



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Evaluación térmica y energética del sistema de enfriamiento de pollo en  
una planta procesadora de aves**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A**

**JORGE CUÉLLAR SILVA**

**ASESOR:** I.A. Manuel Alarcón López

**COASESOR:** I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
Introducción	
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	
1.1. Materia prima: <i>Gallus gallus domesticus</i>	1
1.2. Proceso de sacrificio.	3
1.3. Sistemas de enfriamiento de aves.	6
1.3.1. Sistemas de enfriamiento con inmersión de agua	7
1.3.2. Equipos utilizados en la industria.	10
1.3.3. Sistemas de enfriamiento con aire.	15
1.4. Estudio térmico del enfriamiento de aves	16
1.4.1. Parámetros térmicos	17
1.5. Instalaciones frigoríficas en la industria avícola.	22
1.5.1. Características de operación y diseño.	22
1.5.2. Eficiencia energética de la instalación frigorífica.	24
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO	
2.1. Problema.	31
2.2. Objetivos.	32
2.3. Parámetros de trabajo de campo.	32
2.4. Actividades de campo.	33
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1. Ubicación y localización de la planta.	40
3.1.1. Proceso de sacrificio en la planta.	40
3.1.2. Aplicaciones frigoríficas características de enfriadores y almacenamiento.	41
3.2. Condiciones operativas y de utilización del enfriador.	41
3.3. Descripción de la instalación frigorífica.	41
3.4. Estudio térmico.	45

3.4.1. Preenfriador	45
3.4.2. Enfriador.	48
3.5. Aplicaciones de refrigeración y congelación.	50
3.6. Análisis energético.	52
3.7. Estudio de COP.	54
3.8. Análisis global.	54
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	58
ANÉXOS	62

## ÍNDICE DE FRIGURAS Y TABLAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Consumo mundial de carne de pollo, 2006-2016	1
2	Producción de carne de pollo, 2006-2016	2
3	Colgado y matanza de pollos en una línea automática.	4
4	Proceso de escaldado en línea automática.	4
5	Proceso de desplumado de pollo en línea automática.	5
6	Proceso de eviscerado en una línea automática.	6
7	Pre-enfriador utilizado industrialmente.	9
8	Esquema de enfriador para enfriamiento de aves.	9
9	Enfriador de aves por arrastre.	11
10	Enfriador modelo HMR.	11
11	Vista interior de enfriador modelo HMR con tecnología DTM.	12
12	Enfriador modelo Quick Chill.	12
13	Enfriador de agua.	13
14	Esquema de comparación de enfriador normal (izquierda) con enfriador con tecnología Jet Bird (derecha).	14
15	Eliminador Continuo en Línea de Patógenos (COPE)	15
16	Esquema de túnel de aire para enfriamiento de pollo.	16

17	Diagrama de Y con $1/B_i$ para la determinación del número de Fourier.	19
18	Ciclo frigorífico básico.	22
19	Diagrama de presión entalpía de amoniaco.	25
20	Formato de trabajo de campo para la toma de datos en el enfriador de pollo.	34
21	Formato de trabajo de campo para la toma de datos en la sala de máquinas.	34
22	Secuencia de actividades para estudio térmico en el sistema de enfriamiento.	35
23	Secuencia de actividades para estudio energético y parámetros termodinámicos de la instalación frigorífica.	37
24	Secuencia de actividades para determinar la eficiencia energética de los compresores.	38
25	Diagrama de presión-entalpía de la instalación frigorífica.	43
26	Diagrama de la instalación frigorífica de la planta.	44
27	Comparación de las cargas térmicas real en la cámara de almacén de producto refrigerado con respecto al valor de diseño.	51
28	Comparación de la carga térmica real en la cámara de congelación con respecto al valor de diseño.	52
29	Comparación del amperaje entre los dos compresores que brindan servicio al enfriador de agua.	53
30	Comparación de presión de descarga entre los dos compresores que brindan servicio al enfriador de agua.	54

**Tabla**

**Página**

1	Datos de los compresores de la instalación frigorífica en la planta.	42
---	--	----

2	Datos de temperatura de entrada y salida, masa entrada y calor retirado en el pre enfriador en proceso real.	45
3	Datos de temperatura de entrada, masa entrada y calor retirado en el pre enfriador en proceso teórico.	46
4	Comparación de velocidad de enfriamiento en pre enfriador en proceso real y teórico.	47
5	Ganancia de masa en dos diferentes horas del día durante el proceso de sacrificio en la planta, en el pre enfriador	47
6	Datos de temperatura de salida de pre enfriador, salida de enfriador, masa salida pre enfriador y calor retirado en el enfriador en proceso real.	48
7	Masa salida pre enfriador y calor retirado en proceso teórico.	49
8	Comparación de velocidad de enfriamiento en enfriador en comparación en proceso real y teórico.	49
9	Ganancia de masa en dos diferentes horas del día durante el proceso de sacrificio en la planta, en enfriador.	50
10	Datos recopilados en la planta en el horario de las 8 horas	62

## NOMENCLATURA

$Q_{ret}$	Calor retirado del producto (kJ)
$Bi$	Número de Biot
$Fo$	Número de Fourier
$h$	Coefficiente convectivo ( $W/m^2K$ )
$L$	Espesor medio de una placa plana (m)
$t$	Tiempo (s)
$m$	Masa (kg)
$C_p$	Calor Específico ( $kJ/kg^{\circ}C$ )
$Y$	Relación adimensional de temperaturas
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
$\Delta T$	Diferencial de temperaturas ( $^{\circ}C$ )
$k$	Conductividad térmica ( $Km/W$ )
$Q_o$	Calor absorbido en el evaporador (BTU/lb)
$Q$	Calor cedido por el condensador (BTU/lb)
$T_o$	Temperatura inicial del producto ( $^{\circ}C$ )
$T_i$	Temperatura final del producto ( $^{\circ}C$ )
$T_m$	Temperatura del medio de enfriamiento ( $^{\circ}C$ )
$W$	Trabajo de compresión (BTU/min) (HP)
$h_i$	Entalpías en el punto $i$ (BTU/lb)
$COP$	Coefficiente de operación

## **RESUMEN**

El siguiente trabajo consistió en un estudio térmico y energético de un sistema de enfriamiento de pollo, en una planta procesadora de aves, ubicada en el municipio de Apan, en el estado de Hidalgo. El trabajo de campo se realizó en el periodo del 30 de octubre al 8 de noviembre de 2017. El estudio térmico consistió en la obtención de la temperatura y la medición de la masa del producto, a la entrada y salida del enfriador y preenfriador, y la medición de la temperatura del medio de enfriamiento (agua), posteriormente se realizaron los cálculos correspondientes utilizando los datos recopilados en el trabajo de campo. El estudio energético fue efectuado a través de la medición de la presión y temperatura de evaporación a la entrada y salida del enfriador de agua, presión de descarga en la salida del compresor, con la finalidad de conocer el calor absorbido por el refrigerante y el trabajo de compresión realizado en la instalación, para obtener el coeficiente operacional (COP).

En el estudio térmico se obtuvo que la eficiencia del sistema de enfriamiento de pollo tiene una subutilización del 12% con respecto al proceso teórico, el cual se obtuvo con valores bibliográficos. Para el caso del estudio energético se consiguieron valores de COP, por arriba de 7. Por lo anterior, se afirma que el sistema de enfriamiento de pollo esta siendo subutilizado en la planta, al igual que las demás aplicaciones frigoríficas en la planta; aunque la instalación frigorífica presenta un gran rendimiento en su funcionamiento.

## INTRODUCCIÓN

La industria avícola es de las más importantes en el país, y México, al ser el séptimo productor y sexto consumidor de este producto a nivel mundial, es de gran importancia la generación de nueva tecnología que ayude a producir y conservar por un mayor tiempo los productos derivados de las aves de corral (FIRA, 2016).

Uno de los principales problemas en el manejo de los productos avícolas es la gran proliferación de microorganismos inherentes al ave, o al proceso; los cuales pueden llegar a causar problemas a gran escala, en cuanto a volúmenes de producción y por lo tanto ganancias monetarias. Las principales bacterias presentes en las canales son las proteolíticas, al ser el pollo una gran fuente de proteínas es fácilmente atacado por estos microorganismos, al igual que la canal que puede contener bacterias patógenas para el ser humano (FIRA, 2016).

El proceso de sacrificio de pollo está compuesto de varias etapas, las cuales son colgado, sacrificio, o degollado, escaldado, desplumado, eviscerado, preenfriamiento y enfriamiento; siendo el escaldado y las dos etapas de enfriamiento, las más importantes para el proceso, enfocándolo térmicamente, ya que son las dos etapas que marcarán las temperaturas, y por ende los rendimientos de los equipos frigoríficos en la planta (Bellideli, et al., 2014).

Las etapas de refrigeración tienen como objetivo reducir la temperatura de la canal de 40°C, la cual es la temperatura a la salida del proceso de escaldado, a 4°C a la salida del enfriador. El proceso de enfriamiento es dividido generalmente en dos etapas, un pre-enfriamiento y un enfriamiento, el primero teniendo como objetivo, reducir la temperatura de la canal hasta 20°C, al igual que sirve como un lavado, para retirar plumas, materia fecal, y algunos remanentes de vísceras, y la segunda etapa se pretende la reducción de la temperatura hasta los 4°C, la cual es su temperatura de almacenamiento.

El proceso de enfriamiento se puede llevar a cabo por tres distintos métodos como son, el enfriamiento por inmersión en agua, en una mezcla de agua con hielo, o por aire. El sistema de inmersión es el más utilizado en América Latina y Estados Unidos, esto se debe a los costos de los equipos al igual que los tiempos se ven reducidos. El sistema de enfriamiento con aire es el único utilizado en Europa, debido a que, legislativamente está prohibido el uso de agua para este tipo de procesos (Carciofi y Laurindo, 2010).

El método por inmersión en agua se realiza en enfriadores, también llamados tinas de inmersión, los cuales son fabricados en su totalidad de acero inoxidable aunado a que poseen diseños que facilitan y propician la transferencia de calor; el enfriador utilizado en la etapa de preenfriamiento, tiene una menor longitud que el utilizado en la etapa de enfriamiento, al igual que las temperaturas del medio (agua), las cuales son de 10°C a 15°C; para el proceso de enfriamiento se utiliza un enfriador de mayor longitud con temperaturas del medio de 0.5°C a 1°C, esto para poder reducir la temperatura del pollo hasta los 4°C. En ambos casos el agua es alimentada en contracorriente en comparación a la entrada del producto, al igual que es provocada una turbulencia con ayuda de aire inyectado en el seno del líquido, favoreciendo la transferencia de calor. El agua a su vez es enfriada, generalmente, a través de enfriadores de tubos y coraza, cediendo el calor ganado en el enfriador al líquido refrigerante, aunque los cuales carecen de información completa, como es tiempo de residencia y número de pollos introducidos por minuto (Ziolecki, et al., 1997).

El sistema frigorífico más utilizado es el de compresión de vapor. El principio de este sistema frigorífico consiste en el enfriamiento por evaporación de un líquido refrigerante, el cual se mantiene en condiciones de presión tales que su evaporación ocurre a temperaturas menores que las del ambiente a enfriar. El fluido usado como refrigerante, que se encuentra en una fase gaseosa, vuelve a una fase líquida expulsando calor, con lo que se completa el ciclo. Aunque en el diseño se varía mucho con respecto a lo real puesto que los operarios manejan las aplicaciones frigoríficas con mucha diferencia con respecto a lo planeado en los valores de diseño, por lo cual en algunas situaciones la selección de equipo queda de lado (Cascade Energy, 2010).

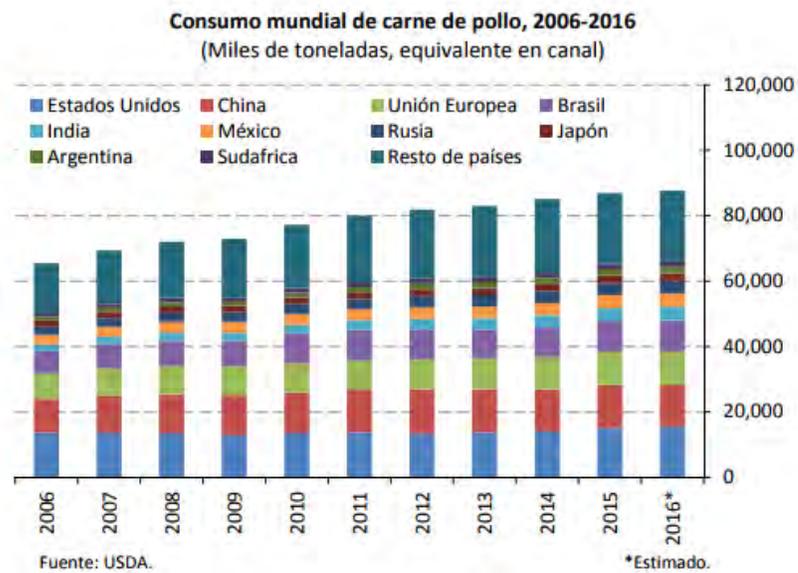
En la industria avícola, usualmente la selección de los sistemas de enfriamiento de pollo se realiza bajo parámetros generales de capacidad y temperaturas de procesos y, por consecuencia, las condiciones reales de operación de esos sistemas difieren significativamente de lo indicado en las especificaciones técnicas del fabricante. Las variaciones diarias en la capacidad de producción, en las temperaturas de producto y medio, en los pesos promedios del producto; así como, el tiempo de residencia del producto en el medio, el porcentaje de agua absorbida por el producto, entre otras variables, influyen directamente en la eficiencia operativa y energéticas de los sistemas de enfriamiento empleados en dichas plantas. Es importante que los usuarios de estos sistemas de enfriamiento tengan un estudio confiable sobre el comportamiento operativo y de utilización de los mismos, que les permita determinar con exactitud la eficiencia energética y su impacto en los procesos de producción de frío. Por esto se planteó realizar un estudio de campo en una planta procesadora de aves para determinar la eficiencia térmica y energética del sistema de enfriamiento de pollo, y del proceso de compresión de la instalación frigorífica.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

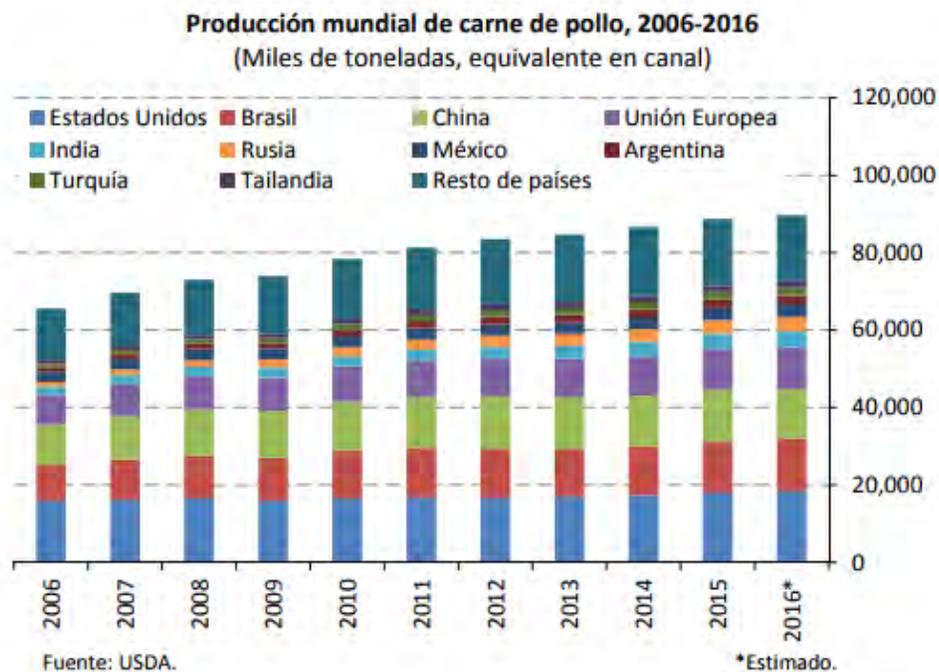
### 1.1. Materia prima: *Gallus gallus domesticus*

El pollo es uno de los alimentos más consumidos en el mundo, teniendo un consumo promedio por persona de 13.3 kg en el 2016 representado gráficamente en la *Figura 1*. En México el consumo promedio anual per cápita en el mismo período es de 32.1 kg, y posicionándose como el séptimo mayor productor en el mundo, con 2.95 millones de toneladas anuales en el 2015, solo superado por países como China, Estados Unidos, Brasil, India, y la Unión Europea (FIRA, 2016).



*Figura 1.* Consumo mundial de carne de pollo, 2006-2016 (FIRA, 2016).

Durante la década reciente, la producción nacional de carne de pollo ha aumentado de manera continua, como se muestra en la *Figura 2*, desde el 2006 se presenta un aumento en cada uno de los años. Y se espera que se mantenga esta tendencia favorable en los próximos años. En los últimos años la participación de la avicultura en la producción pecuaria fue de alrededor del 63 por ciento, con un 34 por ciento netos de carne de pollo, superando la producción de otros productos pecuarios como la carne de res y de cerdo (FIRA, 2016).



*Figura 2.* Producción de carne de pollo, 2006-2016 (FIRA, 2016).

Por otro lado, dentro de las amenazas que afectan la producción avícola se encuentran enfermedades como la influenza aviar patógena y la potencial aparición de nuevas cepas de virus de la influenza aviar. Uno de los casos más recientes de influenza aviar de baja patogenicidad ocurrió en Sinaloa, provocando que las autoridades zoosanitarias declararan en estado de cuarentena varias granjas productoras de productos avícolas.

En lo que respecta a la producción de carne de pollo por entidad federativa, se observa que aproximadamente el 76.7 por ciento de la producción nacional se encuentra en diez

entidades. Durante el pasado año, en Jalisco se produjo 11.7 por ciento del total nacional, en Aguascalientes, el 10.2 por ciento; 10.2 por ciento igual en Veracruz; mientras que en Durango, Querétaro, Guanajuato, Puebla, Chiapas, Sinaloa y Yucatán aportaron en conjunto el 44.5 por ciento de la producción nacional del cárnico.

El gran consumo, la contaminación por microorganismos patógenos y alterantes del producto, han dado pauta a desarrollar tecnología de enfriamiento, como uno de los métodos más comunes de almacenamiento para alargar la vida de anaquel. En los procesos industriales de pollo, en seguida del sacrificio, desangrado, escaldado, desplumado y eviscerado, la canal de pollo debe ser enfriada de 40° C a 4° C (Belledeli et al., 2014).

## **1.2. Proceso de sacrificio**

El proceso de sacrificio en los mataderos a gran escala se inicia con un aturdimiento de las aves antes del proceder a un sacrificio, este estado se mantiene hasta la muerte del animal. El aturdimiento se efectúa con una corriente eléctrica a través del cerebro, ocasionándose una pérdida del conocimiento. Esto permite el sacrificio sin dolor inherente al proceso. En algunos casos las aves pasan por un baño aturdidor de agua electrificada; tras el aturdimiento el ave es susceptible a recuperar el conocimiento, en el caso de que el cerebro no haya sido desactivado de una manera adecuada, por esto el desangrado debe ser iniciado en un tiempo no mayor a 15 segundos después del aturdimiento (Belledeli et al., 2014; Carciofi y Laurindo, 2010).

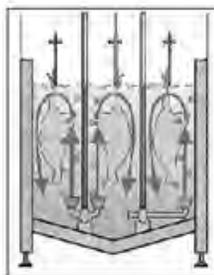
En el sacrificio los dos métodos más utilizados son la dislocación del cuello y el desangrado, siendo el último el más utilizado, el cual se divide en dos, que son el externo e interno; el primero consiste en el corte de la vena yugular y la arteria carótida en la cavidad bucal con una navaja en forma de gancho; el segundo puede ser manual o automático, consiste en un corte al lado del cuello, bajo los pabellones articulares, la muerte dura aproximadamente de 2 a 3 minutos, pero no debe superar los 3.5 minutos y con una pérdida de 30% a 50% del total de la sangre, procedimiento observado en la *Figura 3*, aunque la meta es desanjarlas a un 45%. Al sobrepasar los 3.5 minutos se provoca el inicio del rigor *mortis*,

ocasionando una rigidez cadavérica. Se debe tener especial cuidado no cortar la tráquea o el nervio cervical. Al ocurrir esto, las aves morirán por asfixia al no poder respirar normalmente durante su desangre y además las señales emitidas por el cerebro se interrumpen (Carciofi y Laurindo, 2010).



*Figura 3.* Colgado y matanza de pollos en una línea automática (Bellideli et al., 2009).

Posteriormente se procede a un escaldado mostrado en la *Figura 4*, por inmersión en agua caliente, el más difundido y por aire caliente y húmedo, siendo más limitado en la industria avícola. Consiste en hacer pasar las aves por un tanque de agua caliente por un tiempo determinado; la agitación del agua es necesaria para mantener la homogeneidad de la temperatura y se pueda transferir el calor necesario a los folículos con el fin de desnaturalizar la proteína estructural que mantiene la pluma unida, y facilitar la separación mecánica en el desplumado (Belledeli et al., 2014).



*Figura 4.* Proceso de escaldado en línea automática (Belledeli et al., 2014).

El desplumado, tiene la finalidad de remover las plumas de las aves sin provocar un desgarramiento de la piel ni daños en huesos. Se realiza a través del roce de dedos de goma sobre las plumas mientras las aves recorren la desplumadura. Se procede a un desprendimiento de cabeza, corte de patas y lavado previo a evisceración. La primera debe ser realizada antes de la evisceración, teniendo precaución de que sea del 100% para evitar problemas posteriores en el proceso, el corte de patas debe ser entre la pata y el muslo del ave para que la piel no se retraiga, se realiza con ayuda de un disco de corte, para evitar producir pérdida de rendimiento. Por último, el lavado antes de la evisceración ayuda a la remoción de gran parte de las bacterias (Carciofi y Laurindo, 2010).



*Figura 5.* Proceso de desplumado de pollo en línea automática (Belledeli et al., 2014).

La evisceración puede ser manual, semiautomática o automática. Para la semiautomática el buche y la tráquea son retiradas de manera manual, esto hace que se incremente los gastos operacionales. Se debe evitar el rompimiento de vísceras y contaminación con heces fecales, que produzcan una contaminación en la canal. Seguidamente se procede al enfriamiento de la canal, se realiza en dos etapas, un preenfriamiento, consiste en un lavado de las canales y una hidratación, y un enfriamiento con finalidad de disminuir rápidamente la temperatura de la canal, y se finaliza la etapa de absorción de agua.



*Figura 6.* Proceso de eviscerado en una línea automática (FIRA, 2016).

### **1.3. Sistemas de enfriamiento de aves**

La refrigeración es uno de los procesos térmicos más comunes utilizado para mejorar la calidad y la seguridad de los productos alimenticios al igual que para extender su vida de anaquel. En el proceso industrial de aves, inmediatamente después del sacrificio, desangrado, escaldado, desplumado y evisceración, la temperatura de las canales de pollo debe ser reducida de 40° C a 4° C, que contribuye a asegurar los productos. Durante el enfriamiento del procesamiento de aves, la mayor temperatura es localizada en el centro geométrico de la pechuga, el cual es el parámetro de interés para evaluar la eficiencia del proceso de enfriamiento.

Algunos casos del sistema industrial usado para enfriar canales de pollo han sido reportados por muchos autores. La inmersión en agua, inmersión en hielo y el uso de aire son tres de los sistemas de enfriamiento más comunes, teniéndose al sistema de inmersión en agua y mezcla de agua y hielo, como un método de rápido enfriamiento y de bajo costo comparado con el uso de aire, siendo de los más utilizados en el continente; por otra parte, el uso de aire como método de enfriamiento, es utilizado en Europa debido a las normatividades y restricciones de uso del método de inmersión en agua, al igual el método puede causar pérdidas de masa en el producto por un mal control del proceso, a diferencia del sistema de inmersión en que habrá una ganancia de masa a causa de la absorción de agua, la cual no debe ser mayor a 8% (Carciofi y Laurindo, 2010).

### **1.3.1. Sistemas de enfriamiento con inmersión en agua.**

El enfriamiento por inmersión es el método de enfriamiento de aves más común en Sudamérica y Norteamérica en países como Estados Unidos y Brasil, dos de los países con mayor producción de pollo en el mundo. En este sistema las canales de pollo son forzadas a través de un tanque de acero inoxidable conteniendo al medio de enfriamiento (Ziolecki et al., 1997).

En Estados Unidos la industria avícola rutinariamente hace uso de este método rápido de enfriamiento por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, a través de FSIS (Food Safety and Inspection Service), el cual demanda que el enfriamiento de las canales sea por debajo de 4.4° C hasta las 4 horas de *postmortem*. En Brasil, el Departamento Federal de Agricultura demanda el uso de al menos dos tanques de enfriamiento para el enfriamiento de las canales por inmersión de agua (Ziolecki et al., 1997).

El sistema de enfriamiento consiste en dos partes, las cuales son una para el preenfriamiento y otra de enfriamiento, la primera es utilizada para un lavado y para disminuir la temperatura de la canal de 40° C a menos de 20° C, y la segunda es empleada para reducir la temperatura a 4° C, para su posterior almacenamiento en refrigeración y congelación (Carciofi y Laurindo, 2010).

El sistema de enfriamiento de inmersión con agua es un método que se ha documentado desde 1910. En general, el tiempo que toma disminuir la temperatura de la canal, es aproximadamente de 30 a 50 minutos. El sistema de inmersión puede ser considerado como un proceso por lotes o discontinuo (batch). Este sistema brinda un gran movimiento a las canales por lo que los tiempos son de 2 a 6 veces menores que los sistemas estáticos, al igual que la absorción es alta. El enfriamiento por inmersión continuo suele comprender tanques multi etapas. En el proceso, las canales son empujadas a través del agua con ayuda de un tornillo o paletas. En la primera etapa de enfriamiento, usualmente llamada preenfriamiento, la temperatura del agua es entre 10-15° C y el tiempo de residencia es de 10 y 15 minutos. A la entrada del preenfriador, la temperatura de la canal es cerca de 40° C, pero

la temperatura de la canal es reducida a 20° C antes de entrar al enfriador principal (Veerkamp, 1985).

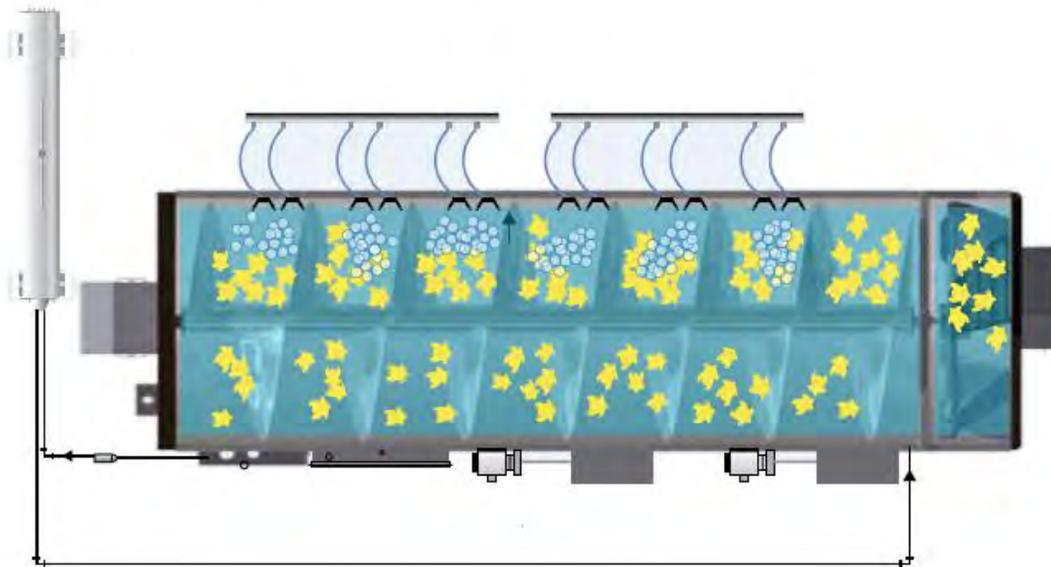
La etapa final de enfriamiento incluye dos diferentes sistemas de alimentación de agua, paralelo y contracorriente. El enfriamiento por inmersión en flujo paralelo ocurre cuando el agua fluye en la misma dirección en el que lo hace la canal, y la canal es lentamente trasladada a lo largo del enfriador por acción del tornillo. En este sistema, la absorción de agua es mayor pero menos uniforme. El sistema en contracorriente es el sistema de enfriamiento más utilizado en la industria avícola. En este sistema, el flujo del agua fría fluye en sentido opuesto al flujo de la canal, la cual es enfriada con agua significativamente más limpia y fría. El flujo en contracorriente maximiza el intercambio de calor de la canal al agua, y mejora la limpieza de la canal. Los sistemas con multi-tanques en contracorriente son diseñados de manera que el tanque de enfriamiento descargue en el tanque de preenfriamiento, para reciclar la energía refrigerante. La temperatura del agua es controlada por la aplicación de la máquina de hielo, típicamente adicionado de una tolva superior a la entrada del enfriador, o por un intercambiador de calor con agua recirculada. La cantidad de hielo necesario para enfriar la canal de 40° C a 4° C es de 0.38 kg de hielo por kilogramo de carne, pero usualmente es utilizado entre 0.4 a 1 kg de hielo en la industria. El uso de hielo en escamas ha sido substituido por agua fría obtenida directamente de una unidad intercambiadora de calor (Veerkamp, 1985; Ziolecki et al., 1997).

El equipo más utilizado en todas las etapas de enfriamiento por inmersión es el enfriador de tornillo que puede ser utilizado como enfriadores y preenfriador, en la primera etapa de preenfriamiento la temperatura del agua es de 7° C a 13° C y el tiempo de residencia es aproximadamente de 10 a 15 minutos y en la etapa de enfriamiento debe ser de 0° C a 2° C para lograr disminuir la temperatura de la canal a 4° C; el equipo opera con un flujo en paralelo y contracorriente, el flujo en contracorriente permite una mayor transferencia de calor aunado a una limpieza extra para la canal. Los sistemas con multi tanques están diseñados para que la descarga del último tanque descargue en el primer tanque, optimizando esto el consumo de agua. La reutilización del agua es comúnmente conocida como “aguas rojas”.



*Figura 7.* Preenfriador utilizado industrialmente (Morris & Associates, 2018).

Los enfriadores de tornillo son fabricados en acero inoxidable con resistencia al desgaste y corrosión, que ofrezca condiciones sanitarias ideales, aunado a diseños que favorezcan un mayor flujo de agua provocando una mayor transferencia de calor, que sean de fácil limpieza e instalación; al igual los enfriadores son equipados con un flujo de aire que permiten un mayor movimiento del producto, observado en la figura 8.



*Figura 8.* Esquema de enfriador para enfriamiento de aves (Morris & Associates, 2018).

Durante el proceso de enfriamiento, el agua no es solo utilizada para remover calor, también es utilizada para remover sólidos propios del pollo, incluyendo microorganismos de la canal, al igual que durante el proceso se sufren pérdidas de agua provocadas por la absorción de agua en la canal de pollo, y pérdidas propias del proceso, por lo cual se debe tener un control del nivel de agua que se incorporará nuevamente al proceso, agua de reposición, la cual debe ser en un rango de 2.5 a 6 litros por canal de pollo.

Durante el enfriamiento por inmersión, el coeficiente de transferencia de calor es grande. Agitación mecánica del agua e inyección de aire son los métodos más utilizados para prevenir la formación de una capa térmica en la superficie del producto. Esta capa térmica aísla la superficie y reduce el calor intercambiado. La agitación del ave durante el enfriamiento aumenta la absorción de agua por “bolsillos de agua” que se forman debajo de la piel. La absorción de agua es mayor con un mayor grado de exposición de la carne.

### **1.3.2. Equipos utilizados en la industria.**

La principal marca de equipos utilizados en el proceso de enfriamiento de aves industrialmente es la marca Morris & Associates, los cuales son líderes en innovación y venta de equipos. Los principales equipos para el proceso son:

#### **a) Enfriadores.**

**Enfriador de aves por arrastre.** Este equipo, mostrado en la figura 9, cuenta con paletas para generar el flujo máximo posible de agua y maximizar la transferencia de calor.

El equipo tiene un diseño en contracorriente que produce un consistente enfriamiento, al igual que un campo ajustable de agitación de aire provee flexibilidad operacional. Un tanque con secciones de acero inoxidable brinda resistencia y durabilidad al equipo, controles de variación de velocidad permiten flexibilidad en tiempos de residencia.



*Figura 9.* Enfriador de aves por arrastre (Morris & Associates, 2018).

**Enfriador HMR.** En la figura 10 se muestra el enfriador, cuenta con la acción de lavado del equipo disminuye drásticamente la carga orgánica, el diseño del enfriador permite procesar grande cargas de producto, con secciones del tanque de acero inoxidable, para una mayor durabilidad.



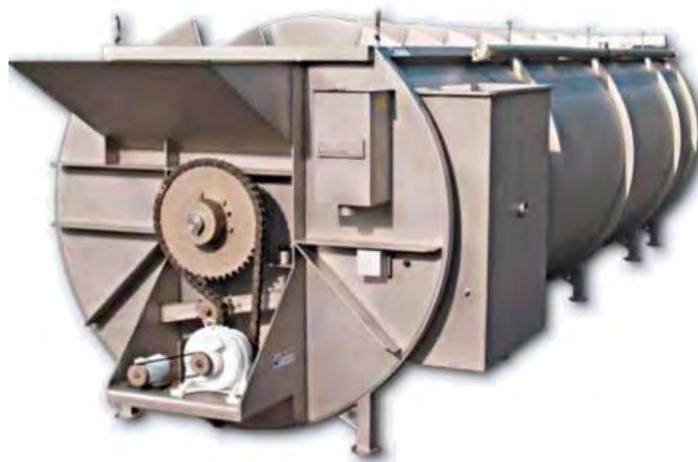
*Figura 10.* Enfriador modelo HMR (Morris & Associates, 2018).

**Enfriador HMR con tecnología DTM.** La tecnología DTM, vista en la figura 11, incluye todas las características de un enfriador HMR, con la ventaja de la reducción de la desviación de las variables del producto a través del mejoramiento de la consistencia de: tiempo de residencia, temperatura, acción de lavado.



*Figura 11.* Vista interior de enfriador modelo HMR con tecnología DTM (Morris & Associates, 2018).

**Enfriador rápido (*Quik Chill*).** La alta capacidad de diseño brinda un mayor volumen en un menor espacio de suelo, con tubería de acero inoxidable y tubos de cabezales de aire con capuchones removibles que permiten óptimas condiciones sanitarias, cuenta con secciones de acero inoxidable para aumentar resistencia y seguridad, un mayor flujo de agua disponible, mayor flujo de agua a través de la canal de pollo y eliminación de gradiente de agua, enfriador mostrado en la figura 12.



*Figura 12.* Enfriador modelo Quik Chill (Morris & Associates, 2018).

## b) Enfriador de agua.

**Enfriadores y reenfriadores de agua.** Los accesorios en “U” facilitan una completa inspección y limpieza de todas las superficies, los inyectoros de refrigerante eliminan la necesidad de alta manutención y costos operacionales de bombas de amoniaco; logra mantener el alto flujo de agua en la industria para mejorar el intercambio de agua en el enfriador. Tiene toda la gama de acero inoxidable de grado alimenticio, enchaquetamiento, tubería de proceso, accesorios en “U” y hojas de tubería. Garantizando una temperatura de salida de agua de 32.5° F.

De igual manera cuenta con tecnología que logra proteger el enfriador de agua de la expansión térmica. Cuando el agua caliente es utilizada para la limpieza del equipo, es generado un estrés muy grande ocasionado en el metal por la expansión térmica. El estrés ocurre en los tubos dentro del equipo que se expanden al ser calentados.



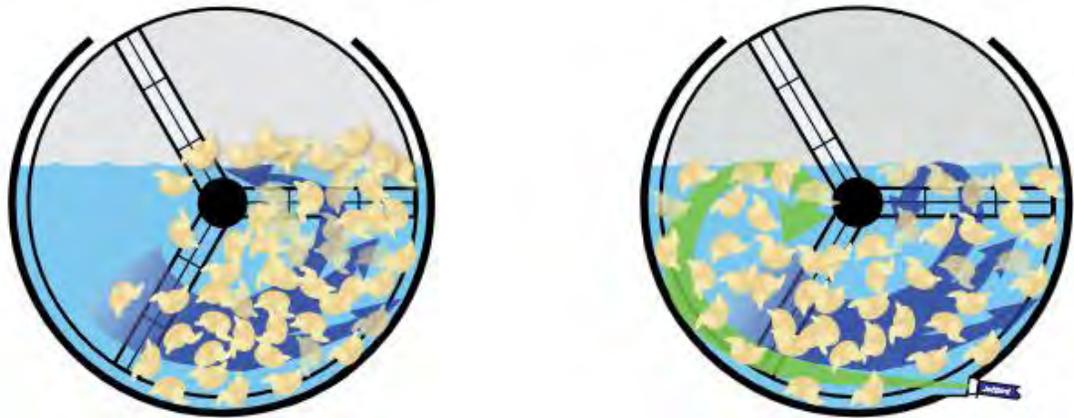
*Figura 13.* Enfriador de agua (Morris & Associates, 2018).

## c) Otros equipos de interés.

**Tecnología *Jet Bird*.** Aumenta la capacidad de enfriamiento, distribuye inmediatamente la capacidad de aumentar la producción, disminuye el promedio de

temperatura por ave y reduce la variación de la temperatura en las aves. Disminuye el conteo bacteriano al incrementar el contacto entre el ave y el agente antibacteriano aumentando el flujo de agua a través de cada ave, maximizando la eficiencia de intercambio de calor, lo anterior indicado en la figura 14.

Compatibilidad con todos los biocidas de grado alimenticio. Elimina el gradiente de agua, optimiza la capacidad de enfriamiento, al igual que aumenta la consistencia de tiempo de residencia, temperaturas de las aves, temperatura del agua, y absorción de agua.



*Figura 14.* Esquema de comparación de enfriador normal (izquierda) con enfriador con tecnología Jet Bird (derecha) (Morris & Associates, 2018).

**COPE.** El Eliminador Continuo en Línea de Patógenos, o COPE por sus siglas en inglés, es tecnología que cumple con la regulación por parte del FSIS para el control de patógenos, equipo presentado en la figura 15.

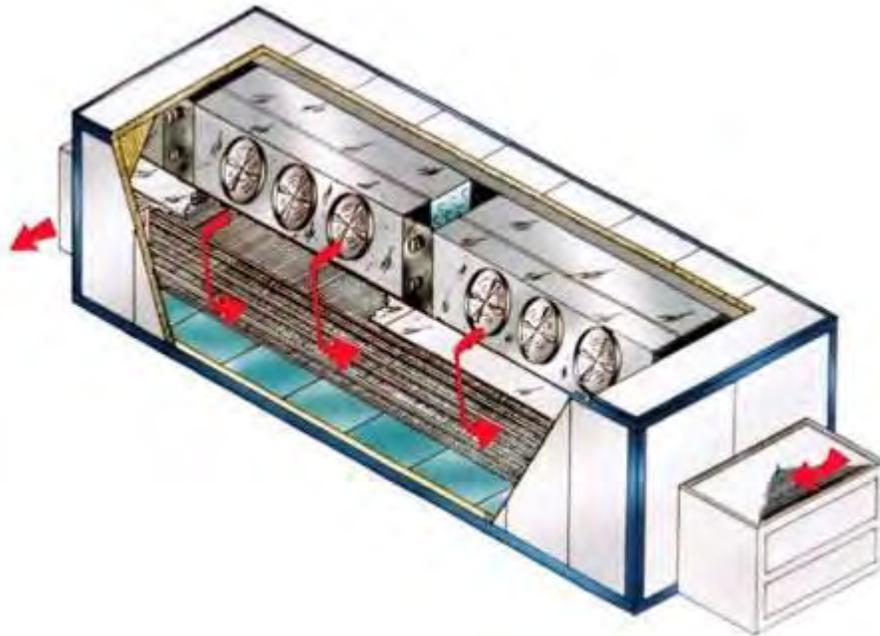
Brinda un cumplimiento de la regulación para un amplio rango de canales o de partes de aves, trabaja con los clásicos biocidas de grado alimenticio, con un tanque de inmersión se asegura cubrir con biocidas cada canal dentro del equipo, con flujo de proceso continuo, permite una fácil limpieza sin la necesidad de desarmar el equipo.



*Figura 15.* Eliminador Continuo en Línea de Patógenos (COPE) (Morris & Associates, 2018).

### **1.3.3. Sistemas de enfriamiento con aire.**

El método de enfriamiento con aire consiste en hacer pasar la canal de pollo a través de un cuarto frío o por un túnel de aire, mostrado en la figura 16, con temperaturas de aire de  $-7^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$ , en la línea de proceso de unos 90 a 150 minutos. El uso de enfriamiento con aire ha sido extensamente utilizado en países europeos, en donde el producto es escaldado a temperaturas menores que en los demás países ( $49^{\circ}\text{C}$  –  $52.2^{\circ}\text{C}$ ), lo cual logra retener la cutícula que protege a la piel de la deshidratación del aire frío. El enfriamiento de aire puede incluir una etapa de preenfriamiento por una hora a  $5^{\circ}\text{C}$  para remover humedad de la canal, y un enfriamiento final por 1.5 horas a  $0^{\circ}\text{C}$ . Estas dos etapas de enfriamiento, disminuye la temperatura de la canal a  $1^{\circ}\text{C}$ . En este tipo de enfriamiento, la velocidad del aire tiene casi el mismo efecto que la temperatura del aire. El efecto de congelación de la canal disminuye rápidamente conforme la velocidad del aire disminuye por debajo de los 4 m/s. Por arriba de 6 m/s, el efecto de la velocidad del aire en la temperatura de la canal es prácticamente despreciable.



*Figura 16.* Esquema de túnel de aire para enfriamiento de pollo (Zhuang et al., 2008).

Estas son diferencias tecnológicas en la aplicación del sistema de enfriamiento con aire. El aire frío puede pasar por debajo de la canal o a través de la canal. Algunos sistemas tienen ductos en los cuales pasa el aire frío directamente en la cavidad corporal de la canal y por la parte más delgada de la pechuga, para aumentar la eficiencia de enfriamiento. En general, la masa perdida por evaporación de agua, en operaciones comerciales de enfriamiento de aire, es por lo menos de 1% a 1.5%, pero la perdida puede aumentar hasta el 3% en sistemas con un mal diseño (Zhuang et al., 2008).

#### **1.4. Estudio térmico del enfriamiento de aves**

La transferencia energía es relacionada con cuerpos calientes y fríos, llamados fuente y receptor, en donde la misma tiene sus propios mecanismos (conducción, convección y radiación) y cada uno de estos cuenta con propiedades totalmente particulares. La transferencia de calor es de gran importancia en el área de los procesos alimenticios, tratándose de un tipo de energía la cual se encuentra en tránsito, gracias a la ayuda de la una diferencia de temperaturas (gradiente), y por lo tanto existe la posibilidad de que haya un enfriamiento (Larregain y Machado, 2009).

### 1.4.1. Parámetros térmicos.

Para lograr procesos de enfriamiento más eficientes existen técnicas para determinar la eficiencia de la transferencia de calor, las cuales involucran la medición de la temperatura del producto con respecto al tiempo durante el proceso enfriamiento o a la congelación. Para ello se utilizan números adimensionales.

#### a) Calor sensible.

El calor es la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de un cuerpo. El concepto de calor se usa para describir la energía que se transfiere de un lugar a otro, es decir flujo de calor es una transferencia de energía que se produce únicamente como consecuencia de las diferencias de temperatura.

El calor sensible es la energía que es percibida por los sentidos, y la temperatura es una medida del contenido de calor sensible del aire. Cuando el contenido de calor sensible tiene un valor elevado, las moléculas tienen velocidades más altas y más colisiones entre ellas y sus alrededores, y por tanto hay más transferencia de energía. Conforme el calor sensible disminuye, de igual manera lo hace la temperatura. Un indicativo de esto es el calor que es retirado del producto el cual está en función de la masa del producto, el calor específico, y de la diferencial de temperaturas que el producto experimente, y es expresado por la ecuación 1.

$$Q_{ret} = (m_p)(C_p \text{ producto})(\Delta T) \dots (1)$$

Donde  $Q_{ret}$  es el calor retirado del producto,  $m_p$  es la masa del producto,  $C_p$  es el calor específico del producto,  $\Delta T$  es el diferencial de temperaturas al inicio y al final del proceso, e indica la cantidad de calor que será absorbida por el líquido refrigerante de la instalación frigorífica.

### **b) Número de Biot.**

El número de Biot, que indica la resistencia interna a la transferencia de calor. Un número de Biot bajo indica que la resistencia interna a la transferencia de calor es despreciable, y así, la temperatura dentro del objeto es uniforme a cualquier tiempo al instante. Un gran número de Biot indica que la resistencia interna a la transferencia de calor no es descartable, por lo cual, un gradiente de temperatura puede existir dentro del objeto. En operaciones típicas de enfriamiento en alimentos, el número de Biot es grande, de 0.2 a 20. Así la resistencia interna a la transferencia de calor es, generalmente, no despreciable durante el proceso y el gradiente de temperatura existirá dentro del producto.

El número de Biot es obtenido a través de la ecuación 2, el cual función del coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ), la longitud o radio del alimento ( $L$ ), y la conductividad térmica propia del alimento ( $k$ ) (Becker, 2004).

$$Biot = \frac{hL}{k} \dots (2)$$

### **c) Número de Fourier.**

Es la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de la energía. Es cual es representado por la ecuación 3. En la cual  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $t$  es el tiempo característico, y  $L$  es la longitud a través de la que la conducción de calor ocurre (Becker, 2004).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \dots (3)$$

Los gráficos de transición de temperatura para una placa plana, cilindros y esferas son llamados gráficos de Heisler. Fueron suplementados en 1961 con los gráficos de transición de transferencia de calor por H. Gröber. El gráfico para el caso de la placa plana se muestra en la figura 17.

En la figura 17, en el eje de las ordenadas están situados los valores de la temperatura adimensional, representado por la ecuación número 4, y en el eje de las abscisas el número de Fourier, representado por la ecuación número 3. En el interior cada una de las líneas representan un valor inverso del número de Biot. Dependiendo de lo que se quiera determinar (tiempo o temperatura) se unen los tres números adimensionales a través del gráfico (Annaratone, 2011).

$$Y = \theta_0 = \frac{T_0 - T_m}{T_i - T_m} \dots (4)$$

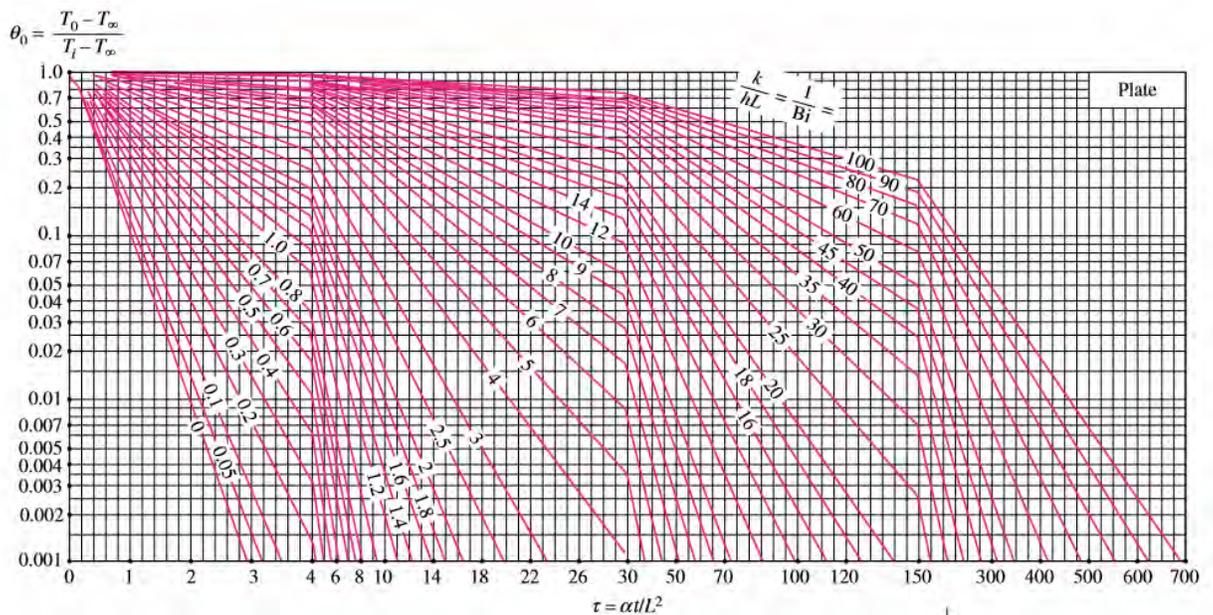


Figura 17. Diagrama de Y vs. 1/Bi para la determinación del número de Fourier, en el cálculo de tiempo de enfriamiento.

La figura indica que la transición de temperatura y del coeficiente de calor para una placa plana a una temperatura uniforme inicial es sujeta a convección por ambos lados a presión constante y temperatura con un coeficiente convectivo de h (Annaratone, 2011).

Para los cuerpos de sección transversal rectangular que se, enfrían se utilizan los gráficos como la figura 17, pero es necesario tener en cuenta algunas consideraciones, como son:

1. El cuerpo tiene longitud finita, por tanto, se considera el calor que se transmite transversalmente al eje de la pieza y no se considera el calor que se absorbe o rechaza por los extremos del cuerpo.
2. El espesor del cuerpo que debe utilizarse en los cálculos es el medio del espesor total, de manera que la magnitud de referencia que se utiliza en los cálculos es el espesor dividido entre dos.
3. En los gráficos solo se pueden conocer los parámetros del centro y la superficie del cuerpo, para cualquier otro punto es necesario utilizar otro tipo de métodos.

#### **d) Conductividad Térmica.**

Es una propiedad térmica de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Es también la capacidad de una sustancia de transferir energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que se encuentra en contacto (Becker, 2004).

#### **e) Coeficiente convectivo.**

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa dentro de un cuerpo o sustancia. Puede ser de manera natural producida solo por la diferencia de densidades de los ; forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro.

El coeficiente convectivo cuantifica la influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección. La transferencia de calor por convección se modela con la Ley de enfriamiento de Newton:

$$dQ = h * dA_s * (T_s - T_{inf}).... (5)$$

Donde  $h$  es el coeficiente convectivo,  $A_s$  es el área del cuerpo en contacto con el fluido,  $T_s$  es la temperatura de la superficie del cuerpo y  $T_{inf}$  es la temperatura del fluido a cierta distancia del cuerpo, donde ésta y la velocidad del fluido son constantes.

El coeficiente convectivo depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo a través del cual se da la convección:

- Tipo de convección (forzada o natural),
- Régimen del fluido ([laminar](#) o [turbulento](#)),
- Velocidad del flujo,
- [Viscosidad](#) del fluido,
- Densidad del fluido,
- Conductividad térmica del fluido,
- [Calor específico](#) del fluido,
- [Coeficiente de dilatación](#) del fluido,
- Forma de la superficie de intercambio,
- [Rugosidad](#) de la superficie de intercambio,
- Temperatura.

#### **f) Velocidad de enfriamiento.**

La expresión matemática de la velocidad de enfriamiento es:

$$\frac{dT}{dt} = KA(T - T_A) \dots (6)$$

Donde  $dT/dt$  representa la variación de energía, esta variación puede ser expresada como una diferencia de temperaturas, que es el calor sensible que el cuerpo cede, con respecto al tiempo;  $A$ , es la superficie del cuerpo que se enfría;  $K$ , un coeficiente de proporcionalidad;  $T$ , la temperatura del cuerpo que se enfría; y  $T_A$  la temperatura del medio de enfriamiento (Fraile-Delgado et. al.1997).

## 1.5. Instalaciones frigoríficas en la industria avícola.

Industrialmente son usados distintos tipos de ciclos frigoríficos, el más común es conocido como ciclo de compresión mecánica del vapor refrigerante. Los componentes básicos del sistema son el evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión. El calor transferido del líquido (refrigerante) cambia de estado de gas a líquido por las fases del ciclo de compresión de vapor (Cascade Energy, 2010).

### 1.5.1. Características de operación y diseño.

En la figura 18 se observa un ciclo frigorífico simple en donde del punto 1 al punto 2 el refrigerante deja el condensador como un líquido caliente y pasa a través de una válvula de expansión, en donde su presión disminuye drásticamente ocasionando, igualmente, una disminución de la temperatura, y generándose una mezcla de líquido con vapor; del punto 2 al punto 3 el líquido fluye hacia el interior del evaporador, convirtiendo el líquido en vapor saturado en condiciones de baja presión y temperatura; del 3 al punto 4 el refrigerante está en un estado frío y gaseoso, teniendo el cambio de estado de líquido a gas después de absorber el calor en el evaporador del proceso. Del punto 4 al punto 1 el gas es comprimido por el compresor y descargado como vapor sobrecalentado a una alta temperatura y presión, y el ciclo comienza nuevamente (Cascade Energy, 2010).



Figura 18. Ciclo frigorífico básico (Xataka-ciencia, 2018).

El diseño se debe realizar teniendo en cuenta los datos de partida de las necesidades frigoríficas, la normativa vigente y las limitaciones económicas. Además de su eficiencia energética, la instalación debe dar solución a los siguientes requisitos:

- Facilidad de mantenimiento
- Mínimo riesgo de averías
- Condiciones de frío requeridas
- Economía de la instalación
- Plazos de amortización de la instalación
- Servicios individuales
- Servicios centralizados
- Sistemas inundados
- Bombeo/gravedad
- Sistemas indirectos
- Compresión centralizada o diferenciada
- Variantes de bombeo
- Sistemas mixtos (frío-clima)
- Recuperación de calor

Un punto importante que se debe considerar para el diseño de la instalación frigorífica es la fase de planificación, en la cual se detallan los factores que afectan al diseño previo de la instalación frigorífica, como la eficiencia del mobiliario frigorífico, el aislamiento de las cámaras, la distancia entre los puntos por refrigerar y la zona de producción o la ubicación de la instalación (datos climáticos, posibilidades de condensación, necesidades de climatización del local, etcétera).

Una vez elegido el tipo de instalación se debe procurar que sea lo más eficiente posible. Para ello se deben seleccionar de forma adecuada todos los componentes de la instalación, haciendo un esfuerzo técnico mayor en cuanto a consumo de energía.

Para la correcta elección los elementos que componen la instalación se seleccionan y calculan de forma óptima para las condiciones de trabajo en las que van a funcionar.

### **1.5.2. Eficiencia energética de la instalación frigorífica.**

La capacidad frigorífica de los equipos está en relación del calor absorbido en el evaporador, o intercambiadores de calor. En cambio, la carga térmica frigorífica corresponde a la energía térmica que contiene el medio que se desea enfriar; con esto el trabajo ejercido por el compresor sobre el fluido refrigerante se puede estimar como la diferencia entre el calor disipado por el condensador y el calor absorbido por el evaporador. El calor absorbido, el calor disipado y el trabajo ejercido en el refrigerante, se pueden calcular de acuerdo a las variaciones de entalpía del líquido existentes en las diferentes partes del ciclo, realizando suposiciones como que en el paso por la válvula de expansión sea de forma isoentálpica, al igual que el sobrecalentamiento del líquido sea de forma isoentrópica. Los ciclos reales, difieren en la práctica a los ciclos teóricos o de diseño, y esto se debe a que los fluidos utilizados no se comportan de forma ideal, lo cual se infiere al realizar los cálculos.

La capacidad frigorífica de un equipo está dada por el calor absorbido en el evaporador ( $Q_0$ ). En cambio, la carga de refrigeración corresponde a la energía térmica que contiene el medio que se desea refrigerar (Carrasco, 2002).

El trabajo ejercido por el compresor sobre el fluido refrigerante ( $W$ ) puede estimarse como la diferencia entre el calor disipado por el condensador ( $Q$ ) y el calor absorbido por el evaporador ( $Q_0$ ).

El calor absorbido en el evaporador ( $Q_0$ ), el calor disipado en el condensador ( $Q$ ) y la potencias o trabajo ejercido sobre el fluido refrigerante ( $W$ ), pueden ser calculados de acuerdo con las variaciones de la entalpía del refrigerante en las distintas etapas del ciclo,

suponiendo que las válvulas de expansión son isoentálpicas. Las ecuaciones que ayudan a comprender el proceso son:

$$Q_o = m(h_1 - h_4)_{evap} = m(h_1 - h_3)_{exp} \dots (7)$$

$$Q = m(h_2 - h_3)_{cond} \dots (8)$$

$$W = m(h_2 - h_1)_{comp} \dots (9)$$

Donde  $m$  es el flujo másico del líquido refrigerante y  $h_i$  puede ser visto en la figura 19.

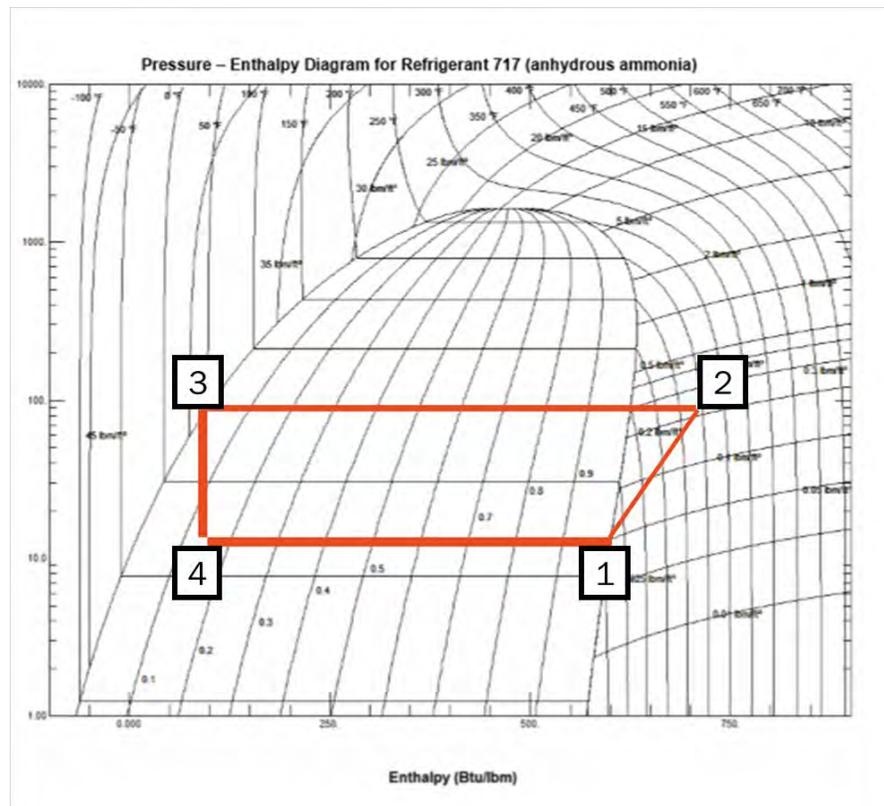


Figura 19. Diagrama de presión entalpía de amoníaco (R-717).

El coeficiente de operación (COP) brinda una idea de la eficiencia con que está operando el sistema de refrigeración. Esto se define como:

$$COP = Q_o/W = (h_1 - h_3)_{evap}/(h_2 - h_1)_{comp} \dots (10)$$

Un dato clave para lograr describir la eficiencia de un sistema frigorífico activado térmicamente es el COP, o coeficiente térmico de funcionamiento, definido como el cociente entre el calor extraído en el proceso frigorífico, y el calor de activación del sistema.

El calor retirado representa el trabajo de compresión que necesita aportarse al compresor; en esta definición para el compresor térmico no incluye ningún consumo. Para realizar una compresión se debe considerar que la energía aportada a todos los componentes del sistema sea en forma de calor; ya sea para bombas, ventiladores, etc. Se observa que cuanto más pequeño es el COP, mayor aportación de calor se requiere y más calor tiene que ser expulsado del sistema en el condensador. Por lo contrario, un alto valor de COP tiene la ventaja de poder reducir la aportación de calor y de energía eléctrica (Carrasco, 2002).

Para maximizar la eficiencia de procesos de frigoríficos en alimentos, es necesario optimizar el diseño de la instalación, para ajustar a los requerimientos particulares de las aplicaciones frigoríficas. La optimización requiere la estimación de los tiempos de enfriamiento, al igual que la correspondiente carga frigorífica. Las estimaciones dependen de las determinaciones de los coeficientes de enfriamiento, y coeficiente de operación (COP). El coeficiente de operación nos da una idea de la eficiencia con que está operando el sistema frigorífico. Este coeficiente puede ser aplicado tanto para un ciclo real o uno teórico; en el ciclo real se puede determinar conociendo las condiciones de presión y/o temperatura del líquido refrigerante en las distintas partes del ciclo, y así conocer las diferentes entalpías necesarias para la determinación.

En la actualidad los temas de ahorro de energía y la protección del medio ambiente han tomado mayor fuerza debido a los altos costos en energía y al gran daño que se causa al planeta, por ello, se trabaja de manera ardua en leyes y procesos que impliquen el uso moderado y eficiente de la energía. Siendo la refrigeración uno de los principales sectores

donde se genera gran consumo de energía, instaladores como fabricantes y técnicos de mantenimiento deben elegir métodos que impliquen ahorro, pero también eficiencia en cualquier equipo.

El ahorro en instalaciones frigoríficas se enfoca en los métodos que se aportan para producir una cantidad de frío con el menor gasto posible. A continuación, se citan algunas actividades que el técnico puede llevar a cabo:

- Ubicar los equipos en el lugar más fresco del inmueble.
- No exponer los equipos a los rayos del sol.
- Colocar el termostato en posición mínima o media, pues si está en posición máxima consume aproximadamente 50 por ciento más energía.
- Si no se cuenta con un dispositivo automático de deshielo, es conveniente evitar la acumulación del hielo sobre la pared interna, ya que ésta incrementa el consumo de energía y reduce el tiempo de vida del equipo.
- Evitar la formación de polvo en el condensador (limpiar la parte posterior)

Para reducir el gran porcentaje de energía que consume un equipo frigorífico, la empresa Emerson sugiere actuar fundamentalmente sobre los siguientes puntos:

#### **a) Elementos**

- Refrigerante: elección adecuada para las condiciones de trabajo de la instalación.
- Compresor: COP, temperaturas de evaporación y condensación, sub-enfriamiento de líquido.
- Condensador: tipo, capacidad necesaria y presión disponible.
- Evaporador: aprovechamiento de superficie y condiciones de trabajo.
- Sistemas de automatización: condensación flotante, válvulas de expansión electrónicas, variadores de velocidad en compresores y en condensadores.

## **b) Ajuste de la instalación frigorífica**

Para completar la instalación frigorífica y una vez ejecutada según los parámetros de diseño, se deben realizar ajustes para conseguir un óptimo rendimiento y así cumplir las expectativas de ahorro estimadas (EMERSON, 2018; Carrasco, 2002). Los parámetros de ajuste más usuales serán:

- Paquete de evaporación.
- Paquete de condensación.
- Recalentamiento adecuado.
- Sub-enfriamiento de líquido.
- Número de arranques y paradas de compresores.
- Duración de los arranques y paradas de los compresores.
- Temporizaciones.
- Ajuste de los variadores de velocidad.

## **c) Mantenimiento de la instalación**

Sin un adecuado mantenimiento de la instalación frigorífica es prácticamente imposible que se alcancen los resultados de ahorro energético esperados. Por ello, se ha de realizar un mantenimiento preventivo y correctivo (cuando sea necesario), que incluya:

- Limpieza de condensadores.
- Limpieza de evaporadores.
- Sustitución de filtros.
- Humedades en la instalación.
- Recomendaciones de colocación del producto.
- Correcciones debido a modificaciones de uso de alguna parte de la instalación.

#### **d) Comportamiento energético.**

Es importante que se cheque el funcionamiento de todos los componentes de los sistemas para garantizar mejor eficiencia. Debe llevarse a cabo una inspección minuciosa de la capacidad de los compresores para adaptarse a las exigencias de la carga. Además, un correcto dimensionado de los conductos de paso de líquido y gas contribuye a disminuir las pérdidas de carga y, en consecuencia, el consumo energético del sistema. La elevación de la presión de aspiración (o la temperatura de evaporación) también contribuye a disminuir el consumo por unidad de refrigeración, mientras la disminución de la temperatura de condensación hace disminuir el consumo por unidad de refrigerante (EMERSON, 2018).

#### **e) Elementos que deben ser analizados.**

- El dimensionamiento, los recorridos y la distribución de tuberías
- La utilización de variadores de velocidad
- El tipo de sistema de enfriamiento de aceite
- Las etapas de compresión
- La centralización de sistemas
- El refrigerante
- La presencia de contaminantes
- La temperatura de la carga térmica
- Los diferenciales de temperatura
- Caída de presión y temperatura de bulbo húmedo
- El tipo de condensación

Se establece que, desde el punto de vista del consumo de energía, lo que realmente importa es aumentar la calidad de una instalación, aumentando el frío producido y reduciendo el consumo de energía del compresor (EMERSON, 2018).

Para aumentar la producción de frío, se debe disminuir la entalpía del líquido que se evapora, para disminuir el consumo del compresor es necesario reducir la relación de compresión, utilizar el proceso de compresión que consuma menos energía o utilizar

compresores con menos pérdidas mecánicas y mejorar los rendimientos de los motores eléctricos (EMERSON, 2018).

Es importante utilizar materiales con baja conductividad térmica, la cual debe ser estable a lo largo del tiempo (para evitar pérdidas por envejecimiento). Las paredes y techos deben tener colores claros para evitar la acumulación de calor en la masa del aislante. La situación de los recintos refrigerados en lugares que por la orografía del terreno estén en lugares frescos, que eviten la radiación directa del sol, que estén orientados al norte, así como la creación de ambientes frescos (evitar efectos invernadero con corrientes de aire suaves) son factores que pueden reducir considerablemente las necesidades frigoríficas y la demanda energética (EMERSON, 2018).

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO**

#### **2.1. Problema**

En la industria avícola, usualmente la selección de los sistemas de enfriamiento de pollo se realiza bajo parámetros generales de capacidad y temperaturas de procesos y, por consecuencia, las condiciones reales de operación de esos sistemas difieren significativamente de lo indicado en las especificaciones técnicas del fabricante. Las variaciones diarias en la capacidad de producción, en las temperaturas de producto y medio, en los pesos promedios del producto; así como, el tiempo de residencia del producto en el medio, el porcentaje de agua absorbida por el producto, entre otras variables, influyen directamente en la eficiencia operativa y energéticas de los sistemas de enfriamiento empleados en dichas plantas. Es importante que los usuarios de estos sistemas de enfriamiento tengan un estudio confiable sobre el comportamiento operativo y de utilización de los mismos, que les permita determinar con exactitud la eficiencia energética y su impacto en los procesos de producción de frío.

## **2.2. Objetivos**

### **a) Objetivo general.**

Estimar la eficiencia térmica y energética del sistema de enfriamiento de pollo de una planta procesadora de aves, a través del comportamiento térmico del producto durante el hidrogenfriamiento y el impacto en el proceso de compresión de la instalación frigorífica.

### **b) Objetivo particulares.**

1. Determinar los cambios físicos que expliquen el fenómeno de absorción de agua de las canales de pollo durante el proceso de enfriamiento.
2. Comparar los parámetros térmicos de los procesos de enfriamiento de pollo por inmersión en agua, que ayuden a definir la eficiencia térmica del sistema.
3. Evaluar el proceso de compresión utilizado en las aplicaciones de enfriamiento de pollo, para la valoración de la eficiencia energética de esos sistemas.
4. Definir la relación entre la eficiencia térmica y energética de los equipos de enfriamiento de pollo y del proceso de compresión de la instalación frigorífica.

## **2.3. Parámetros de trabajo de campo**

Los parámetros operativos que son de mayor importancia, que se deben considerar para los análisis térmico y energético son:

### **a) Parámetros de trabajo del producto y el medio de enfriamiento (agua).**

- Temperaturas del producto a la entrada y salida del preenfriador y enfriador.
- Masa del producto a la entrada del preenfriador y salida del enfriador.
- Tiempo de residencia del producto en el enfriador.
- Temperatura del medio de enfriamiento.
- Coeficiente convectivo.

**b) Parámetros de trabajo de aplicaciones frigoríficas.**

- Cantidad de producto que se introduce.
- Dimensiones del enfriador.
- Temperatura del aire en cámaras de refrigeración y de congelación.
- Dimensiones de las cámaras.
- Acomodo del producto en las cámaras.
- Tiempo de almacenamiento.
- Velocidad del aire.
- Temperatura de entrada del producto.
- Temperatura de salida del producto.
- Capacidad de enfriamiento de la instalación frigorífica.

**c) Parámetros de trabajo de la instalación frigorífica.**

- Presión de evaporación del líquido refrigerante a la salida del enfriador de agua.
- Presión de condensación del líquido refrigerante a la salida del compresor.
- Temperatura de evaporación a la entrada y salida del enfriador de agua.
- Temperatura de condensación a la salida del compresor.
- Voltaje de los motores del compresor, al arranque del equipo y durante el proceso.
- Amperaje de los motores del compresor, al arranque del equipo y durante el proceso.

**2.4. Actividades de campo**

*a) Preparación de herramientas de investigación de campo.* La preparación consistió en el acondicionamiento de los instrumentos que se utilizaron en la toma de datos en la planta, junto a los formatos de trabajo que se utilizaron para la toma de datos en la planta. A continuación, en las figuras 20 y 21, se presentan los formatos de trabajo que fueron utilizados para la toma de datos en la planta, para el enfriador de pollo y para la sala de máquinas.



máquinas), para establecer el procedimiento de medición de masa y temperaturas del producto y del medio, y las condiciones operativas de la instalación frigorífica, con el propósito de realizar correcciones de los formatos de trabajo en la toma de datos al igual que los procedimientos que se plantearon en el trabajo de campo.

c) *Estudio térmico.* Se realizó el estudio térmico del sistema de mediante el cálculo de los parámetros térmicos de enfriamiento, al igual que la absorción de agua del pollo, considerando la secuencia mostrada en la figura número 22.

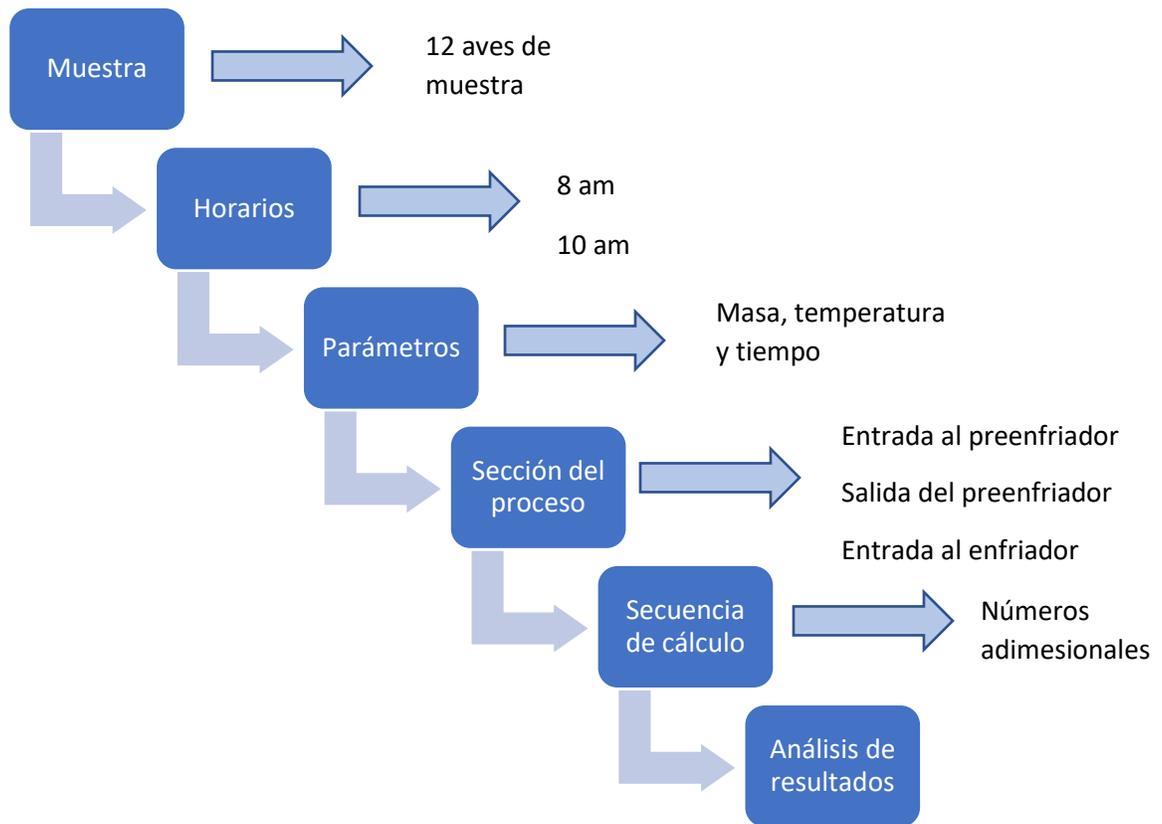


Figura 22. Secuencia de actividades para estudio térmico en el sistema de enfriamiento.

Se tomaron mediciones de masa a 12 pollos, en dos diferentes tiempos durante el proceso, a las 8:00 am y 10:00 am, con 6 pollos en cada muestreo, se le fijo una marca a la canal en la parte de la pierna, para su posterior reconocimiento a la salida del preenfriador y enfriador. Se les tomaron mediciones de masa, temperatura en el centro térmico de la canal que se localiza en la mitad de la pechuga, y tiempo, con ayuda de un termómetro de penetración, una balanza digital, la cual se encontraba en las instalaciones de la planta, y un

cronómetro digital. Se tomaron temperaturas del medio en distintas partes del preenfriador y enfriador con un termómetro infrarrojo, estas fueron elegidas con ayuda de la división del tornillo, el preenfriador fue dividido en 3 partes y el enfriador fue dividido en 5 partes distintas.

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente, obteniendo los valores de media, desviación estándar y coeficiente de variación. Consecuentemente se evaluó el porcentaje de agua absorbida, a través de la ganancia de masa presentada en cada uno de los pollos en las dos partes del proceso mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Ganancia de masa} = \frac{(\text{masa final} - \text{masa inicial})}{\text{masa inicial}} \times 100 \dots (11)$$

El calor retirado del producto se determinó, utilizando la ecuación número 1, con el promedio de la masa de las canales de aves, el calor específico calculado con valores obtenidos bibliográficamente, y se realizaron dos diferentes métodos para la diferencial de temperaturas, la temperatura que realmente alcanzaban las canales al final del proceso de enfriamiento, y otra la cual era la temperatura que es marcada bibliográficamente con la que deben salir las canales del proceso. Posteriormente se realizó una modificación a la ecuación 1, igualando el calor retirado con el calor absorbido, obteniéndose la igualdad:

$$Q_{ret} = Q_{abs} \dots (12)$$

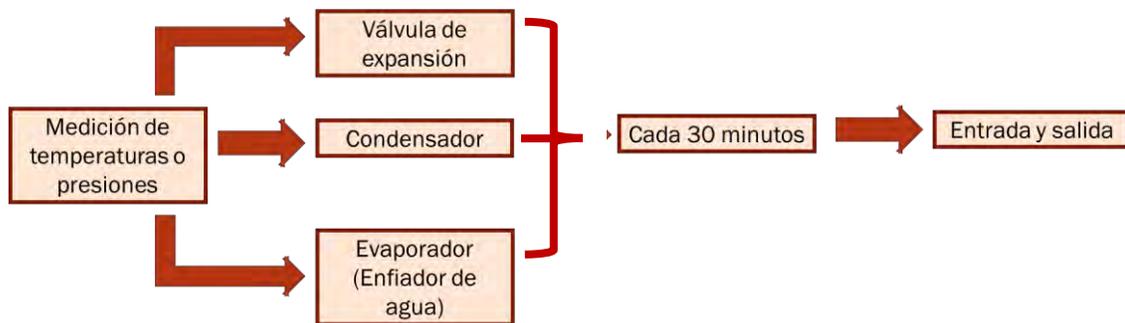
Al haber determinado el calor cedido del producto, se procedió al cálculo del calor absorbido por el agua. Metodología observada en el anexo 1.

Se determinó la velocidad de enfriamiento tomando como datos los parámetros teóricos de trabajo, y con ello determinando el número de Biot, mediante la ecuación 2 y el tiempo de enfriamiento obtenido experimentalmente, el coeficiente convectivo ( $h$ ) con valor de  $207 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  (Bozzo-Muñoz, 2011), al igual que la conductividad térmica ( $k$ ) de  $0.484 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  (Annaratone, 2011); consecuentemente se utilizó el diagrama que relaciona el

número de Fourier, con la diferencial de las temperaturas del medio y del producto ( $Y$ ); diferencial representada con la ecuación 4.

Habiendo obtenido el inverso del número de  $Bi$  se interceptará con el valor de  $Y$  de la figura 17, con el eje de las abscisas se obtiene el número de  $Fo$ , y de la ecuación 3 se despeja el tiempo.

- d) *Estudio energético.* Tuvo como finalidad obtener un estudio energético del compresor a través del coeficiente de operación (COP), por medio de la medición de las condiciones operativas de la instalación frigorífica y el cálculo de las condiciones de trabajo, al igual que la eficiencia total del sistema de refrigeración secuencia mostrada en la figura 22.

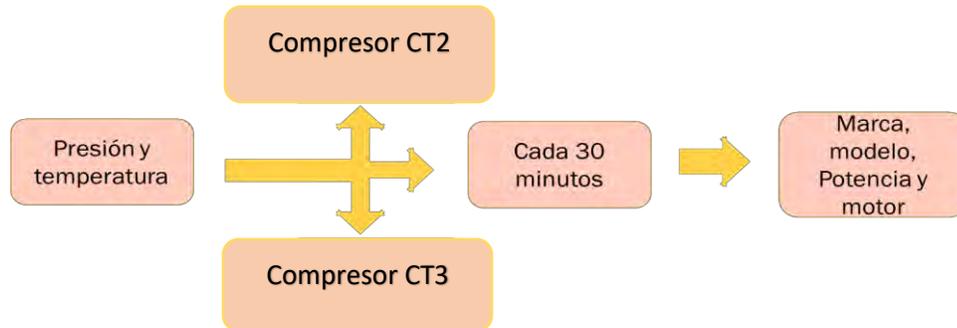


*Figura 23.* Secuencia de actividades para estudio energético y parámetros termodinámicos de la instalación frigorífica.

La determinación total del sistema se realizó en el cuarto de máquinas, se comenzó la toma de datos a las 7:00 horas en cada uno de los puntos de interés, los cuales fueron la salida y entrada del compresor, condensador, evaporador (enfriador de agua), y válvula de expansión.

Con las lecturas realizadas, se procedió a elaborar el diagrama de presión entalpía para la obtención de las entalpías correspondientes, y calcular las condiciones de trabajo del sistema frigorífico, y así poder conocer la eficiencia termodinámica del sistema en general. Al igual se determinó la relación que existe entre las capacidades de enfriamiento en lo observado en la planta y los valores de diseño, para las aplicaciones de refrigeración y de

congelación, las cuales son: el almacén de producto refrigerado, almacén de producto congelado y cámara de congelación de pollo. Para las cuales se tomó en cuenta la cantidad que se introduce al día, la temperatura, dimensiones, tipo de embalaje, tipo de tarima, cantidad de personas que tienen acceso a la cámara, y horas de iluminación al día.



*Figura 24.* Secuencia de actividades para determinar la eficiencia energética de los compresores.

Se tomaron las temperaturas, presiones, y amperaje de los compresores que dan servicio a la aplicación de enfriamiento de agua, en el enfriamiento de pollo. Las mediciones comenzaron a las 7.00 am cuando se hacía el arranque del equipo, esto fue realizado en el cuarto de máquinas de la planta, se tomaron las lecturas en el panel de control de cada uno de los compresores. Se tomaron lecturas cada 30 minutos durante el proceso de sacrificio en la planta, secuencia mostrada en la figura 23.

El rendimiento energético de cada uno de los compresores, a través del cálculo del COP, y observar la necesidad de energía eléctrica y así la aportación de calor. Obtenido por la ecuación 10.

El gráfico de amperaje a través de las horas de estudio, para lograr observar el cambio de amperaje conforme aumenta la carga de producto en el enfriador de pollo.

Posteriormente se realizó el diagrama de presión-entalpía característico de la planta con ayuda de los datos recopilados en la planta, para todas las aplicaciones existentes en la planta, con lo cual se determinaron las entalpías en cada una de las etapas del sistema.

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1. Ubicación y localización de la planta**

El trabajo de campo se realizó en una planta procesadora de aves la cual se encuentra en el municipio de Apan, estado de Hidalgo. En el periodo del 30 de octubre al 8 de noviembre.

##### **3.1.1. Proceso de sacrificio en la planta**

El proceso de sacrificio en la planta donde se realizó el trabajo de campo es similar al proceso descrito bibliográficamente, con la variante de un proceso adicional de teñido de la piel de la canal, post-desplumado. En dicho proceso, se introducía las canales de aves durante 30 segundos, la temperatura de la solución era de 25° C, esto sin afectar la temperatura del pollo después del escaldado.

El proceso de sacrificio iniciaba a las 8 horas, con un preacondicionamiento de equipos a las 6:30 horas. El proceso tenía una duración de tres horas aproximadamente, con un promedio de 7000 pollos sacrificados por día.

### **3.1.2. Aplicaciones frigoríficas características de enfriadores y almacenamiento**

La totalidad del producto es introducido en el preenfriador y enfriador y en la cámara de congelación, no ocurriendo lo mismo para la cámara de refrigeración, donde es introducido el 75% del producto total. El producto es almacenado durante 5 días, después de su sacrificio, en las cámaras de congelación.

### **3.2. Condiciones operativas y de utilización del enfriador**

En el enfriador de aves eran procesado el 100% del producto, en el preenfriador eran introducidas un promedio de 42 aves por minuto, mientras que en el enfriador eran 25 aves en el mismo tiempo. Para el enfriador, el agua era recirculada a través de bombas hacia un enfriador de agua. El agua tenía una temperatura de entrada de 3° C y 1° C de salida. La temperatura de salida de agua no presentaba variación durante el proceso. Para el enfriador de agua, el líquido refrigerante entraba a una temperatura promedio de -6.7° C. Datos utilizados para la obtención de las entalpías a través del diagrama de presión entalpía. Mostrado en la figura 25.

### **3.3. Descripción de la instalación frigorífica**

Las aplicaciones que se encontraban en la planta era el enfriador de agua, el que operaba durante el preacondicionamiento de los equipos y el proceso, con temperaturas de agua de 1° C de salida del enfriador, al cual le daban servicio dos compresores (CT2 y CT3) con motores de 100 Hp cada uno, las descripciones de los equipos se muestran en la tabla 1. Una cámara de refrigeración, la que tenía una temperatura de aire de 4° C a 0° C. El método de alimentación de estas aplicaciones es por expansión directa, pasando el líquido refrigerante previamente por un acumulador. Una cámara de congelación con una temperatura de aire de -40° C, y un almacén de producto congelado a temperatura de -30° C. Estas dos últimas aplicaciones utilizan recirculación por bombas como método de alimentación a evaporadores, teniendo las aplicaciones una línea de “*bypass*”. Todo el sistema frigorífico se encuentra en una etapa. Diagrama de la instalación mostrado en la figura 26, complementado con el diagrama de presión entalpía en la figura 25.

Durante el día no se encuentran trabajando todas las aplicaciones de la instalación; en la mañana solo se encuentran en operación las aplicaciones del enfriador de agua y los evaporadores de la sala de procesamiento. La cámara de refrigeración y las de congelación comienzan a operar en el momento en el que el producto empieza a ser introducido en las cámaras. Es por esto que el sistema solo se encuentra un condensador en operación.

Tabla 1. Datos de los compresores de la instalación frigorífica en la planta.

Compresor	Servicio	Tipo	Marca	Modelo	Motor
CT1	Congelación	Tornillo	Frick	RXF-85-LI	RAM 150 HP
CT2	Refrigeración/ Enfriador de agua	Tornillo	Frick	RXF-39-LI	RAM 100 HP
CT3	Refrigeración/ Enfriador de agua	Tornillo	Frick	RXF-39-LI	RAM 100 HP

## Diagrama de presión entalpía de la instalación frigorífica.

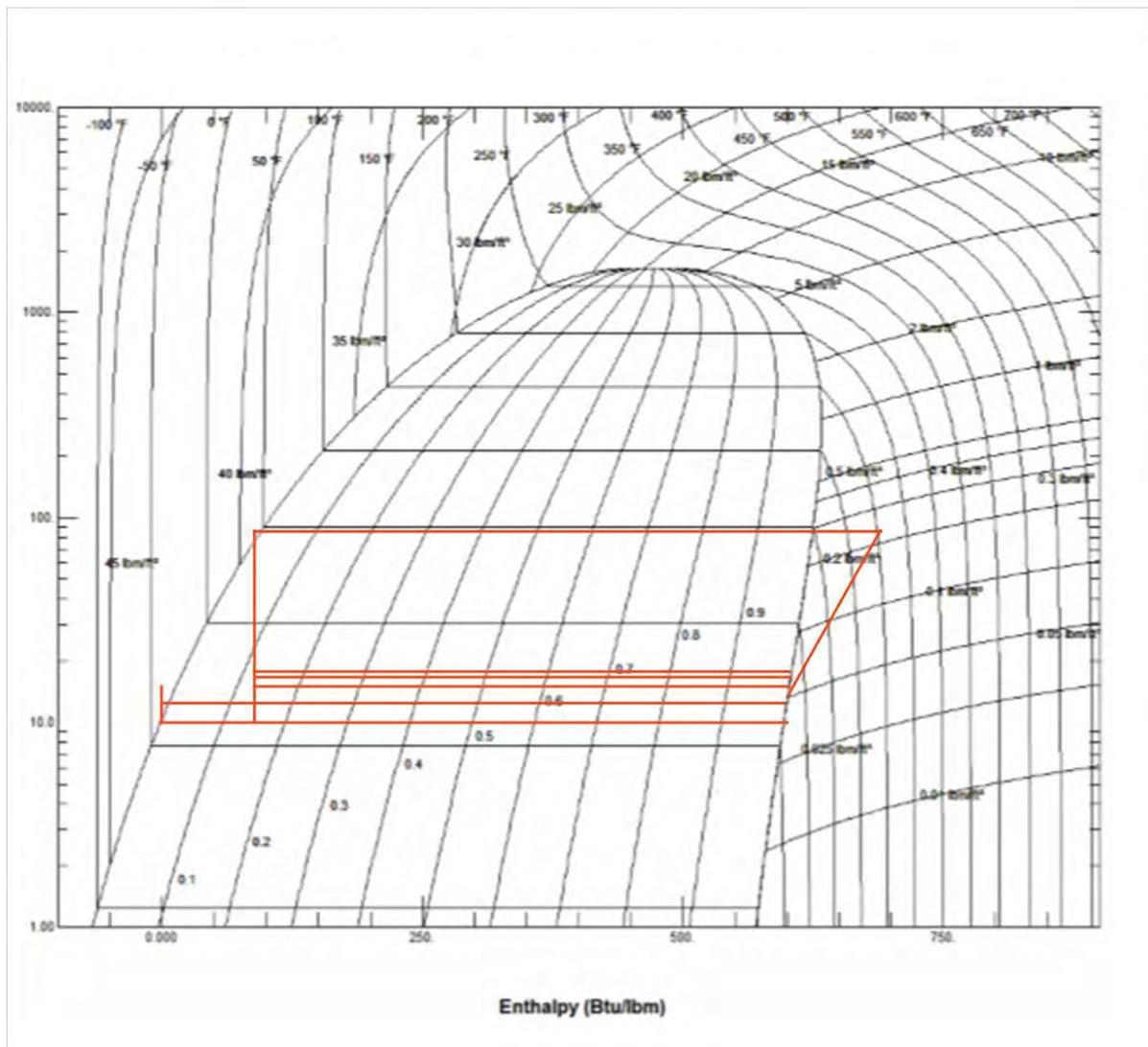


Figura 25. Diagrama de presión-entalpía de la instalación frigorífica.

## Instalación frigorífica.

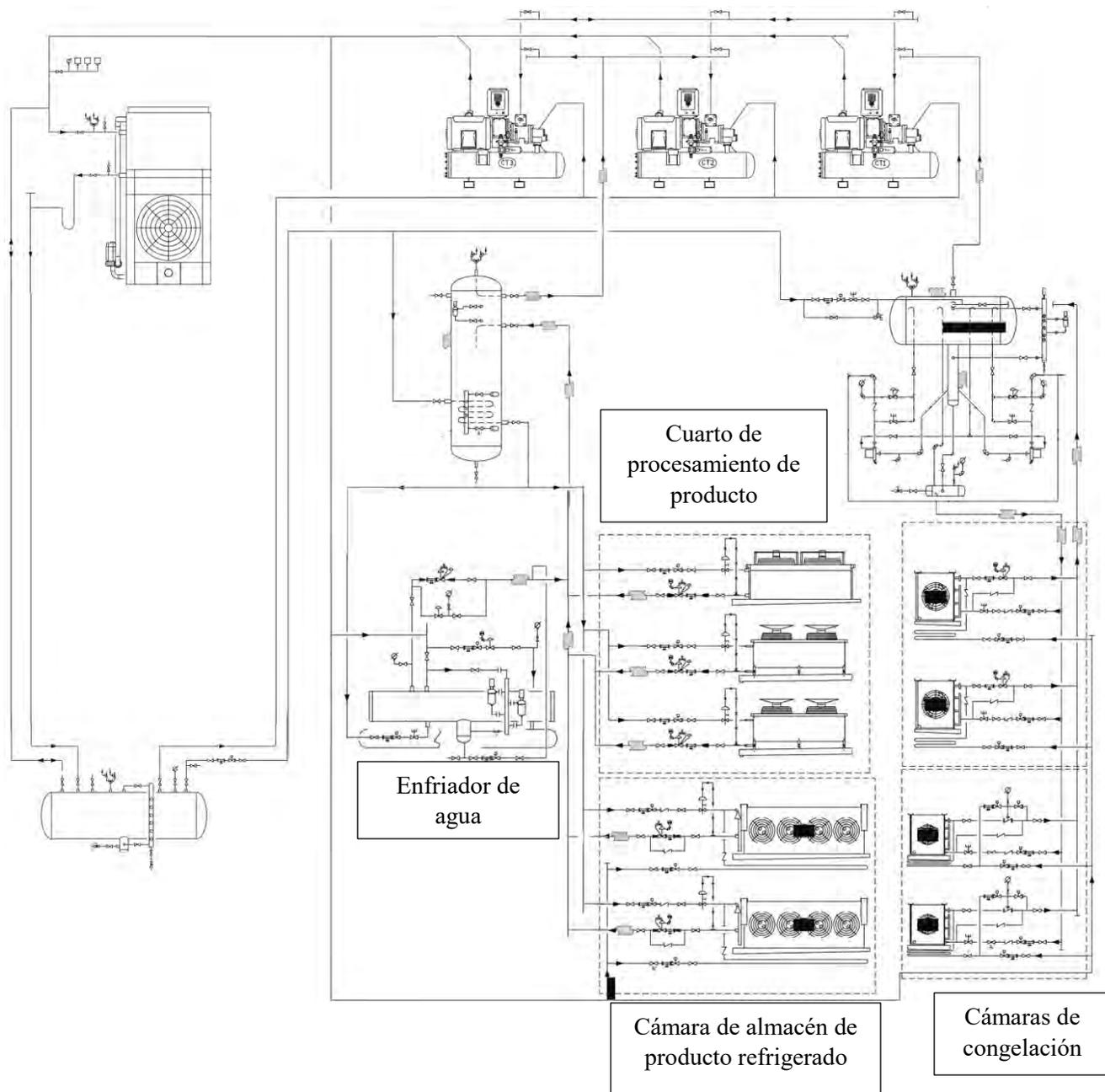


Figura 26. Diagrama de la instalación frigorífica de la planta.

### 3.4. Estudio térmico

#### 3.4.1. Preenfriador.

##### a) Flujo de calor.

En las tablas 2 y 3 se muestra la diferencia entre las medias, en la situación real y la situación teórica del sistema, en el proceso teórico fue de 76.54 kJ y 82.73 kJ para el real. Los tiempos de residencia oscilaron entre 19.21 y 20.34 minutos, valores muy cercanos a los reportados por Bellideli et al. (2014), las canales que permanecieron un mayor tiempo en el preenfriador, alcanzaron una menor temperatura de salida. Los datos recopilados en el trabajo de campo muestra que el proceso de preenfriamiento es sobre utilizado, dado que presenta una variación superior al 8% con respecto a la situación teórica, la cual fue considerada con todos los parámetros encontrados en bibliografía tomando la masa tomada a cada uno de los pollos; esto es debido a que el proceso en la planta se realiza con temperaturas del medio de 18° C, lo cual no es recomendado, Huezó (2007) especifica las temperaturas del proceso entre 10-15° C del medio, el tiempo de enfriamiento no es óptimo, haciendo así imposible disminuir la temperatura a 20° C, valor recomendado en bibliografía.

Tabla 2. Datos de temperatura de entrada y salida, masa entrada y calor retirado en el preenfriador en proceso real.

	Temperatura de entrada de preenfriador (° C)	Temperatura de salida de preenfriador (° C)	Masa de entrada de preenfriador (kg)	Calor retirado (kJ)
Pollo 1	37.0	21.4	1.98	90.81
Pollo 2	39.0	25.4	2.56	102.36
Pollo 3	36.0	23.6	1.94	70.72
Pollo 4	37.6	24.6	2.28	87.14
Pollo 5	36.6	24.8	2.44	84.65
Pollo 6	34.8	23.7	1.86	60.70
MEDIA	36.8	23.9	2.18	82.73

Tabla 3. Datos de temperatura de entrada, masa entrada y calor retirado en el preenfriador en proceso teórico.

	Temperatura de entrada de preenfriador (° C)	Masa de entrada de preenfriador (kg)	Calor retirado (kJ)
Pollo 1	37.0	1.98	69.85
Pollo 2	39.0	2.56	105.37
Pollo 3	36.0	1.94	62.74
Pollo 4	37.6	2.28	84.46
Pollo 5	36.6	2.44	83.21
Pollo 6	34.8	1.86	53.59
MEDIA	36.8	2.18	76.54

Con lo anterior una solución para lograr disminuir estos problemas térmicos, es un sistema continuo en el cual el agua del enfriador vaya al preenfriador y después regresado al enfriador de agua, con esto ayudaría a aumentar la eficiencia en el sistema; otra solución al problema de preenfriamiento es disminuir la carga de producto, puesto que se introducen 42 aves, en promedio, por minuto. Por otro lado, la temperatura de la canal se ve disminuida, antes de ingresar al preenfriador, por condiciones propias del proceso en la planta, como lo es un teñido con beta caroteno, posterior al escaldado, con esto ayuda a reducir la temperatura en la canal, teniendo una temperatura media de entrada al preenfriador de 38° C, con un diferencial de temperatura de 13° C a la salida del preenfriador.

#### **b) Velocidad de enfriamiento.**

En la tabla 4 se observa la velocidad de enfriamiento para el proceso real y teórico, muestra que la velocidad para el proceso teórico es de 1.33° C/ min, y de 0.65° C/min, lo que indica que, en el proceso real, la velocidad de enfriamiento es menor en comparación al proceso teórico. Durante la experimentación se obtuvieron tiempos de residencia de 36.8 minutos, y se consideraron 15 minutos, y temperaturas de 20° C de salida de preenfriador para el proceso descrito por Huezo, 2007, para realizar los cálculos de velocidad de enfriamiento. La mayor velocidad en el proceso real se debió a las temperaturas consideradas

para el cálculo teórico, ya que la velocidad de enfriamiento disminuye conforme la diferencia entre temperaturas decrece.

Tabla 4. Comparación de velocidad de enfriamiento en preenfriador en comparación en proceso real y teórico

Preenfriador	
Velocidad de enfriamiento (° C/ min)	
Real	0.65
Teórico	1.33

**c) Ganancia de masa.**

La ganancia de masa se mostró disminuida en comparación a los valores teóricos, con un valor promedio de 2.5% de ganancia, con respecto a lo reportado por Belledeli et al. (2014), que indica que la mayor absorción de agua en el pollo se da en esta etapa de enfriamiento, el cual debe ser máximo de 6% de ganancia. Al igual que el porcentaje disminuye conforme al volumen de producto dentro del preenfriador, debido a que, a las 8 horas, cuando el preenfriador está empezando a recibir carga es cuando se tiene la mayor ganancia de masa, y a las 10 horas, cuando el preenfriador se aproxima al 100% de carga, disminuye considerablemente hasta un 1.09% de ganancia de masa. Esto ocurre porque el volumen de producto afecta considerablemente a la absorción de agua, haciendo que el proceso de preenfriamiento sea solamente un lavado de la canal.

Tabla 5. Ganancia de masa en dos diferentes horas del día durante el proceso de sacrificio en la planta, en el preenfriador.

Preenfriador			
Hora	Masa de entrada	Masa de salida	Ganancia de masa
08:00	2.17	2.22	2.50%
10:00	2.21	2.36	1.09%

### 3.4.2. Enfriador.

#### a) Flujo de calor.

Los valores de las medias que son presentados en las tablas 6 y 7, para el proceso teórico y real, respectivamente, la diferencia entre las medias, en la situación real y la situación teórica del sistema, en el proceso real fue de 120.05 kJ, y 137.26 kJ para el proceso teórico. Los tiempos de residencia oscilaron entre 28.25 y 37.26 minutos; las canales que duraron mayor tiempo en el enfriador alcanzaron una menor temperatura de salida. El enfriador es subutilizado, debido a que el proceso real presenta una desviación del 12% por debajo, con el proceso teórico, aunque en realidad el proceso de enfriamiento no se llega a alcanzar, la temperatura marcada legislativamente de 4° C. Esto se debe igualmente, a que en el proceso de preenfriamiento no se logran alcanzar las temperaturas óptimas; lo que representa un gran problema debido a que se requiere alcanzar esta temperatura para lograr la mayor inactivación de bacterias que se encuentran en la canal, y así evitar un gran riesgo de contaminación y de grandes pérdidas de producto.

Tabla 6. Datos de temperatura de salida de preenfriador, salida de enfriador, masa salida preenfriador y calor retirado en el enfriador en proceso real.

	Temperatura de salida de preenfriador (° C)	Temperatura de salida de enfriador (° C)	Masa de salida preenfriador (kg)	Calor retirado (kJ)
Pollo 1	21.4	4.0	2.28	116.64
Pollo 2	25.4	6.6	2.68	148.13
Pollo 3	23.6	4.0	2.06	118.71
Pollo 4	24.6	6.0	2.16	118.12
Pollo 5	24.8	7.5	2.30	116.98
Pollo 6	23.7	5.1	1.86	101.71
MEDIA	23.9	5.5	2.22	120.05

Tabla 7. Masa salida preenfriador y calor retirado en el enfriador en proceso teórico.

	Masa de salida de preenfriador (kg)	Calor retirado (kJ)
Pollo 1	2.28	140.76
Pollo 2	2.68	165.46
Pollo 3	2.06	127.18
Pollo 4	2.16	133.35
Pollo 5	2.30	142.002
Pollo 6	1.86	114.83
MEDIA	2.22	137.26

**b) Velocidad de enfriamiento.**

En la tabla 8 se indica la velocidad de enfriamiento para el proceso real y teórico, y muestra que la velocidad para el proceso teórico es de  $1.33^{\circ} \text{C}/\text{min}$ , y de  $1.48^{\circ} \text{C}/\text{min}$ , lo que indica que, en el proceso teórico, la velocidad de enfriamiento es menor en comparación al proceso real. Durante la experimentación se obtuvieron tiempos de residencia de 32.17 minutos, y se consideraron 37.74 minutos, tiempo que se obtuvo a través de la determinación del número de Fourier y el número de Biot utilizando la figura 17, y temperaturas de  $4^{\circ} \text{C}$  de salida de preenfriador para el proceso teórico, para realizar los cálculos de velocidad de enfriamiento. Debido a que se logra alcanzar una temperatura cercana a  $4^{\circ} \text{C}$  durante todo el proceso, lo que hace que la velocidad de enfriamiento sea muy similar en el proceso teórico y real.

Tabla 8. Comparación de velocidad de enfriamiento en enfriador en comparación en proceso real y teórico

Enfriador	
Velocidad de enfriamiento ( $^{\circ} \text{C}/\text{min}$ )	
Real	1.48
Teórico	1.33

### c) Ganancia de masa.

La ganancia de masa se mostró similar a lo descrito por Belledeli et al. (2014), con un valor promedio de 6.92% de ganancia, que indica que la mayor absorción de agua en el pollo se da en esta etapa de enfriamiento. Al igual que el porcentaje disminuye conforme al volumen de producto dentro del preenfriador. Las 8 horas, cuando el preenfriador está empezando a recibir carga es cuando se tiene la mayor ganancia de masa, y a las 10 horas, cuando el preenfriador se aproxima al 100% de carga, disminuye considerablemente hasta un 3.1% de ganancia de masa. Esto ocurre porque el volumen de producto afecta considerablemente a la absorción de agua, haciendo que el proceso de enfriamiento sea ineficiente conforme aumenta el volumen en el enfriador.

Tabla 9. Ganancia de masa en dos diferentes horas del día durante el proceso de sacrificio en la planta, en enfriador.

Enfriador			
Hora	Masa de entrada (kg)	Masa de salida (kg)	Ganancia de masa
08:00	2.22	2.32	4.60
10:00	2.36	2.28	2.80

## 3.5. Aplicaciones de refrigeración y congelación

### a) Refrigeración.

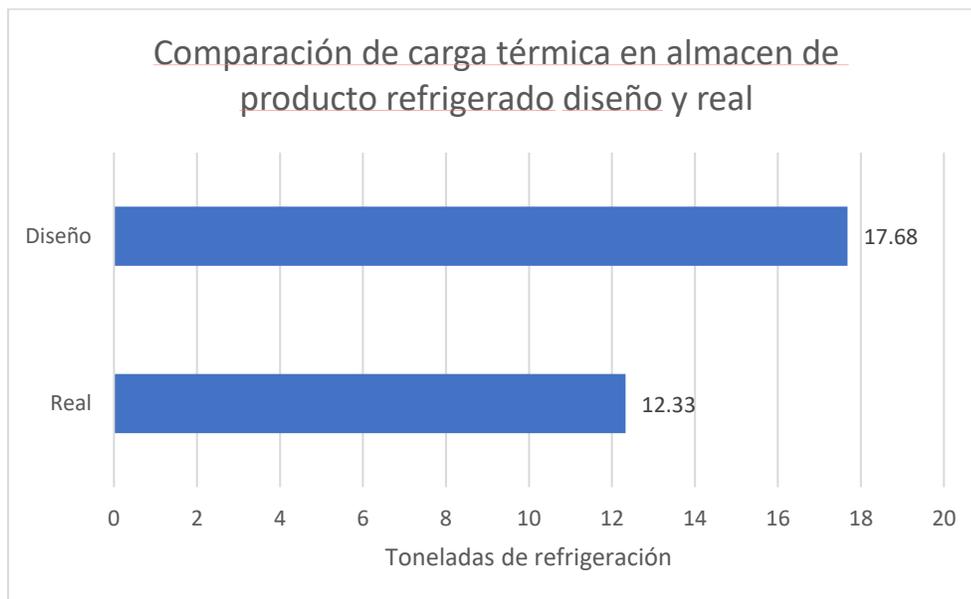
En el caso de las otras aplicaciones de refrigeración, el almacén de producto refrigerado se encuentra subutilizado teniendo solo un 65% de la capacidad total de uso con respecto a la de diseño. Para el análisis se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Entrada del 75% del producto a refrigeración.
- Almacenado en cajas de plástico rígido al igual que tarimas.
- Entrada de 15 personas durante 10 horas de trabajo.
- Área total de 1840  $m^2$

- 1.8 cambios de aire al día.
- Factor de calor de motor de 3700
- Temperatura de 2° C

Estas son observaciones tomadas en la planta, durante el periodo de trabajo, el cual es de 7:00 horas a 18:00 horas. Igualmente se consideró para los cálculos de selección de evaporadores la temperatura media de Apan, Hidalgo, al igual que la temperatura máxima. Y la subutilización se debe a un bajo volumen de procesamiento de producto, inferior a la cantidad de producto procesado propuesta en los cálculos de diseño; igualmente, solo una fracción del producto es almacenado bajo estas condiciones.

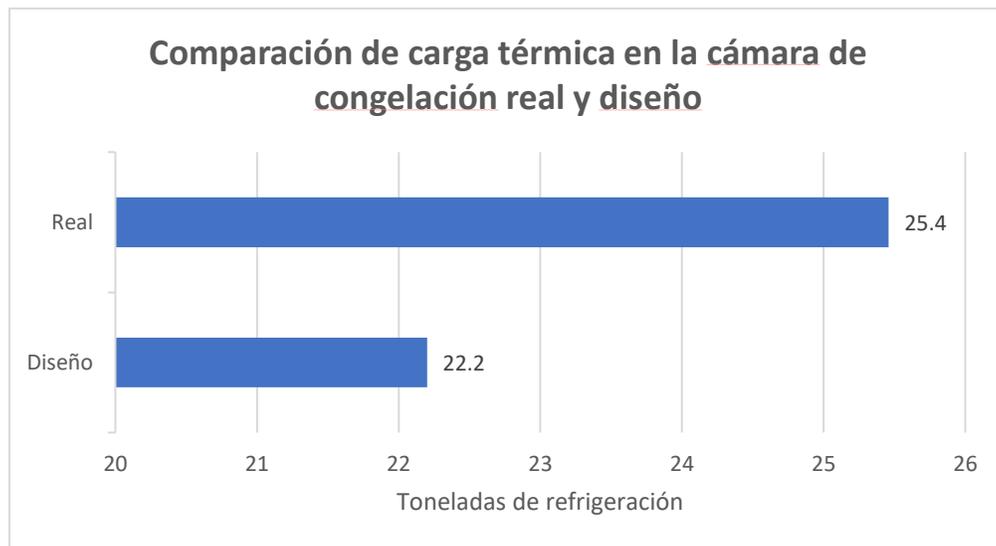
La alimentación hacia los evaporadores, de esta aplicación es por expansión directa, la cámara cuenta con dos evaporadores, por lo que, se dividió a la mitad la carga resultante de los cálculos. En la figura 27 se muestra la diferencia entre la carga calculada con la carga de diseño.



*Figura 27.* Comparación de las cargas térmicas real en la cámara de almacén de producto refrigerado con respecto al valor de diseño.

## b) Congelación.

En las aplicaciones de congelación ocurre el efecto opuesto, las cuales se encuentran en sobre utilización para en el caso de ambas cámaras mostrado en la 28, la comparación entre el proceso real y el valor de diseño. Esto ocurre debido a que en la planta solamente una fracción del producto es refrigerado instantáneamente, y lo demás es procesado de manera diferente, cortado, para su venta por piezas, y todo el producto es sometido a congelación, y almacenado de esta manera.

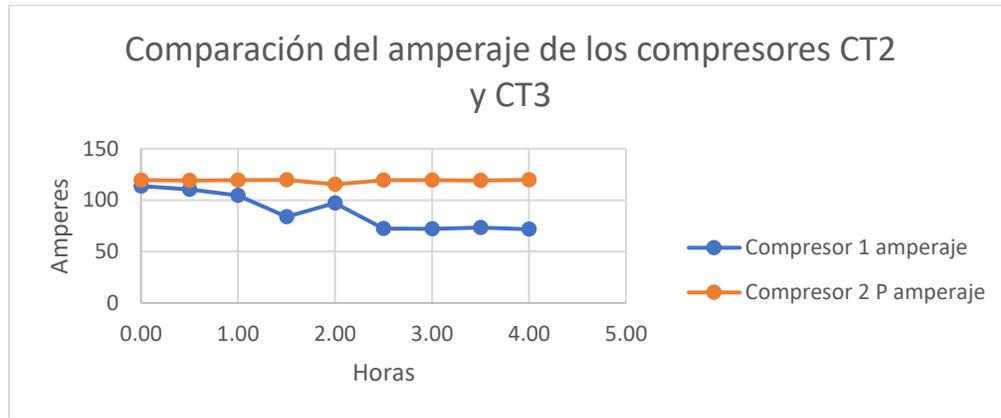


*Figura 28.* Comparación de la carga térmica real en la cámara de congelación con respecto al valor de diseño.

### 3.6. Análisis energético

En los compresores, no se presenta un aumento de consumo de energía al comenzar el proceso, y durante la situación de máxima carga en el enfriador. Situación normal que ocurra, aunque sea necesario hacer llegar una mayor cantidad de refrigerante al enfriador de

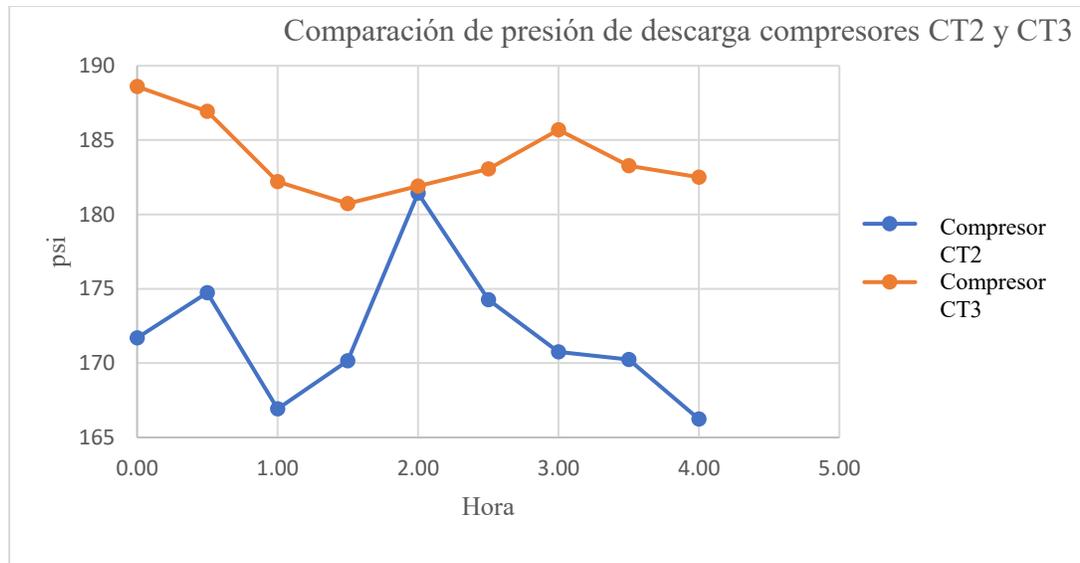
agua, para lograr retirar el calor absorbido por el agua. Y en la figura 29 se observa que en la segunda hora de producción el compresor 2 tiene un mayor gasto energético.



*Figura 29.* Comparación del amperaje entre los dos compresores que brindan servicio al enfriador de agua.

En la figura 30 se muestra el comportamiento de la presión de descarga de para los compresores CT2 y CT3, que dan servicio al enfriador de agua.

Y al comparar la figura 29 con la figura 30, se tiene que en el compresor CT2 experimenta un aumento en la velocidad de descarga es en el momento en el que presenta igualmente un aumento en la presión de descarga, por lo que, no indica que necesita realizar un mayor trabajo el compresor para lograr comprimir la carga de refrigerante cuando se encuentra el mayor volumen en el enfriador.



*Figura 30.* Comparación de presión de descarga entre los dos compresores que brindan servicio al enfriador de agua.

### 3.7. Estudio de COP.

El caso del coeficiente de operación (COP) de los compresores, se consideró un trabajo de compresión de 1100.85 BTU/min, un calor absorbido en los evaporadores de 7987 BTU/min; tomando en cuenta para estos datos, las temperaturas y presiones de condensación y evaporación recopiladas en la planta. Obteniendo un resultado de COP de 7.25, el valor indica que el sistema frigorífico es eficiente, ya que no hay pérdidas entre el calor absorbido por el evaporador y el trabajo de compresión ejercido por el compresor. Lo anterior se debe a que las aplicaciones frigoríficas en la planta solo operan una a la vez, haciendo que la instalación se comporte de una manera más eficiente.

### 3.8. Análisis global.

En el trabajo de campo se encontró que el sistema de preenfriamiento de agua se encuentra en sobreutilización ya que en todos los análisis realizados en el trabajo resulta ser más deficiente el proceso real, en comparación al proceso teórico. El proceso real presenta una velocidad de enfriamiento muy por debajo del proceso teórico, el valor de la velocidad

es duplicado en el proceso teórico teniendo una variación superior al 50%. Con lo que se recomienda el uso de otros equipos como lo es el enfriador de arrastre, el cual aumenta la transferencia de calor, gracias a su diseño de paletas y el flujo en contracorriente con el que cuenta, de igual manera es recomendable el uso de la tecnología *Jet Bird*, ya que aumenta la turbulencia y el flujo de agua, a través de las canales, por lo que se aumentaría la transferencia de calor en el sistema.

Por otro lado, el sistema de enfriamiento se encuentra en un rango aceptable, los parámetros como la velocidad de enfriamiento, es muy similar la velocidad del proceso teórico al proceso real, las velocidades cuentan con una variación inferior al 10%, aunque la variación de estas es considerable y sería necesario estandarizar el tiempo de residencia, la temperatura de salida del enfriador, y la absorción de agua por canal. Con lo que se recomienda el uso nuevamente de la tecnología *Jet Bird*, para el aumento de la transferencia de calor del producto al medio de enfriamiento en el proceso. Otra recomendación es el cambio por un enfriador de mayor capacidad como lo es el modelo de enfriamiento rápido (*Quik Chill*), utilizando un espacio similar lo que no ocasionaría problemas de espacio en la planta.

## CONCLUSIONES

En el trabajo se logró determinar los cambios físicos de absorción de agua de las canales durante el proceso de enfriamiento, con ayuda del diferencial de masas que se observaron en el pollo, a la entrada del proceso de enfriamiento y a su salida, la cual fue de 6.92% a las 8 horas y de 3.1% a las 10 horas, lo que indica que hubo una mayor absorción en la primer hora de la mañana; con lo que se realiza la recomendación de que el proceso no se llegue a saturar, ya que con el volumen de producto en alguna de las etapas de enfriamiento, reduce significativamente la absorción de agua en la canal, aunado a que la temperatura del medio en el preenfriador aumenta 2° C con respecto al inicio del proceso.

Igualmente se definió la eficiencia térmica, comprando los parámetros térmicos y realizando un análisis térmico del sistema de enfriamiento de pollo, con el cual se definió el problema que experimenta la planta al momento en el proceso, en el preenfriamiento teniendo una diferencia de 8% con respecto al sistema teórico, esto se debe a que en el sistema se manejan temperaturas del medio entre 18° C a 20° C lo cual es muy por arriba de las temperaturas recomendadas en la bibliografía; para esto se recomienda que se disminuya la carga de producto que ingresa por minuto al preenfriador para evitar introducir una menor carga térmica en el enfriador, ya que presenta tres veces menos capacidad que la de diseño, con lo cual esto indica que el sistema esta subutilizado, teniendo grandes pérdidas de energía en el compresor debido a que no trabaja a una carga total.

Por otro lado se evaluó el proceso de compresión utilizado en la instalación frigorífica de la planta, y se valoró eficiencia energética representada con el gasto energético de cada uno de los compresores que brindan servicio al enfriador de agua y a las aplicaciones de frío, el cual se relacionó a la eficiencia térmica, de cada una de las aplicaciones de refrigeración que se presentan en la planta, con lo que se observó que el sistema de almacén de producto refrigerado es subutilizado teniendo solamente un 65% de eficiencia con respecto a los valores planteados en el diseño de la instalación, esto se debe a que una fracción del producto es enviada a la cámara, aunado a que la planta fue diseñada para un mayor volumen de producción por día.

Para el caso de la cámara de congelación y almacén de producto congelado, estos se encuentran en sobre utilización ya que todo el producto es ingresado a la cámara y su tiempo de permanencia es de, aproximadamente, 15 días, aunque la sobreutilización no es significativa para lograr causar problemas en la instalación.

Igualmente, se tiene un coeficiente de operación por encima de 7, que indica que el sistema es eficiente, mostrando que para el sistema frigorífico en la planta no es necesario realizar modificaciones. Las aplicaciones trabajando solo una vez al día, logran no saturar el sistema frigorífico en la planta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvis, A., Caicedo, I., Peña, P., (2010). Determinación del coeficiente de transferencia de calor a través de una aplicación de computadoras. *Información Tecnológica*, 21; 13-20.
- Annaratone, D. (2011). *Transient Heat Transfer*. 2<sup>nd</sup> ed., New York, United States, Springer.
- Barana, A.C., Botelho, V.M. (2014). Rational use of water in a poultry slaughterhouse in the state of Paraná, Brazil: A case study. *Eng. Agríc, Jaboticabal*, 1; 171-178.
- Becker, B.R., Fricke, B.A. (2004). Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. *International Journal of Refrigeration*, 27; 540-551.
- Belledeli, B.D., Silveira, C.L. Soares, M.B.A., Treichel, H., Mazutti, M.A. (2014). Correlation and regression analysis of temperature of chicken carcasses in an industrial cooling process. *Journal of Food Process Engineering*, 37; 185-190.
- Bozzo, M.F.J. (2011). Determinación de coeficientes convectivos en el exterior de evaporadores de refrigeración mediante simulación. *Universidad de Chile*.
- Carrasco, G. (2002). Enfriamiento de un cuerpo Estudio de la ley de enfriamiento de Newton. *Red Creativa de Ciencia*, 2; 130-136.
- Carciofi, B.A.M., Laurindo, J.B. (2010). Experimental results and modeling of poultry carcass cooling by water immersion. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30; 447-453.

- Cascade Energy (2010). *Industrial Refrigeration Best Practices Guide*. 3er ed., Melbourne, Australia, Sustainability Victoria.
- Departament of Agriculture (1998). Retained Water in Raw Meat and Poultry Products; Poultry Chilling Performance Standards. 9 CFR Parts 381 and 441. Proposed rule.
- EMERSON (2018). Ahorro de Energía Disponible en <http://www.emerson.com/es-mx> Consultado 11 de enero de 2017.
- Farkas, B.E., Singh, R.P. (1991). Physical properties of air-dried and freeze-dried chicken white meat. *Journal of Food Science*, 56; 611-615.
- FIRA (2016). Panorama Agroalimentario. Avicultura carne 2016. Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200631/Panorama\\_Agroalimentario\\_Avicultura\\_Carne\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200631/Panorama_Agroalimentario_Avicultura_Carne_2016.pdf). Consultado 12 de octubre de 2017.
- Gontarski, C. A. et al. Simulation of an industrial wastewater treatment plant using artificial neural networks. *Computers & Chemical Engineering*, v. 24, n. 2-7, p. 1719-1723, 2000
- Huezo, H., Northcutt, J.K., Smith, D.P., Fletcher, D.L. (2007). Effect of immersion or dry air chilling on broiler carcass moisture retention and breast fillet functionality. *J. Appl. Poult. Res.*, 16: 438-447.
- Larregain, P., Machado, A. (2009). Comparación entre curvas de calentamiento teóricas y experimentales.
- Morris & Associates (2018). COPE Continuous Online Pathogen Eliminator.
- Morris & Associates (2018). Drag Style Poultry Chiller.
- Morris & Associates (2018). HMR Chiller.
- Morris & Associates (2018). HMR with Patented\* DTM Technology.
- Morris & Associates (2018). Patented\* Jet Bird Temperature Stabilization System.
- Morris & Associates (2018). Quik Chill High Capacity Auger Chiller with IntraGrill Design.
- Morris & Associates (2018). Water Chiller and Rechillers with Quik Chill Controls.

- NOM-194-SSA1-2004. Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos. Norma Oficial Mexicana.
- Orrego, C.E.A. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. 1ra. Ed., Caldas, Colombia, Artes Gráficas Tizan.
- Rodríguez-Marínez, v., Cerón-Carrillo, T.G., Vázquez-Aguilar, M.M. (2007). Descripción y aplicaciones de equipos de congelación para la industria de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos, 1*; 97-107.
- Ruano-Domínguez, R. (2011). Sistemas de Refrigeración- Evaluación de la eficiencia integral. *Ingeniería Energética General, 5*; 458-465.
- Souza, E. A., Teixeira, L. C. V., Penancinno, M. R. (2003). Aplicação de Redes Neurais para Avaliação do Teor de Carne Mecanicamente Separada em Salsicha de Frango. *Ciência de Tecnologia de Alimentos, 23*; 307-311.
- Stewart WE, Becker BR, Greer ME, Stickler LA. (1990). An experimental method of approximating effective heat transfer coefficients for food products. *ASHRAE Trans, 2*; 142–147.
- Umaña C.E. (2010). Conservación de alimentos por frío. FIGARO Y FUSADES PROINNOVA.
- USDA (2014). Chicken from Farm to Table. Disponible en [https://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/ad74bb8d-1dab-49c1-b05e-390a74ba7471/Chicken\\_from\\_Farm\\_to\\_Table.pdf?MOD=AJPERES](https://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/ad74bb8d-1dab-49c1-b05e-390a74ba7471/Chicken_from_Farm_to_Table.pdf?MOD=AJPERES). Consultado 12 de octubre de 2017.
- Verboven, P., Nicolai, B.M., Scheerlink N., De Baerdemaeker, J. (1997). The local surface heat transfer coefficient in thermal food process calculations: a cfd approach. *J Food Engng, 33*; 15–35.
- Veerkamp, C. H., (1985). Developments in poultry chilling. *Poult. Int. 24*; 68–70.

WFLO (2008). Poultry Products. *Commodity Storage Manual*, 12; 1-7.

Xataca-Ciencia (2018). ¿Cómo funciona un frigorífico? Disponible en <https://www.xatakaciencia.com/sabias-que/como-funciona-un-frigorifico-2>  
Consultado 7 de febrero de 2018.

Zhuang, H., Savage, E.M., Smith, D.P., Berrag, M.E. (2008). Effect of dry-air chilling on Warner-Bratzler shear force and water-holding capacity of broiler meat deboned four hours postmortem. *International Journal of Poultry Science*, 7, 743-748.

Ziolecki, J., Wcislo, H., Wos, Z., Kijowski, J. (1997). Chilling of broiler carcasses by the evaporative technique. *Przemysl Spozywczy*, 51, 32-35

## ANEXOS

A continuación, se muestra un ejemplo de la secuencia de cálculo que se siguió para determinar el calor retirado al producto.

Tabla 10. Datos recopilados en la planta en el horario de la 8:00.

	Pollo 1	Pollo 2	Pollo 3	Pollo 4	Pollo 5	Pollo 6	Promedio
T ent a pre-chiller (° C)	37	39	36	37.6	36.6	34.8	36.83
M ent pre-chiller (kg)	1.98	2.56	1.94	2.28	2.44	1.86	2.18
T sal pre-chiller (° C)	21.4	25.4	23.6	24.6	24.8	23.7	23.92
M sal pre-chiller (kg)	2.28	2.68	2.06	2.16	2.3	1.86	2.22
t de residencia en pre-chiller	20.34	19.21	20.11	19.35	19.44	20.02	19.75
T sal del chiller (° C)	4	6.6	4	6	7.5	5.1	5.53
Masa sal del chiller (° C)	2.18	2.68	2.2	2.32	2.54	2	2.32
Tiempo de residencia (min)	37.26	29.45	39.49	30.01	28.25	28.57	32.17

Ganancia de masa a la salida del preenfriador.

$$2.503\% = \frac{(2.22 - 2.18) \text{ kg}}{2.18 \text{ kg}} (100)$$

Ganancia de masa a la salida del enfriador

$$6.92\% = \frac{(2.32 - 2.18) \text{ kg}}{2.18 \text{ kg}} (100)$$

Calor retirado en el preenfriador

$$82.73 \text{ kJ} = (2.18 \text{ kg})(36.83^\circ\text{C} - 23.92^\circ\text{C})(2.94 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})$$

Masa de agua necesaria para enfriar cada canal en el preenfriador.

$$15.22 \text{ kg} = \frac{82.73 \text{ KJ}}{(4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(19.6^\circ\text{C} - 18.3^\circ\text{C})}$$

Flujo de agua en el preenfriador.

$$15.24 \text{ l} = \frac{15.22 \text{ Kg}}{998.68 \text{ kg/m}^3} (1000)$$

Calor retirado en el enfriador

$$120.04 \text{ kJ} = (2.22 \text{ kg})(23.92^\circ\text{C} - 5.53^\circ\text{C})(2.94 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})$$

Masa de agua necesaria para enfriar cada canal en el preenfriador.

$$41.02 \text{ kg} = \frac{120.04 \text{ kJ}}{(4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(1.7^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C})}$$

Flujo de agua en el preenfriador.

$$41.08 \text{ l} = \frac{41.02 \text{ Kg}}{998.68 \text{ kg/m}^3} (1000)$$