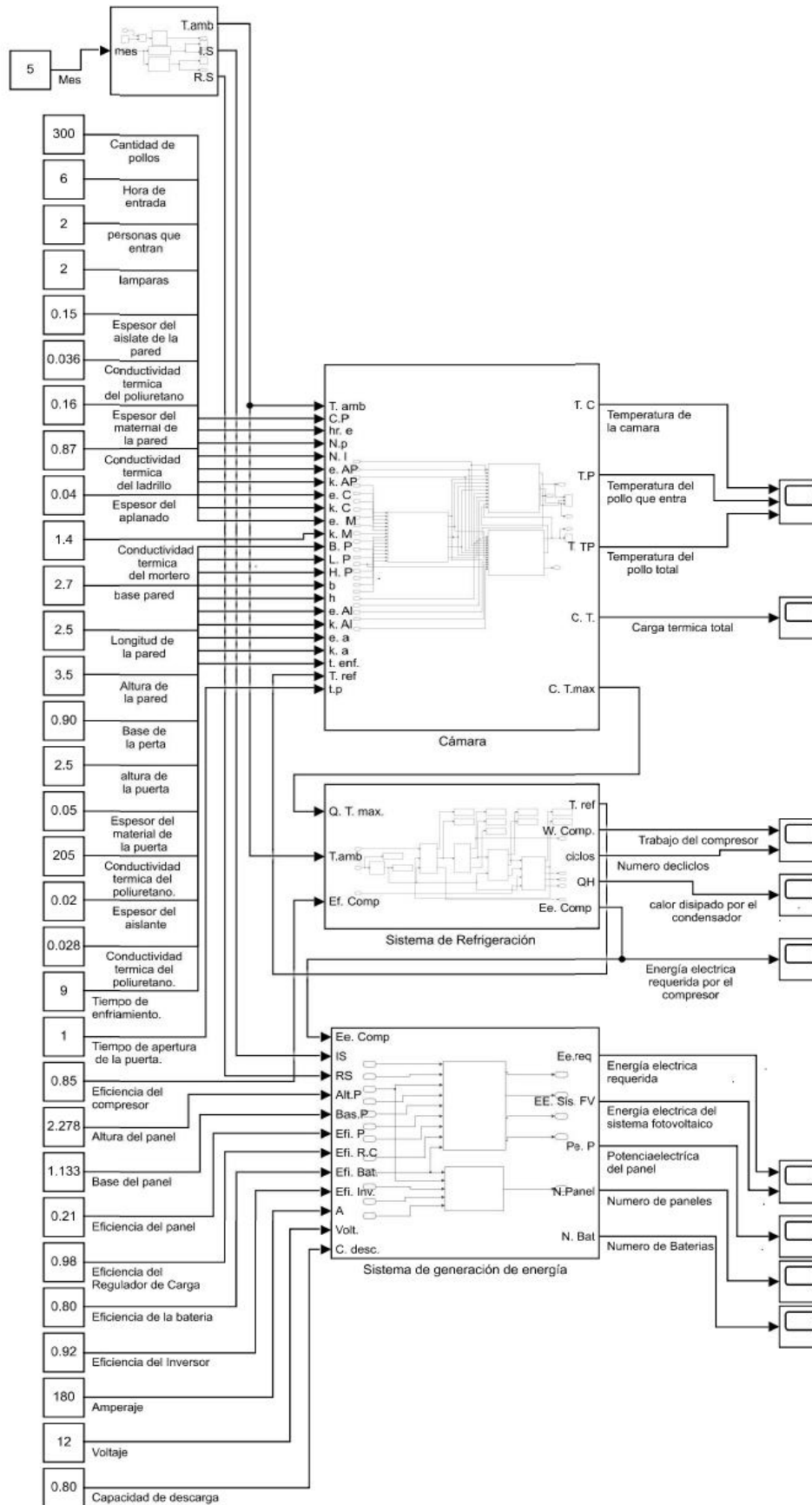


Figura 15. Simulador de la cámara frigorífica. [49]

## **CAPÍTULO 5**

# **EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA CÁMARA MEDIANTE SIMULACIÓN**

Para evaluar el diseño y operación de una cámara frigorífica mediante simulación, además del uso de software que pueda modelar los aspectos térmicos y dinámicos del sistema, se requiere de un caso de estudio que permita probar el funcionamiento del simulador. El caso de estudio que se presenta en este trabajo consiste en el diseño de una cámara frigorífica para la conservación de carne de pollo, en la región de Apan, Hidalgo. El simulador debe comportarse de manera similar a como lo haría la cámara, para así poder determinar la factibilidad de los equipo y materiales seleccionados para su construcción, obteniendo resultados lo más semejantes a la realidad.

### **5.1. Caso de Estudio**

Como se presentó en el capítulo 3, el diseño de la cámara debe considerar tanto el producto a refrigerar, en este caso carne de pollo, como las condiciones climáticas del lugar a instalar la cámara, Apan, Hidalgo. El caso de estudio, inicia con la justificación de la elección del producto, posteriormente se presentan las características climáticas la región de Apan, para determinar las cargas térmicas y los sistemas de alimentación de energía solar. Por último, se definen las características del proceso de almacenamiento para el diseño del sistema de refrigeración.

#### **5.1.1. Producción de Carne de Pollo**

Para la producción de pollo se recabaron datos de una fuente elaborada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las delegaciones de SAGARPA. Obteniendo datos de la producción de pollo en el estado de Hidalgo del año 2000 al año 2016. Se estimó el porcentaje de la producción de la carne de pollo para el municipio de Apan con datos encontrados del año 2006-2007 como se muestra en la tabla VII [45].

*Tabla VII. Tamaño de la producción de pollo [45].*

Producción de cabezas	Hidalgo estimado con 100%	Apan estimado al 11%	Peso en kg (promedio)
	Animales sacrificados (cabezas)	Animales sacrificados (cabezas)	
2000	29,374,192	3,231,161	1.66
2002	28,011,121	3,081,223	1.73
2004	35,499,782	3,904,976	1.73
2006	39,306,358	4,323,699	1.74
2008	38,778,494	4,265,634	1.76
2010	34,098,044	3,750,785	1.77
2012	32,459,436	3,570,538	1.76
2014	31,916,873	3,510,856	1.77
2016	36,845,007	4,052,951	1.8
<b>Promedio</b>	<b>34,032,145</b>	<b>3,743,536</b>	<b>1.75</b>

En la tabla VIII se muestra el desglose de la producción de pollo en el municipio de Apan Hidalgo, observándose una estimación aproximada de la producción de pollo para los años 2018, 2020 y 2022 haciendo una proyección con los datos obtenidos anteriormente en la tabla VII [45].

*Tabla VIII. Tamaño de producción en el municipio de Apan Hidalgo [49].*

Producción de cabezas		
Años	al año	al día
2000	3,231,161	9,617
2002	3,081,223	9,170
2004	3,904,976	11,622
2006	4,323,699	12,868
2008	4,265,634	12,695
2010	3,750,785	11,163
2012	3,570,538	10,627
2014	3,510,856	10,449
2016	4,052,951	12,062
2018	4,132,534	12,299
2020	4,188,105	12,465
2022	4,243,675	12,630
<b>Promedio</b>	<b>3,854,678</b>	<b>11,472</b>

#### 5.1.1.1. Cantidad de Producto a Almacenar en la Cámara

El pollo al ser un producto altamente perecedero debe ser almacenado a temperaturas de refrigeración en la tabla IX se muestra la cantidad de producto a almacenar, considerando el

3% respecto al tamaño de producción para conservar la carne en Apan. El valor porcentual propuesto se tomó en consideración debido a que la carne de pollo es uno de los cárnicos más consumidos en la zona.

*Tabla IX. Producción de cabezas promedio al 3% respecto al día [49].*

Producción de cabezas		
	Día	Promedio del 3% respecto al día
2022	12,299	<b>374</b>
2024	12,465	
2026	12,630	

### 5.1.1.2. Características del Producto a Almacenar en la Cámara

En la tabla X se presentan las características termodinámicas de la carne de pollo, ya que son fundamentales para conocer el comportamiento biológico del producto dentro de la cámara, o bien, los estándares que se ajustan para el diseño del contenedor para conservar la carne en condiciones óptimas.

*Tabla X. Características termodinámicas del producto cárnico [49].*

<b>% Humedad relativa</b>	85-95
<b>Peso promedio kg</b>	1.75
<b>Calor específico kJ/kg °C</b>	3.31
<b>Calor latente kJ/kg</b>	247.02
<b>Temperatura de conservación °C</b>	0-4
<b>Tiempo de conservación por día</b>	24 horas

### 5.1.2. Condiciones Climáticas de Apan

Apan generalmente tiene un clima templado subhúmedo. Este tipo de clima se caracteriza por tener temperaturas moderadas y una estación de lluvias durante el verano. A continuación, se describe las características climáticas del lugar como es; la temperatura, la precipitación, la humedad, el viento y la radiación solar.

#### 5.1.2.1. Temperatura

Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 4 °C a 24 °C y rara vez baja a menos de 1 °C o sube a más de 27 °C [46]. La temporada templada dura 2.4 meses,

del 23 de marzo al 4 de junio, y la temperatura máxima promedio diaria es de más de 23 °C, los días más calurosos del año alcanzan una temperatura máxima promedio de 24 °C y una temperatura mínima promedio de 10 °C [31]. La temporada fresca dura 3.4 meses, del 22 de octubre al 4 de febrero, y la temperatura máxima promedio es de 20 °C y la temperatura mínima promedio es de 4 °C [46].

#### **5.1.2.2. Humedad**

La humedad promedio en Apan, Hidalgo, puede variar a lo largo del año. Sin embargo, en general, México, incluyendo la región de Hidalgo, tiende a tener un clima diverso debido a la geografía del país. Apan, como parte de esta región, experimenta un clima principalmente subtropical, con estaciones de lluvias en verano. Los porcentajes de humedad relativa pueden superar el 70% o incluso acercarse al 90% en algunos casos [46].

#### **5.1.2.3. Viento**

La velocidad promedio del viento por hora en Apan tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 6 meses, del 30 de abril al 30 de octubre, con velocidades promedio del viento de más de 8.1 kilómetros por hora, o hasta alcanzar una velocidad del viento máxima de 9.0 kilómetros por hora. El tiempo más calmado del año dura 6 meses, del 30 de octubre al 30 de abril, alcanzando una velocidad promedio del viento de 7.1 kilómetros por hora.

#### **5.1.2.4. Energía Solar**

La energía solar de onda corta incidente promedio diaria tiene variaciones estacionales leves durante el año. El período más resplandeciente del año dura 3 meses, del 8 de marzo al 7 de junio, con una energía de onda corta incidente promedio superior a 6.8 kWh. El día más resplandeciente en promedio alcanza el 7.3 kWh. El periodo más oscuro del año dura 2.5 meses, del 9 de noviembre al 25 de enero, con una energía de onda corta incidente promedio de menos de 5.4 kWh. El día más oscuro del año en promedio alcanza el 4.9 kWh [46].

En la tabla XI se muestran los datos de la irradiancia de la región de Apan Hidalgo, donde se tiene una irradiación promedio por mes y anual desde el año 2000 al año 2021, los datos

obtenidos son una irradiación promedio anual de  $6.1 \frac{W}{m^2}$ , máxima de  $6.96 \frac{W}{m^2}$  y mínima de  $5.4 \frac{W}{m^2}$  [47].

Tabla XI. Irradiancia descendente de onda corta de superficie de todo el cielo [47].

IRRADIACIÓN SOLAR													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2000	5.38	6.07	6.35	6.63	6.17	5.59	6.75	5.96	5.69	5.6	5.28	4.91	5.865
2001	5.04	5.27	6.8	6.63	5.91	5.54	5.89	5.65	5.17	5.22	4.93	4.48	5.544
2002	5.34	5.18	6.65	6.99	6.67	5.8	5.48	5.95	4.53	5.07	4.76	4.77	5.599
2003	4.69	6.32	6.74	6.31	6.75	4.91	5.86	5.76	4.87	4.83	5.13	5.07	5.603
2004	4.53	6.14	5.91	6.44	6.01	5.31	5.94	5.92	4.89	4.88	5.5	4.85	5.527
2005	5.23	5.36	6.26	6.61	6.16	5.77	5.67	5.23	5.5	4.86	5.12	4.71	5.54
2006	5.19	5.96	6.55	6.98	6.33	6.17	5.22	5.25	5.22	4.88	4.64	4.84	5.603
2007	4.93	5.83	6.29	6.3	6.13	6.1	5.61	5.46	5.27	5.3	5.24	4.9	5.613
2008	5.07	5.94	6.41	6.36	6.21	5.41	5.04	5.53	4.56	5.12	5.37	5.21	5.519
2009	4.98	6.11	6.9	7	6.1	6.08	6.24	5.92	4.56	5.03	4.98	4.51	5.701
2010	4.27	5.11	6.69	6.67	6.9	6.11	4.63	5.12	4.82	6.02	5.5	5.37	5.6
2011	5.36	5.99	6.93	6.68	6.67	6.02	4.84	5.88	5.65	5.58	4.95	5.13	5.8
2012	4.84	4.56	6.35	6.63	6.41	5.49	5.34	5.12	5.39	5.71	4.83	5.13	5.5
2013	4.91	6.27	6.3	6.61	6.06	5.9	5.8	5.57	4.14	4.85	4.51	4.67	5.5
2014	5.09	6.03	6.53	6.57	5.68	5.16	5.72	5.95	4.85	4.81	4.76	4.46	5.5
2015	4.88	5.57	5.52	6.19	5.74	5.56	5.9	5.83	4.65	4.93	4.49	4.44	5
2016	4.36	5.83	5.57	6.33	6.16	5.3	5.75	5.55	5.05	5.25	4.44	4.79	5
2017	5.52	6.05	6.16	6.59	5.69	5.95	5.31	5.71	4.56	4.96	5.74	5.26	5.6
2018	5.04	5.49	6.47	6.16	6.78	5.45	6.53	5.47	5.34	4.59	4.52	4.89	5.6
2019	5.2	5.99	6.57	6.69	6.6	5.61	5.81	6.31	5.47	4.84	4.73	4.94	5.7
2020	4.88	5.82	6.67	6.52	6.49	6.31	5.9	5.54	4.61	6.08	5.36	4.78	5.7
2021	4.99	5.85	6.14	6.55	6.12	7.1	5.57	5.68	4.66	5.17	4.91	4.91	5.6
Promedio	5.418	6.21	6.89	6.96	6.85	6.48	6.31	6.23	5.53	5.66	5.46	5.26	6

### 5.1.3. Características del Proceso de Almacenamiento

Con los datos descritos anterior mente, se determinó que la cámara frigorífica tendrá una capacidad mínima para conservar 250 canales y máxima de 500 canales aproximadamente con peso promedio de 1.75 kg.

El producto será almacenado en cajas de plástico con rejillas con las siguientes dimensiones; ancho de 79.39 cm, largo de 71 cm y alto de 32 cm, alcanzando una capacidad máxima de almacenamiento de 10 pollos por caja y así tener un mayor flujo de aire dentro de la cámara, esto permitirá que la carne se encuentre en conservación óptima.

## 5.2. Dimensionamiento de la Cámara Frigorífica

En la tabla XII se muestran las condiciones de diseño de la cámara frigorífica de acuerdo con las características de conservación y la cantidad de producto que se almacenará.

*Tabla XII. Condiciones de diseño [49].*

Carne Avícola							
Temperatura ambiente	Temperatura		Capacidad de canales		Flujo de aire		Tiempo estimado de abatimiento
	Entrada	Deseada	máximos	Mínimos	Temperatura	Humedad	
3°C mínima 35° máxima	10 °C	0 °C	500	250	-1 °C a 4 °C	85% al 95 %	24 horas

El dimensionamiento propuesto para la cámara frigorífica se muestra en la tabla XIII, teniendo un volumen de 23.63 m<sup>3</sup>.

*Tabla XIII. Dimensiones internas [49].*

Cámara frigorífica	
Alto (m)	3.50
Largo (m)	2.70
Ancho (m)	2.50
Pasillo (m)	0.90
Almacenamiento (m)	0.90
Puerta del frigorífico	
Alto (m)	2.50
Largo (m)	0.90

### 5.2.1. Materiales para la Construcción de la Cámara

Las cámaras frigoríficas al operar a una temperatura baja, se deben considerar los materiales aislantes con menor transferencia de calor, que permitan reducir la demanda de energía. En la tabla XIV se muestran los espesores y conductividades térmicas de los materiales seleccionados para la construcción de la cámara.



Tabla XIV. Materias de construcción de la cámara frigorífica [49].

Material	Paredes			Puerta	
	Poliuretano	Ladrillo	Mortero	Poliuretano	Aluminio
Conductividad térmica ( $\frac{W}{m K}$ )	0.028	0.87	1.40	0.028	205
Espesor (m)	0.15	0.16	0.04	0.02	0.05

### 5.2.2. Propuesta del Sistema de Refrigeración

Para este caso de estudio se propone utilizar un sistema de refrigeración por compresión de vapor simple, debido a que la conservación de este producto es en cantidades pequeñas y al ser uno de los productos más consumidos por la zona, no se requiere de tiempos prolongados para su almacenamiento. En la figura 16 se muestra el ciclo de refrigeración por compresión de vapor propuesto y su diagrama temperatura-entropía a las condiciones de operación.

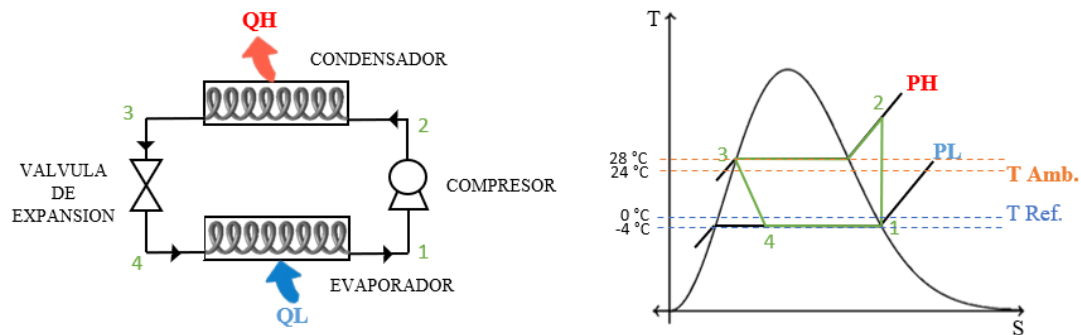


Figura 16. Diagrama del ciclo de refrigeración simple [49].

El sistema de refrigeración utiliza el refrigerante R\_290, ya que es una alternativa muy conveniente para la refrigeración al ser amigable con el medio ambiente, debido a que ofrece una gran reducción de las emisiones directas y aumenta la eficiencia energética.

Este sistema de refrigeración utiliza un compresor hermético recíprocante adecuado para el refrigerante R-290, teniendo una eficiencia que se encuentra generalmente entre 75% al 90%. Para este análisis se consideró una eficiencia del 85%, con un tiempo de operación 14.25 horas/día, con 4 ciclos por hora.

En cuanto a la fuente de energía se seleccionó la solar fotovoltaica debido a la buena irradiancia solar de la zona. Se eligió un modelo de panel solar de 540W, con una eficiencia de 21.13%. Considerando eficiencias del 98% y 92% para el regulador de carga y el inversor, respectivamente, con un factor de descarga de la batería del 80% [48].

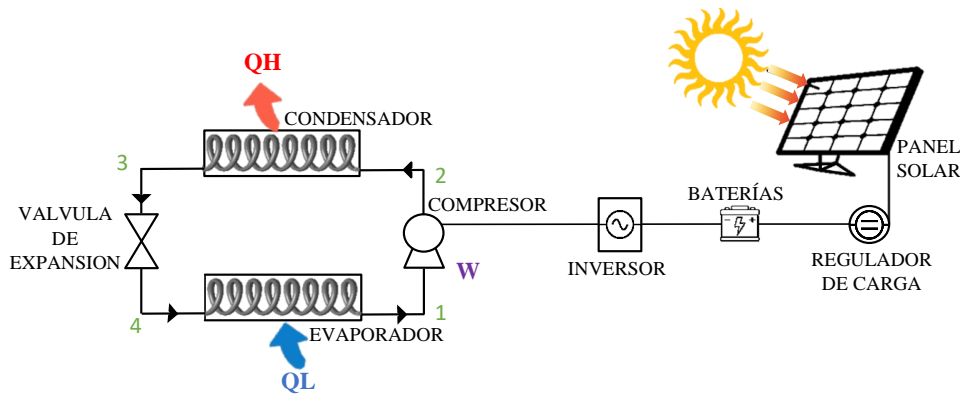


Figura 17. Diagrama del arreglo fotovoltaico para alimentar eléctricamente el sistema [49].

En la figura 17 se muestra el diagrama del sistema a evaluar por medio del simulador, el cual consta de un arreglo fotovoltaico conectado a una cámara frigorífica.

### 5.3. Simulación de la Cámara Frigorífica

La simulación permite analizar el funcionamiento de una cámara frigorífica antes de construirla básicamente. Las cámaras frigoríficas deben operar en condiciones extremas, como temperaturas bajas o alta carga térmica. La simulación permite evaluar el comportamiento del sistema en esas condiciones y tomar medidas para garantizar un funcionamiento seguro.

#### 5.3.1. Variables de Entrada

El diseño del simulador consta del modelado matemático de las variables de estado, el cálculo de cargas térmicas, el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración y el sistema de suministro de energía. Para este diseño se requiere conocer las características del producto, la cantidad de individuos que ingresarán al recinto, las condiciones climáticas del lugar, las propiedades de los materiales de construcción de la cámara frigorífica y las características de los componentes del sistema.

#### 5.3.2. Variables de Salida

El simulador resuelve las ecuaciones diferenciales correspondientes al modelo matemático y entrega como variables de salida: la carga térmica, la temperatura del producto, el calor desechado, el trabajo del compresor y la energía eléctrica consumida por la cámara y suministrada por el arreglo fotovoltaico.

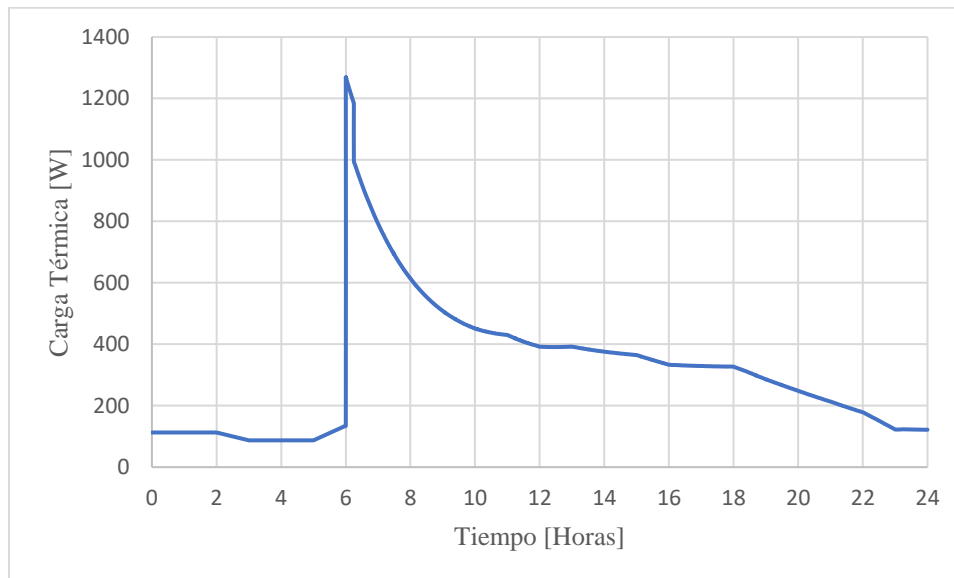
## 5.4. Resultados de la Simulación

Los resultados obtenidos de la simulación, realizada a partir de la metodología descrita anteriormente, son: las cargas térmicas, la temperatura de la cámara sin ciclo de refrigeración, la temperatura del producto refrigerado, el trabajo requerido por el compresor, y la energía eléctrica requerida suministrar por el sistema fotovoltaico.

### 5.4.1. Simulación de Cargas Térmicas

En las figuras 18 y 19 se muestra el comportamiento de las cargas térmicas involucradas; por producto, personas, lámparas, transmisión de paredes, por transmisión por la puerta y por infiltración de aire exterior.

En la figura 18 se muestra el comportamiento de las cargas térmicas totales a lo largo de un día promedio del mes de mayo, donde se observa una carga máxima de 1270 W a las 6 horas, momento que ingresa la carne, las personas y las lámparas permanecen encendidas, y una carga térmica mínima de 87 W entre las 3 y las 5 horas aproximadamente.



*Figura 18. Cargas térmicas totales [49].*

En la figura 19, se muestra el comportamiento de las cargas térmicas por separado.

- La línea azul representa la carga térmica del producto, conservando 875 kg de pollo, el cual entra a la cámara a las 6:00 horas con una temperatura de preenfriamiento de 10° C, alcanzando una carga térmica máxima de 950 W.

- La línea naranja representa la carga térmica debido a las personas y lámparas, se considera que las personas ingresan a las 6:00 horas y permanecen durante 15 minutos en la cámara, manteniendo las dos lámparas encendidas durante este tiempo. Por lo que se tiene una carga térmica de 188 W.
- La línea gris representa la carga térmica de transmisión por las paredes, donde se tiene un mínimo de 68 W entre las 4 y las 6 horas del día, y un máximo de 263 W entre las 13 y 15 horas, esto debido a la temperatura exterior.
- En la línea amarilla se observa la carga térmica de transmisión por la puerta, que presenta un comportamiento similar al de transmisión por paredes, teniendo como mínimo 20 W entre las 4 y las 6 horas, y como máximo 77 W entre las 13 y 15 horas.

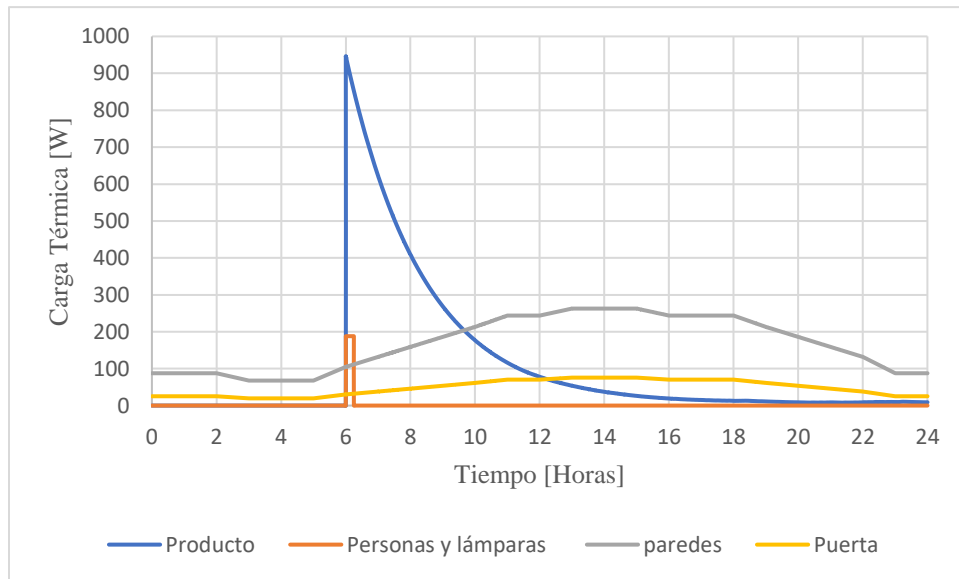


Figura 19. Cargas térmicas [49].

En la figura 20 se muestra el comportamiento de las cargas térmicas por infiltración de aire exterior, la línea azul muestra la carga térmica debida a las necesidades por renovaciones técnicas de aire obteniendo 31 W a lo largo del día, la línea naranja muestra la carga térmica debida a las necesidades por renovaciones equivalentes de aire mientras se abre la puerta obteniendo 10 555 W durante 60 segundos.

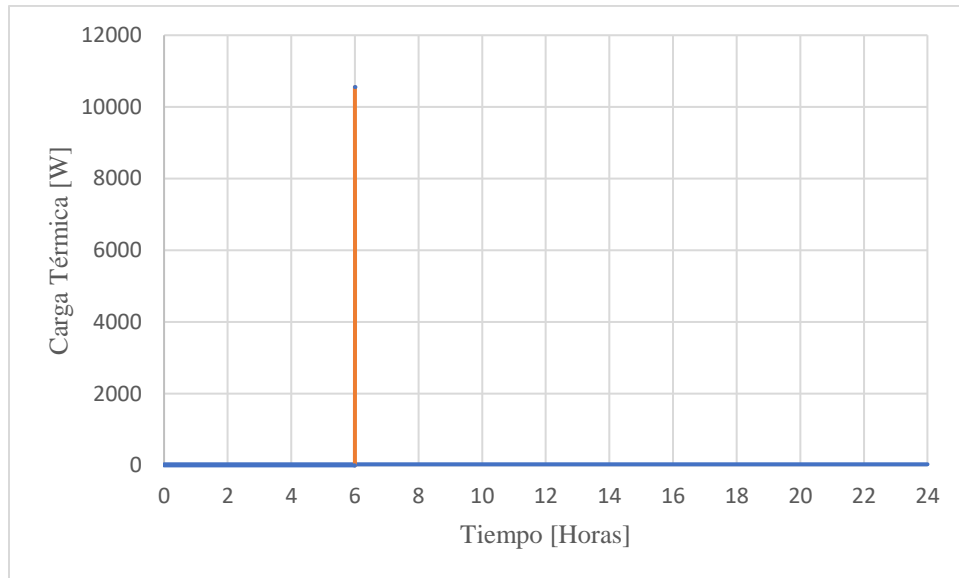


Figura 20. Cargas térmicas [49].

#### 5.4.2. Simulación del Interior de la Cámara sin Ciclo de Refrigeración

En la figura 21 se muestra el comportamiento de la temperatura del aire al interior de la cámara sin ciclo de refrigeración, donde se presenta la variación de la temperatura del aire a lo largo de un día promedio, alcanzando una temperatura máxima de 29°C a las de 13:00 horas, esto debido a las cargas térmicas por transmisión de paredes y puerta.

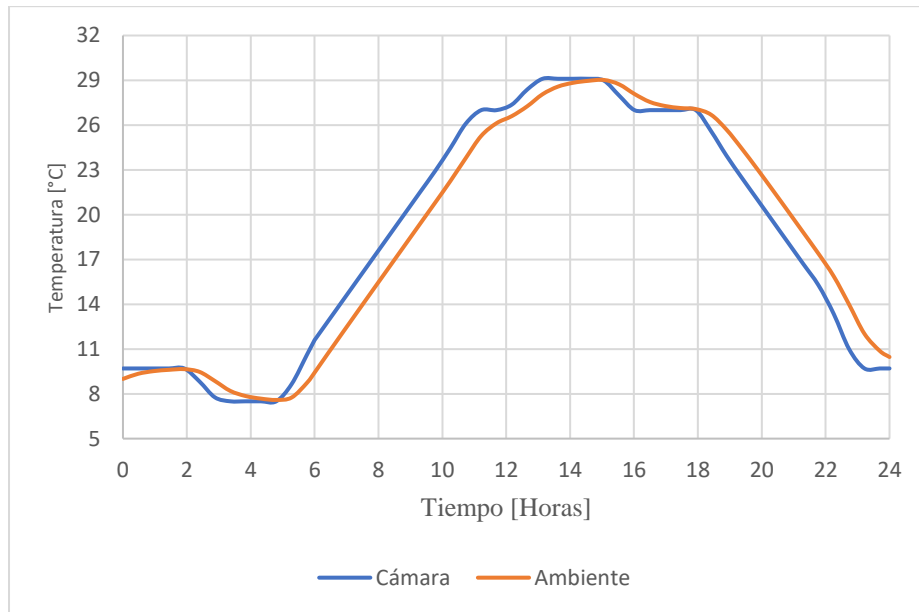


Figura 21. Temperatura del aire en la cámara [49].

### 5.4.3. Simulación del Ciclo de Refrigeración por Compresión Simple

El ciclo de refrigeración trabaja a partir de las cargas térmicas que se involucran en el sistema. Fijando la temperatura de conservación del producto a 0° C, con un flujo másico de refrigerante de  $0.012 \frac{Kg}{s}$ , el simulador calcula el trabajo de compresión requerido para mantener las condiciones de conservación. En la figura 22 se muestra el comportamiento del trabajo de compresión a lo largo de un día promedio, donde se muestra un trabajo máximo de 395 W entre las 13:00 y 15:00 horas, y un mínimo de 315 W entre las 3:00 y 5:00 horas.

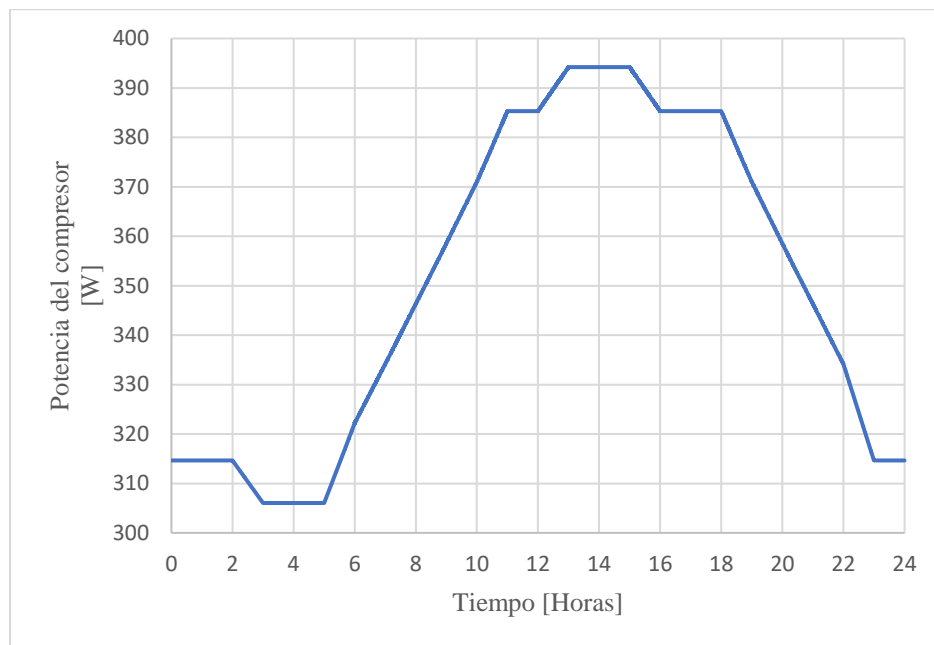


Figura 22. Trabajo del compresor [49].

En la figura 23, se muestra el comportamiento de los ciclos del sistema de refrigeración, el compresor trabaja 14 horas con 25 minutos por cada 24 horas de operación, obteniendo un total de 96 ciclos en un día.

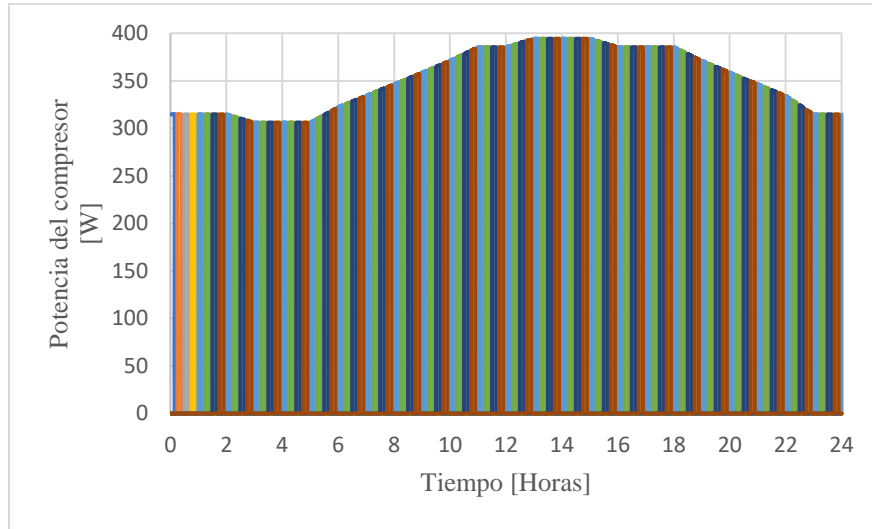


Figura 23. Ciclados a lo largo del día [49].

En la figura 24 se muestra el calor disipado por el proceso de condensación  $Q_H$ , que alcanza un valor máximo de 2810 W entre las 12:00 y 14:00 horas y mínimo de 2723 W entre las 3:00 y 6:00 horas.

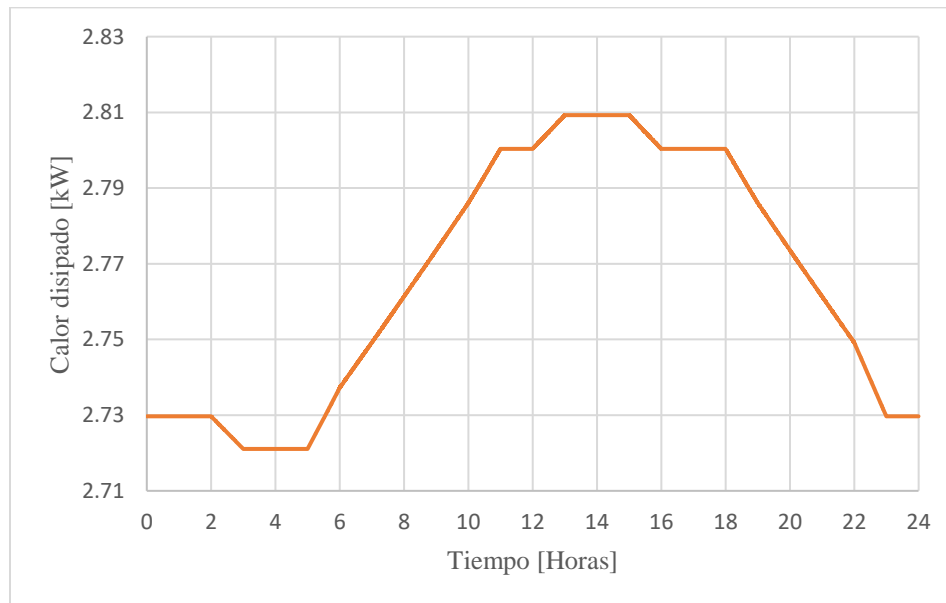


Figura 24. Calor disipado por el proceso de condensación [49].

El compresor requiere de un trabajo de operación máximo de 604.31 W, para las condiciones extremas, obteniendo coeficiente de desempeño (COP) de 5.52.

#### 5.4.4. Simulación del Producto Refrigerado

La integración de los modelos de cargas térmicas, ciclo de refrigeración y temperatura en la cámara, nos permite conocer el comportamiento de la temperatura del producto a refrigerar.

En la figura 24 se muestra el comportamiento de la temperatura de la carne que ingresa a la cámara, línea punteada, donde se observa que alcanza la temperatura de refrigeración en 8 horas aproximadamente. La línea continua muestra el comportamiento de la temperatura del total de carne dentro del recinto, donde se observa un aumento de su temperatura a la hora de la recepción. Este aumento no excede el rango de refrigeración que va de 0° C a 4° C, manteniéndose debajo de los 3° C.

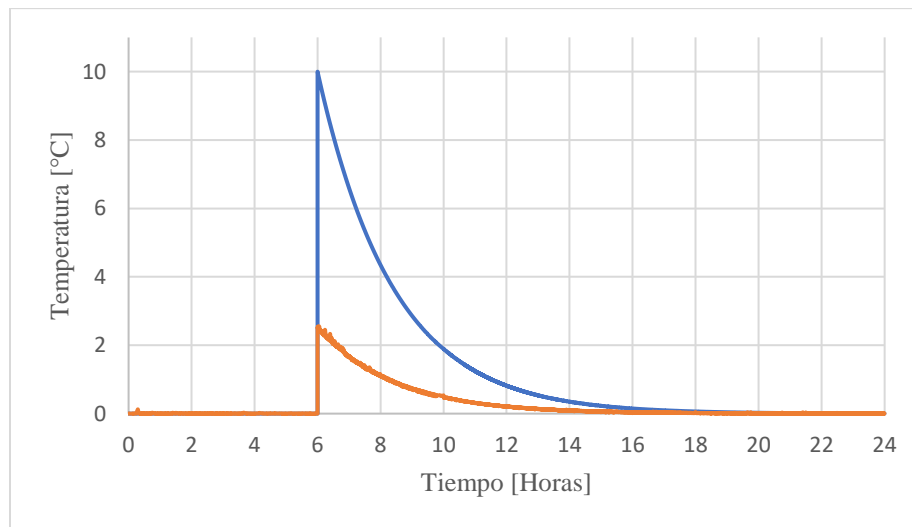


Figura 25. Temperatura del Producto dentro de la cámara frigorífica [49].

#### 5.4.5. Simulación de la Energía Eléctrica Suministrada por el Sistema Fotovoltaico

Se seleccionaron paneles solares con una potencia de 540 W, eficiencia de 21.13%, y un área de 2.58 m<sup>2</sup> [35]. En la figura 26 se muestra la distribución de la potencia generada por el panel durante el día. Considerando un recurso solar de 6.8 horas, se tiene que el panel entrega 3415 Wh.



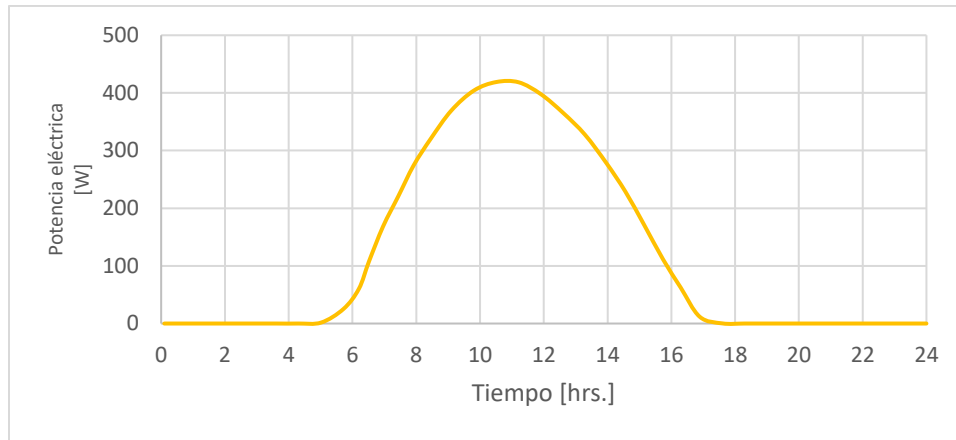


Figura 26. Potencia eléctrica suministrada por el panel [49].

La energía eléctrica máxima que debe suministrar el sistema fotovoltaico es de 14 184 Wh, considerando eficiencias del 98% y 92% para el regulador de carga y el inversor, respectivamente, con un factor de descarga de la batería del 80%. Por lo que el sistema fotovoltaico propuesto consta de 4 paneles fotovoltaicos para satisfacer la demanda de energía requerida por el sistema. Considerando que se requieren 7 baterías con capacidad de carga de 180 Ah, a 12 volts [36].

En la figura 27, en la línea de color gris se muestra la distribución de la potencia eléctrica suministrada por el arreglo fotovoltaico y en la línea de color naranja la potencia consumida por el compresor del sistema de refrigeración.

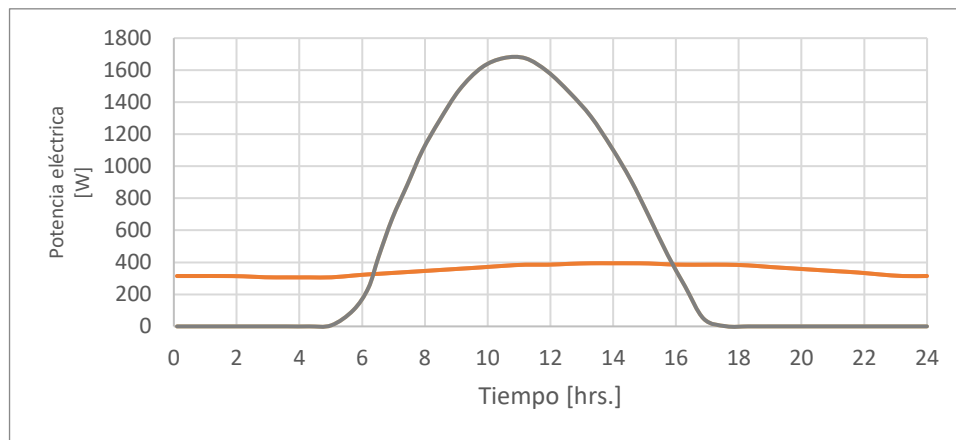


Figura 27. Potencia suministrada por los paneles y requerida por sistema [49]

## CONCLUSIÓN

La carne de pollo es el segundo cárnico más consumido en México, este tipo de alimento es altamente perecedero debido a su contenido de humedad y nutrientes, lo que la hace propensa a la proliferación de bacterias si no se maneja adecuadamente. La refrigeración es una forma efectiva de conservar el alimento al disminuir la velocidad de crecimiento de microorganismos que pueden causar enfermedades alimentarias. Mantener las condiciones específicas de temperatura entre 0° C a 4° C y humedad relativa de entre 85% a 90 % es crucial para conservar la carne de pollo de manera segura y prolongar su vida útil. Las cámaras frigoríficas son herramientas fundamentales para lograr este objetivo, ya que ofrecen un ambiente controlado donde se pueden mantener las condiciones de conservación de alimentos perecederos. Sin embargo, para diseñar una cámara frigorífica es necesario seguir una metodología que incluye una serie de consideraciones, para crear un ambiente óptimo de almacenamiento a bajas temperaturas, a partir de las características del sitio y las necesidades específicas del producto.

Sin embargo, toda metodología para el diseño de cámaras frigoríficas debe ser evaluada para garantizar la viabilidad técnica y energética en la implementación de la cámara. Es por esto que la metodología propuesta en el presente trabajo se complementó con el desarrollo de un simulador que permite evaluar el desempeño de las cámaras diseñadas. La metodología se basa en el conocimiento de dos elementos principales; las características de almacenamiento del producto y las condiciones de operación de la cámara durante el día.

El diseño modular del simulador le otorga la capacidad de evaluar diversos tipos de cámaras en diferentes escenarios, adaptándose a las necesidades y condiciones requeridas por el cliente. Su implementación permite simular la cámara frigorífica con y sin ciclo de refrigeración, para verificar sus condiciones de operación, así como simular todo el proceso de conservación del pollo en la cámara y calcular el trabajo del compresor. La estimación de la energía eléctrica requerida permite determinar la viabilidad técnica de la cámara propuesta y factibilidad en la implementación de tecnologías que reduzcan el impacto económico ambiental de su funcionamiento.

El caso de estudio permitió cumplir con el objetivo del simulador que es evaluar la viabilidad energética del diseño de una cámara frigorífica para la conservación de pollo instalada en el municipio de Apan, Hidalgo. Donde a partir de una producción diaria de pollo, 500 carcazas con un peso promedio de 1.75 kg aproximadamente, se obtuvo un consumo de energía para la operación de la cámara propuesta de 10.23 KWhr/día, considerando un compresor hermético recíprocante que opera durante un tiempo de 14.4 horas/día con una potencia máxima de 604 W. Con base en los resultados de consumo de energía, y buscando que el sistema sea sustentable, el simulador determinó un arreglo fotovoltaico para la alimentación de electricidad que consta de 4 paneles fotovoltaicos de 540 W y 7 baterías de 180 Ah. Por lo que además de evaluar la factibilidad energética en el diseño de la cámara frigorífica, el simulador también promueve la sustentabilidad energética.

Finalmente, cabe mencionar que las simulaciones obtenidas nos dan un panorama general de la viabilidad energética del diseño de la cámara frigorífica propuesta, pero hay que considerar que el simulador se desarrolló mediante modelos teóricos obtenidos de leyes físicas, por lo que los resultados generados deben ser considerados ideales.

## REFERENCIAS

- [1] Rua. (S/f). Sistema de refrigeracion por compresion. Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>
- [2] FAO (1991). Elaboración de frutas y hortalizas. Editorial Trillas. ISBN 968-24-3219-7.
- [3] Gasesgrit. (S/f). Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://gasesgrit.com/wp-content/uploads/2022/03/GRIT-Catalogo-web-de-gases-refrigerantes-en-espanol.pdf>
- [4] Blog. (2020). Cámaras Frigoríficas. Recuperado el 16 de abril del 2020 de: <https://www.solocamarasfrigorificas.com/blog-articulos/19-consejos/32-floristeria-como-idea-de-negocio>
- [5] Isoterma. (2012). Materiales utilizados en el aislamiento térmico de cámaras frigoríficas. Recuperado el 18 de abril del 2020 de: <https://www.camarasfrigorificas.es/blog/materiales-utilizados-en-el-aislamiento-termico-de-camaras-frigorificas/>
- [6] Flores, A. (2011). Aislamiento térmico, tipos y recomendaciones (actualizado). Recuperado el 20 de abril del 2020 de: <https://www.grupounamacor.com/aislamiento-termico-tipos-y-recomendaciones/>
- [7] Jesus A, Cengel & Afshin J. Chajar. (2011). HEAT and MASS TRANSFER Fundamentals and Aplicati3n. Recuperado el 20 de abril del 2020.
- [8] Vizuete. (s/f) Recuperado el el 20 de abril del 2022, de <https://www.vizuite.com/wp-content/uploads/2015/09/TL3-Cortina-de-lamas-de-PVC-email.pdf>
- [9] SODECA. (s/f). Cortinas de aire. Sodeca.com. Recuperado el 20 de abril del 2020, de [https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/SODECA\\_CT06\\_cortinas\\_de\\_aire\\_ES.pdf](https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/SODECA_CT06_cortinas_de_aire_ES.pdf)
- [10] Renedo, C. (s/f). Tecnología Energética (G.I.T.I.). Unican.es. Recuperado el 12 de junio de 2024, de <https://personales.unican.es/renedoc/Traspereancias%20WEB/Trasp%20Tec%20Ener/010%20Prod%20Frio.pdf>
- [11] Yunes A Cengel y Michael A Boles,(2012). Cap. 11 Ciclos de refrigeraci3n, séptima edici3n. Recuperado 19 de junio de 2020, de <http://joinville.ifsc.edu.br/~evandro.dario/Termodin%C3%A2mica/Material%20Did%C3%A1tico/Livro%20-%20Cengel/Termodinamica%20-%20Cengel%207th%20-%20espanhol.pdf>
- [12] RANEDO. C. Refrigerantes y Salmueras. Recuperado el 2 de mayo del 2020 de: <https://personales.unican.es/renedoc/Traspereancias%20WEB/Trasp%20Tec%20Frig/005%20Refrig%20y%20Salm.pdf>
- [13] Indubel. (S/f-c). Refrigerantes. Recuperado el 12 de junio de 2024, de <https://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>
- [14] Freon. (S/f). Properties, Uses, Storage, and Handling Recuperado el 12 de junio de 2024, de <https://www.freon.com/es/-/media/files/freon/freon-123-push-bulletin.pdf?rev=b5fb1eba89d946d898997fea881b03b2>
- [15] Renedo. (S/f). Tecnología Frigorífica (I.I.). Recuperado el 12 de junio de 2024, de <https://personales.unican.es/renedoc/Traspereancias%20WEB/Trasp%20Tec%20Frig/002%20Cargas%20TC3%A9rmicas.pdf>
- [16] cincap. (2019). Carne de Pollo. Recuperado el 12 de agosto del 2020 de: <https://www.cincap.com.ar/wp-content/uploads/2019/03/Tama%C3%B1o-de-distintos-cortes-de-pollo-por-unidad-pesos-bruto-y-neto-en-base-a-pollos-de-1800-kg-y-2500-kg-peso-en-g%C3%B3ndola..pdf>
- [17] OPS (s.f.). Organización Panamericana de la Salud. Recuperado el 5 de mayo del 2020 de: <https://www.paho.org/es/inmunizaci%C3%B3n/cadena-frio>
- [18] García J. (2016). "Preservaci3n y conservaci3n de muestras biol3gicas: mucho más que almacenamiento". Recuperado el 5 de mayo del 2020 de: [https://www.researchgate.net/publication/298790112\\_Preservacion\\_y\\_conservacion\\_de\\_muestras\\_biologicas\\_mucho\\_mas\\_que\\_almacenamiento](https://www.researchgate.net/publication/298790112_Preservacion_y_conservacion_de_muestras_biologicas_mucho_mas_que_almacenamiento)
- [19] Noguera G, Castillo G & Vega M. (s.f.). Conservaci3n ex situ y propagaci3n in vitro de germoplasma de Neltuma alba Griseb. Recuperado el 20 mayo del 2020 de: <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v24n2/0123-3475-biote-24-02-68.pdf>
- [18] [20] Rodríguez, D. (2011). La carne de pollo (procesamiento) pdf. Recuperado el 12 de agosto del 2020.

- [21] INCAP. (2007). Tabla de composición de Alimentos de Centroamérica pdf. Recuperado el 12 de agosto del 2020.
- [22] ROSS (2015). Manual de manejo del Pollo de carne pdf. Recuperado el 12 de agosto del 2020 de: <https://es.slideshare.net/Luisana26/manual-delpollo-ross>
- [23] León C, Orduz C & Velandia C. (2017.). Physicochemical composition of meat of sheep, chicken, res and pork. Edu.Co. Retrieved June 12, 2024, from [https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/ALIMEN/article/viewFile/2969/1594#:~:text=La%20carne%20contiene%20aproximadamente%20entre,es%20agua%20ligada%20a%20prote%C3%ADnas.](https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/ALIMEN/article/viewFile/2969/1594#:~:text=La%20carne%20contiene%20aproximadamente%20entre,es%20agua%20ligada%20a%20prote%C3%ADnas.)
- [24] aviNews. (2017). Transformación del musculo en carne de pollo. Recuperado el 12 de agosto del 2020 de: <https://avinews.com/transformacion-del-musculo-carne/>
- [25] Gómez & Gómez, N. (2013). Evaluación de la calidad del pollo (pactoralis major y pactoralis minor) que se expende en la ciudad de san juan de pasto (Nariño). Recuperado el 12 de agosto del 2020 de: [Evaluacion-de-la-calidad-del-pollo.pdf](#)
- [26] DOF. (2015). NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. Recuperado en junio, 2024, from [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5398468&fecha=26/06/2015](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5398468&fecha=26/06/2015)
- [27] AGRO PRODUCTIVIDAD (S/f). Empaque para la conservación de carne y productos cárnicos. recuperado, junio 12, 2024, from [https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2013/AGROPRODUCTIVIDAD%20I%202013.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2013/AGROPRODUCTIVIDAD%20I%202013.pdf)
- [28] Uvesa. (2023, 7 agosto). Contramuslos sin hueso y sin piel de pollo ATM bandeja - Uvesa. <https://www.uvesa.es/producto/escalope-bandeja/>
- [29] Envasado de pechugas de pollo enteras en termosellado. (s. f.). ULMA Packaging. <https://www.ulmapackaging.com/es/soluciones-de-ensado/avicola/despiece-de-aves-en-bandeja/ensado-de-pechugas-de-pollo-enteras-en>
- [30] Masterotc. (2012, 16 diciembre). Efecto de las diferentes atmósferas modificadas en la pechuga de pollo. Obtención y tranformación de la carne. <https://otcmaster2011.wordpress.com/2012/12/02/efecto-de-las-diferentes-atmosferas-modificadas-en-la-pechuga-de-pollo/> 4
- [31] De, F., Marco, B., Dios, A., Mejor, E., Adoración, A. M., Precioso, M. I., & Franco, H. (s/f). Universidad Nacional De San Agustín. Edu.pe. Recuperado el 24 de agosto de 2020, de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/98db2a95-8acf-4cb4-81de-7d5618b89354/content>
- [32] E. el G. de P. (s/f). Manejo del Ambiente. Aviagen.com. Recuperado el 28 de agosto 2022, de [https://es.aviagen.com/assets/Tech\\_Center/BB\\_Foreign\\_Language\\_Docs/Spanish\\_TechDocs/Aviagen-Manejo-Ambiente-Galpñ-Pollo-Engorde-2009.pdf](https://es.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Aviagen-Manejo-Ambiente-Galpñ-Pollo-Engorde-2009.pdf)
- [33] FDA. (s/f). Tabla de almacenamiento en refrigerador y congelador. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.fda.gov/media/76116/download>
- [34] SINEC. (s/f). SINEC. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=a1hBTFphSUQxckVIbzJKUESVbW9MUT09>
- [35] Diario Oficial de la Federación || Bienvenido al Sistema de Información del Diario Oficial de la Federación. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://sidof.segob.gob.mx/notas/4886029>
- [36] NOM-009-Z00-1994: Proceso sanitario de la carne. (s/f). Ecolex.org. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.ecolex.org/details/legislation/nom-009-z00-1994-proceso-sanitario-de-la-carne-lex-faac013110/>
- [37] NOM-008-ZOO-1994: Especificaciones zoosanitarias para la construcción y equipamiento de establecimientos para el sacrificio de animales y los dedicados a la industrialización de productos cárnicos. (s/f). Ecolex.org. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.ecolex.org/details/legislation/nom-008-zoo-1994-especificaciones-zoosanitarias-para-la-construccion-y-equipamiento-de-establecimientos-para-el-sacrificio-de-animales-y-los-dedicados-a-la-industrializacion-de-productos-carnicos-lex-faac013106/>
- [38] DOF - Diario Oficial de la Federación. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 25 de enero de 2024, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4794142&fecha=18/10/1993](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794142&fecha=18/10/1993)

- [39] DOF - Diario Oficial de la Federación. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 25 de enero de 2024, de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5172063&fecha=22/12/2010](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5172063&fecha=22/12/2010)
- [40] DOF - Diario Oficial de la Federación (s/f). Gob.mx. Recuperado el 13 de junio de 2024, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5376424&fecha=18/12/2014](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5376424&fecha=18/12/2014)
- [41] DOF - Diario Oficial de la Federación. (s/f). Gob.mx. Recuperado junio 13, 2024, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5376424&fecha=18/12/2014](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5376424&fecha=18/12/2014)
- [42] DOF - Diario Oficial de la Federación (s/f). Gob.mx. Recuperado el 13 de junio de 2024, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5405210&fecha=26/08/2015](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5405210&fecha=26/08/2015)
- [43] NORMA Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. (s/f). Gob.Mx. Recuperado junio 13, 2024, de <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3980/salud/salud.htm>
- [44] Sánchez. M. & Pineda. I. (2001) ingeniería del frío: teoría y práctica. 1ra edición. Madrid España. Mundi-prensa libros, s.a. capítulo 11. Balance térmico en la instalación frigorífica, (págs. 416-433).
- [45] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (s.f.). Producción por estado. Recuperado el 23 de junio del 2021 de: [http://infosiap.siap.gob.mx/anpecuario\\_siapx\\_gobmx/ProduccionEstado.do4](http://infosiap.siap.gob.mx/anpecuario_siapx_gobmx/ProduccionEstado.do4)
- [46] weather spark (s.f.). El clima promedio en Apan, Hidalgo. Recuperado el 10 de enero del 2021 de: <https://es.weatherspark.com>
- [47] Nasa. (2021). The POWER Project. Recuperado el 5 de julio del 2022 de: <https://power.larc.nasa.gov/>
- [48] Conermex. (2020). Catálogo de productos. Recuperado el 24 de agosto del 2022 de: <https://www.conermex.com.mx/catalogo-conermex-2020.pdf>
- [49] Elaboración propia