



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA
CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA**

Otto Raul Chavez Guzman

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA
CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OTTO RAUL CHAVEZ GUZMAN

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 23 de mayo de 2017.



Otto Raul Chavez Guzman



Guatemala, 22 de octubre de 2018
REF.EPS.DOC.860.10.18.

Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Classon de Pinto.


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Otto Raúl Chávez Guzmán** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 8712087, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo
EDSZ/ra





Guatemala, 22 de octubre de 2018
REF.EPS.D.407.10.18

Ing. Carlos Roberto Pérez Rodríguez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

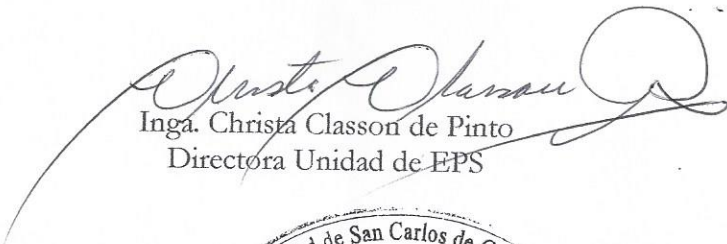
Estimado Ingeniero Pérez Rodríguez:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Otto Raúl Chávez Guzmán** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS

CCdP/ra





USAC
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.304.2018

El Revisor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA** del estudiante **Otto Raúl Chávez Guzmán**, CUI No. 1929045150101, Reg. Académico No. 8712087 y habiendo realizado la revisión de Escuela, se autoriza para que continúe su trámite en la oficina de Lingüística, Unidad de Planificación.

"Id y Enseñad a Todos"

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Revisor
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre 2018

/aej



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.110.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA** del estudiante **Otto Raul Chavez Guzman, CUI No. 1929045150101, Reg. Académico No. 8712087** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, mayo 2019

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

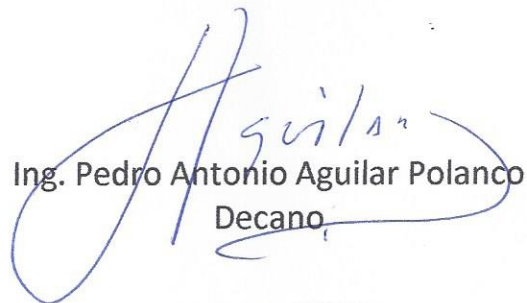


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 216-2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL PARA CONGELAR PRODUCTOS EN PLANTA DE PROCESAMIENTO AVÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario: **Otto Raúl Chávez Guzmán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser guía, luz y fortaleza en todo lo que me he propuesto durante mi vida.
- Mis padres** Raúl Antonio Chávez García y Zoila Hilda Guzmán Aldana, por su amor incondicional y su ejemplo generador de motivación.
- Mi esposa** Silvia Gutiérrez de Chávez, por su paciencia y comprensión durante las largas horas dedicadas para la culminación de este proyecto.
- Mis hijas** Marcellita (Lolo), Andrea (Bubo), Mariana (Colocha) y Fátima (Fati), Chávez Gutiérrez, por ser la fuente de energía infinita para alcanzar mis metas.
- Mi tío** Lic. Mario René Chávez García, por tener fe en que en algún momento llegaría este suceso.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de ser parte de esta <i>alma mater</i> y forjarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser fuente de conocimiento, estudio, aprendizaje y preparación profesional.
Inga. Narda González	Por sus sugerencias y su apoyo para llevar a buen término este proyecto profesional.
Inga. Marcella Chávez	Por su ejemplo, fortaleza y empuje que me motivo a dar la 'milla extra'.
Ing. Luis Eduardo Paíz	Por darme la oportunidad de confiar en mi criterio profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Descripción de la empresa	1
1.1.1. Ubicación	1
1.1.2. Historia	2
1.1.3. Misión	2
1.1.4. Visión.....	2
1.1.5. Valores	3
1.1.6. Generalidades	5
1.1.7. La industria avícola guatemalteca	5
1.2. Definición del proceso de beneficio del pollo y proceso productivo	6
1.2.1. Parámetros e indicadores de proceso de planta.....	11
1.2.2. Importancia de la refrigeración para la conservación de los alimentos.....	13
1.2.3. Descripción del proceso productivo	14
1.3. Descripción del problema	19
1.4. Definiciones esenciales	22
1.4.1. Carga térmica	22

1.4.2.	Tonelada de refrigeración.....	22
1.4.3.	IQF (<i>individual quickly frozen</i>), porción individual congelada.....	22
1.4.4.	ASHRAE.....	23
1.4.5.	Amoníaco	23
1.4.6.	Diagrama de flujo o ingeniería.....	23
1.4.7.	Túnel de congelación rápida tipo ráfaga	23
1.4.8.	Capacidad instalada	24
1.4.9.	Presión – temperatura de saturación	24
1.4.10.	Subenfriamiento	24
1.4.11.	Sobrecalentamiento	24
1.4.12.	Relación de compresión	24
1.5.	Descripción del sistema de refrigeración.....	25
1.5.1.	Historia de la refrigeración.....	25
1.5.1.1.	Descripción de los componentes de un sistema de refrigeración	27
1.5.1.2.	Tipos de sistemas de refrigeración.....	28
1.5.2.	¿Qué son los refrigerantes?	32
1.5.2.1.	¿Por qué utilizar el amoníaco como refrigerante?	33
1.6.	Importancia de los cálculos de ingeniería en el diseño o rediseño de sistemas de refrigeración.....	34
2.	FASE DE INVESTIGACIÓN.....	37
2.1.	Análisis de la capacidad instalada	37
2.1.1.	Identificar la baja de eficiencia del sistema	37
2.1.1.1.	Análisis de la capacidad de los componentes principales del sistema actual.....	39

	2.1.1.1.1.	Compresor de refrigeración.....	39
	2.1.1.1.2.	Condensador evaporativo	42
	2.1.1.2.	Análisis del diagrama de flujo o de ingeniería.....	45
	2.1.1.3.	Análisis de la nueva demanda requerida del sistema	50
2.2.		Áreas de oportunidad en disminución de costos y ahorros	51
	2.2.1.	Utilización eficiente de la energía eléctrica.....	51
	2.2.1.1.	Factor de energía por unidad de proceso eficiente.....	53
	2.2.2.	Optimización de los costos de mantenimiento.....	53
	2.2.3.	Reducción del tiempo extraordinario en mano de obra operativa.....	53
3.		FASE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL	55
	3.1.	Carga térmica demandada	55
	3.1.1.	Cálculos de carga térmica por volumen de producto – producción	56
	3.1.2.	Comparación contra el sistema actual.....	61
	3.1.2.1.	Equipos.....	62
	3.1.2.2.	Red de tuberías	62
	3.2.	Requerimiento de capacidad a la demanda actual.....	62
	3.2.1.	Equipos necesarios para cubrir demanda frigorífica.....	63
	3.2.2.	Dimensionamiento de tubería	65
	3.2.3.	Diagrama de flujo o de ingeniería	66
	3.3.	Optimización del sistema.....	67

3.3.1.	Análisis de la importancia de la optimización	67
3.3.2.	Costos y estimaciones.....	69
3.3.3.	Requerimientos hacia la optimización	70
3.3.4.	Fabricantes de equipos disponibles en el mercado	70
4.	FASE DOCENCIA.....	73
4.1.	Seguridad industrial.....	73
4.1.1.	Manejo seguro del amoníaco	74
4.1.2.	Tablas de concentraciones.....	75
4.1.3.	Riesgos	75
4.1.4.	Equipo de protección personal	76
4.1.5.	Sistemas de alerta.....	79
4.1.6.	Fugas	79
4.2.	Cálculos para el sistema de refrigeración con amoníaco	82
4.2.1.	Cálculos de carga.....	82
4.2.1.1.	Transmisión de calor (Q)	83
4.2.1.2.	Conductividad térmica (k).....	83
4.2.1.3.	Resistividad térmica (r).....	84
4.2.1.4.	Conductancia (C)	84
4.2.1.5.	Resistencia térmica (R)	84
4.2.2.	Selección de tuberías	85
4.2.2.1.	Aislamiento de tuberías	85
4.2.2.1.1.	Materiales y selección... ..	86
4.2.3.	Básicos de la refrigeración industrial	87
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	101

ANEXOS..... 103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación de la empresa.....	1
2.	Organigrama corporativo.....	4
3.	Organigrama planta de producción	4
4.	Diagrama de flujo de la instalación actual	46
5.	Diagrama de flujo	66
6.	Máscaras con filtros	77
7.	Equipo de respiración asistida	77
8.	Ropa protectora	78
9.	Fuentes de descontaminación con duchas y lavajos	78
10.	Utilización mecha de azufre.	80
11.	Equipos portátiles electrónicos.....	81
12.	Equipos locales electrónicos	81
13.	Primera ley de la Termodinámica.....	88
14.	Segunda ley de la Termodinámica	88
15.	Conceptos básicos.....	90
16.	Presión	90
17.	Diagrama temperatura entalpía.....	93
18.	Cambio de estado	93

TABLAS

I.	Situación actual de producción de planta	21
II.	Demanda equipos de congelación.....	38
III.	Data teórica de diseño	40
IV.	Aplicación coolware ingreso data.....	41
V.	Capacidad instalada de compresor RWF177	41
VI.	Tabla de rendimiento, condensadores evaporativos.....	43
VII.	Tabla de rendimiento, compresor de tornillo.....	44
VIII.	Diámetros de tubería, instalación existente	47
IX.	Diámetros de tubería, instalación existente	49
X.	Ponderación de la capacidad instalada versus la requerida	51
XI.	Situación actual.....	52
XII.	Carga térmica por equipo de congelación	56
XIII.	Resumen de cargas térmicas.	58
XIV.	Carga térmica, motores eléctricos	59
XV.	Carga térmica, motores eléctricos instalados	60
XVI.	Capacidad nominal, compresor existente	64
XVII.	Capacidad nominal, compresor existente, etapa alta	64
XVIII.	Diámetros de tubería	65
XIX.	Inversión propuesta	69
XX.	Efectos del amoníaco sobre el cuerpo humano.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grado centígrado
°F	Grado Fahrenheit
hr	Hora
Lb	Libra
TR	Tonelada de refrigeración
\$	Dólar, moneda americana
Q	Quetzal
NH ₃	Amoníaco
kWe	Kilowatio de energía
BTU	<i>British thermal unit</i> , unidad térmica británica
hp	<i>Horse power</i> , caballo de fuerza
kg	Kilogramo
HFC	Hidrofluorocarbono
Ppm	Partes por millón
CO ₂	Dióxido de carbono
CFC	Clorofluorocarbono
HCFC	Hidroclorofluorocarbono
kWh	Kilowatio hora
us\$	Dólar americano
pie ²	Pie cuadrado
pie ³	Pie cúbico
mm	Milímetro
mmHg	Milímetro de mercurio

cm

Centímetro

GLOSARIO

Amoníaco

Es un gas incoloro con olor altamente repulsivo y tóxico, tiene como fórmula química NH_3 , es decir, es un compuesto químico de nitrógeno. Gracias a sus propiedades de vaporización, es útil y económico su uso como refrigerante, por lo que es altamente utilizado en la industria de la refrigeración; tiene alta eficiencia en la conversión de energía. En su uso en refrigeración industrial se le conoce como R-717, refrigerante 717.

ASHRAE

American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers. Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado; es una asociación que promueve el bienestar humano y fomenta un mundo más sostenible mediante propuestas tecnológicas que favorezcan el desarrollo de las artes y de las ciencias en materia de climatización.

IIAR

International Institute of Ammonia Refrigeration. Instituto Internacional de Refrigeración por Amoníaco; es un ente que avoca por el uso

eficiente y seguro del amoníaco como refrigerante.

ANSI

American National Standard Institute. Instituto Nacional Estadounidense de Estándares; es una organización sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, procesos, servicios y sistemas en los Estados Unidos.

Diagrama de flujo o ingeniería

Representación gráfica que muestra todos los componentes de un sistema de refrigeración, se detallan diámetros de tuberías accesorios, equipos y componentes; facilita el entendimiento del sistema.

Túnel de congelación rápida tipo ráfaga

Equipo de proceso para congelación de alimentos donde estos se van introduciendo de forma continua para un determinado periodo de retención, es comparado a un cuarto frío dinámico.

IQF (*individual quickly frozen*) porción individual congelada

Es una porción de producto, en este caso cárnico avícola, que se congela a bajas temperaturas de forma individual.

Carga térmica

Es la capacidad térmica necesaria para agregar o remover calor de un elemento.

Capacidad instalada	Capacidad in situ de un sistema dado; es la máxima que puede entregar, puede verse limitado si la demanda es mayor.
Compresor de refrigeración	Máquina o equipo mecánico accionado por motor eléctrico, motor de combustión o turbina, etc., que se utiliza para comprimir refrigerante en estado gaseoso. Dicha unidad baja la presión del refrigerante de un sistema dado para luego comprimirlo e incrementar su presión. Cuando el compresor baja la presión del refrigerante genera una disminución de la temperatura de este, la que se aprovecha para el enfriamiento o congelación de productos. El rango de temperatura alcanzado depende de la cantidad de presión según el diagrama de presión – temperatura del refrigerante.
Condensador	Equipo que por medio de la combinación de agua y aire hace que un refrigerante en estado gaseoso a una presión dada se condense hasta llegar a una fase líquida a una misma presión.
Unidad recirculadora	Unidad utilizada para bombear refrigerante líquido a bajas presiones hacia los equipos o unidades que se encargan de generar

transferencia de calor. Se compone de un tanque de hierro o acero al carbón y un conjunto de equipo de bombeo, se diseña según la capacidad requerida de refrigeración.

**Acumulador o tanque
recibidor**

Tanque o reservorio que almacena el refrigerante en estado líquido que fue previamente condensado por el condensador. En el hay un flujo constante de entrada y salida de refrigerante, se diseña con un 20 % adicional del volumen de refrigerante que utiliza todo el sistema de refrigeración.

***Intercooler o
interenfriador***

Es un tanque que se utiliza para bajar la temperatura del refrigerante previo a ingresar a las unidades o equipos de proceso que genera la transferencia o intercambio de calor para el enfriamiento o congelación de productos. Se utiliza en sistemas de refrigeración que trabajan en dos etapas.

Economizador

Tiene la misma función que el inter enfriador; se aplica en sistema de una etapa.

PIB

Producto Interno Bruto; es una magnitud macroeconómica que expresa el valor monetario de bienes y servicios de demanda final de un país o una región durante un periodo determinado, normalmente un año.

RESUMEN

Durante los primeros quince días de la ejecución del ejercicio profesional supervisado fue importante recolectar toda la información existente in situ; reconocer y familiarizarse con el área donde está instalado el sistema; y tener interacción con el personal responsable de la operación de los equipos: supervisores, jefes y gerente del área, además con las personas responsables del área de producción, para lograr consolidar toda la información desde diferentes puntos de vista. No se debe dejar a un lado la importancia de conocer las políticas de seguridad industrial que internamente se tienen, dado que el medio refrigerante que el sistema de refrigeración utiliza es amoníaco (NH_3), considerado altamente tóxico.

Posterior a ello, se procedió a analizar el sistema en todo su conjunto apoyado de los diagramas de flujo, manuales y operadores del sistema; además, fue necesario tener comunicación con algunos de los fabricantes de los equipos existentes, estos proporcionaron información técnica en el caso de no haberla completado en la primera etapa del ejercicio profesional supervisado.

Seguidamente, el análisis de ingeniería del sistema como tal, se hizo considerando ecuaciones de calor, tablas, y diagramas, además de las opciones de cálculos de carga que los fabricantes de los equipos exponen en sus páginas web para consulta de los usuarios de los equipos, donde el resultado dio a conocer la capacidad real de operación del sistema. Con esto, se hizo la comparación de la capacidad requerida con la capacidad instalada de la planta y se determinó la capacidad adicional necesaria.

Con la información obtenida en la etapa anterior de análisis, se procedió a realizar la selección de los equipos adicionales o que sustituirán a los existentes, para que finalmente se desarrolle la nueva ingeniería del sistema que cumpla con la capacidad de carga térmica requerida.

OBJETIVOS

General

Que el desarrollo del ejercicio profesional supervisado, EPS, sea oportuno en el aporte de soluciones en la industria, apoyándose en criterios y conocimiento adquiridos en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Con ello, aportar opciones de mejora para la optimización de los procesos industriales, en este caso, la industria avícola.

Específicos

1. Determinar la condición del porqué la baja eficiencia del sistema actual, la capacidad instalada real del sistema y la capacidad de cada uno de sus componentes, para identificar la problemática o área de oportunidad para optimizar el sistema de refrigeración, la base para el ejercicio profesional supervisado.
2. Determinar a través de cálculos de ingeniería y análisis de capacidad en tuberías para refrigeración, el diseño del sistema de refrigeración óptimo, con cada uno de sus componentes, para responder a la demanda de los dos equipos tipo túnel de ráfaga en conjunto.
3. Instruir al personal de la planta en general y especialmente al área de mantenimiento sobre el uso seguro del amoníaco, sus riesgos y consecuencias, además de elaborar un manual sencillo de bolsillo que sirva de consulta para todos los involucrados.

4. Presentar a la gerencia de mantenimiento los cálculos de ingeniería utilizados para el diseño del sistema que se propone como referencia, para la toma de decisiones en proyectos futuros.

INTRODUCCIÓN

La proteína animal es uno de los alimentos más importantes para el consumo de las personas. En estos tiempos en que la proteína procedente de la res ha tenido un incremento considerable en los precios, que impactan directamente en el presupuesto del hogar, los consumidores eligen la opción inmediatamente más económica: la proteína de carne de pollo.

Los procesos productivos que transforman el pollo de un ser vivo a carne de alto valor proteico y económico necesitan estar integrados o compuestos con el equipamiento que permita garantizar la vida de anaquel de los productos.

El ritmo de vida actual hace ventajoso para el consumidor tener alimentos que sean fáciles de cocinar o calentar, tales alimentos corresponden a los que se les llama de cocción rápida. Existe una variedad extensa de este tipo de productos que actualmente existen en el mercado.

Estos productos llevan diferentes procesos, pero entre estos procesos siempre se va a encontrar un denominador común, el proceso de congelación, el cual representa la parte del proceso que garantiza el tiempo de vida de anaquel de los productos.

En el ramo avícola, en las plantas de proceso es imperativo tener equipos de congelación; en este ramo es una condición sin opción alguna.

Si parte de la garantía de la calidad e inocuidad de los productos de origen avícola depende de las instalaciones para la congelación y los sistemas de refrigeración, ¿por qué no darle la atención que se merece?

Adicional a ello, la instalación frigorífica, como tal, puede convertirse en un elemento de costo o ventaja para la operación; es decir, obviar cálculos de ingeniería para el diseño de las instalaciones de este tipo puede ser contraproducente tanto para el producto como para la productividad de la planta de procesamiento.

1. ANTECEDENTES GENERALES

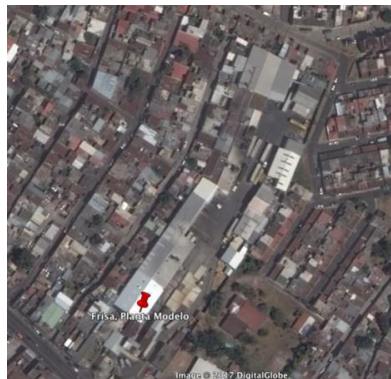
1.1. Descripción de la empresa

Grupo PAF es una empresa con dos unidades de negocio, una dedicada a la producción de alimentos para el consumo humano, cuyos productos son de origen pecuario, y otra dedicada a la producción de alimentos para animales y mascotas.

1.1.1. Ubicación

Las oficinas corporativas de Grupo PAF se encuentran ubicadas en la zona 12 de la capital, entre la 35 calle y la calzada Aguilar Batres. Su planta de proceso avícola se encuentra ubicada en el municipio de Villa Nueva, siempre del departamento de Guatemala, en la dirección 1ª calle 2-91 zona 5.

Figura 1. **Ubicación de la empresa**



Fuente: Google Earth. *Ubicación planta de proceso.*
<https://www.google.com/intl/es/earth/>. Consulta: 15 de mayo 2018.

1.1.2. Historia

El grupo nace en 1958 con un ideal bien definido, pero representa un doble desafío: la fundación de una gran empresa avícola, que contribuiría al desarrollo económico creando fuentes de trabajo en el país y la mejora de la dieta de los guatemaltecos, proporcionándoles un producto de alta calidad y valor nutritivo.

Actualmente, es una de las empresas más sólidas del país; proporciona empleo a más de 5 000 personas de forma directa.

Debido al crecimiento y consolidación de su marca Pio Lindo, el grupo ha evolucionado en conjunto con el mercado que atiende ofreciendo una gama de productos que permiten cubrir las necesidades y los requerimientos específicos de cada uno de sus clientes y todos sus canales de distribución, lo que les ha permitido convertirse en un socio estratégico de sus clientes y consumidores gracias a la calidad de cada uno de sus productos.

1.1.3. Misión

“Proveer alimentación nutritiva de calidad”¹.

1.1.4. Visión

“Crecer inteligentemente, consolidarnos y diversificarnos”².

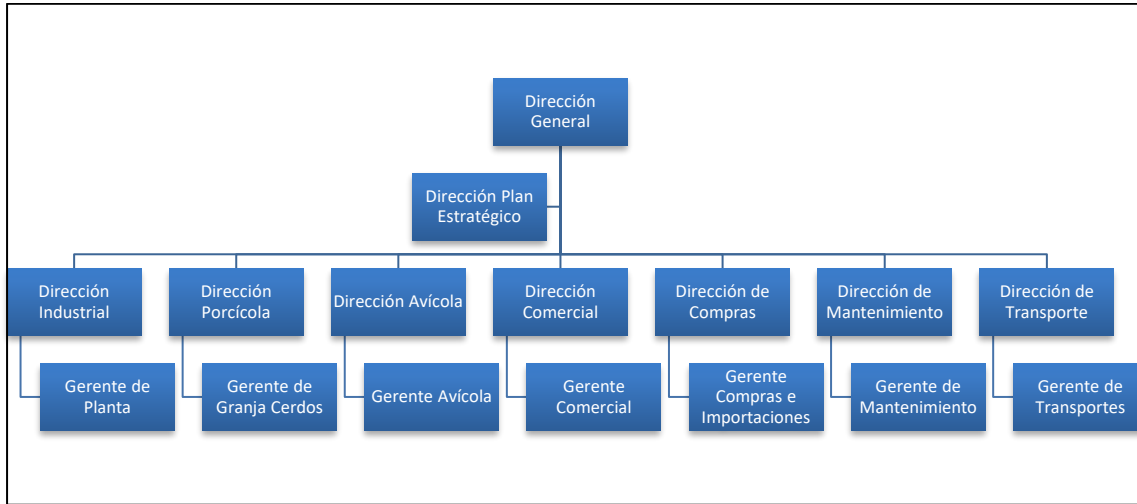
¹ Misión proporcionada por la empresa avícola.

² Visión proporcionada por la empresa avícola.

1.1.5. Valores

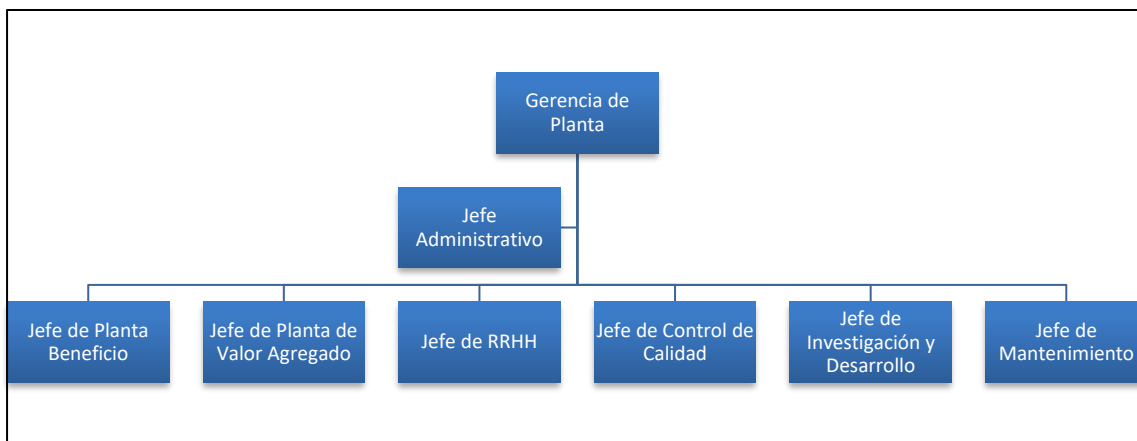
- Respeto: guardamos la más alta consideración a nuestros colaboradores, clientes, consumidores, proveedores, acreedores y a las leyes del país.
- Calidad: buscamos satisfacer las necesidades reales de nuestros clientes por medio de productos y servicios de excelencia.
- Responsabilidad: respondemos por el impacto y las implicaciones de las decisiones que adoptamos tanto individualmente y como empresa.
- Ética: nuestro compromiso es pensar, decidir y actuar.
- Desarrollo humano: nos encanta hacer las cosas bien desde la primera vez.
- Agilidad: somos proactivos para enfrentar los retos y aprovechar las oportunidades.
- Accesibilidad: promovemos una política de puertas abiertas que permite a nuestros colaboradores aportar ideas y compartir a todo nivel.

Figura 2. Organigrama corporativo



Fuente, elaboración propia.

Figura 3. Organigrama planta de producción



Fuente, elaboración propia.

1.1.6. Generalidades

Es importante para cualquier tipo de proceso productivo industrial elaborar sus proyectos en función de las necesidades reales, ya sea por incremento en la producción o en la generación de nuevos productos. Cuando estos proyectos involucran cambios, sustituciones, o instalaciones nuevas, no se puede dejar por alto el considerar todos los elementos del entorno que forman y/o formarán parte del nuevo sistema para dar cabida al final de la ejecución del proyecto, los volúmenes o productos nuevos que se desean tener.

1.1.7. La industria avícola guatemalteca

En Guatemala la industria avícola es uno de los sectores de mayor importancia en la actividad agropecuaria del país. En los años sesenta, la industria avícola comienza un desarrollo acelerado como el resultado de exoneraciones otorgadas por la Ley de Fomento Avícola, en la cual se da un estímulo a la inversión privada, esto dio origen al establecimiento de granjas con mayor tecnificación. Esto logró que la producción avícola formara parte de la dieta integral básica de todos los guatemaltecos. Esta ley ha expirado; sin embargo en la actualidad se afirma decir que cumplió el objetivo para la cual fue creada: propició el surgimiento y fortalecimiento del sector avícola y, por ende, el desarrollo nacional.

El impacto económico del sector avícola es positivo ya que genera más de 35 000 empleos directos en permanencia y alrededor de 300 000 indirectos; provee una forma de proteína animal, económica y saludablemente para la población a través de la carne de pollo y huevos de gallina. Genera arriba del 2 % del PIB nacional y el 8 % del PIB agropecuario.

La avicultura representa un 60 % de la actividad pecuaria de Guatemala, con un consumo per cápita de 36,3 libras (16,5 kgs).

En la industria avícola el agua es el recurso de mayor impacto por ser un factor vital en el procesamiento de aves en las plantas de beneficio (mataderos o rastros); la disminución de galones de agua por ave sacrificada sigue siendo una de las metas con mayor prioridad dentro del sector. El uso de refrigerantes por esta industria es intensivo, como el caso del Freón, gas que en su momento fue causante de daños en la capa de ozono. Una posible reconversión hacia métodos alternativos como los HFC, o la utilización del amoníaco (NH₃), permite a la industria en la continuidad de sus procesos y a la vez les permite ser partícipes en la no contaminación ambiental que evita la emisión de gases de efecto invernadero.

1.2. Definición del proceso de beneficio del pollo y proceso productivo

El proceso de beneficio de pollo consiste en tomar el ave viva y llevarla a través de un sistema mecanizado donde de manera gentil en un estado de inconciencia es sacrificada; se retira de ella todo tipo de partes que no son comestibles para el ser humano: plumas, víscera, sangre. Estas partes, que en el proceso de beneficio son denominados desechos, son procesadas con una facilidad lejana para su utilización en otro tipo de procesos.

Para familiarizarse con el caló de las plantas de proceso de pollo beneficiado y en general de los procesos avícolas, a continuación, se listan algunas definiciones que permitirán entender más adelante el proceso para la obtención de un producto apto y seguro para el consumo humano.

- Aves de corral: es un ave domesticada que se utiliza para la alimentación, ya sea como carne o por los huevos que produce.
- Edad: es el tiempo transcurrido en días desde que se produce el nacimiento hasta que se alcanza el peso apropiado para el proceso productivo, generalmente se asocia el peso y los días de estadía del ave en las granjas de engorde.
- Peso vivo: se denomina al peso del ave estando viva y que se toma el valor de este cuando arriba a la planta para su beneficiado.
- Pollito: se denomina al ave recién nacida hasta los 5 días posteriores.
- Pollo de engorde: es el pollo en su fase inicial de vida, el cual es criado en granja y engordado. Su alimentación consta de vitaminas y proteínas, denominándosele alimento balanceado, para que al final del proceso tenga el mayor peso y finalmente se sacrifica. Su fin es lograr el incremento de la producción de la granja avícola y, por consiguiente, el aumento de mercado.
- Gallina: al hablar de gallina se refiere a la hembra que se cría para producir huevo. Nombre científico: *Gallus gallus*.
- Gallo: el gallo, nombre científico *Gallus gallus domesticus*, es un ave doméstica perteneciente a la familia *Phasianidae*. Han llegado a estado adulto y edad reproductiva.
- Pollo entero: es el ave ya procesada lista para llevar otros procesos que le agreguen valor o para la venta al consumidor.

- Pollo en partes: es el ave ya procesada que ha sido cortada en diferentes números de partes que van desde 2, 4, 8 y 9 partes, lista para su venta al consumidor o para llevar procesos que le agreguen valor.
- Canal o carcaza: es el ave ya procesada que contempla solo el esternón sin haber cortado las alas y las piernas.
- Pollo congelado: es el ave que luego de ser procesada, ha pasado por un proceso de congelación o ultracongelación, dependiendo del método utilizado, donde ha alcanzado una temperatura de la carne de -15 °F (-26,11 °C).
- Pollo fresco: es el ave que luego de ser procesada, ha pasado por un proceso de enfriamiento, donde alcanzó una temperatura de 32 °F (0 °C).
- Especialidades de pollo: son productos de pollo que han llevado un proceso ulterior al pollo entero o pollo en partes, dicho proceso le agrega valor. Los productos resultantes se resumen en:
 - Productos fritos
 - Empanizados
 - Formados
- Días de anaquel: es el tiempo promedio en el cual el alimento es seguro para el consumo humano, correspondiente desde la fecha de producción. Si es pollo fresco, hasta 6 días de anaquel; si es producto congelado, hasta 360 días considerando que su almacenamiento ha sido en ambientes acondicionados estrictamente controlados.

- Enganchado: es la acción de colocar al pollo de cabeza sujetándolo de las patas en ganchos específicamente diseñados.
- Aturdido o insensibilizado: es el proceso en el cual se hace pasar al ave estando viva en un equipo que, a través él, se suministra una ligera descarga eléctrica para que se consiga la inconciencia en el ave sin sacrificarlo.
- Degollado: es la acción de hacer un ligero corte en la vena yugular sin cortar la espina de manera que el corazón siga funcionando para expulsar la sangre a través de la incisión hecha.
- Desangrado: corresponde al periodo tiempo en el cual el ave ha perdido la mayor parte de la sangre.
- Escaldado: el ave se sumerge de manera constante en unos tanques con agua caliente a temperatura determinada, durante un tiempo de retención, esto se hace con el fin de que las plumas se puedan desprender fácilmente de los folículos sin dañar la piel.
- Desplumado: es el desprendimiento de las plumas de los folículos del ave, esto se hace por medio de equipos específicos que tratan gentilmente la piel del ave.
- Corte de garra: se cortan las garras del ave por medio de una cuchilla o cuchillo de forma circular.
- Corte de pico: utilizando tijeras de uso avícola se desprende el pico del ave.

- Escaldado de garra: la garra luego de ser separada del pollo se hace pasar en un tanque con agua caliente con temperatura controlada durante un tiempo determinado; facilita con ello el desprendimiento de la cutícula.
- Eviscerado: es la parte del proceso en la cual se le extraen todos los elementos que no son determinados para el consumo humano a excepción del hígado y mollejas; corresponde al total de las vísceras.
- Preenfriado: el ave luego del proceso de escaldado puede llegar a una temperatura de 100 °F; luego del eviscerado es necesario limpiarlo y bajar la temperatura con agua fresca a temperatura ambiente, haciendo en un tanque semicircular llamado *pre-chiller* de 36 pies de largo y que hace la transición a través de él por medio de un tornillo sinfín.
- Enfriado y desinfección: es considerado un punto crítico de control para garantizar la inocuidad del producto; en un tanque de 70 pies de largo, llamado *chiller* que utiliza un tornillo sinfín para trasladar el pollo en todo lo largo que contiene agua a 33 °F (0,55 °C) de temperatura y 15 partes por millón de cloro; se hace un preenfriado extrayéndole el calor y llevando a una temperatura promedio de 34 °F (1,11 °C); además, por la acción del cloro, se garantiza la desinfección.
- Clasificado por peso: clasificar el pollo o ave por rangos de peso especificado de manera automática. Los rangos de peso se definen según el cliente o el proceso ulterior.
- Destazado: consiste en partir en varias partes el ave: 2, 4, 8, 9.

- Refrigeración: es llevar o mantener el pollo a temperatura de pollo fresco 33 °F (0,55 °C).
- Congelación: es llevar o mantener el pollo a temperatura de pollo congelado 0 °F (-18 °C).
- Marinado: este proceso consiste en agregar sabor al pollo como un proceso de valor agregado.
- Conservación: es el mantener el pollo o ave en ambientes controlados para preservarse en condiciones de inocuidad durante su periodo o vida de anaquel.
- Calidad del ave: se refiere al cumplimiento de los estándares de calidad, siendo aplicables para el ave viva en granjas, durante el transporte, arribo a planta o cuando está en los diferentes pasos o zonas del proceso de beneficiado.

1.2.1. Parámetros e indicadores de proceso de planta

En la industria avícola se llevan parámetros e indicadores que permiten conocer la productividad en todo el proceso, desde la producción de huevo en granjas reproductoras, el nacimiento del pollito en la incubadora, el crecimiento o engorde de las aves en las granjas de engorde, el rendimiento o merma en planta, el rendimiento en los procesos ulteriores como en el proceso de los subproductos.

Los parámetros son estándares definidos para lograr la calidad del producto, según la zona de proceso donde el ave se encuentre. Estos parámetros se definen como puntos críticos de control a mediciones y

comparación a temperatura, tiempo de residencia, partes por millón, etc. Estos parámetros determinan la garantía de la calidad de pollo.

Los indicadores definen el grado de productividad que se obtiene durante el proceso, determinan el valor económico como costo de producción y que a su vez se compara con los indicadores establecidos a nivel compañía.

Los más importantes son:

- Rendimiento: es el resultado de las libras obtenidas al final de todo el proceso en relación con las libras ingresadas en peso como ave viva, o conocido también como peso vivo.
- Merma: es el peso de los descartes de las aves que no se utilizan como producto para consumo humano en relación con las libras ingresadas en peso como ave viva, o conocido también como peso vivo.
- Libras producidas / kWe consumido: es la relación de libras obtenidas al final de todo el proceso en relación con la energía eléctrica total consumida para producir la cantidad total de aves que ingresan vivas a planta.
- Litros de agua / ave: es el indicador que determina la correcta utilización del agua por cada ave que se procesa.
- Eficiencia de línea o de máquina, (aves producidas / aves programadas – hora): es la relación de las aves producidas en un turno contra la cantidad de aves programadas en ese turno. Este indicador se ve afectado por retrasos que pueden ser ocasionados por retrasos de arribo de las aves a planta o por fallas mecánicas en los equipos de proceso.

- Tiempos muertos: se define al tiempo operativo sin producir debido a fallas mecánicas en equipos de proceso, falta de electricidad, falta de materia prima, etc. Este valor debe tender a cero.
- Cortes: se refiere a la cantidad de productos que no se logran despachar a los clientes por incumplimiento de los programas de producción.

1.2.2. Importancia de la refrigeración para la conservación de los alimentos

En productos de origen animal (carnes) los organismos, microorganismos, hasta bacterias se reproducen en función de la temperatura ambiente; por un lado, para reducir o eliminarlos se utiliza la cocción a temperatura que llega a los 175 °F (79.44 °C), siempre y cuando el alimento no alcanzó la descomposición. Por otro lado, inmediatamente de salir del proceso industrial y antes de llegar a las manos del consumidor, el alimento debe ser conservado en ambientes controlados, a bajas temperaturas, que le permitan tener una duración óptima para el consumo humano o vida de anaquel, (carnes frescas 33 °F (0,55°C) (carnes congeladas 0 °F (-18 °C). Con estas temperaturas la velocidad de crecimiento es considerablemente más baja.

La refrigeración mantiene en vida latente los microorganismos, porque no los destruye. La refrigeración es un método de conservación utilizado frecuentemente para prolongar la vida útil de productos que tienen microorganismos o no estériles; es esencial mantener la cadena frío en todo momento hasta que el producto sea preparado, cocido y consumido por el consumidor.

Un desarrollo microbiano no controlado da como resultado un posible riesgo para la salud pública; el desarrollo de estos organismos es causante de enfermedades alimentarias. Generalmente, la aparición de estas no va precisamente acompañada de un deterioro del producto, que puede estar rico y de buen aspecto, pero puede estar contaminado.

En refrigeración, los alimentos perecederos se conservan generalmente durante días o semanas, según el caso. La mayor parte de los alimentos alterables: huevos, lácteos, carnes, pescados, mariscos, frutas, vegetales y hortalizas, pueden conservarse en refrigeración por tiempo limitado.

Los refrigeradores comerciales y domésticos, generalmente, mantienen una temperatura de 39,2 °F (4 °C) y 44,6 °F (7 °C). Sumado a ello a otros factores que deben tenerse en cuenta: la circulación del aire y la humedad relativa del ambiente donde se almacena y se conserva el alimento.

La refrigeración no afecta el sabor, la textura ni el valor nutritivo de los alimentos, siempre y cuando los períodos de almacenamiento no se prolonguen más allá de su vida de anaquel y el mantenimiento de la cadena de frío desde el productor, distribuidor, revendedor y consumidor.

1.2.3. Descripción del proceso productivo

El proceso productivo inicia en las granjas de gallinas ponedoras donde dichas gallinas ponen los huevos y estos son trasladados a la planta de incubación donde nacen las aves luego de 21 días de permanecer en las máquinas incubadoras; a un día de nacido son trasladadas a granjas de engorde donde pasarán entre 35 a 45 días para que ganen el peso requerido. El tiempo de traslado dependerá del peso que se requiera en la planta de proceso.

Pasado el tiempo de engorde, las aves son trasladadas a la planta de proceso para su sacrificio de acuerdo con normas de bioseguridad, inocuidad, calidad y bienestar animal; en este punto es donde se inicia el proceso de beneficiado del ave.

Su arribo lo hace en camiones denominadas planchas, que transportan en promedio 35 000 aves. Las aves se han cargado en jaulas, 8 por cada una. Las jaulas son descargadas una a una del vehículo, colocadas sobre cintas transportadoras que las trasladan al lugar donde de forma individual cada ave es extraída de la jaula y es colgada por las patas en ganchos especiales sujetos a un transportador aéreo, el ave queda con la cabeza hacia abajo. A esta zona se le conoce como área de enganchado. Estos transportadores se encargan de llevar al ave en todo el recorrido del proceso desde su sacrificio hasta su clasificación por peso en pollo entero.

El ave a partir de la zona del enganchado pasa por un proceso de insensibilización eléctrica llevando al pollo a un estado de inconciencia que permite tener al ave de una condición relajada y lista para ser degollada por el equipo degollador o denominada matadora. De esta última toma un tiempo de 2 minutos con 30 segundos para llegar a la zona de escaldado, durante este tiempo el pollo debe drenar la mayor cantidad de su sangre. La zona de escaldado corresponde a dos tanques de 12 metros de longitud que mantienen en ellos agua calentada por medio de vapor directo a temperatura que va entre 128 °F (53,33 °C) a 131 °F (55,0 °C), dependiendo si es pollo blanco o pollo amarillo. En esta zona el pollo se sumerge en el agua con el objetivo de suavizar la cutícula de la piel del ave, para facilitar el desprendimiento gentil de la pluma en la zona del desplumado.

El proceso del desplumado se hace a través un equipo específico denominado desplumadora. Esta es una máquina con forma de túnel recto y que dentro de ella hay una serie de discos de material plástico con 12 agujeros posicionados de forma vertical; cada disco está girando en sentido contrario de uno a otro a una velocidad de 700 revoluciones por minuto; cada disco cuenta con 12 elementos de hule neopreno denominados dedos de hule; estos se encuentran insertos en cada uno de los agujeros del disco. La máquina desplumadora cuenta con 32 discos por lado, un total de 64 discos. La función de la máquina desplumadora es retirar gentilmente del ave sacrificada las plumas, llegando a retirar hasta un 99,8 % de pluma del ave. En la zona de desplume se concluye el proceso de sacrificio, para obtener un ave sin la mayor parte de la sangre y sin plumas listas para extraerle las vísceras en la zona de evisceración.

En la zona de evisceración se llevan múltiples pasos para la extracción de las vísceras que finaliza con la desinfección y enfriado del pollo. Esto se hace con equipos de alta tecnología que permite que el flujo sea alrededor de 7 600 aves/hora hasta una capacidad máxima de 9 000 aves/hora.

Cada uno de los equipos en la zona de evisceración hace una función específica para la extracción de vísceras de forma gentil que evita la contaminación de la carne del ave por rompimiento de ellas. Las funciones que se llevan en cada uno de los equipos corresponden a un orden para evitar ese rompimiento:

- Corte de garra
- Extracción de cloaca
- Corte de abdomen

- Extracción vísceras
- Separación de mollejas
- Corte de cuello o cabeza
- Lavado a presión con agua limpia tanto interno como externo

En cada uno de los pasos anteriores el ave ha sido trasladada por transportadores aéreos donde el ave se mantiene colgada de las piernas y cabeza abajo (en este paso las garras o patas ya han sido cortadas).

El último, es la desinfección, que se hace en sendos tanques; uno con agua fresca a temperatura ambiente, el primer paso, y el segundo con agua fría a 33 °F (0,55 °C) de temperatura y concentración de cloro de 15 ppm, el segundo paso. Estos tanques son denominados *prechiller* y *chiller de tornillo*, tienen forma semicircular con 10 pies (3 metros) de diámetro, con un total de 110 pies (33 metros) de longitud efectiva. La función de estos *chillers* es bajar la temperatura del pollo a 34 °F (1,11 °C) y desinfectarlo para su adecuada preservación. Al llegar al extremo del chiller el ave se descarga por medio de paletas rotativas hacia una mesa de recolección donde personal operativo lo toma de una de las alas para engancharlo en otro transportador aéreo hacia la zona de clasificación por peso. En esta zona de clasificación es donde el ave toma diferentes destinos, ya sea para clientes externos o para trasladarlo a un proceso de valor agregado denominado especialidades de pollo.

Los productos con valor agregado son lo que se conocen como productos, fritos, empanizados, formados, entre otros. Estos productos de pollo llevan una serie de procesos para llevarlos al producto final, entre los productos que se tienen se pueden mencionar:

- Alas a la barbacoa: alas de pollo que han sido marinadas en un proceso de masajeado para lograr que el marinado se impregne en la carne. Luego de la impregnación pasa a través de un freidor, donde el aceite está a 360 °F y un minuto de residencia.
- Alas empanizadas: alas de pollo que han sido embadurnadas en una mezcla de leche y empanizador, posteriormente pasa por un freidor donde la temperatura está a 380 °F y un minuto de residencia.
- Pechuga (*tender*) empanizada: tiras de pechuga de pollo que son embadurnadas en una mezcla de leche y empanizador, posterior pasa por el freidor durante un minuto de residencia y 380 °F.
- Formados: son productos con porcentajes de carne de pollo y proteína de pollo en una mezcla con especias, son formados en un equipo denominado formadora. Esta máquina hace formas con la mezcla de acuerdo con el molde que tenga montado, después de ser formado la pieza se embadurnan en una mezcla de leche y empanizador para luego pasar a través de un freidor a 360 °F en un tiempo de residencia de 20 segundos, los productos formados son:
 - Medallones
 - Tortas clásicas
 - Tortas específicas para clientes institucionales diversos.

En el último paso previo a ser empacado y enviado al centro de distribución, el producto debe pasar por un proceso de ultracongelación llamado IQF por medio de túneles de congelación tipo ráfaga, que han sido diseñados para tal fin. El objetivo de la ultracongelación es congelar en el menor tiempo posible el

volumen de producto que pasa a través de él. El producto ingresa al túnel de ráfaga con una temperatura de 170 °F y debe salir del túnel con una temperatura de -18 °F como mínimo, con ello se garantiza la inocuidad del producto y larga vida de anaquel. Finalmente, el producto es empacado y se encuentra listo para su venta.

1.3. Descripción del problema

El grupo, una empresa con más de 50 años en el mercado guatemalteco, elabora alimentos de origen avícola para el consumo humano; con su planta ubicada en el municipio de Villa Nueva del departamento de Guatemala, produce productos cárnicos de pollo con valor agregado denominados especialidades de pollo.

Dentro de su proceso de producción utiliza equipos de congelación o ultracongelación que permite que sus productos puedan preservarse en ambientes con temperaturas controladas, cámaras frías, para mantener su vida de anaquel en las condiciones óptimas mientras es adquirido por el consumidor.

Este tipo de productos se denomina IQF (congelación rápida de manera individual, por sus siglas en inglés: *individual quickly frozen*), es decir, se van introduciendo los productos al equipo de forma individual pero simultáneamente, para conseguir una congelación rápida para lograr que no se pierdan características de calidad, textura y sabor que aseguran su inocuidad.

Debido a su plan estratégico comercial, Frisa ha tenido un incremento del 200 % en el ramo de productos de valor agregado. Para ello realizó una inversión importante para la adquisición de un segundo túnel de ráfaga el cual fue agregado al sistema actual de refrigeración por amoníaco.

La adquisición de este segundo equipo de congelación conlleva a que el sistema actual de refrigeración por amoníaco esté en condiciones de extraer la cantidad necesaria de calor en los dos equipos trabajando simultáneamente para cumplir con el volumen de producción requerido; mantiene el mismo indicador de consumo energético por libra producida que se ha manejado con un solo equipo de congelación; es un indicador importante debido a que se relaciona directamente en uno de los componentes del costo de producción; por lo tanto resulta un producto competitivo en el mercado.

Durante puesta en marcha del segundo túnel de congelación tipo ráfaga, el resultado no fue satisfactorio porque el sistema de refrigeración instalado no logra cubrir la demanda frigorífica con ambos congeladores trabajando, es decir, solo cubre el 58,1 % de la demanda requerida. Esto ha generado altos costos en operación para cubrir la demanda del mercado.

Estos costos están asociados por la extensión de los turnos de trabajo lo que obliga a:

- Labor en tiempo extraordinario.
- Energía eléctrica que no es utilizada eficientemente.
- Riesgo a deterioro progresivo del sistema de refrigeración debido a que está operando más allá de su capacidad nominal, deteriorando a paso acelerado los componentes, lo que conllevaría un riesgo de paro prolongado de los equipos.

El problema se focaliza en la capacidad instalada del sistema de refrigeración actual.

En la tabla I se resume la baja productividad de la planta por no contar con un sistema de refrigeración que cumpla con cubrir la demanda requerida por los dos sistemas de congelación.

En la tabla I, se muestra una diferencia de 660 000 libras sin producirse aun utilizando más días y horas para cumplir con el objetivo de 2 340 000 libras mensuales. Es de tomar en cuenta que la planta no puede producir más de 20 horas al día, esto debido a procesos de sanitación y limpieza obligatoria para los equipos de proceso para el cumplimiento de inocuidad que garantiza que los productos sean aptos para el consumo humano.

Tabla I. **Situación actual de producción de planta**

Situación actual de producción de planta			
Item	Actual	Esperado	Diferencia
Lb /Hr	2 800	6 000	-3 200
Horas Trabajo día	20	15	5
Días / mes	30	26	4
Cobertura de producción Lbs.	1 680 000	2 340 000	-660 000

Fuente: elaboración propia.

En esta tabla se muestra también que es necesario laborar 5 horas más diariamente durante todo el mes sin descanso, lo que impacta en tiempo extraordinario. ¿Y, el tiempo para mantenimiento?, por la misma necesidad de producir para cumplir por lo menos con el 72 % del objetivo, el tiempo de

mantenimiento queda relegado a recambios para evitar paros durante los periodos de limpieza.

1.4. Definiciones esenciales

Estos términos han sido utilizados frecuentemente en el desarrollo de este documento.

1.4.1. Carga térmica

Es la cantidad de energía por unidad de tiempo que un recinto cerrado intercambia con el exterior debido a las diferentes condiciones higrotérmicas del interior y del exterior, considerando las exteriores como las desfavorables posible. El cálculo de estas cargas permite disponer de los sistemas adecuados de refrigeración para compensarlas.

1.4.2. Tonelada de refrigeración

Es la capacidad de extracción de carga térmica de los equipos frigoríficos. Es entonces la cantidad de calor latente absorbida por la fusión de una tonelada corta de hielo sólido puro en 24 horas.

1.4.3. IQF (*individual quickly frozen*), porción individual congelada

Es una porción de producto que se congela rápidamente en un tiempo dado.

1.4.4. ASHRAE

American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers; Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

1.4.5. Amoníaco

Es un gas incoloro con olor altamente repulsivo y tóxico, tiene como fórmula química NH_3 , es decir, es un compuesto químico de nitrógeno. Gracias a sus propiedades de vaporización, alta eficiencia en la conversión energética, es útil y económico su uso como refrigerante lo que lo hace altamente utilizado en la industria de la refrigeración industrial donde se le conoce más como R-717 o refrigerante 717.

1.4.6. Diagrama de flujo o ingeniería

Es una representación gráfica que plasma los componentes, equipos y direcciones del flujo de un refrigerante de un sistema de refrigeración específico.

1.4.7. Túnel de congelación rápida tipo ráfaga

Equipo utilizado en el proceso de alimentos para la congelación, estos se van introduciendo de forma continua para un periodo de residencia donde se logre el punto de congelación del producto.

1.4.8. Capacidad instalada

Capacidad real disponible *in situ* de un sistema dado y es la máxima que puede entregar, está limitado si la demanda requerida es mayor.

1.4.9. Presión – temperatura de saturación

Es la coexistencia de líquido y vapor a una temperatura dada donde le corresponde una presión definida o a una presión dada le corresponde una temperatura definida.

1.4.10. Subenfriamiento

Es cuando el líquido condensado ve reducida su temperatura por debajo del punto de saturación.

1.4.11. Sobrecalentamiento

Es la condición en la cual el refrigerante completamente evaporado (vapor saturado) absorbe más calor hasta convertirse en un vapor sobre saturado.

1.4.12. Relación de compresión

Corresponde a la razón geométrica resultante entre la presión absoluta de la descarga (condensación) y la presión absoluta de succión en el trabajo de compresión realizado por un compresor en un sistema frigorífico. Al aumentar la relación de compresión disminuye la eficiencia volumétrica, por lo tanto, disminuye el rendimiento del compresor.

1.5. Descripción del sistema de refrigeración

Es una composición mecánica que utiliza propiedades termodinámicas de la materia para transferir energía térmica en forma de calor, específicamente extraer calor o como comúnmente, bajar temperatura.

1.5.1. Historia de la refrigeración

La refrigeración es un proceso conocido desde hace mucho tiempo, ya en el siglo XII los chinos utilizaban mezclas de salitre con el fin de enfriar el agua; en los siglos XVI y XVII, investigadores como Boyle, Faraday (con sus experimentos sobre la vaporización del amoníaco) hacen los primeros intentos prácticos de producción en frío.

En 1834, Perkins desarrolla su patente de máquina frigorífica de compresión de éter y en 1835 Thilorier fabrica nieve carbónica por expansión; Tellier contruyó la primera máquina de compresión con fines comerciales; Pictet desarrolla una máquina de compresión de anhídrido sulfuroso.

El amoníaco fue el primer refrigerante utilizado en plantas de refrigeración por medio de compresión mecánica en 1876 por Carl von Linde. Desde entonces, se ha venido utilizando en grandes plantas de refrigeración: como los son en rastros, lecherías, cervecerías y otros lugares con grandes demandas de enfriamiento.

Hoy en día, el amoníaco permanece como el refrigerante más utilizado en sistemas de refrigeración industrial para procesar y conservar la mayoría de los alimentos y bebidas. El amoníaco ha estado en el liderazgo de los avances de

la tecnología en refrigeración, siendo parte esencial del procesamiento, almacenamiento y logística de distribución de los alimentos.

Clasificado por ASHRAE con R-717, dentro del grupo de refrigerantes naturales, no destruye la capa de ozono y no contribuye al efecto invernadero asociado al calentamiento global. De hecho, el amoníaco es un compuesto encontrado en la naturaleza comúnmente. Es esencial en el ciclo del nitrógeno de la tierra y su liberación a la atmósfera es inmediatamente reciclada. Esto lo hace consistente con los acuerdos internacionales respecto a la reducción del calentamiento global y destrucción de la capa de ozono.

Directamente los sistemas de refrigeración contribuyen al calentamiento global, a través del efecto invernadero causado por las fugas de gases refrigerantes. Indirectamente contribuyen al calentamiento global por la producción de emisiones de dióxido de carbono como resultado de la conversión de combustibles fósiles en la energía requerida para operar los sistemas de refrigeración.

El amoníaco es un combustible moderado, y considerado por expertos dentro del sector químico industrial relativamente como no combustible. En altas concentraciones es extremadamente tóxico, pero su fuerte olor es una excelente alarma, se hablará acerca de él más adelante.

1.5.1.1. Descripción de los componentes de un sistema de refrigeración

- **Compresor**

Equipo mecánico que accionado por motor eléctrico, motor de combustión o turbina, etc., que se utiliza para comprimir refrigerante en estado gaseoso; baja la presión del refrigerante a la presión requerida para luego comprimirlo incrementarle la presión.

- **Condensador evaporativo**

Equipo que a través de agua y aire hace que el refrigerante (amoníaco), en estado gaseoso a una presión dada, se condense hasta llegar a una fase líquida a una misma presión.

- **Unidad recirculadora**

Unidad compuesta de un tanque acumulador y bombas que hacer recircular el refrigerante líquido a bajas presiones hacia los equipos de intercambio de calor.

- **Economizador**

Tiene la misma función que el interenfriador: aprovecha la carga frigorífica del sistema para suministrar amoníaco a una temperatura más baja; ayuda también en la maximización de la capacidad del compresor de refrigeración.

- Acumulador o tanque recibidor

Tanque o reservorio que almacena el refrigerante en estado líquido que fue condensado a una presión de condensación dada. El acumulador tiene un flujo constante de refrigerante, se diseñan con un 20 % adicional del volumen de refrigerante que utiliza todo el sistema de refrigeración.

- Red de tuberías

Conjunto de tubería, accesorios y válvulas que componen la red del sistema de refrigeración.

- Acometida eléctrica

Derivación desde la red de distribución hacia la edificación donde se hará uso de la energía eléctrica.

- *Intercooler* o interenfriador

Es un tanque se utiliza para bajar la temperatura del refrigerante previo a ingresar a las unidades o equipos de proceso que intercambian calor consiguiendo el enfriamiento o congelación de productos. Generalmente, se utilizan en sistemas de refrigeración de dos etapas.

1.5.1.2. Tipos de sistemas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración se basan en principios termodinámicos y están diseñados para promover el intercambio de calor entre el proceso y el

refrigerante y para facilitar la liberación del calor irrecuperable al medio ambiente. Se pueden clasificar los sistemas de refrigeración de la siguiente forma:

- Sistema de refrigeración conforme a zonas de frío
 - Una zona de frío: es el clásico arreglo donde el sistema opera bajo una sola condición de temperatura de régimen de frío, entre una temperatura de condensación y una sola temperatura de evaporación del refrigerante.
 - Dos o más zonas de frío: es el sistema en el que el refrigerante que se ha condensado a una sola temperatura se evapora a distintos valores en función de distintos procesos, es decir se suministra hacia una cámara o cuarto frío para congelar o para almacenamiento fresco.
- Sistemas de refrigeración conforme se alimenta el refrigerante
 - Expansión directa (DX): se denomina expansión directa a los sistemas frigoríficos en los cuales la evaporación del refrigerante se lleva a cabo a través de su recorrido dentro del evaporador, encontrándose en la condición de saturación.
 - Con recirculación de líquido o recirculado: estos sistemas trabajan por medio de un flujo másico de refrigerante que es bombeado a través del evaporador; es conocido también como sistemas de sobrealimentación de líquido.
- Tipos y configuración de sistemas de refrigeración

- Refrigeración por compresión: desplaza la energía entre dos puntos creando zonas de alta y baja presión confinadas en intercambiadores de calor; estos procesos de intercambio de energía se suceden cuando el fluido refrigerante se encuentra en procesos de cambio de estado de líquido a vapor y de vapor a líquido.
- De compresión simple: eleva la presión del sistema mediante una sola carrera de compresión. Es el más común de los sistemas de refrigeración.
- Una etapa: es simple y versátil, para lograr bajas temperaturas, puede alcanzar grandes relaciones de compresión. Según la aplicación puede incurrir en considerables consumos de energía y, por ende, poco rentable en una operación productiva.
- De compresión múltiple: o de múltiples etapas, se utiliza en sistemas que deben responder a requerimientos de baja temperatura siendo capaces de trabajar con altas relaciones de compresión.
- Doble etapa: permite alcanzar grandes relaciones de compresión mediante un compresor de doble etapa o compresor de baja presión en combinación con una de alta presión; por ende, se logran alcanzar valores de temperatura más bajos. Según la aplicación los consumos de energía eléctrica son menores comparado al sistema equivalente de una etapa.

- Sistema en cascada: es un sistema de compresión múltiple que permite utilizar dos refrigerantes simultáneamente, pero en circuitos independiente a través de varios equipos compresores, aplicaciones comunes cuando se utilizan refrigerantes como el amoníaco y el CO₂. Se logran temperaturas muy bajas.
- Múltiple con enfriador intermedio de tipo abierto: mediante dos o más compresores y un tanque presurizado conectado entre ambos se logra una expansión y enfriamiento del refrigerante en circulación antes de ingresar a la etapa de alta presión. En este sistema se produce una inyección total del refrigerante.
- Múltiple con enfriador intermedio de tipo cerrado: en este sistema se produce una inyección parcial del refrigerante al interior del tanque presurizado intermedio.
- Sistemas con líquido recirculado
 - De compresión simple con tanque recirculado: la recirculación de líquido es un método utilizado con la finalidad de bombear refrigerante y mantener una en el evaporador una relación de recirculación dada según el diseño de la instalación trabaja con un solo equipo de compresión.
 - De compresión múltiple con tanque recirculado: la recirculación de líquido es un método utilizado con la finalidad de bombear refrigerante y mantener una en el evaporador una relación de recirculación dada según el diseño de la instalación trabaja con múltiples equipos de compresión.

- Sistema por absorción: este sistema es un medio de producir frío que aprovecha las propiedades de ciertas sustancias que absorben calor al cambiar de estado líquido a gaseoso.

1.5.2. ¿Qué son los refrigerantes?

Son sustancias que actúan como agente de enfriamiento, con propiedades especiales de punto de evaporación y condensación.

La NRSC (National Refrigeration Safety Code) la divide en tres grupos:

- Agua.
- Amoníaco.
- Freones (en proceso de eliminarse del mercado por ser perjudiciales para la capa de ozono CFC, HCFC).
 - Refrigerantes sintéticos (en sustitución de los freones, HFC).

Los refrigerantes deben cumplir ciertas características:

- El punto de congelación debe ser inferior a cualquier temperatura que existe en el sistema para evitar congelaciones del evaporador.
- El calor latente de evaporación deber ser lo más alto posible para que una pequeña cantidad de líquido refrigerante absorba una gran cantidad de calor.

- El volumen específico debe ser lo más bajo posible para evitar grandes tamaños en las líneas de aspiración y compresión.
- La densidad debe ser elevada para usar líneas de líquidos pequeñas.
- Las presiones de condensación deben elevarse y reducir la temperatura de condensación.
- No deben ser líquidos corrosivos ni inflamables.
- Su conductividad eléctrica debe ser baja.

1.5.2.1. ¿Por qué utilizar el amoníaco como refrigerante?

Los sistemas de refrigeración con amoníaco son los sistemas más económicos y con alto rendimiento energético en cuanto a operación se refiere.

La utilización del amoníaco, como toda sustancia química tiene sus ventajas y desventajas. En el caso de la refrigeración se pueden mencionar las siguientes ventajas:

- No es contaminante.
- Tiene un rendimiento termodinámico de 3 % a 10 % superior que otros refrigerantes, por lo que también tiene un aporte directo al consumo de energía eléctrica.
- Su costo es menor comparado con cualquier otro refrigerante.

- Su característica de seguridad es su olor picante e irritante que permite fácil y rápidamente detectar fugas.

No todo es ventaja en el uso del amoníaco, por lo que también tiene sus desventajas, siendo estas:

- Alta inversión del equipo e instalación.
- Es toxico e inflamable en determinadas concentraciones, por lo que necesita de muchas consideraciones de seguridad industrial en la facilidad donde se utilice.

1.6. Importancia de los cálculos de ingeniería en el diseño o rediseño de sistemas de refrigeración

Una instalación de refrigeración industrial requiere de un diseño adecuado de ingeniería que permita la óptima operación del sistema y que contemple las medidas de seguridad necesarias para los trabajadores y el entorno.

En los cálculos de ingeniería se debe considerar la demanda o carga térmica máxima del sistema, a partir de la especificación del producto, los rangos de temperatura, (medias, bajas, o ultrabajas), esto último determina la temperatura y/o presión de evaporación necesaria a la que refrigerante expuesto.

La carga térmica máxima está determinada por el flujo másico de producto que se estará ingresando, ya sea a un cuarto frío o un túnel de congelación o cualquier otro sistema de intercambio que se utilice para bajar temperatura del producto.

De los valores de presión de evaporación y flujo se pueden elaborar cálculos matemáticos utilizando fórmulas, tablas o gráficas para determinar las capacidades de cada uno de los equipos que componen el sistema de refrigeración; como también, el dimensionamiento de tubería y tanques.

En el proceso de diseño, el cálculo de la carga térmica es tan importante como la correcta selección del gas que se utilizará como refrigerante. Para este último existe una diversidad de criterios de selección de uno u otro en donde pueden influir experiencia de uso, seguridad, tamaño de instalación. Para este caso el enfoque será para el refrigerante amoníaco.

En las plantas de procesamiento de alimentos se tienen que considerar todas las variaciones que se pueden tener en el ciclo de operación, como por ejemplo, periodos picos de producción, cantidad de equipos conectados y fluctuación en el trabajo de estos, la estacionalidad, el clima.

Adicionalmente se deben tomar en cuenta otros factores no menos importantes para conocer la carga térmica total, estos factores se pueden listar como:

- Aislamiento en paredes, techos, pisos, tanques y tuberías; el no considerarse impacta directamente en la eficiencia del equipo y en el aprovechamiento óptimo en el consumo de energía eléctrica.
- Infiltración del aire exterior, dependiendo del tipo de aplicación siempre habrá una porción de aire a temperatura ambiente del medio que ingresa a el equipo frigorífico.

- Motores eléctricos e iluminación que actúen en el interior del equipo frigorífico.

En el diseño o rediseño de un sistema de refrigeración no se deben obviar los cálculos de ingeniería; esto permite una selección óptima de los que equipos que se considerarán para una nueva instalación o que será agregados a una existente. Costos y rendimientos en el proceso se verán beneficiados.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

2.1. Análisis de la capacidad instalada

Al analizar la capacidad instalada, como primer paso se debe identificar el tipo de sistema de refrigeración que se tiene y segundo la demanda de la instalación en conjunto, ya sea según el volumen de producto a congelar por unidad de tiempo o por la indicación de la ficha técnica del fabricante.

En la planta se identifica un sistema recirculado por la forma en que suministra el refrigerante, dispuesto en un sistema de compresión simple de una etapa.

2.1.1. Identificar la baja de eficiencia del sistema

Según el problema identificado y la situación planteada por los personeros de la compañía durante las entrevistas, se puede identificar que no es precisamente una deficiencia del sistema instalado; el no conseguir que los dos sistemas de congelación trabajen simultáneamente va asociado a la adición de un congelador recientemente donde sin considerar por medio de cálculos el impacto que la nueva demanda provocará en el sistema de refrigeración actual.

Se hace necesario identificar la capacidad de cada uno de los congeladores. En planta se tiene una nomenclatura para cada uno de los congeladores, a partir de ahora se les llamará túnel; esta nomenclatura será utilizada en este documento para mantener una concordancia al momento de hacer mención de

cada uno. Se les conoce como túnel 1 GC58 y túnel 2 GC76, este último es de reciente adquisición.

Según datos obtenidos, en la tabla II, se presenta la capacidad en libras hora del volumen de pollo que cada congelador puede congelar; también, la demanda equivalente en refrigeración para congelar dicho volumen.

El pollo se congela a 27 °F (-2,78 °C) y por requerimiento de conservación y calidad debe salir del túnel de congelación a una temperatura no mayor de -15 °F (-26,11 °C).

Tabla II. **Demanda equipos de congelación**

Equipo	Capacidad en Lbs/hr	Toneladas de refrigeración en demanda
Túnel 1 GC-58	2 000 @-40 °F evaporación	68
Túnel 2 GC-76	4 000 @-40 °F evaporación	102

Fuente: elaboración propia.

La tabla II, presenta información recopilada de las hojas de especificación del fabricante.

2.1.1.1. Análisis de la capacidad de los componentes principales del sistema actual

Se analiza la capacidad nominal de los componentes considerados como principales, con ello se determina cuál es la capacidad instalada actual.

El dimensionamiento de las tuberías instaladas (diámetros) también tiene un papel importante a la capacidad instalada del sistema; un dimensionamiento incorrecto penaliza directamente a la eficiencia de la instalación; el análisis se hará más adelante.

Los equipos que se considerados principales para el análisis son:

- Compresor de refrigeración
- Condensador evaporativo

2.1.1.1.1. Compresor de refrigeración

Actualmente, el sistema de refrigeración tiene un compresor de doble tornillo de la marca Frick modelo RWF177E. La ficha técnica proporcionada por el personal de mantenimiento de planta indica un rango para diferentes aplicaciones de este compresor, proporciona una información útil para encontrar la capacidad instalada, ver tabla III.

Tabla III. Data teórica de diseño

STANDARD DESIGN DATA (with Metric equivalents) - NOMINAL @ 3550 RPM

MODEL NO.	COMPRESSOR DISPLACEMENT		RATINGS R-717 ⁽¹⁾⁽²⁾				RATINGS R-507 ⁽¹⁾⁽²⁾				UNIT WEIGHT ⁽³⁾	
			CAPACITY		POWER		CAPACITY		POWER			
			TR	kw	BHP	kw	TR	kw	BHP	kw		
100B	592	1,005	59	207	60	45	-	-	-	-	5,400	2,449
100H	592	1,005	213	749	235	175	217.8	766	264.2	197	5,400	2,449
134B	790	1,342	79	276	80	60	-	-	-	-	5,600	2,540
134H	790	1,342	284	999	314	234	290.4	1021	352.3	263	5,600	2,540
177B	1,042	1,770	105	369	102	75	-	-	-	-	7,300	3,311
177H	1,042	1,770	384	1,351	410	306	386.0	1358	459.1	342	7,300	3,311
222B	1,311	2,228	132	464	129	96	-	-	-	-	7,600	3,447
222H	1,311	2,228	483	1,699	517	386	486.1	1710	578.1	431	7,600	3,447
270B	1,589	2,700	163	573	159	119	-	-	-	-	10,000	4,536
270H	1,589	2,700	598	2,103	638	476	600.5	2112	714.1	533	10,000	4,536
316B	1,865	3,169	188	660	183	137	-	-	-	-	12,500	5,670
316H	1,865	3,169	688	2,420	736	549	691.7	2433	822.6	613	12,500	5,670
399B	2,349	3,992	236	831	230	172	-	-	-	-	12,800	5,806
399H	2,349	3,992	866	3,046	926	691	871.0	3063	1035.8	772	12,800	5,806
480B	2,824	4,798	284	1,000	277	207	-	-	-	-	16,800	7,620
480H	2,824	4,798	1,018	3,581	1,127	841	-	-	-	-	16,800	7,620
546B	3,216	5,464	314	1,104	290	216	-	-	-	-	19,700	8,936
546H	3,216	5,464	1,169	4,110	1,280	955	-	-	-	-	NA	NA

1. Booster conditions are based on -40°F (-40°C) suction and 10°F (-12.2°C) intermediate temperature with liquid at interstage saturation and no superheat.
 2. High stage conditions are based on 20°F (-6.7°C) suction and 95°F (35°C) condensing with 10°F (5.5°C) liquid subcooling and 10°F (5.5°C) superheat.
 3. Unit weight does not include motor.
NOTE: All packages with motors larger than 1500 hp will require a vertical oil separator.

Fuente: Johnson Controls. *Manual de compresores (070.610-SPC1 2014)*. p 2.

En la página del fabricante de compresor, www.frickcoolware.com hay una aplicación en línea que permite determinar la capacidad nominal del equipo a partir de la temperatura de evaporación específica; en este caso lo que el congelador tipo túnel demanda y las condiciones ambientales reales; los siguientes datos fueron proporcionados por el personal de mantenimiento de planta:

- Temperatura de evaporación -40 °F
- Temperatura de condensación 95 °F
- Temperatura de bulbo húmedo 82 °F
- Altura sobre el nivel del mar 1 330,24 mts.

La información anterior se ingresa en la aplicación proporcionando la capacidad nominal del compresor esas condiciones, ver tabla IV.

Tabla IV. Aplicación coolware ingreso datos

Screw Package

Model	RWF11 177	Refrigerant	R717 Ammonia	Motor Type	Frick Std Motor
Vi Range	Automatic	Oil	Automatic	Motor Volt	460v
Drive Mode	60Hz Fixed Speed	Suction Valve	Standard	Motor Size	Service Factor
Oil Cooling	Thermosiphon	Discharge Valve	Standard	Min Motor Serv Factor	1,15
Oil Pump Type	Automatic	Separator Orientation	Horizontal	Starter Type	Solid State Mountec

Fuente: Coolware. <https://www.frickcoolware.com/Pages/OpenProjects.aspx>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

Se inicia colocando el modelo compresor, el refrigerante, y algunas condiciones del tipo de enfriamiento del aceite y las características generales del motor eléctrico. Dan como resultado, lo que se indica en la tabla V:

Tabla V. Capacidad instalada de compresor RWF177

Calculate		Rating	Relief
System Type	Single Stage	Condenser Sat Type	Temperature
Evap Sat Type	Temperature	Cond Temperature	95,0 °F (183 psig)
Evap Temperature	-40,0 °F (-2 psig)	Min Cond Temperature	75,0 °F (128 psig)
Evap Superheat	0,0 °F	Condenser Subcooling	0,0 °F
Suct Line Superheat	10,0 °F	External Subcooling	0,0 °F
Suct Line Pres Drop	0,0 psi	DiscLine Superheat	0,0 °F
		Disc Line Pres Drop	0,0 psi
Rating Type	% Evap Capacity	Economizer	Fixed
% Evap Capacity	100,0 %	Econ Sat Type	Temperature
		Econ Sat Temperature	15,0 °F (31 psig)
		Econ Approach T	0,0 °F
		Econ Superheat	0,0 °F
		Side Load	None
		Side Line Superheat	0,0 °F
		Side Line Pres Drop	0,0 psi
Evap Capacity	91,3 TR	Comp Power	288,0 hp
Cond HeatRej	1840 kbtu/hr	% Evap Capacity	100,0 %
Oil HeatRej	524 kbtu/hr	% Slide Valve	100,0 %
Separator Size	Standard	Driver Speed	3550 rpm
		Motor Power	300 hp
		Disc T	180,0 °F
		Comp Ratio	19,19
		Vi Ideal	12,59
		Vi Actual	5,00
		Perf Factor	3.154 hp/TR

Fuente: Coolware. <https://www.frickcoolware.com/Pages/OpenProjects.aspx>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

Según información obtenida de la tabla V, una temperatura de evaporación de -40 F bajo las condiciones de temperatura de condensación y bulbo húmedo dadas el compresor es capaz de entregar 91,3 toneladas de refrigeración (TR) con un motor eléctrico de 300 caballos de fuerza (*horse power hp*), a una carga del 100 %.

Para verificar la capacidad del condensador evaporativo y saber si será capaz de tomar el calor de rechazo implícito en el refrigerante posterior a la compresión. Este calor de rechazo corresponde a la suma del calor de rechazo debido a la compresión más el calor de rechazo debido al que se utiliza parte del refrigerante para el enfriamiento del aceite que lubrica la partes móviles y rodamientos del compresor.

2.1.1.1.2. Condensador evaporativo

Seguido al compresor es el segundo equipo más importante que saber su capacidad nominal a las condiciones antes mencionadas de temperatura de bulbo húmedo y temperatura de condensación es el condensador evaporativo.

El condensador evaporativo debe tener la capacidad de tomar en su totalidad el calor que trae el refrigerante en estado gaseoso comprimido en el compresor para condensarlo, y que el refrigerante, ahora en estado líquido, pase al tanque receptor e iniciar de nuevo el ciclo de refrigeración.

Si el condensador no tiene la suficiente capacidad de asimilar el calor de rechazo que viene del compresor, habrá, por consiguiente, una pérdida de eficiencia en el sistema limitando su capacidad y, por ende, consumo energético mayor de lo considerado como nominal.

El modelo del condensador evaporativo instalado es un Frick Imeco XLP S-140.

De las hojas técnicas proporcionadas por el personal de mantenimiento de planta se tiene lo que se muestra en la tabla VI:

Tabla VI. **Tabla de rendimiento, condensadores evaporativos**

**X L
P E R F O R M A N C E
T A B L E S**

XLP Model	Heat Rejection (MBH)	XLP Model	Heat Rejection (MBH)	XLP Model	Heat Rejection (MBH)	XLP Model	Heat Rejection (MBH)	XLC Model	Heat Rejection (MBH)
S 90	1,323.0	M 270	3,969.0	M 430	6,321.0	L 870-2	12,789.0	25	367.5
S 100	1,470.0	ML 270	3,969.0	ML 430	6,321.0	XL 870-2	12,789.0	28	411.6
S 110	1,617.0	M 280	4,116.0	L 435	6,394.5	XL 880-2	12,936.0	30	441.0
S 115	1,690.5	ML 280	4,116.0	XL 435	6,394.5	ML 890-2	13,083.0	35	514.5
S 120	1,764.0	M 285	4,189.5	XL 440	6,468.0	ML 900-2	13,230.0	38	558.6
S 125	1,837.5	ML 290	4,263.0	ML 445	6,541.5	L 920-2	13,524.0	40	588.0
S 130	1,911.0	L 290	4,263.0	ML 450	6,615.0	XL 940-2	13,818.0	43	632.1
S 135	1,984.5	ML 295	4,336.5	L 460	6,762.0	ML 950-2	13,965.0	50	735.0
S 140	2,058.0	ML 300	4,410.0	XL 470	6,909.0	L 950-2	13,965.0	55	808.5
S 145	2,131.5	L 300	4,410.0	ML 475	6,982.5	XL 950-2	13,965.0	58	852.6
S 150	2,205.0	M 305	4,483.5	L 475	6,982.5	ML 980-2	14,406.0	60	882.0
S 155	2,278.5	ML 305	4,483.5	XL 475	6,982.5	XL 990-2	14,553.0	68	999.6
								75	1,102.5
								78	1,146.6
								80	1,176.0

Fuente: Johnson Controls. *Manual de condensadores evaporativos (140.920 SED 2009)*. p. 11.

La tabla anterior es muy general por lo que no se puede utilizar para determinar la capacidad nominal del condensador evaporativo, por lo que se usa la herramienta del fabricante para la selección de equipos y cálculo de capacidades según condiciones específicas en la página www.frickcoolware.com; se muestran los datos en la tabla VII:

Tabla VII. **Tabla de rendimiento, compresor de tornillo**

XLP S140 Old

Prod Line	XLP (Legacy)	Refrigerant	R717	Dry Rating	No
Model	XLP S140	Heat Rejection	Known	Air Pres	14,7 psi
Motor Volt	460	Find	Wet Cond T	Auxiliary Circuit	No
Sump	Standard	Wet Bulb T	75,0 °F	Fan Drive	Standard
		Wet Cond T	95,0 °F		
		Heat Rejection	3793 mbh		

Wet Bulb T	75,0 °F	Wet Heat Reject	3793 mbh	Fan Qty	1
Cond T	118,7 °F	Operating	8882 lbm	Fan Motors	(1)7,5 hp
Length	145,0 in			Pump Motors	(1)1,5 hp
Width	61,8 in			Fan Air Flow	28880 cfm
Height	166,3 in			Pump Flow	200,0 gpm

Fuente: Coolware. <https://www.frickcoolware.com/Pages/OpenProjects.aspx>. Consulta:15 de septiembre de 2018.

Según los resultados obtenidos de la página web del fabricante, para un compresor RWF177E con capacidad de 69.8 TR, 300 hp y con un calor de rechazo de 2 364 kBtu/hr, el condensador tiene la suficiente capacidad; según la corrida de los datos en www.frickcoolware.com, la capacidad en calor de rechazo del condensador es de 3 793 kBtu/hr.

2.1.1.2. Análisis del diagrama de flujo o de ingeniería

El diagrama de flujo es un plano o una representación gráfica que muestra la instalación del sistema con todos sus componentes, equipos que suministran o equipos demandantes de la acción refrigerante. Además, el dimensionamiento de la tubería en función a su diámetro y temperatura del refrigerante indica el tipo o la clase de aislamiento que se debe instalar para evitar pérdidas térmicas.

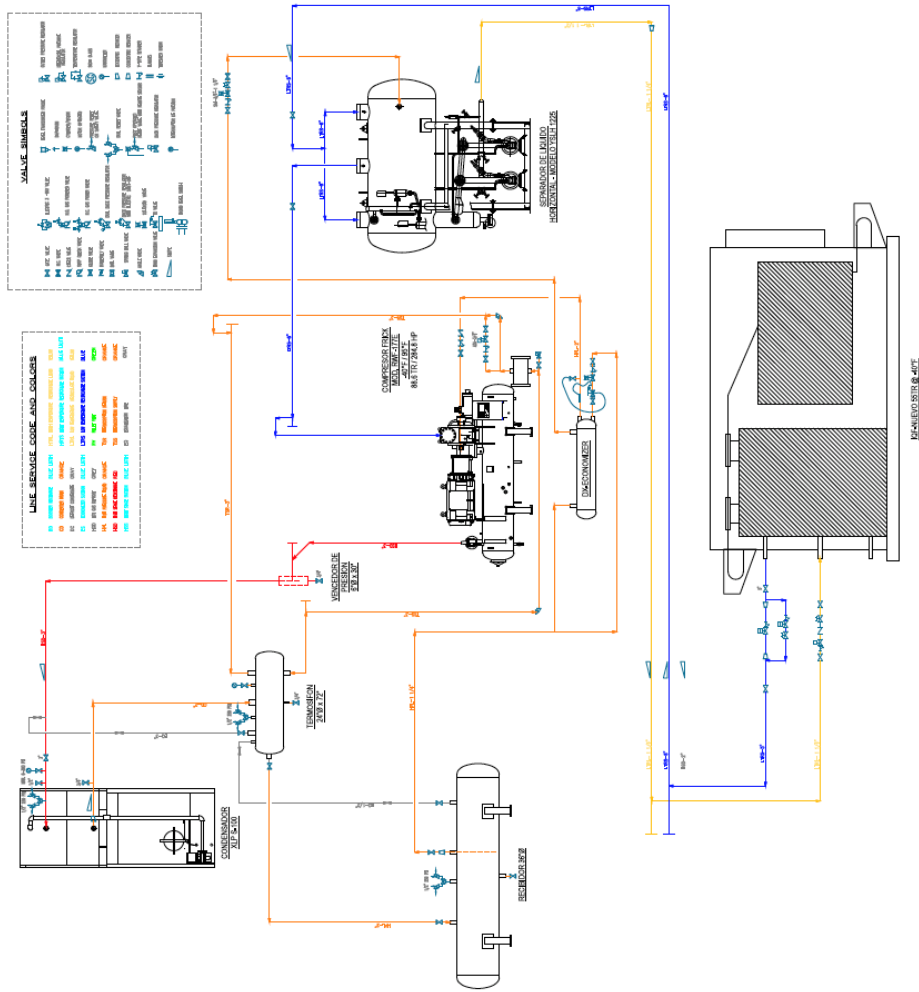
El análisis en el diagrama de flujo o de ingeniería se centra luego de saber las capacidades teóricas de los equipos principales (compresor y condensador), se toman los valores y se comparan con las capacidades máximas de flujo de refrigerante que permiten los diámetros de las tuberías instaladas.

El diagrama que proporcionó la empresa se presenta en la figura 4.

El diagrama de flujo de la figura 4 representa una instalación de refrigeración que opera con amoníaco; es un sistema de compresión simple, una sola etapa y con recirculación de líquido.

Del diagrama de flujo se elaboró la tabla VIII para listar los diferentes diámetros de tubería de acuerdo con su posición en el plano y la zona que ocupa como sistema de refrigeración.

Figura 4. Diagrama de flujo de la instalación actual



Fuente: elaboración propia; empleando AutoCAD

Tabla VIII. **Diámetros de tubería, instalación existente**

Tubería - zona	Diámetro en pulgadas
Succión @-40 °F	6
Descarga @ 175 °F	3
Condensación @ 175 °F	2
Suministro a recirculador @ 175 °F	1 1/2
Suministro a evaporador @ -40 °F	1 1/4

Fuente: elaboración propia.

Todo sistema de refrigeración cuenta con varias zonas según la presión del refrigerante; por ejemplo, sistemas con una sola etapa tienen dos zonas de presión: zona de baja presión y zona de alta presión o de condensación. En sistemas de dos etapas corresponde, entonces, la zona de baja presión, zona de presión intermedia y zona de alta presión o de condensación.

En sistema de refrigeración que funcionan con amoníaco como refrigerante, el dimensionamiento óptimo de la tubería no solo influye en la operación del sistema de refrigeración, influye también en lo económico, si bien, el sobre dimensionar puede beneficiar a la operación del sistema, incurre también en costo de inversión innecesaria en tubería y asilamiento. Todo lo contrario, el subdimensionarla tiene sus desventajas, ocasiona una operación deficiente y costos altos en energía eléctrica, aunque el costo de la inversión en tuberías y aislamiento sea bajo.

El Instituto Internacional de Refrigeración por Amoníaco, IIAR, por sus siglas en idioma inglés, (International Institute of Ammonia Refrigeration), propone en su publicación titulada *Manual de dimensionamiento de tuberías para refrigeración por amoníaco, 2004*, métodos óptimos de selección de tubería según la zona del sistema de refrigeración donde esté dispuesta.

A manera de conocimiento, los métodos que hace mención el IIAR son:

- Método basado en análisis económico: la recomendación es lograr el mínimo costo posible en el dimensionamiento de la tubería. Se hace una comparación a partir de un flujo de refrigerante y las condiciones de operación dadas; el dimensionamiento óptimo para la tubería es la que permite balancear de manera cercana a los costos asociados de la operación contra los costos de instalación.
- Método basado en pérdidas de presión: el dimensionamiento se basa en pérdida de presión o penalización de temperatura por cada 100 pies de longitud equivalente.

De la tabla VIII, y considerando el método de pérdida de presión de IIAR se puede incluir en ella las capacidades que el sistema de refrigeración actual tiene, ver tabla IX:

Tabla IX. **Diámetros de tubería, instalación existente**

Tubería - zona	Diámetro en pulgadas	Capacidad TR
Succión @-40 °F	6	90
Descarga @ 175 °F	3	127
Condensación @ 175 °F	2	140
Suministro a recirculador @ 175 °F	1 1/2	179
Suministro a evaporador @ -40 °F	1 1/4	70

Fuente: elaboración propia.

Se determina que el sistema de refrigeración actual no cubre las necesidades que la planta tiene ahora con un segundo túnel de congelación instalado.

En la zona de succión solo se alcanza a 90 TR y en la de suministro al evaporador 70 TR. La zona de succión es la que viene del evaporador al compresor y es la capacidad máxima de refrigerante que se puede evaporar a una temperatura de -40 °F (-40 °C).

Para las condiciones de operación de con un solo congelador el sistema tal y como se encuentra instalado cumple con suplir la demanda; aun así, teniendo un motor eléctrico con capacidad menor a la nominal según la recomendación del fabricante.

El hecho de haber instalado un segundo túnel de congelación tipo ráfaga limita obtener los resultados esperados a la inversión recientemente dada; es

decir, la cantidad de pollo por congelar no se puede cumplir en las horas de trabajo estipuladas en cada turno, también, cumplir con el costo objetivo.

La capacidad del sistema de refrigeración actual solo es capaz de entregar 69,8 toneladas de refrigeración; la instalación actual ahora demanda 170 toneladas de refrigeración, (corresponde a la suma de las toneladas de refrigeración de los dos túneles 68 TR y 102 TR). La instalación anterior solo con un túnel para congelación tipo ráfaga demandaba 69,8 toneladas de refrigeración.

La limitante para cumplir con la actual demanda se resalta en el compresor, el condensador evaporativo, las dimensiones de las tuberías de la zona de succión, de la zona de descarga y condensación y la de suministro de líquido hacia el evaporador.

2.1.1.3. Análisis de la nueva demanda requerida del sistema

La demanda ahora requerida del sistema debido a la reciente instalación de un segundo túnel de congelación tipo ráfaga se define en la capacidad total de refrigeración que se debe suplir para la operación simultánea de ambos túneles de congelación tipo ráfaga, según la tabla IX, (capacidad GC58 & 76) es necesario que el sistema de refrigeración tenga una capacidad instalada de 170 toneladas de refrigeración; es decir, la adición 102 toneladas de refrigeración.

Esta adición debe hacer a través de un rediseño de la instalación. Debido a que la compañía no esperaba hacer inversiones mayores, existe la limitante de utilizar en la mayor medida posible los equipos existentes y tuberías, y solo

adicionar lo necesario para que la capacidad total instalada resultante sea lo que se necesita para cumplir con sus requerimientos actuales.

Tabla X. **Ponderación de la capacidad instalada versus la requerida**

	Sistema actual	Instalación anterior	Sistema actual	Instalación actual
Toneladas de refrigeración (TR)	70	70	70	170
Diferencia capacidad vrs. demanda (TR)	0		-100	

Fuente: elaboración propia.

Se necesita adicionar por lo menos 100 toneladas de refrigeración.

2.2. Áreas de oportunidad en disminución de costos y ahorros

Al optimizar el sistema también se traduce en una disminución en los costos de operación de la planta, estos a la vez son ahorros que pueden ser orientados hacia reinversión para la mejora de procesos, mejora continua.

2.2.1. Utilización eficiente de la energía eléctrica

La refrigeración industrial a nivel nacional ha tenido una evolución notable, el consumo de energía eléctrica asociada a este representa una oportunidad para el ahorro de energía.

En los últimos años se han sido desarrollados sistema de refrigeración por absorción cuya eficiencia se ha incrementado cerca de un 50 %. Paralelamente

los sistemas de compresión mecánica se han mejorado, ya sea en su manufactura o con el apoyo de dispositivos y/o tecnologías de control que les permiten hacer ajustes instantáneos más precisos donde el aprovechamiento de la energía se hace más eficiente.

En el caso de la planta de proceso avícola, se pueden conseguir reducciones importantes en el consumo de energía eléctrica correlacionándolo a la demanda versus la capacidad instalada óptima que el sistema de refrigeración debería de tener.

Tabla XI, sobre la situación actual de planta, se utiliza para demostrar que en el momento de optimizar el sistema con la inclusión de equipos y cambios en la red de tuberías se logra un ahorro en el consumo de energía eléctrica considerando que se logra el objetivo de producción.

Tabla XI. **Situación actual**

Item	Actual	Esperado	Diferencia
Lb /Hr	2 800	6 000	-3 200
Horas Trabajo día	20	15	5
Días / mes	30	26	4
Cobertura de producción Lbs.	1 680 000	2 340 000	-660 000
Energía kWh	224	466	-241.70
Día kWh	4 476	6 983	-2 506,56
Mes	134 280	181 547	-47 266,56
kWh/lb	0,0799	0,0776	0,0023
Costo energía US\$ /kW	\$0,13	\$0,13	
Costo energía / libra producida (US\$)	\$0,01039	\$0,01009	\$0,00030

Fuente elaboración propia.

2.2.1.1. Factor de energía por unidad de proceso eficiente

Del cuadro anterior se ve un ahorro en el consumo de energía por libra producida de US\$ 0,00030, considerando que el costo de energía es US\$ 0,13 /kWh (dato proporcionado por la planta).

2.2.2. Optimización de los costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento se reducen cuando los planes de mantenimiento preventivo se cumplen de acuerdo con el plan establecido según las recomendaciones del fabricante; de no cumplirse se pone en riesgo el equipo llevando a límites donde las reparaciones lleven a costos excesivos en reparación o hasta el reemplazo de la unidad. Se erogan Q5 000,00 por cada 250 horas de operación de los equipos; optimizar el sistema implica en la erogación de Q5 000,00 cada 500 horas debido a que el sistema estará trabajado bajo la capacidad nominal y no forzada.

2.2.3. Reducción del tiempo extraordinario en mano de obra operativa

Se logra cuando los planes de producción se cumplen en el tiempo planeado para determinado volumen de producción. En la situación actual se utiliza una cantidad considerable de horas extras para cumplir con dicho volumen, con la optimización del sistema de refrigeración no habrá necesidad de tener personal trabajando en tiempo extraordinario.

Se determina que la reducción en tiempo extraordinario impacta en un ahorro de: $Q12,50 \times 1,35 \times 370 \times 5 \times 30 = Q936\,562,50$.

Donde:

- Q12,35 es salario diario
- 1,35 factor de hora extraordinaria
- 370 número de persona que laboran en planta
- 5 horas extraordinarias que se labora
- 30 días laborados
- En tiempo extraordinario generará un ahorro de Q936 565,50 al mes.

3. FASE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL

3.1. Carga térmica demandada

Los productos que se congelan en planta previamente llevan un proceso definido según el tipo de producto final esperado; ingresan a los túneles de congelación a diferentes temperaturas; es decir, cada producto ingresa a determinada temperatura.

Hay que considerar que la temperatura de ingreso determina la carga térmica a la que estará sometido el sistema de refrigeración.

Para fines prácticos los productos se dividen en productos prefritos y cocción total, la diferencia entre uno y otro es la temperatura.

- Prefritos 120 °F
- Cocción total 185 °F a 200 °F

Todos los cálculos serán considerados a partir de una temperatura de producto de 185 °F, tomando en cuenta la información del personal de planta.

Indican que hay un producto que el proceso requiere llevarlo hasta 200 °F de temperatura, pero la tendencia es no producirlo más a mediano plazo.

3.1.1. Cálculos de carga térmica por volumen de producto – producción

Partiendo de los datos de la tabla XII.

Tabla XII. Carga térmica por equipo de congelación

Equipo	Flujo de producto	Temperatura ingreso	Calor específico (Arriba pto. congelación)	Calor específico (Abajo pto. congelación)	Calor latente de fusión	Temperatura de congelación
	Lbs/Hr	°F	Btu/(Lb)(°F)		Btu/Lb	°F
Túnel 1 GC58	2 000	185	0,70	0,30	106	27
Túnel 2 GC76	4 000	185	0,70	0,30	106	27

Fuente: elaboración propia.

Utilizando las ecuaciones de calor de calor sensible y calor latente:

Calor sensible arriba del punto de congelación:

$$Q_h = W \times ch \times (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Donde:

- Q_h = calor extraído en BTU/hr, antes del punto de congelación
- W = peso del producto en libras
- ch = calor específico arriba del punto de congelación
- T_1 = temperatura del producto al ingresar
- T_2 = temperatura de congelación de producto

Calor latente

$$Q = W \times h \quad (2)$$

Donde:

- Q = calor extraído en BTU/hr
- W = peso del producto en libras
- h = calor de fusión latente

Calor sensible por abajo del punto de congelación:

$$QI = W \times c_l \times (T_2 - T_3) \quad (3)$$

Donde:

- QI = calor extraído en BTU/hr, después del punto de congelación
- W = peso del producto en libras
- T₂ = temperatura de congelación del producto
- T₃ = temperatura de salida o final del producto

En la tabla XIII aparecen los resultados de las ecuaciones; agregado a ello, los resultados de las cargas térmicas debido a motores eléctricos, tabla XV, y la carga térmica por infiltración de aire:

Tabla XIII. **Resumen de cargas térmicas**

		Túnel 1 GC58	Túnel 2 GC76
Flujo de producto	Lbs/Hr	2 000	4 000
Temperatura ingreso (T1)	°F	185	185
Calor específico (Arriba pto. congelación)(ch)	Btu/(Lb)(°F)	0,79	0,79
Calor específico (Abajo pto. congelación)(cl)		0,37	0,37
Calor latente de fusión (h)	Btu/Lb	99	99
Temperatura de congelación (T2)	°F	27	27
Temperatura de salida producto (T3)	°F	-15	-15
Qh	Btu/hr	249 640	499 280
Q	Btu/hr	198 000	396 000
QI	Btu/hr	31 080	62 160
Qe motores	Btu/hr	129,880	240 880
Q infiltración de aire	Btu/hr	86,085	124 162
Carga total	Btu/hr_equipo	694 685	1 322 482
Carga total	TR/equipo	57,89	110,21
Carga total TR		168,10	

Fuente: elaboración propia.

Se debe considerar que existen cargas térmicas adicionales que deben ser tomadas en cuenta en la carga total; estas corresponden a la carga térmica generada por los motores eléctricos y por la infiltración del aire del exterior, que de forma continua ingresa al congelador por la escotilla de ingreso simultáneamente con el ingreso del producto.

En el caso de los motores eléctrico, la ASHRAE ha publicado tablas que listan la carga térmica o calor liberado por los motores eléctricos según la potencia de este. La tabla XIV muestra un fragmento de la publicación de la ASHRAE para fines de este documento.

Tabla XIV. **Carga térmica motores eléctricos**

Motor en Hp	Motor instalado en el interior, conducido interior	Motor instalado en el exterior, conducido en el interior	Motor y conducido instalado en el exterior
		Btu / hr	
1,5	4 960	3 820	1 140
2	6 440	5 090	1 350
3	9 430	7 640	1 790
5	15 500	12 700	2 790
7,5	22 700	19 100	3 640
10	29 900	24 500	4 490
15	44 400	38 200	6 210
20	59 500	50 900	7 610
25	72 300	63 600	8 680
30	85 700	76 300	9 440
40	114 000	102 000	12 600
50	143 000	127 000	15 700

ASHRAE 2006 Handbook-Refrigeration

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Carga térmica, motores eléctricos instalados**

Carga térmica debida a motores eléctricos									
Equipo	Motor blower				Motor banda				Total por equipo
	cantidad	hp	Btu/hr ASHRAE*	Carga total Btu/hr	cantidad	hp	Btu/hr ASHRAE*	Carga total Btu/hr	
Túnel 1 GC58	2	20	58 500	177 000	2	2	6 440	12 880	129 880
Túnel 2 GC76	2	40	114 000	228 000	2	2	6 440	12 880	240 880

** según tabla de ASHRAE*

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior fue elaborada como resumen de la cantidad de motores eléctricos que generan una carga térmica al sistema de refrigeración por estar en el interior de ambos congeladores.

La carga térmica debida a la infiltración de aire es aquella que se genera por ingreso de aire con mayor temperatura a la del interior del congelador a través de puertas o ventanas que se abren con cierta frecuencia o que permanecen abiertas. Esta carga se puede obtener a través de la siguiente ecuación:

$$Q_i = 60 \times V \times A \times (h_i - h_r) \times \rho \times D_t \quad (4)$$

Donde:

- Q_i = carga térmica promedio en BTU/hr.
- V = velocidad promedio en pies/minuto.
- A = área abierta donde se da la infiltración del aire, en pies cuadrados.
- h_i = entalpía del aire que se infiltra, BTU/lb, se obtiene por carta psicométrica.

(1) (2) (3) (4)

- h_r = entalpía del aire refrigerado en el interior del congelador, Btu/hr, se obtiene por carta psicométrica.

- q_r = densidad del aire refrigerado en el interior del congelador.
- D_t = porcentaje de tiempo en que el área está abierta permitiendo el ingreso del aire del exterior.

Los datos obtenidos para encontrar el valor de Q_i según la ecuación corresponden a:

- $V = 448,6$ pies/minuto, validada con anemómetro
- $A =$ túnel 1 $0,884$ pies²., túnel 2 $1,275$ pies²
- $h_i = 34,0$ BTU/lb
- $h_r = -6,20$ BTU/lb
- $q_r = 0,09$ Lb/pie³
- $D_t = 100$ %.

Al sustituir valores en la ecuación se tiene:

- Q_i túnel 1 = $86\ 085$ BTU/hr
- Q_i túnel 2 = $124\ 162$ BTU/hr

3.1.2. Comparación contra el sistema actual

Según la tabla XIII, el sistema de refrigeración tiene una capacidad instalada de $69,8$ TR, con solo el túnel 1 cubría la necesidad porque su demanda era $57,89$ TR. Ahora con el túnel 2, a la demanda se le adiciona $110,21$ TR; es decir, para que se cubra la operación de ambos túneles congeladores el sistema debe poseer una capacidad instalada mínima de $168,10$ TR.

3.1.2.1. Equipos

Considerando lo cambiante del mercado de productos cárnicos de tipo avícola y, en especial, los productos de valor agregado o especialidades de pollo y con la oportunidad de aportar el presente documento para potencializar su sistema de refrigeración, se sugiere que el sistema se calcule bajo una base de 90 TR para el túnel 1 GC58, y 110 TR para el túnel 2 GC76; lo que significa que el sistema debe tener una capacidad instalada de 200 TR, y haciendo de nuevo la salvedad de aprovechar los equipos de la instalación existente independientemente como se distribuyan, una sola etapa o dos etapas.

3.1.2.2. Red de tuberías

Hacer referencia a la red de tuberías, es hablar del dimensionamiento que las mismas deben tener para cumplir con los requerimientos mínimos de la demanda. De la misma forma que se hizo para determinar la capacidad que el sistema actual posee según dimensiones (diámetros), se debe proceder para encontrar la dimensiones (diámetros) de la red de tuberías que se utilizará con el con las adiciones al sistema.

3.2. Requerimiento de capacidad a la demanda actual

A continuación, haciendo uso de ecuaciones de calor, tablas y sistemas informáticos se va a encontrar cuál es la capacidad frigorífica necesaria que el proceso necesita para cubrir las necesidades de producción.

3.2.1. Equipos necesarios para cubrir demanda frigorífica

Por recomendación de la gerencia de mantenimiento, se consideró evaluar equipos de la casa fabricante Johnson Controls y su marca de compresores Frick. Se habló con los representantes comerciales para tener una orientación específica sobre la optimización tomando en cuenta la directriz dada por parte de planta, aprovechar todo equipo existente.

Si ahora la demanda de la instalación requiere que el sistema de refrigeración suministre 172 TR y siendo el sistema actual de una sola etapa, se puede aprovechar el compresor de refrigeración existente (Frick RWF177), para transformar el sistema en uno de dos etapas, donde este compresor estaría ubicado en el lado de alta presión y nuevos compresores se instalarán en el lado de baja presión.

La tabla XVI muestra la capacidad de un compresor del modelo Frick RWF222 de 90 TR; considerando la demanda total de 170 TR se puede asumir que dos compresores de refrigeración del modelo mencionado cubren la demanda en el lado de baja presión; queda ahora demostrar si el compresor existente, Frick RWF177 al utilizarlo en el lado de alta presión del sistema cumple con la función de complementar para la demanda requerida.

Al ser la demanda total requerida de 170 TR y transformado el sistema actual de una etapa a un sistema de dos etapas, la capacidad en toneladas de refrigeración del lado de alta debe ser capaz de absorber la carga térmica del lado de baja; es decir, se tienen 170 TR de evaporación, 170 TR deben ser absorbidas y comprimidas por el lado de baja y por ende 170 TR deben ser absorbidas por el lado de alta presión para condensarse en el condensador evaporativo.

Tabla XVI. **Capacidad nominal, compresor existente**

1		
Calculate	Rating	Relief
System Type	Booster Intercooled	Intercooler Sat Type: Temperature
Evap Sat Type	Temperature	Intercooler Temperature: 6,0 °F (23 psig)
Evap Temperature	-40,0 °F (-2 psig)	Intercooler Liq Feed T: 95,0 °F
Evap Superheat	0,0 °F	Intercooler Approach T: 0,0 °F
Suct Line Superheat	10,0 °F	External Subcooling: 0,0 °F
Suct Line Pres Drop	0,0 psi	DiscLine Superheat: 0,0 °F
		Disc Line Pres Drop: 0,0 psi
Evap Capacity	90,0 TR	Comp Power: 99,8 hp
Oil HeatRej	77 kbtu/hr	% Evap Capacity: 70,1 %
Separator Size	Standard	% Slide Valve: 80,2 %
		Driver Speed: 3550 rpm
		Motor Power: 150 hp
		Disc T: 150,7 °F
		Comp Ratio: 3,78
		Vi Ideal: 2,86
		Vi Actual: 2,86
		Perf Factor: 1.109 hp/TR

Fuente: Coolware. <https://www.frickcoolware.com/Pages/OpenProjects.aspx>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

En la tabla XVII, se encuentra la capacidad que puede entregar el compresor existente en planta al hacer la optimización Frick RWF177.

Tabla XVII. **Capacidad nominal, compresor existente, etapa alta**

1		
Calculate	Rating	Relief
System Type	HighStage Intercooler	Condenser Sat Type: Temperature
Intercooler Sat Type	Pressure	Cond Temperature: 95,0 °F (183 psig)
Intercooler P	23,0 psig	Min Cond Temperature: 85,0 °F (154 psig)
Intercooler Superheat	0,0 °F	Condenser Subcooling: 0,0 °F
Suct Line Superheat	10,0 °F	External Subcooling: 0,0 °F
Suct Line Pres Drop	0,0 psi	DiscLine Superheat: 0,0 °F
		Disc Line Pres Drop: 0,0 psi
Cond HeatRej	2791 kbtu/hr	Comp Power: 276,9 hp
Intercooler Capacity	172,0 TR	% Slide Valve: 64,1 %
Oil HeatRej	408 kbtu/hr	Driver Speed: 3550 rpm
Separator Size	Standard	Motor Power: 424 hp
		Disc T: 172,2 °F
		Comp Ratio: 5,59
		Vi Ideal: 3,85
		Vi Actual: 3,85
		Perf Factor: 1.610 hp/TR

Fuente: Coolware. <https://www.frickcoolware.com/Pages/OpenProjects.aspx>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

De lo anterior y siguiendo con la recomendación de planta, se puede utilizar el compresor existente, este actualmente trabaja con un motor eléctrico de 300 hp en un sistema de una sola etapa. Al utilizarse en un sistema de 2 etapas en lado de alta presión podrá asimilar sin ningún problema la carga térmica de 172 TR, donde el motor eléctrico ya instalado, consumirá 277 hp de potencia eléctrica.

3.2.2. Dimensionamiento de tubería

El incrementar la capacidad de refrigeración al transformar el sistema hace necesario un nuevo dimensionamiento de las tuberías; es decir, se deben reemplazar las tuberías, si se considera que el sistema tendrá una capacidad instalada para responder a una demanda de 172 TR y a la vez se transforma de un sistema de una sola etapa a un sistema de dos etapas, según la iiar_Amonia Refrigeration Piping Handbook, tabla XVIII, con las siguientes recomendaciones:

Tabla XVIII. Diámetros de tubería

Tubería - zona	Diámetro en pulgadas	Capacidad TR
Succión baja presión @ -40 °F	8	248
Succión alta presión @ 6 °F	6	285
Descarga @ 6 °F	6	237
Descarga @ 175 °F	4	225
Condensación @ 175 °F	2 1/2	220
Suministro a recirculador @ 175 °F	1 1/2	254
Suministro a evaporador @ -40 °F	2	264

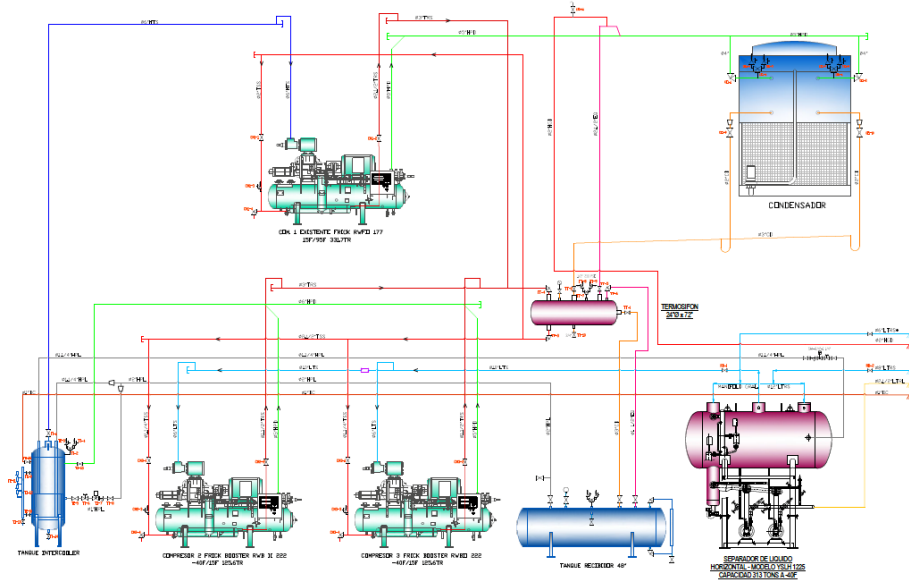
Fuente: elaboración propia.

Tuberías con menores dimensiones, tienen menor capacidad en TR, según
liar.

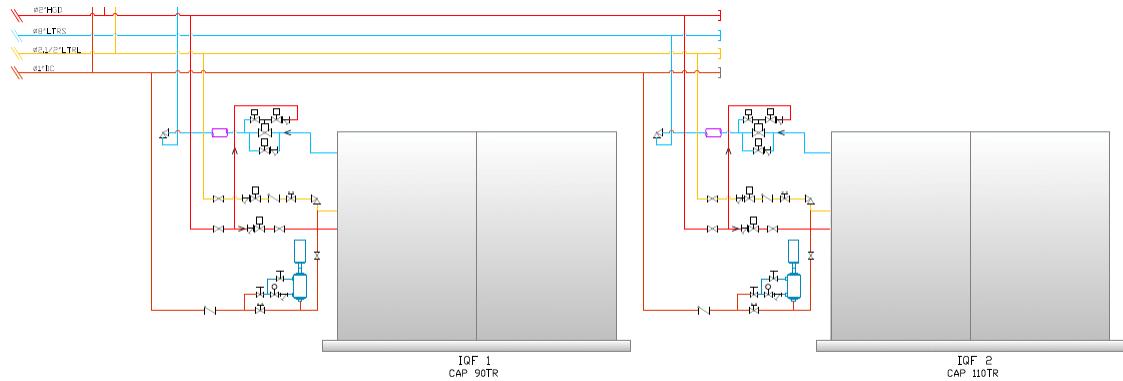
3.2.3. Diagrama de flujo o de ingeniería

A continuación, las figuras 5 y 6 muestran el diagrama de flujo propuesto
en un sistema de dos etapas.

Figura 5. Diagrama de flujo



Continuación figura 5.



Fuente: elaboración propia; empleando AutoCAD

3.3. Optimización del sistema

Al utilizar formulas o ecuaciones de calor, o cálculos de ingeniería, acompañado de tablas termodinámicas y sistemas informáticos, se consigue optimizar cualquier sistema de refrigeración para cumplir con los requerimientos del proceso.

3.3.1. Análisis de la importancia de la optimización

La palabra optimizar se refiere a la forma de mejorar alguna acción, trabajo o proceso realizado, dando a entender que la optimización de los recurso o sistemas es buscar la forma de mejorar dicho recurso o sistema en una empresa, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia.

La optimización de los recursos es una buena técnica de llevar a cabo, debido a que se basa en la eficiencia y la eficacia utilizando la menor cantidad de recursos posibles. Mejor si dentro del concepto de optimización de recursos está implícito la reutilización de equipos o elementos existentes.

Cuando se busca la optimización de los recursos, también se busca el hecho de poder ahorrar ciertos recursos, ya sean energéticos, financieros, económicos o humanos para mejorar la situación actual o para ser más competitivos.

- Ventajas

- Producir un volumen de productos en el menor tiempo posible.
- Reducción del consumo de energía eléctrica, por tonelada de refrigeración o por libra de producto producida.
- Reducción del tiempo extraordinario, se cumple el volumen de producción en los tiempos laborales establecidos.
- Reducción de los costos de mantenimiento.
- Incremento en la vida útil de los equipos que componen el sistema.

- Desventajas

- Mayor cantidad de equipos que requieren atención de mantenimiento.
- Mayor volumen de amoníaco que se maneja en planta, sensible a la seguridad industrial y ocupacional.

3.3.2. Costos y estimaciones

Se conversó con lo diferentes proveedores de equipo, así también con contratistas que la compañía tiene y ha utilizado con años para que indicaran cuales serían los costos asociados para la transformación del sistema de acuerdo con la propuesta del diagrama de flujo, (figuras 5 y 6). Cada uno proporcionó su presupuesto global el cual se presenta un resumen de ello en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Inversión propuesta**

Elemento	Costo US\$	Costo Q.
Instalaciones		
Aislamiento de tuberías	\$6 938,78	Q51 000,00
Tuberías	\$16 326,53	Q120 000,00
Equipo		
Compresor de refrigeración	\$178 000,00	Q1 308 300,00
Condensador evaporativo	\$57 800,00	Q424 830,00
Tanques		
Termosifón	\$15 400,00	Q113 190,00
Recibidor	\$47 800,00	Q351 330,00
Intercooler	\$17 900,00	Q131 565,00
Instalación		
Obra gris	\$31 972,79	Q235 000,00
Electricidad	\$17 476,19	Q128 450,00
Soldadura y metal mecánica	\$11 964,63	Q87 940,00
Pruebas y arranque	\$3 500,00	Q25 725,00
TOTAL	\$405 078,91	Q2 977 330,00
AHORROS		
Tiempo extraordinario		Q936 562,50
Energía eléctrica (15 horas proceso)		Q1 468,50
Mantenimiento		Q5 200,00
Total ahorros		Q943 231,00
Retorno de inversión (meses)		3,16

Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Requerimientos hacia la optimización

La optimización del sistema de refrigeración en el presente caso se asocia desde el entendimiento donde no se ha cumplido las necesidades de los clientes en el cumplimiento de lo demandado por el mercado avícola en cuestión, también, donde no se ha logrado el margen de utilidad esperado por los accionistas.

Es decir, desde que el sistema de refrigeración actual no logre cumplir con la demanda de los sistemas de congelación no se cumplirán los objetivos para alcanzar la meta comercial.

Por lo que los requerimientos para alcanzar la optimización del sistema de refrigeración se puede identificar como:

- Tangibles
 - Adquisición de equipos
 - Transformación física de planta

- Intangibles
 - Entendimiento de la necesidad por todos los involucrados
 - Aprobación de las máximas autoridades de la inversión

3.3.4. Fabricantes de equipos disponibles en el mercado

Cuando se habla de fabricantes de equipos en el mercado internacional en el ramo de la refrigeración por amoníaco, existen una diversidad de ellos; aunque la compañía avícola ya tiene una marca seleccionada debido a que posee otros

sistemas de refrigeración por amoníaco de la marca mencionada. La marca es Frick, de fabricación estadounidense; el porqué de la selección la asocian a experiencia en la eficiente operación en otros sistemas, respaldo técnico y economía por mantener un bajo inventario de repuestos debido a que muchos de ellos son comunes para múltiples equipos que ya se tienen en planta.

En general, en el mercado se encuentran los siguientes fabricantes:

- Frick (www.johnsoncontrol.com)
 - Tipo tornillo

- Sabroe (www.sabroe.com)
 - Tipo tornillo
 - Tipo reciprocante

- Vilter (www.emersonclimate.com)
 - Tipo tornillo
 - Tipo reciprocante

- Gea (www.gea.com)
 - Reciprocante

- Maycom (www.mayekawa.com)
 - Tipo tornillo

- Bitzer (www.bitzer.de)
 - Tipo tornillo

4. FASE DOCENCIA

4.1. Seguridad industrial

Seguridad emana del vocablo latín *securitas* que puede definirse como 'cualidad de estar sin cuidado'; e industrial procede del latín *industria* que se traduce como 'laboriosidad' y que está conformado por la unión del prefijo *indu-* el verbo *struo* que es sinónimo de 'construir' y el sufijo *-ia* que indica cualidad.

La seguridad industrial es un área multidisciplinaria que se encarga de minimizar los riesgos en la industria. Parte del supuesto de que toda actividad industrial tiene peligros inherentes que necesita de una correcta gestión.

Por lo tanto, la seguridad industrial requiere para la protección de los trabajadores: equipo de protección personal y su monitoreo médico, la implementación de los controles técnicos y la formación al control de riesgos.

Para hablar de la seguridad industrial se hace necesario hacer énfasis que la misma se desarrolla de manera específica para prevenir las posibles situaciones y riesgos que se den en ámbitos donde se trabaja, en las instalaciones frigoríficas, electricidad, combustibles gaseosos, refrigeración o equipos a presión.

En materia de prevención, a los empleados se les imparten cursos y seminarios que les enseñan u orientan sobre cómo proteger y cuidar elementos en su trabajo como factores ambientales, las herramientas de protección e instalaciones, y lo más importante, su propia integridad física.

En las instalaciones frigoríficas que utilizan amoníaco como refrigerante se deben tener contemplados planes de manejo seguro de este refrigerante para garantizar que el ambiente laboral está libre de riesgos o en su defecto cualquier situación que se escape del control sea fácilmente controlable.

Esto requiere que el personal que está a cargo de la operación de los equipos frigoríficos tenga un amplio conocimiento y esté entrenado en el manejo y los aspectos de seguridad industrial que el amoníaco requiere.

4.1.1. Manejo seguro del amoníaco

Para comprender el significado de manejo seguro del amoníaco se debe saber que es el amoníaco y sus propiedades.

Como una definición básica, el amoníaco a temperatura ambiente es un gas incoloro de olor picante desagradable, según la concentración en la que se maneje puede llegar a ser tóxico y hasta mortal. Es un compuesto de hidrógeno y nitrógeno muy soluble en el agua, que sirve de base para la formación de distintas sales; se emplea en la fabricación de abonos, productos de limpieza y muy utilizado en la refrigeración industrial.

Su olor característico fuerte y penetrante permite ser detectado por cualquier persona antes de llegar a concentraciones tóxicas.

Es un gas irritante considerado de alto impacto ocasionando daños severos a nivel pulmonar.

4.1.2. Tablas de concentraciones

En manejo y uso del amoníaco, los riesgos potenciales para la salud van asociados al grado de exposición y concentración; en la tabla XX se resumen los efectos y la respuesta del organismo; la concentración está determinada en partes por millón (ppm).

Tabla XX. Efectos del amoníaco sobre el cuerpo humano

<u>Respuesta de organismo (efectos)</u>	<u>Concentración de amoníaco (ppm)</u>
Olor mínimo perceptible.	1 - 5
Olor fácilmente detectable.	11 - 50
Irritación sistema respiratorio y ojos.	50 - 100
Lagrimo, irritación y molestias en la piel. Irritación en las membranas mucosas. Efectos no perdurables en exposiciones cortas.	150 - 200
Severa irritación de ojos, nariz y garganta. Efectos perdurables en cortas exposiciones.	400 - 700
Tos convulsiva y espasmos bronquiales. Peligro potencialmente fatal en menos de media hora de exposición.	1 700
Vesiculación, edema pulmonar. Puede ser fatal.	2 000 - 3 000
Serios edemas, estrangulamiento, asfixia y muerte rápida.	5 000 - 10 000
Muerte inmediata.	Arriba de 10 000

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Riesgos

- Ingestión incidental: quemaduras corrosivas en la boca, garganta, esófago, estómago e intestino delgado.

- Inhalación: dependiendo del grado de exposición que y la concentración, el amoníaco puede no ser un riesgo o puede ser un riesgo de muerte.
- Piel: el contacto directo con amoníaco líquido produce quemaduras severas. El amoníaco gaseoso puede producir irritación de la piel siendo más sensible si la piel está húmeda o sudorosa.
- Ojos: puede provocar ceguera momentánea y serios trastornos oculares. Si hay contacto directo del amoníaco en los ojos puede provocar quemaduras graves.
- Consecuencias por exposiciones prolongadas: irritación y ardor de la piel y de las membranas mucosas, dolor de cabeza, salivación, náusea y vómito. Dificultad para respirar, tos con emisión de sangre mucosa. Severos daños pulmonares, edemas. Puede producir la muerte. Ulceración de la córnea y del globo ocular. Los daños pueden llegar a ser permanentes.

4.1.4. Equipo de protección personal

Se debe utilizar equipo de protección personal completo que comprende:

- Equipo de protección respiratoria, como máscaras con filtros apropiados para el gas, equipos de respiración asistida. Uno u otro dependerá de la concentración y del tiempo de exposición, figura 7.

Figura 6. **Máscaras con filtros**



Fuente: Máscara *full face*. <https://co.msasafety.com/Respiradores-Purificadores-de-Aire/M%C3%A1scara-de-Cara-Completa/Ultra-Twin%C2%AE-Full-Facepiece-Respirator/p/000100000300001450>. Consulta: 10 de agosto de 2018.

Figura 7. **Equipo de espiración asistida**



Fuente: *Equipo de autocontenido*. <https://co.msasafety.com/Supplied-Air-Respirators-%28SCBA%29/c/117?isLanding=true>. Consulta: 10 de agosto de 2018.

- Ropa protectora, guantes y botas de goma sintética, traje completo térmico, traje sintético; figura 8.

Figura 8. **Ropa protectora**



Fuente: Traje de protección. <http://www.dupont.mx/productos-y-servicios/prendas-de-proteccion/prendas-acesorios-de-proteccion-contrasustancias-quimicas/marcas/prendas-tychem.html>. Consulta: 10 de agosto de 2018

Figura 9. **Fuentes de descontaminación con duchas y lavajos**



Fuente: Equipo de lavado. <https://www.debra.company/ducha-lavajos-de-acero-inoxidable>. Consulta: 10 de agosto de 2018

4.1.5. Sistemas de alerta

Los sistemas de alerta son mecanismos o dispositivos que se utilizan para la detección de la presencia del amoníaco. Existen dispositivos manuales y automáticos que facilitan la detección temprana de presencia de amoníaco debido a fugas en el sistema.

Los mecanismos manuales o portátiles ayudan en la localización de la fuga.

También, están los equipos automáticos que son dispositivos más sofisticados y dispuestos de sensores que reconocen el gas amoníaco y que de ellos se emiten señales digitales eléctricas que activan los sistemas de alarma visual y auditiva; dependiendo de la tecnología que tengan incorporado puede bloquear válvulas eléctricas y/o apagar sistemas completos de refrigeración preservando la integridad del personal de planta, figuras 12 y 13.

4.1.6. Fugas

¿Qué es una fuga? Es una salida o escape de un líquido o de un gas por una abertura producida accidentalmente en el recipiente que los contiene o por el conducto donde circula.

Las fugas de amoníaco se pueden dar por muchas razones que están relacionadas a la operación, mantenimiento y a eventualidades ajenas a la instalación.

Como se mencionó en el inciso anterior existen mecanismos y dispositivos para detectar fugas, desde los más rudimentarios a través de calor o los más sofisticados con componentes electrónicos.

Si bien es cierto los mecanismos ayuda en la búsqueda y mitigación de las fugas de amoníaco, el mantenimiento de la instalación es factor esencial para prevenir fugas; si estas se presentan hay que trabajar en ubicarlas y mitigarlas.

A continuación, se presentan algunas formas de detección:

- Mechas de azufre: permiten realizar un adecuado y necesario mantenimiento preventivo y correctivo. La mecha, luego de haberla encendido con un cerillo, la combustión en presencia de amoníaco permite localizar visualmente su fuga. Es un insumo muy sencillo, que cualquier persona de mantenimiento puede utilizar en sus rutinas de inspección si se determina presencia de amoníaco o para garantizar el buen estado de la instalación.

La figura 10 muestra la reacción de los vapores de amoníaco cuando combustionan con la llama que se produce con azufre.

Figura 10. **Utilización de mecha de azufre**



Fuente: Fuga de amoníaco.

https://www.youtube.com/results?search_query=mecha+de+azufre+amoniaco+francisco+martinez
ez. Consulta: 20 de septiembre de 2018.

Figura 11. Equipos portátiles electrónicos



Fuente: Detector de fugas portátil. <http://www.coolairinc.com/products.html>. Consulta: 10 de agosto de 2018.

Figura 12. Equipos locales electrónicos



Fuente: Detector de fugas fijo. <http://www.coolairinc.com/products.html>. Consulta: 10 de agosto de 2018.

4.2. Cálculos para el sistema de refrigeración con amoníaco

El calor ganado a través de paredes pisos y techos en un espacio acondicionado para almacenar producto refrigerado o para congelarlo puede variar del tipo de construcción del espacio que se destina para ello.

En este apartado se hará mención de las generalidades que se deben considerar en cálculos de carga térmica para el diseño de espacios refrigerados.

Además del tipo de construcción, se debe considerar la diferencia de temperaturas a las que estará expuesto el producto y el espacio; la temperatura del espacio refrigerado y la temperatura del aire en el ambiente, tomando en cuenta el espesor del aislamiento de paredes, techos, pisos, etc.

A continuación, se presentan algunas definiciones y ecuaciones básicas para cálculos sencillos que pueden orientar en las necesidades frigoríficas que se tengan.

4.2.1. Cálculos de carga

Para obtener datos certeros de los cálculos de carga térmica, como primer paso, se deben de tomar en cuenta conceptos que son factores importantes durante el proceso de cálculo y que no pueden omitirse.

Posterior, se mencionan diferentes definiciones y sus respectivas fórmulas de carga térmica.

4.2.1.1. Transmisión de calor (Q)

La fórmula básica para la transmisión de calor a través de una barrera de transferencia de calor es:

$$Q = U \times A \times TD \quad (5)$$

Donde:

- Q = transferencia de calor, BTU/hr. Es la tasa del flujo de calor, es la cantidad de calor fluyendo después de todos los factores considerados.
- U = coeficiente de transferencia de calor BTU/(Hora)(pie²) (°FTD).
-
- A = área en pies cuadrados.
- TD = temperatura diferencial entre ambos lados de la barrera térmica, por ejemplo, entre el exterior y el interior del espacio refrigerado.

4.2.1.2. Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica, k está definida como la tasa de transferencia de calor que ocurre a través de un material en unidades de BTU/(hr)(pie² de área)(°F TD) por cada pulgada de espesor. Diferentes materiales varían la resistencia del flujo de calor.

Como ejemplo, el calor transferido en 24 horas a través de 2 pies cuadrados de un material de 3 pulgadas de espesor y teniendo un factor de conductividad

térmica de 0,25 con una diferencia de temperatura promedio través de dicho material de 70 °F, puede calcularse como sigue:

$$Q = \frac{0,25 \text{ k} \times 2 \text{ pie}^2 \times 24 \text{ horas} \times 70 \text{ °F TD}}{3 \text{ pulg. Espesor}} = 280 \text{ BTU}$$

Desde que el total de calor transferido por medio de conducción varia directamente con el tiempo, el área, y la diferencia de temperatura, y varia inversamente con el espesor del material.

4.2.1.3. Resistividad térmica (r)

La resistividad está definida como el recíproco de la conductividad térmica, es decir:

$$r = 1/k \quad (6)$$

4.2.1.4. Conductancia (C)

Es similar a la conductividad térmica, excepto por un factor de transferencia de calor para un espesor de material dado, en contraposición de la conductividad térmica, k, cual es un factor por pulgada de espesor. La definición es similar, BTU/(hora)(pie² de área)(°F TD).

4.2.1.5. Resistencia térmica (R)

Es el recíproco de la conductancia, 1/C, en la misma manera la resistividad térmica es el recíproco de la conductividad.

4.2.2. Selección de tuberías

La selección de las tuberías para un sistema de refrigeración determinado es un proceso que no debe pasarse por alto; esto va desde el diámetro de las tuberías, el material y las especificaciones normalizadas para determinado tipo de refrigerante.

Según el tipo de refrigerantes, pueden ser tuberías de acero al carbón, para el caso del amoníaco, y tuberías de cobre para otros tipos de refrigerantes como por ejemplo R-507 y el R-404A.

En el enfoque hacia los sistemas con amoníaco como refrigerante, el tipo de tubería está normado a la norma ANSI – 36.10/19.

En lo que refiere al diámetro y el espesor del tubo, se toma en consideración lo indicado por la IIAR, Amonia Refrigeration Piping Handbook, cuando se relacione a sistemas de refrigeración por amoníaco.

Las tablas presentadas en dicho manual van desde dimensionamiento, pérdidas y flujo del refrigerante.

4.2.2.1. Aislamiento de tuberías

El ahorro y la eficiencia energética de las instalaciones, se consigue con muchos tipos de aplicaciones. Una de ellas, es el aislamiento de tuberías por las que circulan fluidos calientes o fríos procedentes de equipos de generación térmica en instalaciones de calefacción, climatización o refrigeración, etc.

4.2.2.1.1. Materiales y selección

En el mercado, existen una variedad de soluciones para realizar el aislamiento térmico de las tuberías empleadas en las instalaciones.

Generalmente, en instalaciones de refrigeración industrial se utilizan materiales de aislamiento preformado en forma de accesorios de tubería, (codos o tees), o en forma de tubo o media caña o medio tubo en diferentes espesores de pared y longitud.

Entre los materiales más utilizados se puede mencionar la espuma elastomérica que es un aislamiento térmico formado por caucho sintético y con una estructura celular cerrada. Se presenta en forma de media caña y en planchas.

Este material posee una baja conductividad térmica, es flexible y su instalación es rápida.

También, el polietileno es un polímero utilizado en múltiples aplicaciones; una de ellas es la fabricación de cañuelas para aislamiento térmico de tuberías. Al igual que las cañuelas de espuma elastomérica, presentan gran flexibilidad para adecuarse fácilmente al diámetro y trayectoria de la tubería.

Los criterios técnicos más importantes a tener en cuenta en la selección del aislamiento térmico de las tuberías son los siguientes:

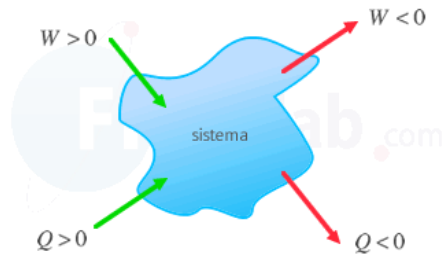
- Conductividad: cuanto menor sea la conductividad, mejor será el aislamiento térmico del material.

- **Espesor:** es especialmente relevante en la elección de un aislamiento para tuberías, es el espesor. Cuanto mayor sea este valor, mejor comportamiento térmico se obtiene.
- **Rango de temperatura:** es importante que el fabricante de las piezas de aislamiento proporcione las temperaturas máximas y mínimas de trabajo a las que pueden ser sometidos los materiales, sin sufrir deterioro.

4.2.3. Básicos de la refrigeración industrial

- **Calor (Q):** es una forma de energía; en términos de termodinámica se define como energía en tránsito como resultado de una diferencia de temperatura.
- **Frío:** es la ausencia de calor.
- **Temperatura (T):** es la intensidad o nivel en el cual el calor puede ser medido.
- **Primera ley de la termodinámica:** la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma, figura 14.

Figura 13. **Primera ley de la Termodinámica**

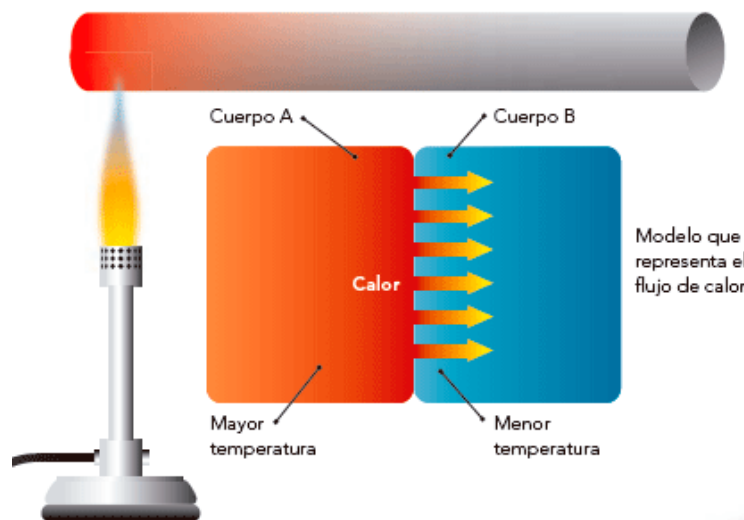


Fuente: *Primera ley*. <https://www.fisicalab.com/apartado/primer-principio-termo#contenidos>.

Consulta: 8 de julio de 2018.

- Segunda ley de la termodinámica: la energía calorífica (calor) se transfiere en forma natural en una sola dirección, de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, figura 15.

Figura 14. **Segunda ley de la Termodinámica**



Fuente: *Segunda ley*. <http://centroderecursos.educarchile.cl/handle/20.500.12246/44650>.

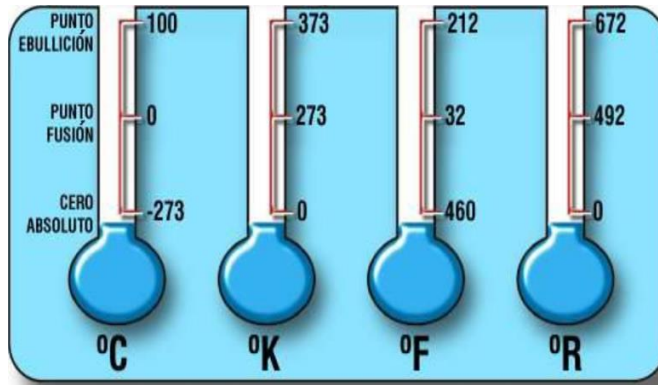
Consulta: 8 de julio de 2018.

- Temperatura: es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo o de un objeto o del ambiente. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío, menor temperatura y caliente, mayor temperatura.

Se muestran en la figura 16 las tres escalas para la medición de la magnitud de la temperatura:

- Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$): escala arbitraria para medir la intensidad del calor en el sistema inglés.
- Centígrados Celsius ($^{\circ}\text{C}$): escala usada para medir la intensidad del calor en el sistema métrico.
- Temperatura absoluta Rankine ($^{\circ}\text{R}$): está basada en el cero absoluto, el cual es -460°F . Teóricamente en este punto no existe la energía calorífica.
- Temperatura absoluta Kelvin (K): prolonga la escala hasta el cero absoluto, una temperatura hipotética caracterizada por una ausencia completa de energía calórica. Es la temperatura en grados centígrados más 273.

Figura 15. **Conceptos básicos**

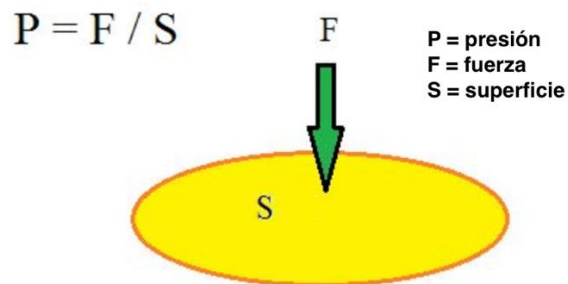


Fuente: *El calor y la temperatura*. <http://cochinamica.blogspot.es/tags/fahrenheit/>.

Consulta: 14 septiembre de 2018.

- Presión: es una fuerza ejercida por unidad de área. La presión de un fluido es la fuerza que ejerce este sobre el área del recipiente que lo contiene, y actúa en todas las direcciones con el mismo valor, figura 17.

Figura 16. **Presión**

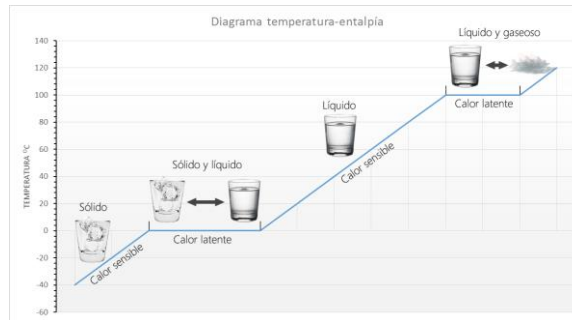


Fuente: *Presión. Definición y ejemplos*. <https://quimicayalgomas.com/fisica/presion-definicion-y-ejemplos/>. Consulta: 8 de julio de 2018.

- Presión manométrica: presión medida sobre la presión atmosférica, siendo la presión que se lee en los manómetros (PSIG).
- Presión de vacío: presión por debajo de la presión atmosférica, comúnmente expresada en pulgadas o mm de mercurio ("Hg o mmHg).
- Presión absoluta: es la presión indicada por el manómetro, más la presión atmosférica (PSIA).
- Presión barométrica (presión atmosférica): fuerza o peso ejercido por la atmósfera. La presión barométrica estándar es considerada como 29,02 pulgadas (760 mm) columna de mercurio o 14,7 lbs/pulg² (1,033 Kg/cm²).
- Volumen: es el espacio ocupado por una sustancia. Se mide en pies³ (pies cúbicos) o mts³ (metros cúbicos).
- Volumen específico: es el espacio en pies cúbicos o metros cúbicos ocupado por una libra o kilogramo de una sustancia determinada.
- Transferencia de calor: es el movimiento de una determinada cantidad de calor de un punto a otro, es también llamado flujo de calor.
- Métodos de transferencia de calor:
 - Conducción: flujo de calor en una sustancia desde una partícula a una partícula adyacente, a través de su mismo material.

- Convección: transmisión de calor causado por la circulación de un líquido o gas como el aire. Si el movimiento es debido a los cambios en densidad causados por cambios de temperatura, es llamada convección natural. Si la circulación es provocada por una bomba o ventilador es llamada convección forzada. El flujo de calor a través de los fluidos es por este método.
- Radiación: los rayos solares son un ejemplo de radiación.
- Calor sensible: es el calor añadido o retirado, que causa un cambio de temperatura en una sustancia, figura 18.
- Calor latente: es el calor añadido o retirado, necesario para cambiar de estado físico de una sustancia, figura 19.
 - Calor latente de fusión: cantidad de calor requerida para lograr el cambio de un sólido a líquido en su punto de fusión. Por ejemplo, para el hielo a 32 °F (0 °C), el calor necesario es aproximadamente 144 BTU.
 - Calor latente de vaporización: cantidad de calor requerido para lograr el cambio de un líquido a vapor en su punto de ebullición. Por ejemplo, para el agua a 212 °F (100 °C) el calor necesario es aproximadamente 970 BTU.

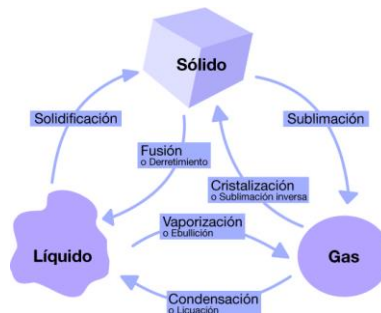
Figura 17. **Diagrama temperatura entalpía**



Fuente: *Latente – Sensible*. http://www.aire-acondicionado.com.es/calor_sensible-y-calor_latente/. Consulta: 10 de agosto de 2018

- Calor específico: la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad, se representa con la letra minúscula 'c'.
- Cambio de estado: es el cambio en las propiedades físicas de una sustancia causada por la adición o sustracción de calor latente.

Figura 18. **Cambio de estado**



Fuente: *Tres estados*. <https://www.fiscalab.com/apartado/primer-principio-termo#contenidos>. Consulta: 8 de julio de 2018.

- Temperatura de saturación: temperatura de ebullición de un líquido, o bien, en la que comienza la condensación de un vapor. A esta temperatura le corresponde una y solo una presión de saturación.
- Presión de saturación: presión en la que una sustancia cambia de estado. A esta presión le corresponde una y solo una temperatura de saturación. En el anexo se muestra la tabla de saturación del amoníaco considerando que es el refrigerante que actualmente se utiliza en la planta de proceso.
- Entalpía: es la cantidad de calor asociado con una sustancia, como una propiedad de esa sustancia a una presión y temperatura determinada.
- Sobrecalentamiento: es el calor contenido en un vapor por arriba de su punto de saturación. Es medido en grados por arriba de la temperatura de saturación.
- Subenfriamiento: es el diferencial de calor en un líquido por abajo del calor contenido en su punto de saturación. Es medido en grados de temperatura por debajo de la de saturación.
- Temperatura de bulbo seco: es la temperatura ambiente (interior o exterior), que indica cualquier termómetro.
- Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura a la cual la evaporación del agua reduce la temperatura del aire. Se mide con un termómetro común, colocándole un paño húmedo en el bulbo.

- Temperatura de punto de rocío: es la temperatura en la cual la humedad de una mezcla de aire-vapor de agua comienza a condensarse.
- Humedad: es la cantidad de vapor de agua mezclado con otros gases en la atmósfera.
- Humedad específica: es el peso del vapor de agua expresado en libras o granos, contenido en una libra o kilogramo de aire seco.
- Humedad relativa: es la relación expresada en porcentaje entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad la cual debería estar presente si este fuera saturado.
- Refrigerante: es el fluido utilizado para producir un efecto de enfriamiento por absorción de calor mientras es vaporizado, aprovechando su calor latente de evaporación.
- Refrigerante secundario (salmuera): es una sustancia utilizada para enfriar indirectamente un objeto. Los más comunes son: el aire, el agua, salmueras, glicol.
- Refrigeración: es el proceso de remover calor de un espacio, donde este no es deseable, y rechazarlo a un espacio donde este no es indeseable.
- Toneladas de refrigeración (TR): es el calor equivalente de derretir 2 000 libras de hielo a 32 °F en 24 horas. Esto es igual a 288 000 BTU/día, 12 000 BTU/hora o 200 BTU/minuto, o lo que representa en el sistema internacional 3 517 Watts.

- Ciclo de la refrigeración: para elaborar una definición de lo que es un ciclo de refrigeración se debe de conocer sus principales componentes:
 - Compresor: mediante el trabajo mecánico proporcionado a través de un motor eléctrico, de combustión o turbina de gas, la función del compresor es aspirar el vapor del refrigerante del evaporador y ayudarlo a entrar en el condensador.
 - Condensador: la misión del condensador es extraerle el calor al refrigerante, este calor corresponde a la suma de los calores extraídos del evaporador y del trabajo de la compresión.
 - Evaporador: es un intercambiador de calor que absorbe el calor del medio donde se encuentra y que a la vez lo enfría.
 - Válvula de expansión: es el elemento del sistema que proporciona un diferencial de presión establecida en las zonas de baja y alta presión del sistema o circuito de refrigeración.

CONCLUSIONES

1. El sistema de refrigeración instalado no tiene la suficiente capacidad frigorífica para atender la demanda del proceso actual; se determina que es necesario incrementar en 170 toneladas de refrigeración la capacidad del sistema a través de cambios de algunos equipos y nuevo diseño de la red de tuberías.
2. En proyectos que involucren sistemas de refrigeración se debe dar la importancia que tipo es el más adecuado; en este caso en particular hay un ahorro importante por medio de eficiencia energética al transformar el sistema actual de una etapa a un sistema de dos etapas.
3. Del sistema de refrigeración se pueden aprovechar algunos de los equipos instalados, adaptándolos en un tipo de configuración diferente pueden proporcionar la carga térmica necesaria por el proceso; esto significa ahorros en futuras inversiones al mejorar el sistema actual.
4. En todo proceso industrial las aplicaciones de la ingeniería mecánica a través del manejo de fórmulas y tablas son pilares fundamentales para el mejoramiento o cambio de procesos porque define con certeza las condiciones mínimas que indican viable o no cualquier proyecto sin importar su dimensión, que logra el objetivo de todo proceso industrial, que sus productos sean rentables a partir de un proceso eficiente.

5. La importancia del conocimiento de manejo seguro de amoníaco como refrigerante debe prevalecer en plantas industriales que lo utilicen en sus sistemas de refrigeración.

RECOMENDACIONES

1. **A la Gerencia de Planta.** Considerar una inversión de Q2 977 330,00 para la compra de equipos nuevos y que en conjunto con equipos existentes lograr cubrir la demanda frigorífica del proceso productivo; se estima un retorno económico en 4 meses, sin considerar la evaluación financiera.
2. **A la Gerencia de Mantenimiento.** Orientar a través de cálculos de ingeniería en la toma de decisiones para la selección de sistemas completos o equipos de refrigeración industrial, como medio comparativo a lo que los proveedores o fabricantes recomiendan.
3. **A la Gerencia de Mantenimiento,** Mantener actualizado los diagramas de flujo de todos los sistemas de refrigeración de la planta y a la vez evaluar a través de cálculos de ingeniería la eficiencia del mismo, dándose oportunidad de mejora e inversión en beneficio de los procesos.
4. **A la Gerencia de Mantenimiento y al Departamento de Recursos Humanos.** Mantener actualizado al personal de mantenimiento, a través de capacitación constante en lo que se refiere a la seguridad industrial, específicamente, en lo concerniente al manejo seguro del amoníaco como refrigerante, bajo la consideración de que un refrigerante con alto grado de toxicidad.

5. **A todos los colaboradores del área de mantenimiento e ingeniería.**
Actualizar constantemente en sus conocimientos sobre refrigeración industrial.

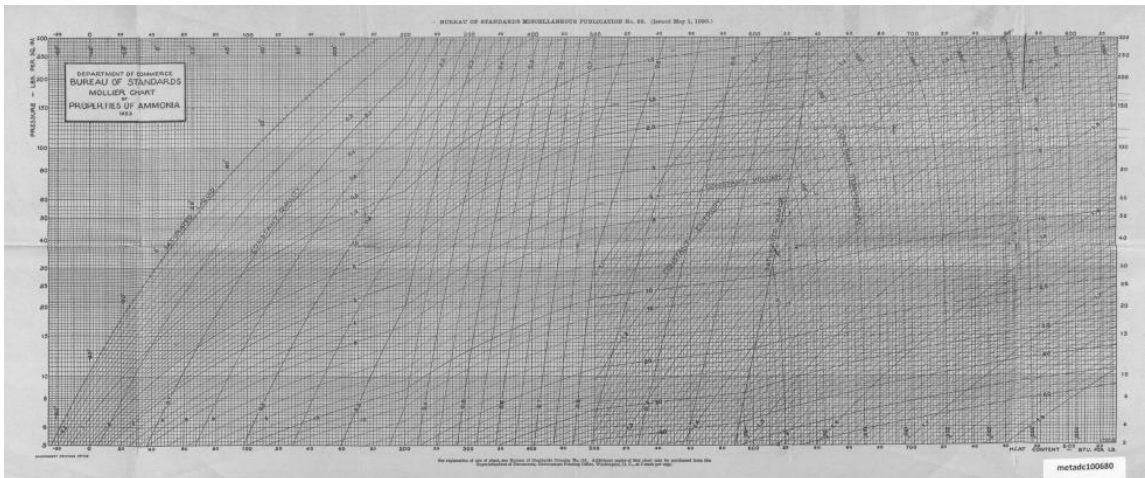
BIBLIOGRAFÍA

1. American Society Of Heating, Refrigerating And A-C Engineers. *Handbook-Refrigeration*. Estados Unidos: ASHRAE, 1998. 926 p.
2. Fundación Wikipedia. *Wikipedia*. Obtenido de *Amoníaco*: [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Amon%C3%ADaco#Refrigeraci.C3.B3n_-_R717> [Consulta: julio 2018].
3. Fundación Wikipedia. *Wikipedia*. Obtenido de *Sistema Frigorífico*: [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_frigor%C3%ADfico> [Consulta: julio 2018].
4. International Institute of Ammonia Refrigeration. *Ammonia Refrigeration Piping Handbook*. Estados Unidos de América: IIAR, 2004. 416 p.
5. Johnson Controls. *Software Coolware*. Obtenido de *Frick Coolware*: [en línea] <www.frickcoolware.com> [Consulta: julio 2018]
6. JTBC. *JBT.com*. Obtenido de *Freezer, Chillers, Refrigeration & Proofers*: [en línea] <<https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/products/freezers-chiller-refrigeration-and-proofers.>> [Consulta: septiembre 2018].
7. OLVERA, Renato. C. *Mundo de HVAC*. Obtenido de *Mundo de HVAC*: [en línea] <[https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/refrigeración-con-amoniaco/.](https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/refrigeración-con-amoniaco/)> [Consulta: julio 2018].

8. RIVAS, Paulino. *Instalaciones y eficiencia energética*. Obtenido de *Ahorro energético con aislamiento térmico para tuberías*: [en línea] <<http://instalacionesyeficienciaenergetica.com/ahorro-energetico-con-aislamiento-termico-para-tuberias>> [Consulta: julio 2018].
9. RODRÍGUEZ, Manuel. *Revista Digital*. Obtenido de *Refrigeración con amoníaco*: [en línea] <<http://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/refrigeracion-con-amoniaco>> [Consulta: mayo 2018].
10. ROMANILLOS, José. Obtenido de *Subenfriamientos de líquido refrigerante*: [en línea] <<https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/frio-refrigeracion-industrial/subenfriamiento-de-liquido-refrigerante.html>> [Consulta: julio 2018].
11. RUBIO, Joel. *Mundo HVAC&R*. Obtenido de *Refrigeración con Amoníaco*: [en línea] <<http://www.mundohvacr.com.mx/muno/2009/03/refrigeracion-con-amoniaco/>> [Consulta: julio 2018].
12. STOECKER, Wilbert. *Industrial Refrigeration Handbook*. Estados Unidos: Mc Graw Hill, 1998. 689 p.
13. Vilter Manufacturing Corp. *Refrigeration Piping Data Manual*. Milwaukee: Vilter, 1992. 88 p.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de Mollier del amoníaco



Fuente: Department of Commerce Bureau of Standards United States. *Diagrama de Mollier para el amoníaco*. p 3.

Anexo 2. Propiedades termodinámicas del amoníaco refrigerante de -50 °F a -1 °F

TABLE 5
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF REFRIGERANT 717 (AMMONIA)

Temp. - °F t	Pressure - Lb. per Sq. In.		Volume - Cu. Ft. per Lb.		Density - Lb. per Cu. Ft.		Enthalpy - Btu per Lb.			Entropy - Btu per (Lb.) (°R)		Temp. - °F t
	Absolute P	Gage p	Liquid v _f	Vapor v _g	Liquid l/v _f	Vapor l/v _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapor h _g	Liquid s _f	Vapor s _g	
-60	5.55	18.6*	0.02278	44.73	43.91	0.02235	-21.2	610.8	589.6	-0.0517	1.4769	-60
-59	5.74	18.2*		43.37		.02306	-20.1	610.1	590.0	- .0490	1.4741	-59
-58	5.93	17.8*		42.05		.02378	-19.1	609.5	590.4	- .0464	1.4713	-58
-57	6.13	17.4*		40.79		.02452	-18.0	608.8	590.8	- .0438	1.4686	-57
-56	6.33	17.0*		39.56		.02528	-17.0	608.2	591.2	- .0412	1.4658	-56
-55	6.54	16.6*	0.02288	38.38	43.70	0.02605	-15.9	607.5	591.6	-0.0386	1.4631	-55
-54	6.75	16.2*		37.24		.02685	-14.8	606.9	592.1	- .0360	1.4604	-54
-53	6.97	15.7*		36.15		.02766	-13.8	606.2	592.4	- .0334	1.4577	-53
-52	7.20	15.3*		35.09		.02850	-12.7	605.6	592.9	- .0307	1.4551	-52
-51	7.43	14.8*		34.06		.02936	-11.7	604.9	593.2	- .0281	1.4524	-51
-50	7.67	14.3*	0.02299	33.08	43.49	0.03023	-10.6	604.3	593.7	-0.0256	1.4497	-50
-49	7.91	13.8*		32.12		.03113	- 9.6	603.6	594.0	- .0230	1.4471	-49
-48	8.16	13.3*		31.20		.03205	- 8.5	602.9	594.4	- .0204	1.4445	-48
-47	8.42	12.8*		30.31		.03299	- 7.4	602.3	594.9	- .0179	1.4419	-47
-46	8.68	12.2*		29.45		0.03395	- 6.4	601.6	595.2	-0.0153	1.4393	-46
-45	8.95	11.7*	0.02310	28.62	43.28	0.03494	- 5.3	600.9	595.6	-0.0127	1.4368	-45
-44	9.23	11.1*		27.82		.03595	- 4.3	600.3	596.0	- .0102	1.4342	-44
-43	9.51	10.6*		27.04		.03698	- 3.2	599.6	596.4	- .0076	1.4317	-43
-42	9.81	10.0*		26.29		.03804	- 2.1	598.9	596.8	- .0051	1.4292	-42
-41	10.10	9.3*		25.56		.03912	- 1.1	598.3	597.2	- .0025	1.4267	-41
-40	10.41	8.7*	0.02322	24.86	43.07	0.04022	0.0	597.6	597.6	0.0000	1.4242	-40
-39	10.72	8.1*		24.18		.04135	1.1	596.9	598.0	.0025	1.4217	-39
-38	11.04	7.4*		23.53		.04251	2.1	596.2	598.3	.0051	1.4193	-38
-37	11.37	6.8*		22.89		.04369	3.2	595.5	598.7	.0076	1.4169	-37
-36	11.71	6.1*		22.27		.04489	4.3	594.8	599.1	.0101	1.4144	-36
-35	12.05	5.4*	0.02333	21.68	42.86	0.04613	5.3	594.2	599.5	0.0126	1.4120	-35
-34	12.41	4.7*		21.10		.04739	6.4	593.5	599.9	.0151	1.4096	-34
-33	12.77	3.9*		20.54		.04868	7.4	592.8	600.2	.0176	1.4072	-33
-32	13.14	3.2*		20.00		.04999	8.5	592.1	600.6	.0201	1.4048	-32
-31	13.52	2.4*		19.48		.05134	9.6	591.4	601.0	.0226	1.4025	-31
-30	13.90	1.6*	0.02345	18.97	42.65	0.05271	10.7	590.7	601.4	0.0250	1.4001	-30
-29	14.30	0.8*		18.48		.05411	11.7	590.0	601.7	.0275	1.3978	-29
-28	14.71	0.0		18.00		.05555	12.8	589.3	602.1	.0300	1.3955	-28
-27	15.12	0.4		17.54		.05701	13.9	588.6	602.5	.0325	1.3932	-27
-26	15.55	0.8		17.09		.05850	14.9	587.9	602.8	.0350	1.3909	-26
-25	15.98	1.3	0.02357	16.66	42.44	0.06003	16.0	587.2	603.2	0.0374	1.3886	-25
-24	16.42	1.7		16.24		.06158	17.1	586.5	603.6	.0399	1.3863	-24
-23	16.88	2.2		15.83		.06317	18.1	585.8	603.9	.0423	1.3840	-23
-22	17.34	2.6		15.43		.06479	19.2	585.1	604.3	.0448	1.3818	-22
-21	17.81	3.1		15.05		.06644	20.3	584.3	604.6	.0472	1.3796	-21
-20	18.30	3.6	0.02369	14.68	42.22	0.06813	21.4	583.6	605.0	0.0497	1.3774	-20
-19	18.79	4.1		14.32		.06985	22.4	582.9	605.3	.0521	1.3752	-19
-18	19.30	4.6		13.97		.07161	23.5	582.2	605.7	.0545	1.3729	-18
-17	19.81	5.1		13.62		.07340	24.6	581.5	606.1	.0570	1.3708	-17
-16	20.34	5.6		13.29		.07522	25.6	580.8	606.4	.0594	1.3686	-16
-15	20.88	6.2	0.02381	12.97	42.00	0.07709	26.7	580.0	606.7	0.0618	1.3664	-15
-14	21.43	6.7		12.66		.07898	27.8	579.3	607.1	.0642	1.3643	-14
-13	21.99	7.3		12.36		.08092	28.9	578.6	607.5	.0666	1.3621	-13
-12	22.56	7.9		12.06		.08289	30.0	577.8	607.8	.0690	1.3600	-12
-11	23.15	8.5		11.78		.08490	31.0	577.1	608.1	.0714	1.3579	-11
-10	23.74	9.0	0.02393	11.50	41.78	0.08695	32.1	576.4	608.5	0.0738	1.3558	-10
- 9	24.35	9.7		11.23		.08904	33.2	575.6	608.8	.0762	1.3537	- 9
- 8	24.97	10.3		10.97		.09117	34.3	574.9	609.2	.0786	1.3516	- 8
- 7	25.61	10.9		10.71		.09334	35.4	574.1	609.5	.0809	1.3495	- 7
- 6	26.26	11.6		10.47		.09555	36.4	573.4	609.8	.0833	1.3474	- 6
- 5	26.92	12.2	0.02406	10.23	41.56	0.09780	37.5	572.6	610.1	0.0857	1.3454	- 5
- 4	27.59	12.9		9.991		.1001	38.6	571.9	610.5	.0880	1.3433	- 4
- 3	28.28	13.6		9.763		.1024	39.7	571.1	610.8	.0904	1.3413	- 3
- 2	28.98	14.3		9.541		.1048	40.7	570.4	611.1	.0928	1.3393	- 2
- 1	29.69	15.0		9.326		.1072	41.8	569.6	611.4	.0951	1.3372	- 1

* inches of mercury below one atmosphere



Fuente: Vilter Manufacturing Corp. Refrigeration piping data manual. p. 19.

Anexo 3. Propiedades termodinámicas del amoníaco refrigerante de 0 °F a 50 °F

TABLE 5 (Continued)
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF REFRIGERANT 717 (AMMONIA)

Temp. – ° F	Pressure – Lb. per Sq. In.		Volume – Cu. Ft. per Lb.		Density – Lb. per Cu. Ft.		Enthalpy – Btu per Lb.			Entropy – Btu per (Lb.) (° R)		Temp. – ° F
	Absolute P	Gage P	Liquid v _l	Vapor v _g	Liquid 1/v _l	Vapor 1/v _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapor h _g	Liquid s _f	Vapor s _g	
0	30.42	15.7	0.02419	9.116	41.34	0.1097	42.9	568.9	611.8	0.0975	1.3352	0
1	31.16	16.5		8.912		.1122	44.0	568.1	612.1	.0998	1.3352	1
2	31.92	17.2		8.714		.1148	45.1	567.3	612.4	.1022	1.3312	2
3	32.69	18.0		8.521		.1174	46.2	566.5	612.7	.1045	1.3292	3
4	33.47	18.8		8.333		.1200	47.2	565.8	613.0	.1069	1.3273	4
5	34.27	19.6	0.02432	8.150	41.11	0.1227	48.3	565.0	613.3	0.1092	1.3253	5
6	35.09	20.4		7.971		.1254	49.4	564.2	613.5	.1115	1.3234	6
7	35.92	21.2		7.798		.1282	50.5	563.4	613.9	.1138	1.3214	7
8	36.77	22.1		7.629		.1311	51.6	562.7	614.3	.1162	1.3195	8
9	37.63	22.9		7.464		.1340	52.7	561.9	614.6	.1185	1.3176	9
10	38.51	23.8	0.02446	7.304	40.89	0.1369	53.8	561.1	614.9	0.1208	1.3157	10
11	39.40	24.7		7.148		.1399	54.9	560.3	615.2	.1231	1.3137	11
12	40.31	25.6		6.996		.1429	56.0	559.5	615.5	.1254	1.3118	12
13	41.24	26.5		6.847		.1460	57.1	558.7	615.8	.1277	1.3099	13
14	42.18	27.5		6.703		.1492	58.2	557.9	616.1	.1300	1.3081	14
15	43.14	28.4	0.02460	6.562	40.66	0.1524	59.2	557.1	616.3	0.1323	1.3062	15
16	44.12	29.4		6.425		.1556	60.3	556.3	616.6	.1346	1.3043	16
17	45.12	30.4		6.291		.1590	61.4	555.5	616.9	.1369	1.3025	17
18	46.13	31.4		6.161		.1623	62.5	554.7	617.2	.1392	1.3006	18
19	47.16	32.5		6.034		0.1657	63.6	553.9	617.5	0.1415	1.2988	19
20	48.21	33.5	0.02474	5.910	40.43	0.1692	64.7	553.1	617.8	0.1437	1.2969	20
21	49.28	34.6		5.789		.1728	65.8	552.2	618.0	.1460	1.2951	21
22	50.36	35.7		5.671		.1763	66.9	551.4	618.3	.1483	1.2933	22
23	51.47	36.8		5.556		.1800	68.0	550.6	618.6	.1505	1.2915	23
24	52.59	37.9		5.443		.1837	69.1	549.8	618.9	.1528	1.2897	24
25	53.73	39.0	0.02488	5.334	40.20	0.1875	70.2	548.9	619.1	0.1551	1.2879	25
26	54.90	40.2		5.227		.1913	71.3	548.1	619.4	.1573	1.2861	26
27	56.08	41.4		5.123		.1952	72.4	547.3	619.7	.1596	1.2843	27
28	57.28	42.6		5.021		.1992	73.5	546.4	619.9	.1618	1.2825	28
29	58.50	43.8		4.922		.2032	74.6	545.6	620.2	.1641	1.2808	29
30	59.74	45.0	0.02503	4.825	39.96	0.2073	75.7	544.8	620.5	0.1663	1.2790	30
31	61.00	46.3		4.730		.2114	76.8	543.9	620.7	.1686	1.2773	31
32	62.29	47.6		4.637		.2156	77.9	543.1	621.0	.1708	1.2755	32
33	63.59	48.9		4.547		.2199	79.0	542.2	621.2	.1730	1.2738	33
34	64.91	50.2		4.459		.2243	80.1	541.4	621.5	.1753	1.2721	34
35	66.26	51.6	0.02518	4.373	39.72	0.2287	81.2	540.5	621.7	0.1775	1.2704	35
36	67.63	52.9		4.289		.2332	82.3	539.7	622.0	.1797	1.2686	36
37	69.02	54.3		4.207		.2377	83.4	538.8	622.2	.1819	1.2669	37
38	70.43	55.7		4.126		.2423	84.6	537.9	622.5	.1841	1.2652	38
39	71.87	57.2		4.048		.2470	85.7	537.0	622.7	.1863	1.2635	39
40	73.32	58.6	0.02533	3.971	39.49	0.2518	86.8	536.2	623.0	0.1885	1.2618	40
41	74.80	60.1		3.897		.2566	87.9	535.3	623.2	.1908	1.2602	41
42	76.31	61.6		3.823		.2616	89.0	534.4	623.4	.1930	1.2585	42
43	77.83	63.1		3.752		.2665	90.1	533.6	623.7	.1952	1.2568	43
44	79.38	64.7		3.682		.2716	91.2	532.7	623.9	.1974	1.2552	44
45	80.96	66.3	0.02548	3.614	39.24	0.2767	92.3	531.8	624.1	0.1996	1.2535	45
46	82.55	67.9		3.547		.2819	93.5	530.9	624.4	.2018	1.2519	46
47	84.18	69.5		3.481		.2872	94.6	530.0	624.6	.2040	1.2502	47
48	85.82	71.1		3.418		.2926	95.7	529.1	624.8	.2062	1.2486	48
49	87.49	72.8		3.355		.2981	96.8	528.2	625.0	.2083	1.2469	49
50	89.19	74.5	0.02564	3.294	39.00	0.3036	97.9	527.3	625.2	0.2105	1.2453	50
51	90.91	76.2		3.234		.3092	99.1	526.4	625.5	.2127	1.2437	51
52	92.66	78.0		3.176		.3149	100.2	525.5	625.7	.2149	1.2421	52
53	94.43	79.7		3.119		.3207	101.3	524.6	625.9	.2171	1.2405	53
54	96.23	81.5		3.063		.3265	102.4	523.7	626.1	.2192	1.2389	54
55	98.06	83.4	0.02581	3.008	38.75	0.3325	103.5	522.8	626.3	0.2214	1.2373	55
56	99.91	85.2		2.954		.3385	104.7	521.8	626.5	.2236	1.2357	56
57	101.8	87.1		2.902		.3446	105.8	520.9	626.7	.2257	1.2341	57
58	103.7	89.0		2.851		.3508	106.9	520.0	626.9	.2279	1.2325	58
59	105.6	90.9		2.800		.3571	108.1	519.0	627.1	.2301	1.2310	59



Anexo 4. **Propiedades termodinámicas del amoníaco refrigerante de 60 °F a 120 °F**

**TABLE 5 (Continued)
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF REFRIGERANT 717 (AMMONIA)**

Temp. – °F t	Pressure – Lb. per Sq. In.		Volume – Cu. Ft. per Lb.		Density – Lb. per Cu. Ft.		Enthalpy – Btu per Lb.			Entropy – Btu per (Lb.) (°R)		Temp. – °F t
	Absolute P	Gage p	Liquid v _f	Vapor v _g	Liquid 1/v _f	Vapor 1/v _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapor h _g	Liquid s _f	Vapor s _g	
60	107.6	92.9	0.02597	2.751	38.50	0.3635	109.2	518.1	627.3	0.2322	1.2294	60
61	109.6	94.9		2.703		.3700	110.3	517.2	627.5	.2344	1.2278	61
62	111.6	96.9		2.656		.3765	111.5	516.2	627.7	.2365	1.2262	62
63	113.6	98.9		2.610		.3832	112.6	515.3	627.9	.2387	1.2247	63
64	115.7	101.0		2.565		.3899	113.7	514.3	628.0	.2408	1.2231	64
65	117.8	103.1	0.02614	2.520	38.25	0.3968	114.8	513.4	628.2	0.2430	1.2216	65
66	120.0	105.3		2.477		.4037	116.0	512.4	628.4	.2451	1.2201	66
67	122.1	107.4		2.435		.4108	117.1	511.5	628.5	.2473	1.2186	67
68	124.3	109.6		2.393		.4179	118.3	510.5	628.8	.2494	1.2170	68
69	126.5	111.8		2.352		.4251	119.4	509.5	628.9	.2515	1.2155	69
70	128.8	114.1	0.02632	2.312	38.00	0.4325	120.5	508.6	629.1	0.2537	1.2140	70
71	131.1	116.4		2.273		.4399	121.7	507.6	629.3	.2558	1.2125	71
72	133.4	118.7		2.235		.4474	122.8	506.6	629.4	.2579	1.2110	72
73	135.7	121.0		2.197		.4551	124.0	505.6	629.6	.2601	1.2095	73
74	138.1	123.4		2.161		.4628	125.1	504.7	629.8	.2622	1.2080	74
75	140.5	125.8	0.02650	2.125	37.74	0.4707	126.2	503.7	629.9	0.2643	1.2065	75
76	143.0	128.3		2.089		.4786	127.4	502.7	630.1	.2664	1.2050	76
77	145.4	130.7		2.055		.4867	128.5	501.7	630.2	.2685	1.2035	77
78	147.9	133.2		2.021		.4949	129.7	500.7	630.4	.2706	1.2020	78
79	150.5	135.8		1.988		.5031	130.8	499.7	630.5	.2728	1.2006	79
80	153.0	138.3	0.02668	1.955	37.48	0.5115	132.0	498.7	630.7	0.2749	1.1991	80
81	155.6	140.9		1.923		.5200	133.1	497.7	630.8	.2769	1.1976	81
82	158.3	143.6		1.892		.5287	134.3	496.7	631.0	.2791	1.1962	82
83	161.0	146.3		1.861		.5374	135.4	495.7	631.1	.2812	1.1947	83
84	163.7	149.0		1.831		.5462	136.6	494.7	631.3	0.2833	1.1933	84
85	166.4	151.7	0.02687	1.801	37.21	0.5552	137.8	493.6	631.4	0.2854	1.1918	85
86	169.2	154.5		1.772		.5643	138.9	492.6	631.5	.2875	1.1904	86
87	172.0	157.3		1.744		.5738	140.1	491.6	631.7	.2895	1.1889	87
88	174.8	160.1		1.716		.5828	141.2	490.6	631.8	.2917	1.1875	88
89	177.7	163.0		1.688		.5923	142.4	489.5	631.9	.2937	1.1860	89
90	180.6	165.9	0.02707	1.661	36.94	0.6019	143.5	488.5	632.0	0.2958	1.1846	90
91	183.6	168.9		1.635		.6116	144.7	487.4	632.1	.2979	1.1832	91
92	186.6	171.9		1.609		.6214	145.8	486.4	632.2	.3000	1.1818	92
93	189.6	174.9		1.584		.6314	147.0	485.3	632.3	.3021	1.1804	93
94	192.7	178.0		1.559		.6415	148.2	484.3	632.5	.3041	1.1789	94
95	195.8	181.1	0.02727	1.534	36.67	0.6517	149.4	483.2	632.6	0.3062	1.1775	95
96	198.9	184.2		1.510		.6620	150.5	482.1	632.6	.3083	1.1761	96
97	202.1	187.4		1.487		.6725	151.7	481.1	632.8	.3104	1.1747	97
98	205.3	190.6		1.464		.6832	152.9	480.0	632.9	.3125	1.1733	98
99	208.6	193.9		1.441		.6939	154.0	478.9	632.9	.3145	1.1719	99
100	211.9	197.2	0.02748	1.419	36.40	0.7048	155.2	477.8	633.0	0.3166	1.1705	100
101	215.2	200.5		1.397		.7159	156.4	476.7	633.1	.3187	1.1691	101
102	218.6	203.9		1.375		.7270	157.6	475.6	633.2	.3207	1.1677	102
103	222.0	207.3		1.354		.7384	158.7	474.6	633.3	.3228	1.1663	103
104	225.4	210.7		1.334		.7498	159.9	473.5	633.4	.3248	1.1649	104
105	228.9	214.2	0.02769	1.313	36.12	0.7615	161.1	472.3	633.4	0.3269	1.1635	105
106	232.5	217.8		1.293		.7732	162.3	471.2	633.5	.3289	1.1621	106
107	236.0	221.3		1.274		.7852	163.5	470.1	633.6	.3310	1.1607	107
108	239.7	225.0		1.254		.7972	164.6	469.0	633.6	.3330	1.1593	108
109	243.3	228.6		1.235		.8095	165.8	467.9	633.7	.3351	1.1580	109
110	247.0	232.3	0.02790	1.217	35.84	0.8219	167.0	466.7	633.7	0.3372	1.1566	110
111	250.8	236.1		1.198		.8344	168.2	465.6	633.8	.3392	1.1552	111
112	254.5	239.8		1.180		.8471	169.4	464.4	633.8	.3413	1.1538	112
113	258.4	243.7		1.163		.8600	170.6	463.3	633.9	.3433	1.1524	113
114	262.2	247.5		1.145		.8730	171.8	462.1	633.9	.3453	1.1510	114
115	266.2	251.5	0.02813	1.128	35.55	0.8862	173.0	460.9	633.9	0.3474	1.1497	115
116	270.1	255.4		1.112		.8996	174.2	459.8	634.0	.3495	1.1483	116
117	274.1	259.4		1.095		.9132	175.4	458.6	634.0	.3515	1.1469	117
118	278.2	263.5		1.079		.9269	176.6	457.4	634.0	.3535	1.1455	118
119	282.3	267.6		1.063		.9408	177.8	456.2	634.0	.3555	1.1441	119
120	286.4	271.7	0.02836	1.047	35.26	0.9549	179.0	455.0	634.0	0.3576	1.1427	120



Fuente: Vilter Manufacturing Corp. *Refrigeration piping data manual*. p. 21.

Anexo 5. **Tabla de calores específicos de los alimentos**

Product	Water content % mass	High freezing point °C (°F)	Specific heat kJ/kg·K (Btu/lb·°F)		Latent heat of freezing kJ/kg (Btu/lb)
			Above freezing	Below freezing	
Apples	84	-1.1 (30)	3.78 (0.902)	1.90 (0.453)	281 (121)
Chicken	74	-2.8 (27)	3.53 (0.843)	1.77 (0.423)	248 (107)
Peas	74	-0.6 (31)	3.53 (0.792)	1.77 (0.423)	248 (107)
Ham	56	-1.7 (29)	3.08 (0.735)	1.55 (0.368)	188 (81)
Salmon	64	-2.2 (28)	3.28 (0.783)	1.65 (0.392)	214 (92)
Sirloin beef	56		3.08 (0.735)	1.55 (0.368)	188 (81)
Strawberries	90	-0.8 (31)	3.93 (0.938)	1.97 (0.471)	302 (130)

Fuente: STOECKER, Wilbert. *Industrial Refrigeration Handbook*. p. 591.

Anexo 6. **Tabla de las capacidades de flujo en las tuberías para la conducción de amoníaco en los sistema de refrigeración**

Tables

**Tables 1-2A to 1-5A
Suction and Discharge Line Capacity (tons)**

Service	Temp. (°F)	Press. (psig or (in. Hg))	Pipe Size (NPS)																
			1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Table 1-2A Suction Line Low Stage	-10	9.0	4.8	3.9	12.5	24.8	35.8	56.8	101	162	239	436	687	1000	1240	1660	2160	2700	4010
	-20	3.5	4.0	7.4	10.4	20.6	30.0	47.5	84.3	136	200	365	575	840	1030	1390	1810	2260	3360
	-30	(1.7)	3.3	6.1	8.6	17.1	24.8	39.4	69.9	113	166	302	477	696	857	1150	1500	1870	2780
	-40	(0.8)	2.7	5.0	7.1	14.0	20.4	32.3	57.4	92.4	136	248	391	572	704	945	1230	1540	2290
	-50	(14.4)	2.2	4.2	5.8	11.5	16.8	26.6	47.3	76.2	112	204	323	471	580	779	1010	1270	1880
	-60	(16.7)	1.8	3.3	4.7	9.3	13.5	21.4	38.0	61.2	90.2	164	259	379	466	620	815	1020	1510
Table 1-3A Discharge Low Stage	150	33.4	4.7	8.8	12.3	24.4	35.5	56.2	99.8	161	237	432	681	994	1220	1640	2140	2680	3980
	40	58.4	9.0	16.6	23.3	46.0	67.1	108	189	304	447	815	1290	1880	2310	3100	4040	5060	7510
Table 1-4A Suction Line High Stage	30	44.9	7.8	14.4	20.2	40.0	58.2	92.2	164	264	389	708	1120	1630	2010	2700	3510	4390	6520
	20	33.4	6.7	12.3	17.3	34.3	49.9	79.0	140	226	333	607	957	1400	1720	2310	3010	3760	5590
	10	23.7	5.7	10.6	14.9	29.4	42.8	67.7	120	194	285	520	820	1200	1470	1980	2580	3230	4790
Table 1-5A Discharge High Stage	0	15.6	4.9	9.0	12.6	25.0	36.4	57.6	102	165	243	442	697	1020	1250	1680	2190	2740	4070
	75	181	10.7	19.8	27.8	54.8	79.9	127	225	362	533	971	1530	2240	2750	3700	4810	6030	8950

NOTES:

1. The basis for each of the above tables is detailed in Table 1-1 on page 1-2, and stated in the text on page 1-4. The table values must be adjusted for actual conditions.
2. To adjust for pipe cost, power cost, hours of use, and years of life, use Equation 1-1 in the text, page 1-4.
3. For line capacity in pounds per minute and the associated temperature loss and pressure loss, see the corresponding tables (e.g., for Table 1-2A, see Tables 1-2B, 1-2C, and 1-2D).

Fuente: International Institute of Ammonia Refrigeration. *Piping hand book*. p. 25.

Anexo 7. Tabla de las capacidades de flujo en las tuberías para la conducción del amoníaco en los sistemas de refrigeración

Chapter 1 (Revised 2004), Pipe Sizing

**Table 1-6A
Overfeed Return Line Vapor Capacity (tons)**

Service	Temp. (°F)	Press. psig or (in. Hg)	Pipe Size (NPS)																
			Pipe Schedule																
			1	1½	2	2½	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24	
	40	58.4	5.35	9.90	13.9	27.5	40.0	63.4	113	181	267	487	768	1120	1380	1850	2410	3020	4480
	30	44.9	4.79	8.86	12.5	24.6	35.8	56.7	101	162	239	436	667	1000	1240	1660	2160	2700	4010
	20	33.4	4.22	7.81	11.0	21.7	31.6	50.0	88.8	143	211	384	606	885	1090	1460	1900	2380	3540
	10	23.7	3.74	6.91	9.71	19.2	27.9	44.2	78.5	127	188	340	536	792	963	1290	1680	2110	3130
Table 1-6A Overfeed Return Lines	0	15.6	3.27	6.06	8.51	16.8	24.5	38.8	69.9	111	163	298	470	686	844	1130	1480	1850	2740
	-10	9.0	2.89	5.34	7.50	14.8	21.6	34.2	60.7	97.8	144	262	414	604	744	999	1300	1630	2420
	-20	3.5	2.49	4.60	6.47	12.8	18.6	29.5	52.3	84.3	124	226	357	521	642	862	1120	1400	2090
	-30	(1.77)	2.13	3.84	5.54	10.9	15.9	25.2	44.8	72.1	106	194	305	446	549	737	960	1200	1780
	-40	(3.87)	1.80	3.33	4.68	9.25	13.5	21.3	37.9	61.0	89.9	164	258	377	465	624	812	1020	1510
	-50	(14.47)	1.53	2.83	3.98	7.86	11.4	18.1	32.2	51.9	76.4	139	220	321	395	530	690	864	1280
	-60	(18.77)	1.27	2.35	3.31	6.53	9.51	15.1	26.7	43.1	63.5	116	182	266	328	440	573	718	1070

NOTES:

1. The basis for the above table is detailed in Table 1-1 on page 1-2, and stated in the text on page 1-4. **The table values must be adjusted for actual conditions.**
2. To adjust for pipe cost, power cost, hours of use, and years of life, use Equation 1-1 in the text, page 1-4.
3. The capacities in the table are recommendations based on a circulating number (n) of 4, where $n = 1/x$, and x = exit vapor quality. To adjust for different circulating number, use Equation 1-6 in the text, page 1-7.
4. For line capacity of overfeed return risers, see Tables 1-18A and B. For temperature loss in risers, see Table 1-6C, note 5.
5. For line capacity of horizontal pipes in pounds per minute and the associated temperature loss and pressure loss, see Tables 1-6B, 1-6C, and 1-6D.

Fuente: International Institute of Ammonia Refrigeration. *Piping hand book*. p. 26.

Anexo 8. **Tabla de las capacidades de flujo en las tuberías para la conducción del amoníaco en los sistema de refrigeración**

Tables 1-7A to 1-13
Liquid Piping Capacities (tons and gpm)

Service		Pipe Size (NPS)														
		Pipe Schedule														
		½	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8	10	12	
	80	80	80	80	80	40	40	40	40	40	40	40	40	Std		
Table 1-7A	Condenser Drain, Open Channel Flow	tons	6.0	14.5	24.0	50.0	77.0	140	220	375	740	1,320	2,030	4,200	6,960	11,000
Table 1-7B	Condenser Drain, Full Liquid Flow	tons	9.0	21.8	36.0	75.0	116	210	330	563	1,110	1,960	3,040	6,300	10,500	16,500
Table 1-8	High Pressure Liquid Main	tons	31.6	58.4	97.1	179	254	496	729	1,160	2,050	3,300	4,890	8,690	14,000	20,600
Table 1-9A	Pump Discharge	gpm	4.0	7.3	12.7	23.4	33.0	65.4	95.3	150	266	429	630	1,130	1,810	2,850
Table 1-9B	Pump Discharge	tons ^a	15.3	29.4	51.1	94.2	133	264	384	604	1,070	1,730	2,540	4,560	7,280	10,700
Table 1-10	High Pressure Liquid to a Single Device	tons	31.7	55.8	92.8	171	244	479	705	1,120	1,990	3,220	4,780	8,510	13,800	20,300
Table 1-11A	Pumped Liquid Line to a Single Device	gpm	2.2	4.0	6.7	12.0	18.0	34.0	50.0	80.0	141	227	335	596	960	1,410
Table 1-11B	Pumped Liquid Line to a Single Device	tons ^a	8.8	16.3	27.0	50.0	70.0	139	202	320	565	911	1,350	2,390	3,860	5,670
Table 1-12A	Pump Suction	gpm	2.1	4.0	6.9	12.8	18.1	35.8	52.2	82.0	146	235	345	619	989	1,450
Table 1-12B	Pump Suction	tons ^a	8.4	16.1	28.0	51.6	72.9	144	210	331	588	948	1,390	2,500	3,990	5,850
Table 1-13	Defrost Relief Line	tons ^{b,c}	10.7	19.8	33.0	59.0	81.0	154	220	339	584	918	1,320	2,300	3,620	5,190

NOTES:

- Circulating n=4, with -10°F liquid: for n=5, table tons*0.8; for n=3, table tons*1.33; for n=2, table tons*2.0.
- Based on a velocity of 4 FPS and a nominal coil capacity based on a 10° T.D.
- Line sizing applies to section from coil to regulator. Downstream of the regulator, specify piping two sizes larger than the inlet pipe.

NOTE: The basis for each of the above tables is detailed on pages 1-8 and 1-9.

Fuente: International Institute of Ammonia Refrigeration. *Piping hand book*. p. 33.

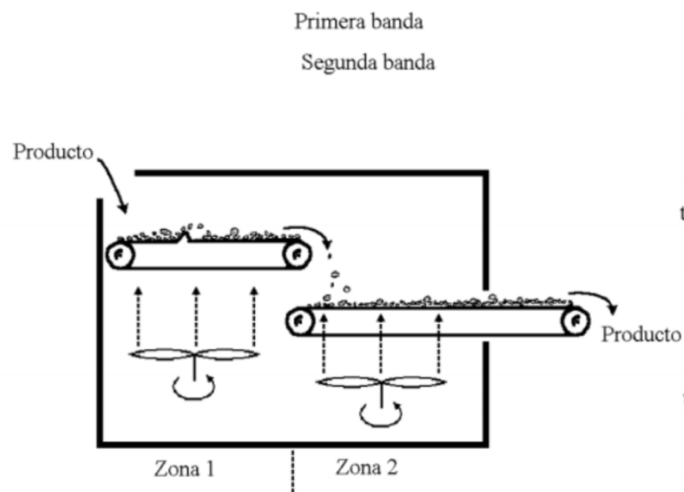
Anexo 9. Tipos de túnel de congelación tipo ráfaga

Un túnel de congelación es la combinación de un cuarto frío con sus respectivos evaporadores o intercambiadores y un transportador que tiene como función el transportar en todo el interior el producto para su congelación. Siendo este un método de congelación por aire.

Dentro del cuarto frío está recirculando aire frío a temperatura de evaporación de refrigerante de -40°F (-40°C) y a una alta velocidad 4486 pies/minuto (1367 metros/minuto), razón por la que se le denomina tipo ráfaga. El aire incide constantemente sobre el producto o por debajo de él.

Según sea la disposición de la banda dentro del cuarto frío se pueden encontrar:

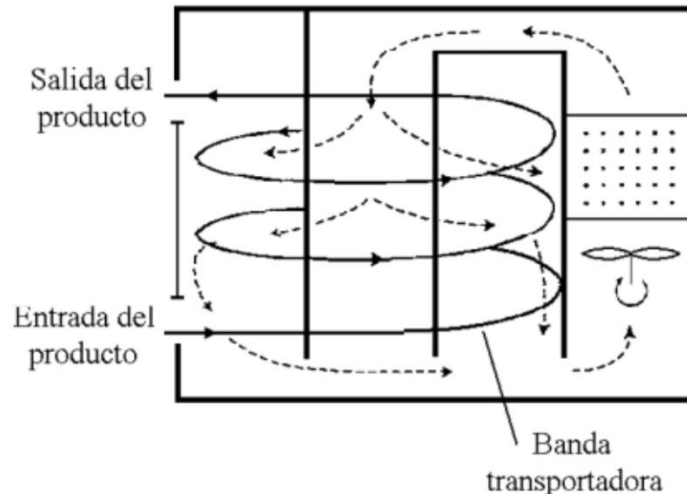
Figura A1. Túnel recto de una o varias etapas



Fuente: *Túnel varias etapas*. <https://www.tsia.udlap.mx>. Consulta: 8 de julio de 2018.

Continuación del anexo 9.

Figura A2. **Túnel de espiral**



Fuente: *Túnel de espiral*. <https://www.tsia.udlap.mx>. Consulta: 8 de julio de 2018.

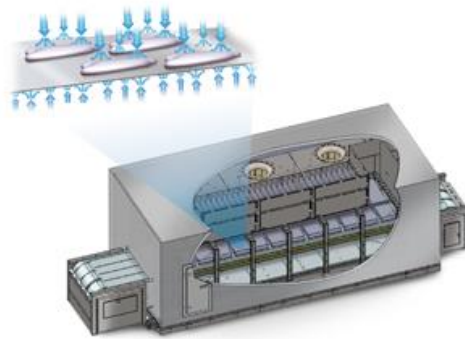
Las bandas de los transportadores son construidas generalmente por materiales de acero inoxidable o plásticos, estas suelen tener una configuración de mallado el cual permite el paso del aire frío a través de ellas.

Generalmente este tipo de túneles se utilizan para la congelación de piezas sensibles, pequeñas o grandes, donde se espera que no pierdan la forma ni que se quiebren a la salida del túnel debido a la dureza adquirida luego de la congelación.

Las capacidades de congelación dependen de las necesidades de la planta con especificación que es condicionada al producto en como ingresa y como

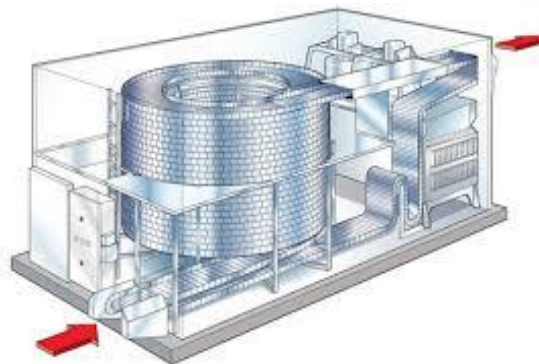
debe de salir, es como se calculan y diseñan de acuerdo con los alcances de los fabricantes

Figura A3. **Túnel recto**



Fuente: *Túnel recto*. <https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/products/freezers-chillers-refrigeration-and-proofers>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

Figura A4. **Túnel de espiral**



Fuente: *Túnel espiral autosoportado*. <https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/products/freezers-chillers-refrigeration-and-proofers>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

