

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN CONGELADOR DE MAÍZ ENTERO
CON CAPACIDAD DE 100 kg/hr**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:**

FREDDY MARTIN LUDEÑA QUIÑONES

ASESOR: Ing. Enrique Barrantes Peña

Lima, Diciembre de 2013

RESUMEN

En el sector agro-industrial del país, la exportación del maíz amiláceo (choclo) está caracterizado por un nivel de exportación pequeño y con una baja intensidad tecnológica en sus procesos, sin embargo es un mercado en continuo crecimiento. Es por ello, que se requiere proporcionar al producto características de conservación y volumen adecuado de exportación, mediante el almacenamiento de producto congelado.

Siendo el propósito de la presente tesis, en el área de energía, el diseño y selección de los componentes de una máquina congeladora de maíz entero para una capacidad de 100 kg/h. Empleando para este propósito las normas de diseño DIN VDI 2221 y 2225; los manuales ASHRAE, “Fundamentals-2009” y “Refrigeration-2006”; conocimientos en refrigeración industrial, transferencia de calor, mecánica de fluidos, resistencia de materiales y electricidad; además, del conocimiento de normas técnicas de dibujo mecánico, utilización de programas CAD y de simulación por el método de elementos finitos.

Obteniendo como resultado un congelador de tipo túnel de congelamiento estático a una temperatura de producto final de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ en su centro térmico, utilizando el refrigerante R-404a, y con dimensiones generales de la máquina de 2.1 x 3 x 3.2 metros de ancho, largo y alto respectivamente. Además, de una carga térmica total del sistema de 10.92 kW y un tiempo de congelamiento de 5.61 h. Siendo, el presupuesto total del equipo de \$ 27 400.00 dólares americanos.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : **DISEÑO DE UN CONGELADOR DE MAÍZ ENTERO CON CAPACIDAD DE 100 kg/hr**

ÁREA : Energía # 332

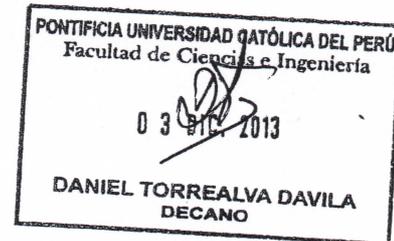
PROPUESTO POR : Freddy Martin Ludeña Quiñones

ASESOR : Enrique José Barrantes Peña

TESISTA : Freddy Martin Ludeña Quiñones

CÓDIGO : 20060258.4

FECHA : 22 de Noviembre de 2013



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Una actividad económica importante en la sierra y costa del país, es la siembra y cosecha del maíz amiláceo (choclo). Caracterizado por un nivel de exportación pequeño y con baja intensidad tecnológica. Sin embargo, dado que es un mercado en continuo crecimiento, se requiere proporcionar al producto características de conservación y volumen adecuado para la exportación. Esto se puede lograr mediante el almacenamiento de producto congelado.

Por ello se propone el presente proyecto con el objetivo de Diseñar un Congelador para choclo entero con capacidad de 100 kg/hr.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO DE UN CONGELADOR DE MAÍZ ENTERO CON
CAPACIDAD DE 100 kg/hr

Introducción

1. Características del proyecto
2. Diseño del sistema
3. Especificaciones Técnicas
4. Presupuesto del Proyecto

Planos

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Ing. Enrique J. Barrantes P.
Asesor







Dedicatoria:

A mis padres, mi hermana y mi tía Albina, quienes vieron y alentaron el desarrollo de este trabajo. Dedicado a ellos, quienes tuvieron la paciencia de formarme y darme un amor incomparable, además del ejemplo de trabajo y actitud hacia el prójimo.

ÍNDICE

Resumen

Lista de símbolos

Introducción

1

CAPITULO 1: Características del proyecto

1.1 Descripción de la materia prima	2
1.1.1 Generalidades, denominación y variedades del maíz	2
1.1.2 Zonas de cultivo y producción	4
1.1.3 Rendimiento promedio	4
1.1.4 Formas de comercialización	5
1.1.5 Características de elaboración y propiedades térmicas	7
1.2 Métodos de congelación	
1.2.1 Congeladores de contacto directo	9
1.2.2 Congeladores de aire forzado	10
1.2.3 Congeladores de inmersión	12
1.2.4 Congeladores por vaporización de líquido o sólido	12
1.3 Refrigerantes	
1.3.1 Componentes halocarbonados	12
1.3.2 Componentes orgánicos misceláneos	13
1.3.3 Compuestos orgánicos cíclicos	13
1.3.4 Compuestos orgánicos no saturados	14
1.3.5 Compuestos inorgánicos	14
1.4 Equipos del sistema de refrigeración	
1.4.1 Compresores	14
1.4.2 Condensadores	15
1.4.3 Dispositivos de expansión	16
1.4.4 Evaporadores	16
1.4.5 Tipos de aislantes	17
1.5 Equipos de operación, mantenimiento, control y seguridad	
1.5.1 Operación y mantenimiento	18
1.5.2 Control de operación	19
1.5.3 Seguridad de operación	20

1.6 Sistema eléctrico	
1.6.1 Conductores eléctricos	21
1.6.2 Canalizaciones eléctricas	21
1.6.3 Elementos de maniobra y protección	21

Referencias del capítulo 1	22
----------------------------	----

CAPITULO 2: Diseño del sistema

2.1 Metodología y concepto solución	
2.1.1 Lista de exigencias	24
2.1.2 Estructura de funciones	26
2.1.3 Concepto solución	27
2.1.4 Valoración técnico – económica	28
2.1.5 Concepto solución óptimo	28

2.2 Sistema térmico	
2.2.1 Propiedades térmicas del producto	29
2.2.2 Tiempo de congelamiento	34
2.2.3 Carga térmica	39
2.2.4 Selección del tipo de refrigerante	44
2.2.5 Selección de componentes principales	45
2.2.6 Selección de componentes secundarios	54

2.3 Sistema estructural	
2.3.1 Estructura soporte	58
2.3.2 Estructura base	69

2.4 Sistema de control	76
------------------------	----

2.5 Sistema eléctrico	
2.5.1 Conductor eléctrico	78
2.5.2 Elementos de maniobra y protección	82

2.6 Diseño final	84
------------------	----

Referencias del capítulo 2	86
----------------------------	----

CAPITULO 3: Especificaciones técnicas

3.1 Componentes principales	87
3.2 Componentes secundarios	89

CAPITULO 4: Presupuesto del proyecto

4.1 Costo de equipos principales	94
4.2 Costo de equipos secundarios	95
4.3 Costo de tuberías y accesorios	95
4.4 Costo de panel aislante	96
4.5 Costo de equipos diseñados	96
4.6 Costo de elementos del circuito eléctrico	96
4.7 Costo total del proyecto	97
Conclusiones	98
Bibliografía	100
Planos	
Anexos	
Anexo A: Metodología de diseño y concepto solución	
Anexo B: Procedimiento de cálculo	
Anexo B.1: Determinación de las propiedades térmicas del producto	
Anexo B.2: Determinación del tiempo de congelación	
Anexo B.3: Determinación de la carga térmica preliminar	
Anexo B.4: Determinación del coeficiente convectivo	
Anexo B.5: Determinación de la carga térmica total	
Anexo B.6: Cálculos estructurales	
Anexo C: Manuales de equipos principales	

Lista de símbolos

A	m^2	Superficie externa de la máquina
A_{ef}	m^2	Área efectiva que atraviesa el flujo de aire
A_p	mm^2	Área transversal del perfil estructural
a_1, a_2	-	Constantes de la falla de pandeo según Tetmajer
Bi	-	Número de Biot
C_l	$kJ/(m^3 K)$	Calor específico volumétrico a la temperatura de ingreso del producto
C_s	$kJ/(m^3 K)$	Calor específico volumétrico a la temperatura de total congelación
c_1	$kJ/(kg °C)$	Calor específico del producto antes de la congelación
c_2	$kJ/(kg °C)$	Calor específico del producto después de la congelación
c_i	$kJ/(kg °C)$	Calor específico de cada constituyente del producto
c_n	$kJ/(kg K)$	Coefficiente de transmisión de calor de la carga interna
$cos\emptyset$	-	Factor de potencia del motor
D	m	Dimensión característica
d	mm	Distancia al punto crítico
E	-	Coefficiente de dimensión equivalente
E'	N/mm^2	Módulo de elasticidad longitudinal del acero ASTM A36
F	%	Ingreso de calor a la cámara por descongelamiento
F_n	N	Fuerza normal
FD	-	Factor de demanda
FS	-	Factor de seguridad
FS_p	-	Factor de seguridad al pandeo
f_v	m^3/h	Flujo volumétrico de aire total de los evaporadores
G_1, G_2, G_3	-	Valores que se obtienen de tablas
G_n	kg	Peso de las diversas piezas y materiales
GWP	-	Potencial de Calentamiento Global
H	kJ/kg	Entalpia del producto a una cierta temperatura
H_1, H_2, H_3, H_4	kJ/kg	Entalpias del ciclo de compresión de vapor
H_f	kJ/kg	Entalpia del producto a la temperatura inicial de congelamiento
h	$W/(m^2 K)$	Coefficiente convectivo
h_i	$kW/(m^2 °C)$	Coefficiente convectivo de la superficie interna de pared
h_o	$kW/(m^2 °C)$	Coefficiente convectivo de la superficie externa de pared
h_{sf}	kJ/kg	Calor latente de cambio de fase
I	A	Intensidad de la corriente de línea
I_D	A	Corriente de diseño
I_N	A	Corriente admisible
I_T	A	Corriente de trabajo de los elementos de maniobra y protección
I_i	mm^4	Momento de inercia en la dirección i
I_x, I_y	mm^4	Momento de inercia en las direcciones x e y
i	mm	Radio de giro del perfil en la dirección que favorece el pandeo
i_x, i_y	mm	Radio de giro en las direcciones x e y
J	$N m$	Momento de inercia polar
K_E	-	Constante que depende del tipo de circuito 3ϕ ó 1ϕ
K_N	-	Factor de corrección por agrupación de conductores
K_{TP}	-	Factor de corrección por temperatura
k	$W/(m K)$	Conductividad térmica del producto

k_a	W/(m K)	Conductividad térmica del aire a la temperatura promedio
k_i	W/(m K)	Conductividad térmica de los constituyentes
k_p	W/(m K)	Conductividad térmica del panel aislante
k_s	W/(m K)	Conductividad térmica del producto totalmente congelado
L	m	Longitud que atraviesa el aire a través del producto
L_c	km	Longitud total del conductor
L_o	kJ/kg	Calor latente de fusión del agua
L_p	m	Longitud efectiva de la columna a pandeo
L_x, L_y	mm	Dimensión en la dirección x e y
$M_{f,i}$	N mm	Momento flector en la dirección i
$M_{t,i}$	N mm	Momento torsor en la dirección i
m	kg	Masa del producto
m'	m	Distancia en la dirección m
m_R	kg/s	Flujo másico del refrigerante
$N^{°evap}$	-	Número de evaporadores
$N^{°motor}$	-	Número de motores por evaporador
Nu	-	Número de Nusselt
OPD	-	Potencial de reducción de la capa de ozono
P	-	Factor en función de números adimensionales
P_E	W	Potencia eléctrica del motor
P_{cond}	kPa	Presión de condensación
P_{evap}	kPa	Presión de evaporación
$\frac{P_{cond}}{P_{evap}}$	-	Relación de presiones condensación - evaporación
P_{motor}	kW	Potencia de cada motor de los ventiladores del evaporador
Pk	-	Número de Plank
Pr	-	Número de Prandtl
Q_1	kJ	Calor de enfriamiento
Q_2	kJ	Calor de cambio de fase
Q_3	kJ	Calor de congelación
Q_d	kW	Calor de descongelamiento del diseño
$Q_{descong}$	kW	Calor de descongelamiento por resistencias eléctricas
Q_i	kW	Carga interna del material de transporte y de envasado
Q_m	kW	Calor aportado por motores del evaporador
Q_p	kW	Carga térmica del producto
Q_t	kW	Flujo de calor que atraviesa la máquina
R	-	Factor en función de números adimensionales
R_c	Ω /km	Resistencia eléctrica efectiva del conductor
Re	-	Número de Reynolds
r	mm	Radio crítico
Ste	-	Número de Stefan
t	h	Tiempo total de congelamiento del producto
t_c	$^{\circ}$ C	Temperatura final de congelamiento del producto
t_d	h/d	Tiempo de descongelamiento
t_e	h/d	Tiempo de funcionamiento del evaporador
t_f	$^{\circ}$ C	Temperatura inicial de congelamiento del producto
t_i	$^{\circ}$ C	Temperatura de ingreso del producto al congelador

t_m	°C	Temperatura del evaporador
t_{prom}	°C	Temperatura promedio del aire de congelamiento
t_r	°C	Temperatura de referencia (entalpia cero)
t_s	°C	Temperatura del producto totalmente congelado
U	kW/(m ² °C)	Coficiente global de transmisión
U_v	V	Voltaje del motor
V	N	Fuerza cortante
v	m/s	Velocidad del flujo de aire
W	kW	Potencia de compresión
X_c	Ω/km	Reactancia del conductor
x	mm	Espesor del panel aislante
x_b	%	Fracción de masa ligado al contenido de agua
x_c, y_c	mm	Coordenadas del centroide del perfil
x_{crit}	m	Longitud crítica a la cual la capa limite se encuentra en zona laminar
x_i	%	Fracción de masa de los constituyentes
x_{ice}	%	Fracción de hielo
x_s	%	Fracción de masa de la parte solida del producto
x_{wo}	%	Contenido de agua del producto antes de ser congelado
ΔH	kJ/m ³	Variación de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial de congelamiento y la temperatura final de congelación
ΔH_{14}	kJ/kg	Variación de entalpía de evaporación
ΔH_{18}	kJ/m ³	Variación de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial producto hasta la temperatura final de congelación en el centro térmico
ΔT	°C	Promedio ponderado de diferencia de temperatura
$\Delta U\%$	%	Caída de tensión en porcentaje
Δt	°C	Diferencia de temperatura entre el ambiente externo y evaporador
$\delta_{A/B}$	mm	Deflexión en que existe entre los puntos <i>A</i> y <i>B</i>
ε	%	Porosidad
η	-	Eficiencia del motor
θ	h	Tiempo estimado de congelamiento para una superficie cilindrica
θ_{stab}	h	Tiempo estimado de congelación para una superficie infinita
λ	-	Grado de esbeltez mecánica
μ	Pa s	Viscosidad dinámica del aire a la temperatura promedio
ρ	kg/m ³	Densidad del producto
ρ_a	kg/m ³	Densidad del aire a la temperatura promedio
ρ_i	kg/m ³	Densidad de los constituyentes
σ_F	N/mm ²	Esfuerzo de fluencia para el acero ASTM A36
σ_{Fadm}	N/mm ²	Esfuerzo de fluencia admisible de pandeo
σ_{adm}	N/mm ²	Esfuerzo admisible
σ_{eq}	N/mm ²	Esfuerzo equivalente
σ_f	N/mm ²	Esfuerzo flector
σ_n	N/mm ²	Esfuerzo normal
σ_p	N/mm ²	Esfuerzo de pandeo
τ_c	N/mm ²	Esfuerzo cortante promedio
τ_t	N/mm ²	Esfuerzo torsor
ϕ	°	Ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente

INTRODUCCIÓN

Una actividad económica importante en la sierra y costa del país, es la siembra y cosecha del maíz amiláceo (choclo). Caracterizado por un nivel de exportación pequeño y con baja intensidad tecnológica. Sin embargo, es un mercado en continuo crecimiento siendo el formato con mayor volumen de exportación el de “Choclo entero y congelado”. Además, el proceso de congelado es una de las etapas más importantes en su elaboración, ya que este permite mantener las características del producto por un mayor periodo de tiempo. El cual, se realiza de acuerdo a las normas internacionales de sanidad y producción recomendadas por la FAO y OMS a través del CODEX Alimentarius.

Dado el continuo crecimiento de este mercado se requiere proporcionar al producto características de conservación y volumen adecuado para la exportación. Esto se puede lograr mediante el almacenamiento de producto congelado. Por ello, se realiza el diseño de un congelador del maíz entero que se adecue a las características del producto y volumen de abastecimiento. Buscando contribuir en el desarrollo de este mercado emergente.

Para responder a esta necesidad la tesis se estructurará en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se desarrolla las características del proyecto, los cuales son: la descripción del maíz y de las tecnologías existentes para la congelación. En el segundo capítulo, se expone el método de diseño, se desarrollan los cálculos térmicos, mecánicos y eléctricos realizados, además, del diseño del sistema de control. En el tercer capítulo, se exponen las especificaciones técnicas de los componentes del congelador. Y por último, en el cuarto capítulo, se detalla el presupuesto del proyecto. Además, se adjuntan los planos necesarios para la fabricación y del sistema eléctrico.

Por lo expuesto, se plantea en la tesis los siguientes objetivos:

Objetivo General

- Diseñar y seleccionar los componentes de una máquina congeladora de maíz entero para una capacidad de 100 kg/h.

Objetivos específicos

- Seleccionar el método de congelación adecuado para el producto
- Seleccionar el tipo de refrigerante a utilizar
- Obtener la carga térmica total del sistema
- Seleccionar los equipos necesarios para el sistema de refrigeración
- Diseñar los componentes mecánicos complementarios para el ensamblaje e integración de todo el sistema.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

1.1 Descripción de la materia prima

1.1.1 Generalidades, denominación y variedades del maíz

El maíz es un cereal que pertenece a la familia Graminaceae, tribu *Maydeae* o *tripsacea*, genero *Zea* y especie *mays*. Nomenclatura dada por Linneo en 1737 [Alva 2000, pp.15]. A continuación, en la tabla 1.1 se muestra la taxonomía biológica del maíz [Alva 2000: pp16].

Tabla 1.1 Taxonomía biológica del maíz

Taxonomía biológica	Tipo	Observación
Reino	Vegetal	
División	Tracheophyta	Plantas con tejidos vasculares
Sub-división	Pteropsidae	Plantas con hojas grandes
Clase	Angiospermae	Plantas con flor y semillas dentro de sus frutos
Sub-clase	Monocotiledoneae	Plantas con un solo cotiledón
Grupo	Glumiflora	Plantas de flores simples
Orden	Graminales	Generalmente hierbas
Familia	Gramineae	Hojas con dos filas alrededor o tallos aplanados
Tribu	Maydeae	
Género	<i>Zea</i>	
Especie	<i>Mays</i>	Maíz cultivado o domesticado

En el Perú el maíz se viene utilizando en la alimentación humana desde hace más de 1200 a 1300 años a. C. En la época Inca el grado de conocimiento del maíz llegó a tal punto que pudieron distinguirse diferentes tipos, de acuerdo a su calidad nutricional. De igual manera, supieron aplicar propiedades prácticas de cultivo, uso de tierras, acondicionamiento y aplicación de riegos. Además, es un cultivo tradicional en nuestro

país, el cual requiere, generalmente, de zonas con climas templados y cálidos, sin presencia de heladas [Manrique 1988].

Dentro de la especie *mays L.* existe una clasificación de gran utilidad comercial, que fue planteada inicialmente por E. Lewis Sturtevant en 1894 y publicada en 1899. Quien los clasificó basándose en la textura o estructura del endospermo. Y de esta clasificación el producto de análisis se encuentra en la clasificación de *Zea mays L.* variedad *Amylacea*, que se caracteriza por sus granos de consistencia lechosa en estado no maduro. En otra clasificación se encuentra dentro de la especie *Mays* como grano verde, ya que este producto se consume en estado inmaduro. En el Perú, se denomina comúnmente a este producto como choclo, que proviene de la palabra quechua “chuqllu”. Además, en otros países o regiones se le conoce como “millo”, “elote”, “jojote” o “maíz tierno”. Cabe resaltar que este producto se consume fresco, congelado o enlatado.

A continuación, se muestra, en la figura 1.1, las principales razas observadas en la sierra central del Perú. De las cuales para el presente trabajo se empleara el maíz cusco (tipo 2).

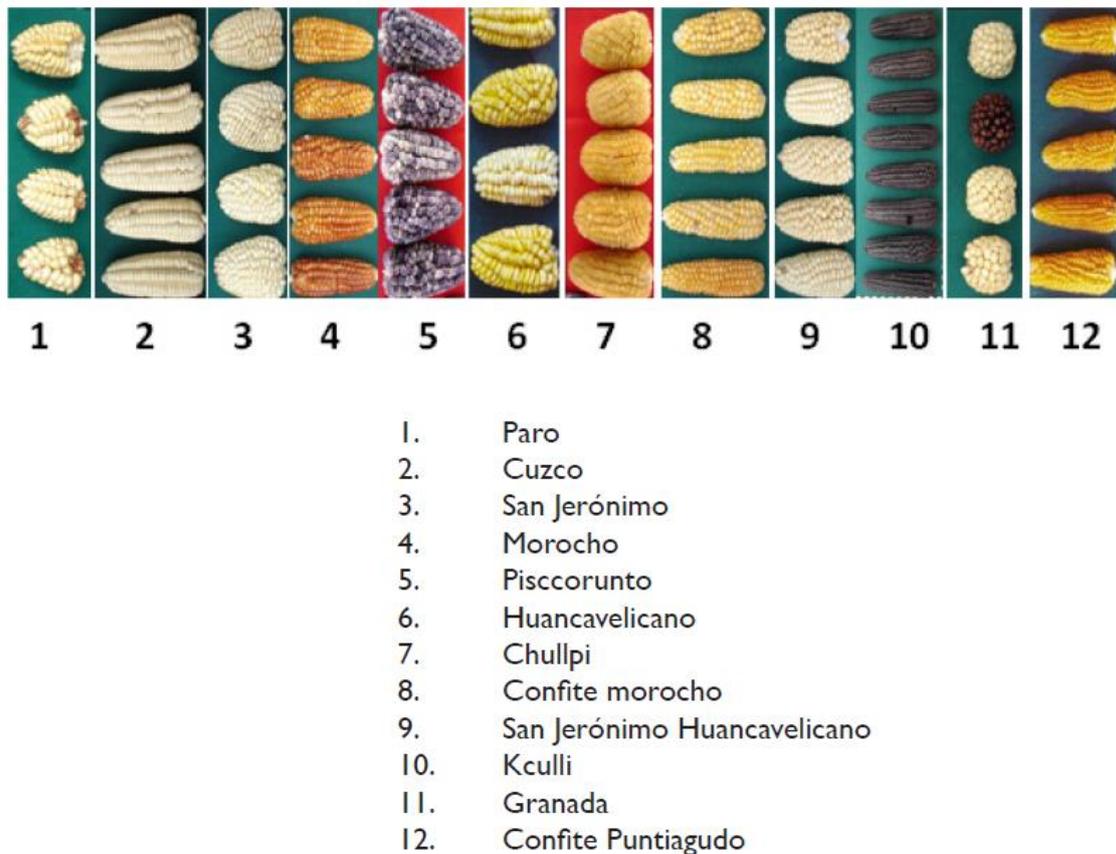


Figura 1.1 Principales Razas de maíz observadas en la Sierra Central del Perú [DGCA 2012, pp22]

1.1.2 Zonas de cultivo y producción

El maíz amiláceo (choclo) tiene un periodo vegetativo de 165 días según la variedad. Y se siembra en gran parte del Perú, prioritariamente en las regiones de la sierra, siendo Junín el principal departamento productor de maíz choclo, el cual se centraliza en el valle del Mantaro (Huancayo) y la provincia de Tarma [DGCA 2007]. Además, las cosechas de maíz se realizan durante todo el año, principalmente entre los meses de diciembre a mayo. A continuación, en la tabla 1.2, se presenta la superficie de cosechada en hectáreas y la distribución de producción nacional de maíz choclo en toneladas, al año 2011.

Tabla 1.2 Superficie de Cosecha y Producción Nacional del Maíz Choclo, año 2011
[DGCA 2012, pp13]

Departamentos	Sup. Cosechada (ha)	Porcentaje	Producción (tn)	Porcentaje
Junín	6 395	14.8%	78 144	21.2%
Ancash	5 132	11.9%	54 336	14.8%
Loreto	4 874	11.3%	21 314	5.8%
Lima	1 699	3.9%	30 642	8.3%
Cajamarca	9 641	22.3%	33 451	9.1%
Cusco	2 139	4.9%	39 218	10.7%
Lambayeque	3 004	7.0%	25 086	6.8%
Huánuco	1 128	2.6%	9 013	2.4%
Arequipa	901	2.1%	16 073	4.4%
Ica	1 731	4.0%	15 040	4.1%
Otras regiones	6 570	15.2%	45 678	12.4%
Total	43 214	100.0%	367 995	100.0%

Por otra parte, los departamentos de Junín, Ancash y Cusco tienen como uno de sus principales destinos el mercado externo; en cambio, los otros departamentos producen para ser comercializados en el Gran Mercado Mayorista de Lima (GMML) o abastecer mercados extra-regionales para su propio consumo.

1.1.3 Rendimiento promedio

El maíz choclo obtuvo un rendimiento promedio en el año 2011 de 8516 kilogramos producidos por hectárea. Siendo, Moquegua, el departamento con mejor eficiencia de producción.

A continuación, en la tabla 1.3, se presenta el rendimiento promedio de producción de maíz choclo en diversas regiones del Perú, al año 2011.

Tabla 1.3 Rendimiento Promedio de Maíz Choclo, año 2011

[DGCA 2012, pp15]

Departamentos	Rendimiento (kg/ha)
Moquegua	19 899
Cusco	18 335
Arequipa	17 839
Pasco	11 357
Junín	12 220
Lima	18 035
Ica	8 691
Ancash	10 588
La Libertad	9 408
Lambayeque	8 351
Loreto	4 373
Cajamarca	3 470
Promedio Nacional	8 516

1.1.4 Formas de comercialización

El proceso de comercialización es una de las actividades más importantes de la cadena agro-productiva. En esta etapa para el choclo intervienen: acopiadores, intermediarios y transportistas. Generalmente, el producto es vendido directamente en campo; el acopiador o intermediario visita el lote y pone un precio por toda la siembra, asumiendo, muchas veces, los gastos de cosecha. Muy pocos son los productores que llevan su producto directamente a los mercados mayoristas u otros sitios de venta [DGCA 2012, pp18-20].

Comercio Interior:

En el mercado nacional el mayor centro de abastos es el Gran Mercado Mayorista de Lima – Santa Anita, Lima. Lugar al cual llegan las cosechas de diferentes partes del país para ser distribuidos a centros comerciales, tiendas de abasto, restaurantes, entre otros. Este recibe, aproximadamente, el 40% de la producción total de choclo. Siendo el modo de comercialización entero y con panca (hojas); seleccionado, previamente, en tres calidades de acuerdo al tamaño y peso de la mazorca. La primera calidad tiene una medida de longitud que oscila entre los 15 - 20 cm; la segunda calidad, entre los 12 - 15 cm; y la tercera calidad, menor a 12 cm. Para luego ser comercializado en mallas o bolsas, que pueden ser cantidades de 25, 50, 100, 500 unidades de choclos. A la cantidad de 500 choclos es, comúnmente, llamado “un saco”. Luego estos se

comercializan en los mercados minoristas, centro de abastos y supermercados por kilogramo, en una presentación maíz choclo fresco con hojas refrigerado.

En la tabla 1.4, se muestran los precios al por mayor del maíz choclo desde el año 2006 al 2012 de las dos variedades más importantes de este tipo de maíz: maíz serrano tipo Cusco y maíz Pardo. Para la primera variedad, esta viene creciendo a una tasa promedio de 6.4%; mientras que para la segunda a 8.6%, desde el 2006. Además, el consumo per cápita del maíz choclo en el país presenta un crecimiento del 214% desde el año 1992 al 2010, con un consumo de 15kg/hab. al año 2010 [DGCA 2012, pp.24].

Tabla 1.4 Precio Promedio al por mayor del Maíz choclo (S/. x Kg)
[DGCA 2012, pp17]

Año	Variedades	
	Maíz serrano tipo Cusco	Maíz pardo
2006	1.26	1.06
2007	1.63	1.35
2008	1.80	1.41
2009	1.82	1.62
2010	1.61	1.52
2011	1.97	1.61
2012	2.07	1.91

Comercio Exterior:

El maíz choclo se exporta bajo diferentes formas, agrupándose en tres partidas diferenciadas por el grado de procesamiento del producto final:

- Maíz dulce fresco o refrigerado
- Maíz dulce congelado
- Maíz dulce sin congelar preparado o conservado

A continuación, en la tabla 1.5, se muestra la descripción de las partidas de exportación del maíz choclo.

Tabla 1.5 Descripción de las presentaciones de exportación del maíz choclo
[DGPA 2007, pp.16]

Partida de Exportación	Denominación	Descripción
0709.90.10.00	Maíz dulce fresco o refrigerado	Maíz cosechado en estado verde (tierno) para consumo humano
0710.40.00.00	Maíz dulce congelado	Sin cocinar o cocinado al vapor o en agua hirviendo y posteriormente congelado
2005.80.00.00	Maíz dulce sin congelar preparado o conservado	Preparado o conservado de cualquier modo que no sea con vinagre o ácido acético, sin congelar.

Además, el maíz dulce congelado se vende en tres diferentes presentaciones que son las siguientes: cholo entero, choclo en trozos y choclo desgranado. A continuación, se mostrará, en la figura 1.2, las formas de exportación del maíz choclo.



Figura 1.2 Formas de exportación del maíz choclo [Agroballe 2010]

Estos productos se envasan en bolsa con un contenido de 500 gramos cada uno, siendo en caso de choclo entero un valor aproximado. Además, la cantidad de bolsas por caja depende del tipo de producto: choclo entero, 10 y 18; choclo en trozos, 12; y choclo en grano, 12 [Agroballe 2010]. En la figura 1.3, se muestra una caja de maíz choclo congelado para exportación.



Figura 1.3 Maíz choclo congelado para exportación en caja [DGPA 2007, pp17]

1.1.5 Características de elaboración y propiedades térmicas

En la industria alimentaria existen normas y reglamentos internacionales para producir casi cualquier variedad de alimentos, teniendo como finalidad principal la protección de la salud de los consumidores. Estas normas son regidas por el Codex Alimentarius que es una comisión creada por la FAO y la OMS en 1963 para desarrollar esta labor

[CODEX 2010]. Para el caso de la elaboración del cholo entero o trozado congelado rápidamente, se encuentra especificado en la norma CODEX STAN 133-1981, mientras que para el choclo desgranado o grano entero se especifica en la norma CODEX STAN 132-1981.

Por lo tanto, para el caso del choclo entero congelado se empleará la norma **CODEX STAN 133-1981**, el cual especifica que se debe cumplir con ciertas características para ser procesado, las cuales son:

- *Limpio y sano*: El producto debe estar exento de arena y tierra; sano sin contaminación de insectos o partes dañadas mecánicamente. Además, de presentar un color uniforme.
- *Grado de madurez*: Este se debe procesar en un estado lechoso; es decir, se cosecha el producto aun no totalmente maduro, aproximadamente, menos de una semana de su total maduración. Además, se debe realizar la post-cosecha en un lapso máximo de 24 horas para evitar deterioros.
- *Tamaño*: Las longitudes para exportación de este producto varían dependiendo del cliente. Para el caso de USA las medidas oscilan de 13.5 a 18 cm, en cambio para el caso de Europa, 13 cm a 18 cm¹. Según el Codex la mínima longitud que debe tener debe de ser de 12 cm.
- *Defectos*: El producto no debe presentar brácteas (pancas); barbas, pelos que se encuentran dentro del choclo; pedúnculo, rama que sostiene el fruto; ni grietas, separación entre los surcos de granos en el choclo.
- *Peso*: El peso tiene que ser el necesario para poder ser embolsado en el formato de venta.

A continuación, se presentan las propiedades térmicas del maíz en la tabla 1.6 [ASHRAE 2006, Ch. 09].

Tabla 1.6 Propiedades y características térmicas

Parámetros	Valores
Contenido de humedad	75 %
Punto de congelación	-0.6 °C
Punto de congelado	-18 °C
Calor específico antes de la congelación	3.30 kJ/(kg K)
Calor específico después de la congelación	2.04 kJ/(kg K)
Calor latente de fusión	254 kJ/kg

¹ Entrevista realizada el 22 de abril de 2010 al Sr. Carlos Oballe – Representante de la Corporación Agroballe Alegre S.A.C.

Por otro lado, el proceso de congelado debe de realizarse de tal forma que la zona de cristalización se supere rápidamente. En otras palabras, al realizar el congelado se debe obtener cristales de hielo muy finos, para que el producto no pierda su sabor, color y textura. Además, este proceso no se dará por concluido hasta que el producto no haya alcanzado una temperatura de por lo menos $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ en su centro térmico. Es decir, que al finalizar el proceso de congelación se debe tener en el punto más caliente del grano de maíz una temperatura mínima de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Codex 1981].

1.2 Métodos de congelación

Existen diferentes métodos de congelación la mayoría basados en el sistema mecánico por compresión de vapor que consta de los siguientes elementos fundamentales: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. A continuación, se mostrará una clasificación de acuerdo al medio de transmisión térmica, tomando como referencia el manual de refrigeración ASHRAE [ASHRAE 2006, Ch.16].

1.2.1 Congeladores de contacto directo

Estos congeladores se utilizan sobre todo en bloques de forma regular y materiales pastosos semilíquidos. Además, este método de congelación se aplica con mayor frecuencia a espesores que no sobrepasen 50 a 60 mm [IIF 1990].

➤ Congeladores de placas

Estos pueden ser verticales u horizontales. Estos congelan en bloques, introduciendo el producto envasado o no entre las placas del congelador; las cuales suelen ser de 15 a 20 placas. El proceso es por “batch” (lote); y es comúnmente utilizado en pescados o carnes. A continuación se muestran algunas fotografías de estas máquinas [Woldbase 2010].



Figura 1.4 Congelador por placas horizontales



Figura 1.5 Congelador por placas verticales

➤ Congeladores de correa o bandas

Se utilizan para congelar principalmente capas bastante delgadas de productos líquidos o pastosos, de carne preparada y filetes de pescado. Estas pueden ser de una o dos correas de acero inoxidable.

➤ Congeladores de tambor

Congelan los mismos productos que los congeladores de correas, pero este es un sistema más compacto. Este método de congelación cuenta con un tambor giratorio de acero inoxidable, al cual se vierte en su superficie exterior el producto a congelar.

➤ Congeladores rotativos

Se utilizan para congelar principalmente carne, productos lácteos, pescado (especialmente en embarcaciones). Tienen una capacidad de 15 toneladas por día y pueden llegar a congelar espesores de 60 a 85 mm. Además, su funcionamiento es automático, figura 1.6 [Abellolinde 2011].

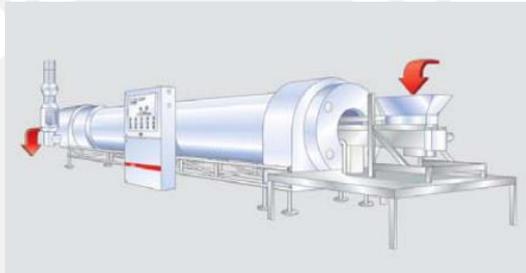


Figura 1.6 Congelador rotativo, equipo especial de la marca CRYOLINE® RF [Abellolinde 2011]

1.2.2 Congeladores de aire forzado

➤ Túneles de congelación estáticos

Son cámaras equipadas con evaporadores y ventiladores, donde el aire frío circula a través de los productos que pueden estar situados en bandejas dispuestas en sobre estantes estacionarios. Es un equipo muy flexible, que se adapta a productos de todas las dimensiones y formas, figura 1.7. Es recomendable su utilización en productos ya empacados, para evitar el inconveniente de que el producto se adhiera a las bandejas [IIF 1990].



Figura 1.7 Armario congelador, equipo estándar de la marca CRYOLINE® CF [Abellolinde 2011]

➤ Congeladores de banda transportadora

Estos congeladores pueden ser de una sola banda, de dos o más bandas superpuestas, o también de bandas enrolladas alrededor de un tambor rotatorio (congelador en espiral). Son utilizados principalmente para productos no envueltos; por ejemplo, congelados individualmente. A continuación, se presentan algunas máquinas de esta categoría [IIF 1990].

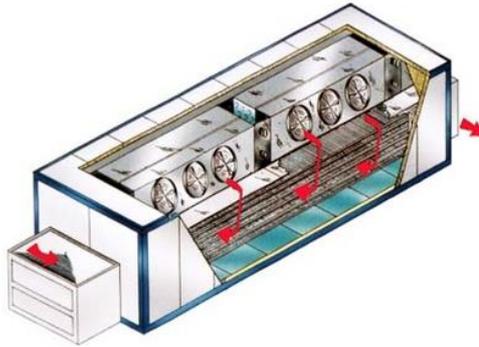


Figura 1.8 Congelador con tres bandas [Woldbase 2010]

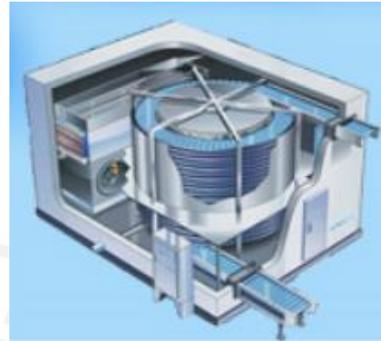


Figura 1.9 Congelador en espiral [Woldbase 2010]

➤ Congeladores de lecho fluidizado

Se utiliza para productos pequeños de dimensiones uniformes las cuales se someten a una corriente de aire ascendente. Además, para una velocidad de aire adecuada estas pequeñas partículas flotan en la corriente con el fluido. Asimismo, al tener la faja que los transporta una inclinación estas se deslizan, transportándose y congelándose al mismo tiempo sin la necesidad de ayuda mecánica. Este método presenta algunas ventajas sobre la congelación por banda: el producto es verdaderamente congelado de manera individual, si se reduce la carga no afecta la distribución del aire y se puede tratar productos muy húmedos. Generalmente, este proceso presenta dos partes: la primera, una congelación muy rápida para lograr congelación superficial; y la segunda, un congelamiento más lento donde se termina la congelación [IIF 1990]. Ambas se dan en dos fajas diferentes pero dentro de la misma máquina. A continuación se presenta una figura del proceso.

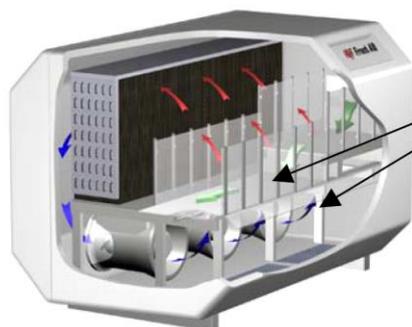


Figura 1.10 Equipo de congelación de lecho fluidizado [IQF 1990]

1.2.3 Congeladores de inmersión

Se utilizan para productos de forma irregular, ya que el producto es sumergido en una sustancia fría o rociada con esta. La sustancia que se utiliza puede ser una solución acuosa de sal (salmuera), azúcar, alcohol u otra sustancia no tóxica.

1.2.4 Congeladores por vaporización de líquido o sólido

➤ Congeladores de nitrógeno líquido

Consiste en pulverizar el nitrógeno líquido a -196°C sobre una banda transportadora; luego el nitrógeno gaseoso que se produce en el congelamiento es evacuado. Este método es utilizado para una primera congelación de superficie. También, se utiliza en congelamientos completos de productos pequeños de gran valor. A continuación, en la figura 1.11, se presenta una máquina de este tipo de congelamiento [Abellolinde 2011].



Figura 1.11 Congelador de nitrógeno líquido, equipo especial de la empresa Crust CRYOLINE® CM

➤ Congeladores de dióxido de carbono

El CO_2 existe a presión atmosférica como gas o sólido. Por lo que el producto se pone en contacto con trozos de nieve carbónica.

1.3 Refrigerantes

Tan importante como los equipos del ciclo de refrigeración, es el fluido refrigerante que es sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. A continuación, se describe su clasificación [ASHRAE 2009, Ch.30].

1.3.1 Componentes halocarbonados o hidrocarburos halogenados

➤ Serie de los metanos (CFC y HCFC)

Están compuestos por los CFC y HCFC. Los CFC o clorofluorocarbonos son muy estables lo que hace que permanezcan durante largo tiempo en la atmósfera, afectando la capa de ozono y causando efecto invernadero (R-11, R-12, R-13, R-23,

R-115). Los HCFC o hidroclorofluorocarbonos, son menos estables y poseen un menor potencial de destrucción de la capa de ozono (R-22) [ASHRAE 2009, Ch.30].

➤ Serie de los etanoles (HFC)

Están compuestos por los HFC o hidrofluorocarbonos, al no contener cloro no tiene un potencial destructor de la capa de ozono pero si con el efecto invernadero (R-134a, R-152a) [Yamada 2007].

➤ Mezclas Azeotrópicas

Un azeotrópico es una mezcla de dos o más sustancias químicas en la cual se mantienen la misma relación de constituyentes químicos en ambas fases líquida y vapor. No pueden ser separados por destilación. Se les denomina con la Serie 500 (R-500, R-502, R-503 y R-507) [ASHRAE 2009, Ch.30].

➤ Mezclas Zeotrópicas o no azeotrópicas

Son una mezcla de dos o más sustancias químicas que evaporan y condensan en un rango de temperaturas. El más utilizado es el R-404a que tiene un ODP (Ozono Depletion Potencial) casi de cero pero con un GWP² de 3750. Realizando una comparación con el R11, este tiene un OPD de uno y un GWP de 4600 [GRIP 2009].

1.3.2 Componentes orgánicos misceláneos:

Están compuestos por los hidrocarburos, los oxigenados y los nitrogenados. Estos dos últimos se especifican con el número seis adelante y los siguientes números indican la secuencia en que fueron fabricados.

➤ Hidrocarburos:

Son empleados principalmente en la industria petroquímica. Además, son poco usados en la refrigeración por su alto grado de inflamabilidad. En este grupo se encuentran: R-50 (metano), R-170 (etano), R-290 (propano), R-600 (butano) y R-600a (isobutano)

➤ Oxigenados:

Usados en las naves espaciales y en el tratamiento de metales radiactivos (R610/611).

➤ Nitrogenados:

Usados para el tratamiento de metales radiactivos (R-630, R-631).

1.3.3 Compuestos orgánicos cíclicos:

Se obtienen a partir del butano. Se emplean en la industria criogénica. Se les denomina con la Serie 300 (R-316, R-317 Y R-318).

² Global Warming Potencial (GWP) o Potencial de Calentamiento Global (PCA). Nos indica una medida de la capacidad de una sustancia para contribuir al calentamiento global mediante el efecto invernadero. El índice se calcula sobre un periodo de cien años, tomando como referencia la capacidad de dióxido de carbono, al que se le asigna por convenio un valor de GWP de 1 [OZONO 2010].

1.3.4 Compuestos orgánicos no saturados

Son raramente utilizados y están compuestos por el R-1150 (etileno), R-1270 (propileno), etc.

1.3.5 Compuestos inorgánicos:

En este grupo se encuentran los refrigerantes con Serie 700 como el R-717 (amoníaco), R702 (hidrogeno), R-728 (nitrógeno), R-729 (aire), R-732 (oxígeno), R-744 (dióxido de carbono), entre otros.

1.4 Equipos del sistema de refrigeración

1.4.1 Compresores

Son los elementos encargados de elevar la presión del refrigerante en el sistema de refrigeración hasta una adecuada para que ingrese al condensador. Existen diferentes tipos de compresores, los cuales se seleccionan de acuerdo al tamaño y naturaleza de la instalación, así como del tipo de refrigerante a utilizar.

➤ Compresores volumétricos

Incremento de presión es por reducción de volumen [Yamada 2010].

- Desplazamiento positivo (reciprocantes)

Están compuestos por pistones movidos por pines y bielas desde el cigüeñal. Además, son usados en instalaciones de mediana y elevada capacidad. Son relativamente más baratos que los de tornillo (50%), pero necesitan un mantenimiento frecuente. Tienen una relación de compresión de 9:1 (multicilindros). Estos se encuentran en el mercado como: abiertos, semi-herméticos y herméticos.

- Rotativos

- Tornillo: Son de engranaje helicoidal que pueden ser simples o de doble tornillo. Funcionan con los refrigerantes más comunes y sirven para toda aplicación; además, tienen potencias de 20 a 1500 HP y gran eficiencia a cargas parciales. Tienen una relación de compresión de 19:1.
- Otros: Son compactos y de poco peso. Los grandes compresores de este tipo son de tipo Scroll (de engranaje helicoidal) o paletas y tiene una relación de compresión de 7:1. En cambio los pequeños son usados en la aplicación doméstica y en pequeñas unidades de aire acondicionado hasta 5 HP.

➤ Compresores dinámicos (Turbocompresores)

Son compresores donde la compresión se realiza por acción de la fuerza centrífuga y tienen una aplicación por encima de las 200 toneladas de refrigeración. Suelen llegar a velocidades de 1800 a 90000 RPM; además, pueden operar hasta una temperatura de

succión de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su funcionamiento es continuo durante largos periodos de tiempo [Yamada 2010].

1.4.2 Condensadores

Son los equipos encargados de enfriar el refrigerante pasando de estado gaseoso a líquido, cediendo la energía al ambiente exterior u otro medio que lo absorba.

➤ Enfriados por agua

Estos equipos utilizan como medio de enfriamiento el agua; están conformados principalmente por carcasa y tubos, los cuales pueden ser horizontales o verticales. Son más eficientes que los de aire y pueden llegar a menores temperaturas de condensación pero se necesita un consumo de agua lo que aumenta el costo de operación del sistema.

➤ Enfriados por aire

Estos equipos utilizan el aire para condensar el refrigerante y pueden ser por convección libre o forzada. Los de convección libre poseen tubos desnudos; en cambio, los de convección forzada, tubos aletados. Son utilizados en medianas y bajas cargas; además, presentan ventajas cuando no se dispone de agua.

➤ Evaporativos

Estos emplean tanto agua como aire como medio de condensación, pueden ser de extracción inducida como de tiro forzado. Son más económicos que los enfriados por agua aunque siguen necesitando de ese fluido. Además, algunos de estos equipos tienen una conformación parecida a las torres de enfriamiento, figuras 1.12 y 1.13.



Figura 1.12 Condensador evaporativo de tiro forzado [HD 2010].

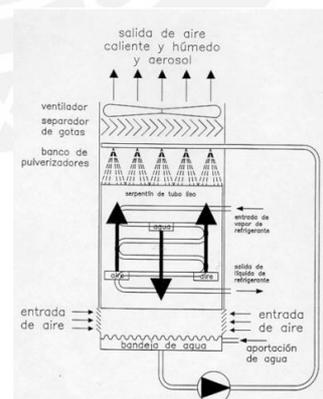


Figura 1.13 Esquema de un condensador evaporativo de tiro forzado [Alisan 2008]

1.4.3 Dispositivo de expansión

Es el elemento que disminuye la presión a la salida del condensador, bajando su temperatura hasta que se obtenga el efecto refrigerante necesario para el proceso.

➤ Válvula de expansión automática

Son dispositivos que mantienen la presión constante en los evaporadores inundados, alimentando una mayor o menor cantidad de flujo al evaporador dependiendo de la carga térmica.

➤ Válvula de expansión termostática

Este dispositivo permite regular el flujo másico de refrigerante en función de la carga térmica, ya que posee un bulbo sensor de temperatura que se conecta con la salida del evaporador. Es un dispositivo que se utiliza en evaporadores de expansión seca o directa.

1.4.4 Evaporadores

Son los equipos encargados de absorber el calor de la carga térmica. Pasando el refrigerante de una mezcla líquido – vapor a vapor. Estos se seleccionan dependiendo de la carga térmica. Además, existen diferentes tipos de evaporadores los cuales se pueden clasificar de diferente manera:

➤ Según alimentación de refrigerante

- De expansión directa o expansión seca

Son aquellos en donde la evaporación del refrigerante se lleva a cabo a través de su recorrido por este; obteniéndose vapor sobrecalentado a la salida. Son los más comunes pero no los más apropiados para las instalaciones de gran volumen. Son menos eficientes que los inundados, pero su diseño es más simple y requieren menor carga de refrigerante; además, tienen menos problemas con la separación de aceite del sistema.

- Inundados

Estos equipos trabajan con refrigerante líquido dentro del intercambiador de calor, con lo cual humedece toda su superficie interior, teniendo una mejor transferencia de calor. Además, estos equipos cuentan con un acumulador o colector de vapor, que a la vez sirve como un receptor de líquido. Se utilizan en instalaciones de gran volumen y operan a bajas temperaturas.

➤ Enfriamiento de aire

Estos equipos pueden ser de superficie primaria (tubos descubiertos y placas) o de superficie secundaria (aleteados). Además, la forma en la que se distribuye en aire entre ellos puede ser natural o forzada.

- Tubo desnudo o descubierto

Son los tipos más simples y se construyen por lo general de tubos de acero o cobre. El tubo de acero se utiliza para grandes evaporadores y en aquellos que trabajan con amoníaco; mientras que de cobre para los más pequeños y otros refrigerantes.

- De superficie de placa

Estos equipos son de varios tipos, algunos son construidos de dos placas de metal realzado y soldado una con otra de tal modo que pueda fluir el refrigerante entre las placas (intercambiador de placas) [Coloma 2009].

- Evaporadores aleteados

Son serpentines de tubo descubierto sobre los cuales se coloca planchas metálicas o aletas, las cuales sirven de superficie secundaria, aumentando el área superficial externa del intercambiador. Son los más utilizados en la refrigeración industrial. El tamaño y espaciado entre aletas depende del tipo de aplicación, este último varía desde 1 hasta 14 aletas por pulgada, esta variación depende de la temperatura de operación del serpentín; a menor temperatura, mayor espaciado entre aletas, siendo fundamental este parámetro en la formación de escarcha en el evaporador [Coloma 2009]. En la siguiente figura 1.14 se muestran dos equipos de evaporadores aleteados de tiro forzado [Helpman 2010].



Figura 1.14 Tipos de evaporadores aleteados de tiro forzado

- Enfriamiento de líquido

Son equipos utilizados para enfriar líquidos; tienen diferentes diseños los cuales están sumergidos dentro del líquido que se quiere enfriar. Son usados en la industria de agua, cerveza, leche, etc.

1.4.5 Tipos de aislantes

Estos se venden en paneles los cuales tienen en su interior un tipo de materia aislante. Además, estos no colaboran a la estabilidad estructural de la máquina.

A continuación, se detalla una lista de materiales aislantes utilizados en el mercado.

➤ Fibras minerales

Pueden ser fibra de roca o de cristal. Son muy ligeras y absolutamente inflamables. Absorben la humedad fácilmente, por lo que es conveniente colocarlas recubiertas.

➤ Fibras vegetales

Normalmente se encuentran en forma de paneles o de losas. Estos aislantes están compuestos de fibras de madera apelmazadas, son bastante rígidas y resistentes a los golpes. Suelen utilizarse para trabajos de aislamiento fónico. Son inflamables.

➤ Poliestireno expandido (EPS)

Se caracterizan por su bajo costo y por la facilidad por la que puede ser colocado en cualquier lugar. Tiene un coeficiente de conductividad que depende de la densidad (a mayor densidad menos aislamiento) y es de medio rendimiento térmico. Es fácilmente atacable por la radiación ultravioleta por lo cual se le debe de proteger de la luz del sol.

➤ Espumas de poliuretano

Es un material de muy buen rendimiento térmico y con bajos espesores en comparación a otros aislantes.

➤ Aluminio en películas plásticas

Vienen en rollos y se aplican con una cola adhesiva especial.

1.5 Equipos de operación, mantenimiento, control y seguridad

El sistema de refrigeración, además de tener componentes principales, necesita contar con elementos o dispositivos que garanticen un correcto funcionamiento, una operación controlada, y periodos de mantenimiento durante los ciclos de parada de la máquina o cuando sea necesario.

1.5.1 Operación y mantenimiento

A continuación, se muestran diversos elementos secundarios de operación y de mantenimiento comunes en diversas instalaciones frigoríficas.

- Separador de aceite

Se instala en la tubería de descarga para separar el aceite del refrigerante y retomar al cárter del compresor. Todos los compresores de acción simple recíproca y rotativos dejan pasar una pequeña cantidad de aceite a la tubería de descarga que es necesario que retorne al cárter.

- Silenciador

Se coloca a la salida del compresor para evitar ruidos y vibraciones a su descarga. Generalmente, son productos opcionales que vienen con el compresor cuando se realiza su compra.

- Recipiente de Líquido

El recipiente de líquido refrigerante es un tanque que almacena el exceso de refrigerante que circula a lo largo del sistema.

- Filtro secador

Se ubica en la tubería de líquido, después del condensador, su función es proteger la válvula termostática y extraer todo cuerpo extraño del refrigerante como impurezas de fabricación, humedad y ácidos.

- Intercambiador de calor

Se utiliza para sub-enfriar el refrigerante en estado líquido que sale del condensador pero calentando el vapor a la salida del evaporador. Este equipo no modifica la eficiencia del ciclo, solo ayuda a reducir la carga de refrigerante en el ciclo. Para este caso no será necesario.

- Visor de líquido e indicador de humedad

Suele estar provisto de un indicador de color que cambia cuando el contenido de humedad del refrigerante es superior a un valor crítico determinado.

- Acumulador de succión

Se instala en la tubería de aspiración para asegurar que en el arranque del compresor tenga la suficiente cantidad de refrigerante en estado de vapor. Además, durante las paradas evita el ingreso de líquido al compresor, por lo que funciona como un reservorio y trampa a la vez. Por lo que también ayuda a prevenir golpes de líquido en el arranque.

- Válvula de paso

Son accionadas a mano y sirven para labores de servicio. Generalmente son de tipo diafragma y de bola.

1.5.2 Control de operación

Estos se encargan de velar por la correcta operación del sistema. A continuación, se mencionan los equipos de control que se usaran en la máquina:

- *Válvula reguladora de presión*

Se pueden utilizar a la salida del evaporador, para regular que la presión se mantenga constante y asegure una condición de vapor saturado, generalmente se usa cuando se tiene un solo compresor para varios evaporadores. Además, también, están presentes a la entrada del compresor, “regulador de presión en el carter”, para prevenir posibles sobrecargas durante el arranque, después de largos periodos de parada o después de periodos de descongelamiento con presión elevada en el evaporador; para esto se fija una presión de consigna a la cual la válvula se cierra por ser elevada. Cabe resaltar

que este dispositivo regula la presión a la salida de la válvula, por lo que no le afecta la presión variable a la entrada.

- *Válvula solenoide*

Es una válvula ON/OFF normalmente abierta o cerrada, se puede utilizar para evita que el evaporador se llene de refrigerante cuando la máquina esta parada.

- *Control de temperatura o termostato*

Son los que controlan puntos específicos del sistema, abriendo o cerrando contactos en función de un valor determinado.

Además, se debe tener en cuenta que se contará con un sistema de control para el correcto funcionamiento de la máquina. Este estará conformado por controladores de tipo electromecánico o electrónico que permita tener el control en el proceso de congelado de manera que se puedan ajustar las variables del proceso, como son: presión, temperatura, caudal o nivel, de ser necesario.

1.5.3 Seguridad de operación

Estos elementos se encargan de velar por la seguridad del sistema y en mayor medida al compresor; ya que si este elemento falla, deja de funcionar todo el sistema. A continuación, se detalla algunos de estos.

- Control diferencial de presión de aceite

Protege al compresor frente a una baja presión de la lubricación del aceite. Si la presión es muy baja, este elemento detiene al compresor. Se utiliza generalmente cuando el compresor tiene una bomba de aceite independiente.

- Control dual de presión

Este elemento pone en marcha o detiene al compresor en función de la presión de aspiración y lo detiene ante una sobrepresión excesiva a la descarga.

1.6 Sistema Eléctrico

Para que el sistema de enfriamiento pueda operar correctamente es necesario que los dispositivos o equipos eléctricos (compresor, condensador y evaporador) sean alimentados en forma debida. Por esta razón, es importante el diseño de un circuito eléctrico conformado por dispositivos que permiten la transmisión de energía eléctrica y controlan el correcto funcionamiento del sistema.

Las partes que conforman el sistema eléctrico son las siguientes:

1.6.1 Conductores eléctricos

Es un alambre o conjunto de alambres de una sola clase de material no aislado normalmente destinado a conducir la corriente eléctrica desde los puntos de generación hasta los sitios de utilización. Los conductores que se usan en los sistemas de refrigeración son aislados del tipo THW y TW.

1.6.2 Canalizaciones eléctricas

Las tuberías o conductos que se usan para los sistemas de distribución son en general tuberías rígidas o flexibles en donde circulan los conductores eléctricos. Estas tuberías son de plástico del tipo PVC o metálica del tipo Conduit. Pueden llevar varios conductores a la vez dependiendo del tipo y modelo.

1.6.3 Elementos de maniobra y protección

Básicamente estos elementos se usan como medio de protección del sistema eléctrico. Se puede mencionar los siguientes:

- Contactor : Es un interruptor que sirve como medio de accionamiento automático y de protección del sistema eléctrico.
- Relé térmico : Es el medio de protección automática contra el cortocircuito que pudiera ocurrir en el sistema eléctrico.
- Interruptor Termomagnético : Es un elemento limitador de corriente que se emplea para proteger la instalación eléctrica en casos de sobrecarga.

Referencias del Capítulo 1:

ABELLOLINDE

- 2011 Equipos especiales de congelación y refrigeración. Consulta: 17 de septiembre de 2011.
<[http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/like35lges.nsf/repositorybyalias/equipos_especiales_congelacion/\\$file/Equipos%20Especiales%20Congelaci%C3%B3n%2017005-02.pdf](http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/like35lges.nsf/repositorybyalias/equipos_especiales_congelacion/$file/Equipos%20Especiales%20Congelaci%C3%B3n%2017005-02.pdf)>
- 2011 Equipos estándar para congelación y refrigeración. Consulta: 17 de septiembre de 2011.

AGROBALLE ALEGRE S.A.C.

- 2009 *Productos congelados*. Corporación Agroballe Alegre S.A.C. Consulta: 2 de junio de 2010. <<http://agroballealegre.com/congelados.html>>

ALISAN

- 2008 Condensadores evaporativos. Alisan desinfecciones. Consulta: 9 de junio de 2010.
<<http://www.alisandesinfecciones.com/contenido.php?lang=es&seccion=5&familia=5&servicio=10>>

ALVA, Milagros; Mariela DE LA PUENTE; Eloy MEDINA y Cecilia NORIEGA

- 2000 *Elaboración de un manual de calidad y un plan HACCP para la línea de choclo (Zea Mays L.) entero pre-cocido y congelado con dióxido de carbono, para la empresa Expobel S.A.* Tesis de licenciatura en Industrias Alimentarias con mención en Ingeniería de Industrias Alimentarias. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Industrias Alimentarias.

ASHRAE

- 2009 “Thermophysical Properties of Refrigerants” (Chapter 30). ASHRAE Handbook *Fundamentals*. New York: ASHRAE Inc.
- 2006 “Thermal Properties of Foods” (Chapter 9). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
- “Industrial Food-freezing Systems” (Chapter 16). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.

CODEX ALIMENTARIUS

- 2010 *Normas alimentarias FAO/OMS*. FAO y OMS. Consulta: 2 de junio de 2010. <http://www.codexalimentarius.net/web/index_es.jsp>
- 1981 *Norma del Codex para el maíz en la mazorca congelado rápidamente* CODEX STAN 133-1981.

COLOMA RODRÍGUEZ, Luis

- 2009 *Manual de capacitación: Buenas prácticas en sistemas de refrigeración*. Santiago: Universidad tecnológica de Chile (INACAP). Consulta: 9 de junio de 2010. <<http://www.scribd.com/doc/18358827/manual-de-refrigeracion>>

DIRECCIÓN GENERAL DE COMPETIVIDAD AGRARIA (DGCA)

- 2012 *Maíz amiláceo: Principales Aspectos de la Cadena Agroproductiva*. 1ra ed. Ministerio de Agricultura. Lima, Pág. 13, 15, 16, 17,18-20, 22,24

- DIRECCIÓN GENERAL DE LA PROMOCIÓN AGRARIA (DGPA)
2007 "Choclo". Cadena Productiva. Ministerio de Agricultura. Lima, año 1, boletín 1, pp. 16-17.
- GRID
2009 "Direct GWPs". Climate Change 2001: The Scientific Basis (Chapter 6.12). Arendal: United National Environment Programme (UNEP). Consulta: 10 de junio de 2010.
<http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/248.htm>
- HD EQUIPAMENTOS
2010 *Condensadores evaporativos*. HD-Hidrotérmica equipamentos industriais. Consulta: 9 de junio de 2010. <<http://www.hd.ind.br/>>
- HELPMAN
2010 Product specifications. Alfal Laval Groningen BV. Consulta: 9 de junio de 2010. <<http://www.helpman.com/index.php?id=13>>
- IIF - INSTITUTO INTERNACIONAL DEL FRIO
1990 "Métodos de congelación". *Alimentos congelados: Procesado y distribución*. Traducción de León Villanúa. Zaragoza: Acribia.
- IQF Frost AB
2009 *OctoFrost*. IQF Frost AB. Consulta: 3 de junio de 2010.
<www.iqf.se/lang/2008_01_OctoFrost_ESP.pdf>
- MANRIQUE, Antonio
1988 *El maíz en el Perú*. Lima: Banco Nacional Agrario.
- OZONE LAYER PROTECTION
2010 Global Warming Potential (GWP): a number that refers to the amount of global warming caused by a substance. U.S. Environmental Protection Agency. Modificado: 15 de diciembre 2010. Consulta: 17 de septiembre de 2011.
< <http://www.epa.gov/ozone/defns.html#odp>>
- WORLDBASE REFRIGERATION EQUIPMENT
2010 *Products*. Nantong WorldBase Refrigeration Equipment Co. Consulta: 3 de junio de 2010.
<<http://www.worldbase.cn/product4.html>>
- YAMADA TANAKA, Luis
2010 *Refrigeración Industrial*. Material de enseñanza. Lima
2007 *Los refrigerantes y su impacto ambiental* [diapositivas]. Lima PUCP

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL SISTEMA

2.1 Metodología y concepto solución

Considerando los sistemas descritos y los elementos que conforman la máquina, se procederá a aplicar la metodología de diseño, desarrollada en los cursos de pregrado, basada en las normas DIN VDI 2221 y 2225 para el diseño del congelador. Luego, se procederá a mostrar los cuadros comparativos de las diferentes soluciones de las cuales se escogerá la que mejor cumpla con los parámetros técnicos y económicos del producto e instalación.

2.1.1 Lista de exigencias

Es una descripción que resume los requerimientos que el diseño debe cumplir (Task of Design), procedimiento según la norma DIN VDI 2221. Esta descripción hace las veces de contrato entre el diseñador y el cliente, en donde se detallan los alcances que tendrá el proyecto y pone por escrito que el diseñador ha comprendido las necesidades a satisfacer. La lista de exigencias que se elaboró para este diseño se aprecia en la tabla 2.1. Este se divide en exigencias, requerimientos a cumplir; y deseos, requerimientos no indispensables.

Tabla 2.1 Lista de exigencias: Congelador de maíz

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág.	1 de 2
PROYECTO Diseño de un congelador de maíz		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU	
		Fecha: 18/11/13	Autor: Freddy Ludeña
Característica	Deseo o exigencia	Descripción	
FUNCIÓN PRINCIPAL	E	<ul style="list-style-type: none"> - Congelamiento del maíz amiláceo (choclo) en un formato entero para una capacidad de 100 kg/h. - El producto obtenido cumplirá con las condiciones necesarias para la exportación. 	
GEOMETRÍA	E	<ul style="list-style-type: none"> - Este deberá ser lo suficientemente compacto y robusto como para asegurar un costo razonable y una adecuada resistencia mecánica. 	
CINEMÁTICA	E	<ul style="list-style-type: none"> - La velocidad de trabajo de la maquina deberá permitir un correcto congelamiento del maíz. - El movimiento de los componentes del congelador no deberá afectar la calidad del producto final. 	
FUERZAS	E	<ul style="list-style-type: none"> - El equipo deberá tener la fuerza suficiente para transportar el peso del maíz - Deberán soportar distintas deformaciones producidas por cambios de temperatura y esfuerzos mecánicos inherentes al proceso. 	
ENERGIA	E	<ul style="list-style-type: none"> - La vibración de los ventiladores del evaporador no deberá afectar a la estabilidad y rigidez de la máquina. 	
MATERIA PRIMA	E	<ul style="list-style-type: none"> - El material a procesar será el maíz choclo denominado Zea Mays Amilácea. Para el proceso se utilizara el maíz de primera calidad con una longitud que oscila entre 16 - 18 cm y un diámetro aproximado de 6cm. Además, el producto ingresará entero y pre-cocido al congelador; y culminado el proceso, la calidad del producto estará dentro de los estándares de exportación. 	
FABRICACION	E	<ul style="list-style-type: none"> - Se considerará durante el desarrollo la selección de los componentes que cumplan las exigencias de resistencia, durabilidad, precio accesible y disponibilidad en el mercado local y principalmente inocuidad con la materia prima. - Los materiales de elaboración deben ser de fácil adquisición. - La máquina deberá de permitir un fácil acceso a sus componentes para el mantenimiento de los mismos. 	
MANTENIMIENTO	E	<ul style="list-style-type: none"> - Las piezas deberán de ser de fácil recambio (stock en el mercado nacional); el mantenimiento deberá de ser sencillo, económico y de poca frecuencia. 	
MONTAJE	E	<ul style="list-style-type: none"> - La máquina deberá ser de fácil montaje y desmontaje. 	
TRANSPORTE	E	<ul style="list-style-type: none"> - El equipo deberá de ser de fácil transporte al lugar de trabajo. 	
COSTOS	E	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño del equipo será el económicamente más factible. 	
SEGURIDAD	E	<ul style="list-style-type: none"> - El sistema deberá ofrecer las medidas mínimas de seguridad para él o los operarios que lo manipulen. Además, de cumplir las normas de seguridad industrial. 	
CALIDAD	E	<ul style="list-style-type: none"> - Para el proceso se tomara en cuenta las normas que mencionan la FAO y el CODEX Alimentarius. 	

Tabla 2.1 Lista de exigencias: Congelador de maíz (continuación)

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág.	2 de 2
PROYECTO Diseño de un congelador de maíz		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU	
		Fecha: 18/11/13	Autor: Freddy Ludeña
Característica	Deseo o exigencia	Descripción	
SEÑALES	D	<ul style="list-style-type: none"> - Los controles deberán ser entendibles por personal de planta. Además, de contar con dispositivos de parada de emergencia visibles, que pueda ser accionado por cualquier persona, sea capacitada o no. - También, existirán indicadores de los parámetros fundamentales con tableros de lectura o luces indicadoras. 	
ERGONOMÍA	D	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos con controles cómodos y accesibles a los operarios - Posiciones de montaje que no requieran condiciones forzadas. 	
USO	D	<ul style="list-style-type: none"> - Se deberá evitar ruidos por arriba de los 60 Db. - Ser útil en cualquier condición climática y de altura. - Se deberá evitar que su uso sea complejo para un operario común en planta. 	

2.1.2 Estructura de funciones

Definida las necesidades a solucionar con la lista de exigencias se procede a iniciar un proceso de abstracción para definir la estructura de funciones de la máquina. Comenzando con la abstracción del problema de forma general a través de un esquema de caja negra donde se enfoca en las entradas y salidas de esta. Luego, se procede a detallar la “secuencia operaciones” necesaria en el funcionamiento de la máquina, las cuales abarcan todas las etapas del proceso de congelado. Seguidamente, se definen los “procesos técnicos” que es la división del problema general en sub-problemas y que se denominan campos de fase, los cuales son los siguientes: preparación, ejecución, control y fase final. Cada campo de fase está en función a cada etapa del proceso. Por último, cada campo de fase se puede dividir en fases (problemas individuales) culminando por el proceso de abstracción. A continuación, se nombran las siete fases que han sido identificadas para el diseño del congelador, las cuales están definidas en orden lógico según la secuencia de operaciones, tomando en cuenta las limitaciones y alcances de la máquina a diseñar. En el “Anexo A” se encuentra el detalle del proceso de abstracción elaborado para el diseño, así como las gráficas correspondientes.

Estructura de funciones:

Las funciones son ordenadas de la siguiente manera:

1. Recepción de producto a congelar
2. Alimentar el equipo de maíz entero
3. Traslado del maíz al equipo para el proceso de refrigeración
4. Proceso de refrigeración
5. Traslado del maíz al equipo para el proceso de congelado
6. Proceso de congelado
7. Trasladar el producto congelado

Para optimizar la estructura de funciones los procesos de refrigeración y de congelado se realizan en una misma cámara. A continuación, se muestra en la figura 2.1 la estructura de funciones óptima para el diseño del congelador de choclos entero.

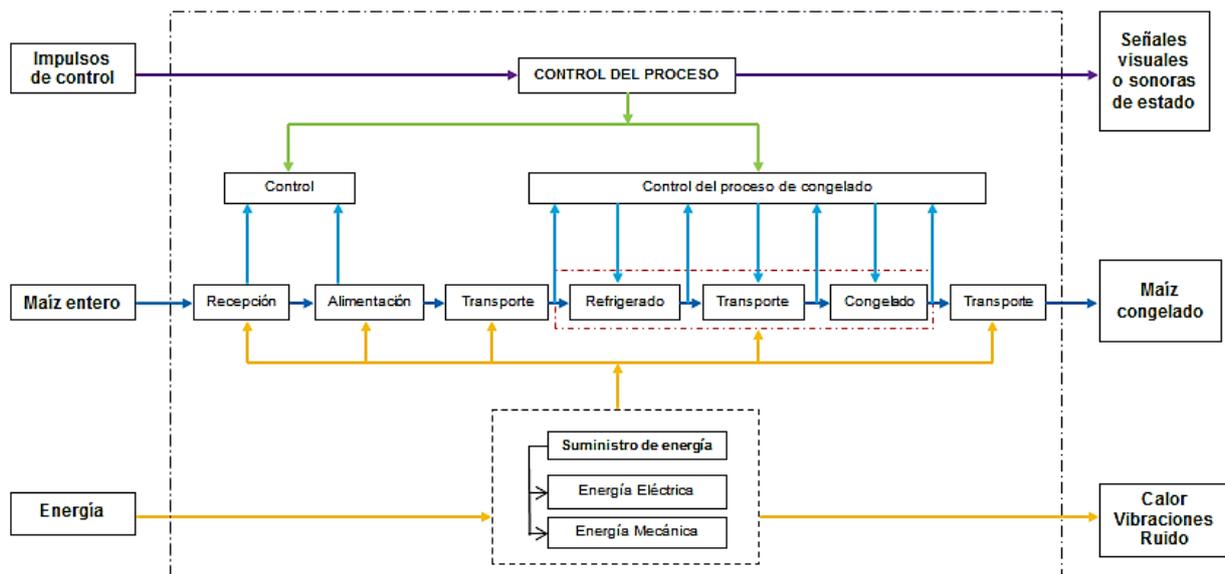


Figura 2.1 Estructura de funciones óptima del diseño

2.1.3 Concepto solución

Una vez definida la estructura de funciones se propusieron alternativas de solución a cada función. Luego con la ayuda de una matriz morfológica de Zwicky, se combinaron las alternativas de solución de cada una de las funciones y se seleccionaron 5 combinaciones, a las cuales llamaremos “concepto solución”. A continuación, se describen cada una de ellas en la tabla 2.2. Para mayor detalle del proceso de selección de los conceptos solución, véase el “Anexo A”.

Tabla 2.2 Conceptos solución del diseño

Concepto solución	Método de congelación	Descripción
1	Aire forzado <i>Tunel de congelacion estático</i>	El producto empaquetado en grupo de dos unidades se coloca en bandejas, las cuales a través de unos carros transportadores ingresan al congelador y se mantienen dentro de forma estática hasta que se alcance la temperatura de congelación deseada.
2	Aire forzado <i>Banda lineal transportadora</i>	El producto ingresa al congelador de forma individual y se desplaza a lo largo de una banda lineal, logrando el congelado cuando termine su recorrido.
3	Vaporización de líquido <i>Nitrógeno</i>	El producto ingresa individualmente al congelador sin empaquetar y se congela a través del contacto con el nitrógeno líquido, el cual se encuentra a -196 °C.
4	Aire forzado <i>Banda espiral transportadora</i>	El producto ingresa por la parte superior y sale congelado por la inferior de la máquina. Su configuración es un poco compleja pero tiene un buen ahorro de espacio.
5	Aire forzado <i>Tunel de congelacion estático</i>	El producto ingresa al congelador estático empaquetado en cajas y transportado en los pallets a su interior.

2.1.4 Valoración técnico - económica

Para elegir la opción óptima entre los conceptos solución se realizó un análisis objetivo con criterios técnicos y económicos comunes con puntajes asignados siguiendo el procedimiento según la norma DIN VDI 2225 de proyectos mecánicos. Para mayor detalle de los criterios tomados, véase el “Anexo A”.

A continuación, se muestra en la figura 2.2 los resultados del análisis.

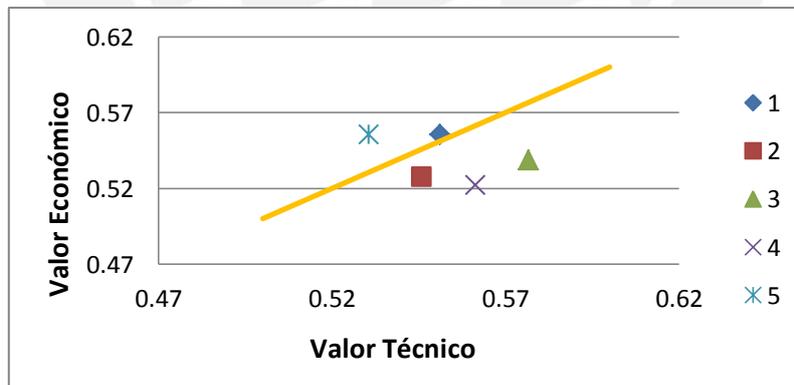


Figura 2.2 Evaluación de los conceptos solución con pesos ponderado

2.1.5 Concepto solución óptimo

El concepto solución óptimo será aquel que cumpla con las valoraciones técnicas y económicas de manera equilibrada. Es por esta razón, que se elige como solución óptima al concepto solución 1 (figura 2.3). El cual es un congelador estático donde el producto ingresa a una temperatura de 5 °C embolsado en paquetes de 2 unidades (cada paquete tiene un peso aproximado de 500 g, formato de exportación) en

bandejas que se transportaran en carros, los cuales serán los suficientes para satisfacer la demanda de 100 kg/h. Estos permanecerán en la cámara el tiempo necesario para obtener en el centro térmico del producto (lugar más caliente) una temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ según la recomendación del CODEX Alimentarius.

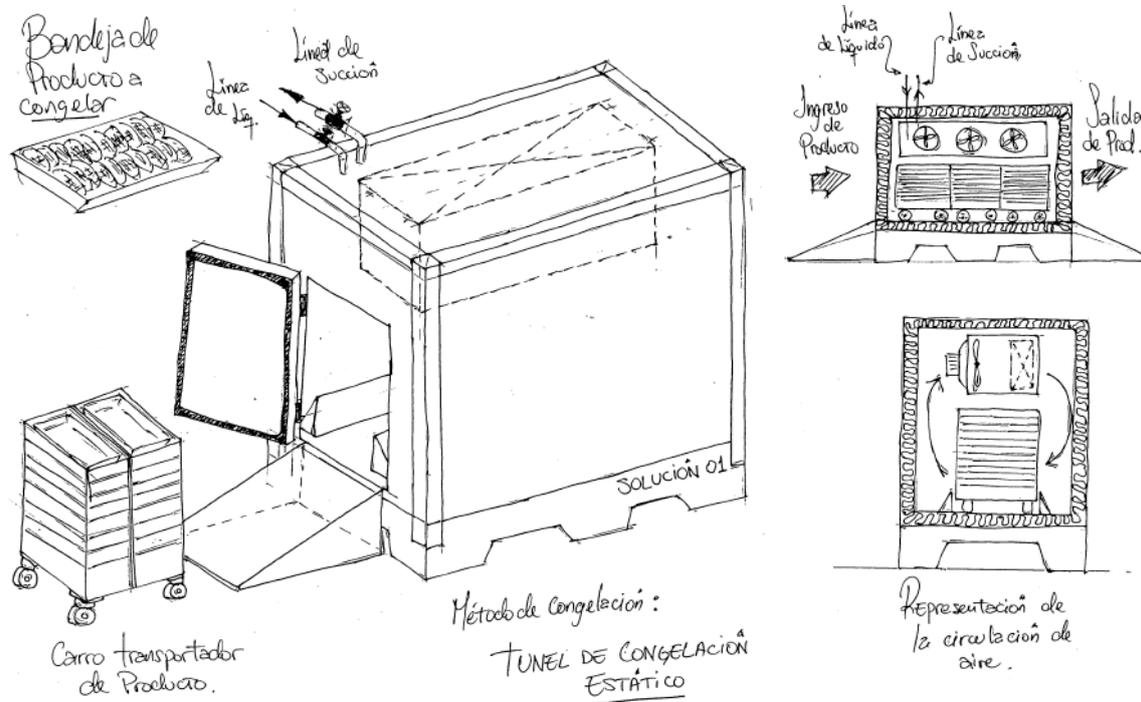


Figura 2.3 Representación del concepto solución óptimo según *Frabdy. Ludenay* la evaluación técnico-económica

2.2 Sistema térmico

El sistema térmico comprende los cálculos necesarios para la obtención de la carga térmica, la selección del refrigerante y de los equipos necesarios para que el sistema pueda funcionar adecuadamente. En la selección de equipos se detallara la obtención de los componentes principales (unidad condensadora, evaporador y válvula de expansión) y los secundarios (accesorios).

2.2.1 Propiedades Térmicas del producto

Las propiedades térmicas del maíz amiláceo (choclo) se pueden obtener por medio de métodos teórico-empíricos utilizando los datos de los constituyentes del producto, los cuales son obtenidos en laboratorio y son los siguientes: proteínas, grasas, carbohidratos, cenizas (que son los restos que quedan después de realizar el ensayo) y el contenido de agua que se encuentra en estado líquido o sólido. Para ello se utilizara la información del Handbook ASHRAE – Refrigeration 2006, “Thermal

Properties of Food (Chapter 09)". A continuación, se mostrara el procedimiento de cálculo para la obtención de la fracción de hielo, densidad, conductividad térmica y calor específico del producto.

2.2.1.1 Fracción de hielo

Cuando el producto se lleva por debajo del punto inicial de congelación comienza el proceso de congelado que no se da a una temperatura constante sino que congela en un rango de temperaturas que no necesariamente comienza en cero sino que dependiendo de la concentración de azúcares que tenga podrá darse a una temperatura menor. Para el caso del choclo se da a $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es un valor empírico [ASHRAE 2006: Ch. 9, pp. 9.2]. La fracción de hielo es la fracción de agua que se congela realmente a cierta temperatura. Y se obtiene de forma empírica:

$$x_{ice} = \frac{1.105 \times x_{wo}}{1 + \frac{0.7138}{\ln(t_f - t_c + 1)}} \quad \dots (2.1)$$

Donde:

t_c : Temperatura final de congelamiento del producto [$^{\circ}\text{C}$]

t_f : Temperatura inicial de congelamiento del producto [$^{\circ}\text{C}$]

x_{ice} : Fracción de hielo [%]

x_{wo} : Contenido de agua del producto antes de ser congelado [%]

2.2.1.2 Densidad

La densidad del producto depende de la porosidad del producto que en nuestro caso es igual a cero, también de la densidad y fracción de masa de los constituyentes del producto [ASHRAE 2006: Ch. 9, pp. 9.6].

$$\rho = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad \dots (2.2)$$

Donde:

ε : Porosidad (en productos granulados) [%]

ρ : Densidad del producto [kg/m^3]

ρ_i : Densidad de los constituyentes [kg/m^3]

x_i : Fracción de masa de los constituyentes [%]

Esta relación se puede aplicar para antes y después del punto inicial de congelado. Los modelos experimentales para obtener la densidad de cada uno de los constituyentes se encuentran detallados en el "Anexo B.1".

2.2.1.3 Calor específico

Es la medida de la energía requerida para el cambio de la temperatura del alimento en un grado. Esta propiedad no es constante y varía con la temperatura. Por otro lado, para obtener el calor específico del producto se tiene que tomar en cuenta si está por debajo o encima del punto de inicio del congelamiento [ASHRAE 2006: Ch. 9, pp. 9.7]

Para el alimento sin congelar, tomando la temperatura promedio si se trabaja en un rango de temperaturas:

$$c_1 = \sum c_i \times x_i \quad \dots (2.3)$$

Donde:

- c_1 : Calor específico del producto antes de la congelación [kJ/(kg °C)]
- c_i : Calor específico de cada constituyente del producto [kJ/(kg °C)]
- x_i : Fracción de masa de los constituyentes [%]

Para el alimento congelado, a una temperatura específica:

$$c_2 = 1.55 + 1.26x_s - \frac{(x_{w0} - x_b)L_o t_f}{t_s^2} \quad \dots (2.4)$$

Donde:

- c_2 : Calor específico del producto después de la congelación [kJ/(kg °C)]
- L_o : Calor latente de fusión del agua [kJ/kg]
- t_f : Temperatura inicial de congelamiento del producto [°C]
- t_s : Temperatura del producto totalmente congelado [°C]
- x_b : Fracción de masa ligada al contenido de agua [%]
- x_s : Fracción de masa de la parte sólida del producto [%]
- x_{w0} : Contenido de agua del producto antes de ser congelado [%]

Para conocer el cálculo detallado véase el “Anexo B.1”.

2.2.1.4 Entalpia

Es la cantidad de energía que tiene el alimento a una cierta temperatura y que necesita un sistema de referencia. En el caso, que el alimento se encuentre por encima del punto de congelamiento la entalpia consiste en energía sensible, pero por debajo de este punto consiste en una combinación de energía sensible y latente. A continuación, se presentarán fórmulas empíricas para el producto antes y después del punto de inicio de congelación producto [ASHRAE 2006: Ch.9 pp. 9.7].

Para el alimento sin congelar:

$$H = H_f + (t_i - t_f)(4.19 - 2.30x_s - 0.628x_s^3) \quad \dots (2.5)$$

Para el alimento congelado:

$$H = (t_c - t_r) \left[1.55 + 1.26x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) \times L_o \times t_f}{t_r \times t_c} \right] \quad \dots (2.6)$$

En las ecuaciones anteriores:

H : Entalpia del producto a una cierta temperatura [kJ/kg]

H_f : Entalpia del producto a la temperatura inicial de congelamiento [kJ/kg]

L_o : Calor latente de fusión del agua [kJ/kg]

t_c : Temperatura final de congelamiento del producto [°C]

t_f : Temperatura inicial de congelamiento del producto [°C]

t_i : Temperatura del ingreso del producto a la máquina [°C]

t_r : Temperatura de referencia (entalpia cero = 227.6 K) [°C]

x_b : Fracción de masa ligada al contenido de agua [%]

x_s : Fracción de masa de la parte sólida del producto [%]

x_{wo} : Contenido de agua del producto antes de ser congelado [%]

Para obtener el valor de la entalpia a la temperatura del inicio de la congelación se puede tomar la segunda expresión para el alimento congelado.

Para conocer el cálculo detallado véase el “Anexo B.1”.

2.2.1.5 Conductividad térmica

La conductividad térmica se relaciona con la transferencia de calor por conducción debido a un gradiente de temperatura. En el caso de los alimentos este valor depende de la composición del alimento, su estructura y la temperatura. Existen diversos modelos empíricos y teóricos para modelar la conductividad térmica y se dividen en dos grandes grupos: la conductividad que se da en forma paralela o perpendicular al producto [ASHRAE 2006: Ch.9 pp. 9.11]. En nuestro caso usaremos el modelo en el cual la conductividad se da de forma paralela al producto ya que esto se asimila más a nuestro proceso, ya que el flujo de calor es paralelo a la sección característica del producto que es donde se puede observar la corona de granos del maíz, figura 2.4.

La ecuación 2.7 representa la conductividad para un flujo de calor paralelo a la sección característica.

$$k = \sum x_i^v / k_i \quad \dots (2.7)$$

$$x_i^v = \frac{x_i / \rho_i}{\sum (x_i / \rho_i)} \quad \dots (2.8)$$

En las ecuaciones anteriores:

- ρ_i : Densidad de los constituyentes [kg/m^3]
- k : Conductividad térmica del producto [$\text{W}/(\text{m K})$]
- k_i : Conductividad térmica de los constituyentes [$\text{W}/(\text{m K})$]
- x_i : Fracción de masa de los constituyentes [%]

Para conocer el cálculo más detallado véase el “Anexo B.1”.



Figura 2.4 Sección característica del producto a lo largo de su longitud

2.2.1.6 Determinación de las propiedades térmicas del producto

Para obtener las propiedades térmicas del producto es necesario primero conocer la fracción de masa de los constituyentes de este y además conocer a que temperaturas se va a trabajar. A continuación, en la figura 2.5 se muestra las dimensiones del producto, y en la tabla 2.3, los datos necesarios para realizar los cálculos de las propiedades térmicas del maíz a las condiciones de trabajo.



Figura 2.5 Dimensiones del producto a congelar

Tabla 2.3 Datos del producto [ASHRAE 2006, Chapter 9]

Datos del producto Maíz Amiláceo (Choclo)		
Dimensión	Longitud promedio	18 cm
	Diámetro promedio	6 cm
	Espesor de grano	1.5 cm
	Espesor de grano para cálculo	1.75 cm
Peso	Unidad (aproximado)	260 g
Composicion	Contenido de agua (liquida)	67.30 %
	Proteinas	3.30 %
	Grasas	0.80 %
	Carbohidratos	27.80 %
	Cenizas	0,80 %
Temperaturas	Punto inicial de congelación, t_f	-0.6 °C
	Inicial del producto, t_i	5 °C
	Centro térmico. t_c	-18 °C
	Totalmente congelado, t_s	-40 °C

Reemplazando los valores en las ecuaciones anteriores, se obtiene la tabla 2.4. Para conocer el cálculo detallado véase de la tabla véase el “Anexo B.1”.

Tabla 2.4 Propiedades térmicas del producto

Propiedades térmicas del producto		
Fracción de hielo	X_{ice}	59.7 %
Densidad		
Antes de t_f	ρ_i	1129 kg/m ³
Después de t_f	ρ_s	1068 kg/m ³
Calor específico		
Antes de t_f	c_1	3.30 kJ/(kg*K)
A la temperatura $t_s=-40^\circ\text{C}$	c_2	2.04 kJ/(kg*K)
Entalpia		
A la temperatura $t_f=-0,6^\circ\text{C}$	H_f	305.50 kJ/kg
A la temperatura $t_c=-18^\circ\text{C}$	H	58.59 kJ/kg
A la temperatura $t_i=5^\circ\text{C}$	H_i	324.63 kJ/kg
Conductividad Térmica		
A la temperatura $t_s=-40^\circ\text{C}$	k_s	2.04 W/(m*K)

2.2.2 Tiempo de congelamiento

El tiempo de congelamiento es el tiempo necesario para que el producto sea llevado desde una temperatura inicial hasta la temperatura deseada; además, existen varios métodos empírico-teóricos que modelan este tiempo y que utilizan números adimensionales. Para emplear estos métodos de cálculo se tiene que definir la geometría del producto a congelar en formas sencillas y macizas.

En este proyecto, el producto a congelar son los granos del maíz entero, figura 2.6, siendo la geometría a lo largo de toda la longitud del maíz equivalente a un anillo cónico truncado. Esta geometría se asumirá para el cálculo como un cilindro finito

macizo, y se tomará como diámetro característico el espesor del grano promedio multiplicado por dos (por ser un anillo). Además, en el presente diseño, se empleará el método de “Equivalent Heat Transfer Dimensionality, E” (Dimensión equivalente de transferencia de calor) [ASHRAE 2006: Ch. 10, pp. 10.9]. Este se basa en obtener el tiempo de congelamiento para una superficie infinita y luego de aplicar un factor correctivo “E”, se obtiene el tiempo de congelamiento para una superficie cilíndrica finita. Por último, se aplicará un factor de sobretiempo que asegure un adecuado tiempo de congelamiento. El detalle de este cálculo se encuentra desarrollado en el Anexo B.2.

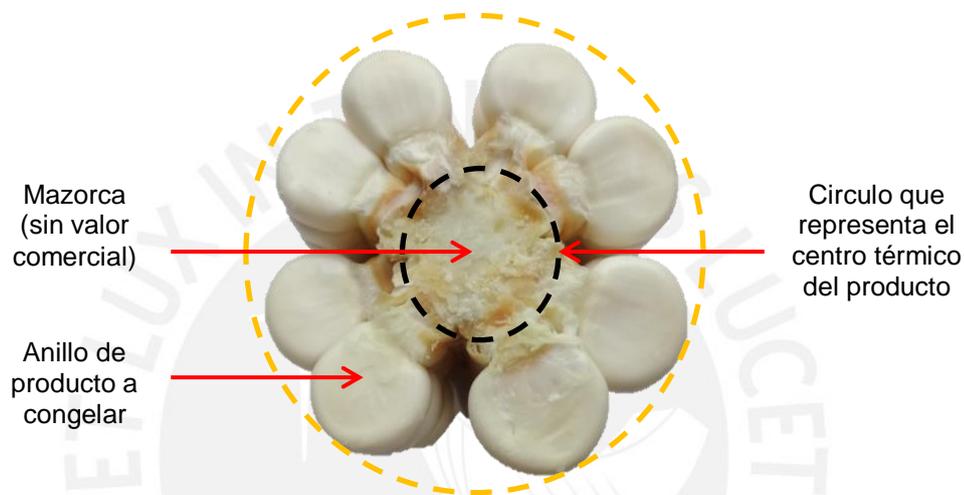


Figura 2.6 Sección característica del producto a lo largo de su longitud

➤ Tiempo de congelación estimado para una superficie infinita

Para determinar el tiempo estimado de congelamiento de una superficie infinita se utilizara el método de Hung y Thompson (1983) para una temperatura final de congelación de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ASHRAE 2006: Ch. 10, pp. 10.8]

$$\theta_{slab} = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{P \times D}{h} + \frac{R \times D^2}{k_s} \right) \quad \dots (2.9)$$

Donde:

- D : Dimensión característica [m]
- h : Coeficiente convectivo [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]
- k_s : Conductividad térmica del producto totalmente congelado [$\text{W}/(\text{m K})$]
- P y R : Factores en función de números adimensionales [-]
- ΔH_{18} : Variación de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial producto hasta la temperatura final de congelación en el centro térmico [kJ/m^3]
- ΔT : Promedio ponderado de la diferencia de temperaturas [$^{\circ}\text{C}$]
- θ_{slab} : Tiempo de congelación para una superficie infinita [h]

- Promedio ponderado de la diferencia de temperaturas:

$$\Delta T = (t_f - t_m) + \frac{(t_i - t_f)^2 \frac{C_l}{2} - (t_f - t_c)^2 \frac{C_s}{2}}{\Delta H_{18}} \quad \dots (2.10)$$

Donde:

- C_l : Calor específico volumétrico a la temperatura de ingreso del producto [kJ/(m³ K)]
- C_s : Calor específico volumétrico a la temperatura total de congelación [kJ/(m³ K)]
- t_c : Temperatura final de congelamiento del producto [°C]
- t_f : Temperatura inicial de congelamiento del producto [°C]
- t_i : Temperatura del ingreso del producto a la máquina [°C]
- t_m : Temperatura del evaporador [°C]
- ΔH_{18} : Variación de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial producto hasta la temperatura final de congelación en el centro térmico [kJ/m³]
- ΔT : Promedio ponderado de la diferencia de temperaturas [°C]

- Factores en función de los números de Biot, Plank y Stefan

$$P = 0.7306 - 1.083 \times Pk + Ste \times \left(15.40 \times U - 15.43 + 0.01329 \times \frac{Ste}{Bi} \right) \quad \dots (2.11)$$

$$R = 0.2079 - 0.2656 \times U \times Ste \quad \dots (2.12)$$

$$U' = \frac{\Delta T}{t_f - t_m} \quad \dots (2.13)$$

Donde:

- Bi : Número de Biot

$$Bi = \frac{h \times D}{k_s} \quad \dots (2.14)$$

- Pk : Número de Plank

$$Pk = \frac{C_l(t_i - t_f)}{\Delta H} \quad \dots (2.15)$$

- Ste : Número de Stefan

$$Ste = \frac{C_s(t_f - t_m)}{\Delta H} \quad \dots (2.16)$$

Además, ΔH es la variación de entalpia volumétrica entre la temperatura de inicio de la congelación y la temperatura final en su centro térmico.

➤ Tiempo de congelamiento aproximado para una forma irregular

Como se explicó, anteriormente, se usará en método de dimensión equivalente de transferencia de calor realizado por Cleland y Earle (1982) [ASHRAE 2006: Ch. 10, pp. 10.9].

$$\theta = \frac{\theta_{slap}}{E} \quad \dots (2.17)$$

Siendo:

E : Coeficiente de dimensión equivalente

$$E = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad \dots (2.18)$$

G_1, G_2 y G_3 : Son valores que se obtienen de tablas

$$E_1 = X \left(\frac{2.32}{\beta_1^{1.77}} \right) \frac{1}{\beta_1} + \left[1 - X \left(\frac{2.32}{\beta_1^{1.77}} \right) \right] \frac{0.73}{\beta_1^{2.50}} \quad \dots (2.19)$$

$$E_2 = X \left(\frac{2.32}{\beta_2^{1.77}} \right) \frac{1}{\beta_2} + \left[1 - X \left(\frac{2.32}{\beta_2^{1.77}} \right) \right] \frac{0.50}{\beta_2^{3.69}} \quad \dots (2.20)$$

$$X(\phi) = \frac{\phi}{Bi^{1.34} + \phi} \quad \dots (2.21)$$

$$\phi = \frac{2.32}{\beta^{1.77}} \quad \dots (2.22)$$

$$\beta_1 = \frac{\text{segunda dimensión más corta del producto}}{\text{dimensión más pequeña del producto}} \quad \dots (2.23)$$

$$\beta_2 = \frac{\text{dimensión más larga del producto}}{\text{dimensión más pequeña del producto}} \quad \dots (2.24)$$

➤ Determinación del tiempo de congelamiento

Para obtener el tiempo de congelamiento aproximado se necesitan las propiedades térmicas del producto, además de las dimensiones geométricas de este. A continuación, se detalla las propiedades térmicas del maíz choclo (tabla 2.5) obtenidas de la tabla 2.4, y las dimensiones características del producto.

Tabla 2.5 Propiedades necesarias para el cálculo del tiempo de congelamiento

Propiedades	-40	-18	5
Densidad	1068	1068	1129
Entalpia	-	58.59	349.63
Calor Especifico	2.045	-	3.30
Conductividad térmica	2.040	-	-

Dimensiones características del producto:

- Longitud promedio : 18 cm
- Diámetro promedio : 6 cm
- Espesor de grano de diseño : 1.75 cm

Además, se emplea por recomendación una temperatura en el evaporador (t_m) igual a -30 °C [Yamada 2010]. Reemplazando los datos en las ecuaciones anteriores, se obtiene la tabla 2.6, tiempo de congelamiento de una superficie infinita. Cabe resaltar que el valor del coeficiente convectivo es un valor asumido en la tabla 2.6, ya que

todavía no se selecciona el evaporador y se desconoce la velocidad del aire que este brinda. Es por ello, que el cálculo es preliminar, y luego de seleccionado los equipos principales se procederá a realizar un recálculo para verificar si los equipos seleccionados trabajan en los rangos requeridos.

Tabla 2.6 Tiempo de congelamiento para una superficie infinita

Tiempo de congelamiento para una superficie infinita			
Diferencia de entalpía volumétrica	ΔH_{18}	304 006.53	kJ/m ³
Calor específico volumétrico			
$t_i=5^\circ\text{C}$	C_l	3 727.80	kJ/(m ³ K)
$t_s=-40^\circ\text{C}$	C_s	2 182.80	kJ/(m ³ K)
Coefficiente convectivo	h	20	W/(m ² K)
Dimensión característica	D	0.035	m
Números adimensionales			
Biot	Bi	0.34	
Plank	Pk	0.069	
Stefan	Ste	0.211	
Promedio de la diferencia de temp.	ΔT	28.505	K
Factores en función de adimensionales			
Factor U	U'	0.970	
Factor P	P	0.479	
Factor R	R	0.154	
Tiempo de congelado	θ_{slap}	9.92	h

Con el tiempo obtenido para una superficie infinita se procede a encontrar el tiempo para una superficie cilíndrica finita, utilizando el método de dimensión equivalente de transferencia de calor (ecuación 2.17), los resultados se aprecian en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Tiempo estimado de congelamiento del producto

Tiempo de congelación para un cilindro finito			
Relación dimensional			
Coefficiente β_1	β_1	1.71	
Coefficiente β_2	β_2	5.14	
Constantes geométricas			
	G_1	2	
	G_2	0	
	G_3	0	
Coefficiente de dimensión equivalente			
coeficiente ϕ	ϕ	0.128	
Coefficiente $X(\phi)$	$X(\phi)$	0.349	
Coefficiente E_2	E_2	0.062	
Coefficiente equivalente	E	2.062	
tiempo de congelación para sup. Infinita	θ_{slap}	9.92	h
tiempo de congelación teórico	θ_t	4.81	h
Factor de sobrecarga	FS	1.15	
Tiempo estimado de congelado	θ	5.54	h

2.2.3 Carga térmica

La carga térmica o también conocida como carga de enfriamiento es el valor en unidades de energía que se necesita para poder enfriar o congelar el producto desde la temperatura inicial hasta la temperatura requerida. Para el cálculo de la carga térmica nos basamos en el manual de recomendaciones de ASHRAE-Refrigeration “Chapter 13: Refrigeration Load” [ASHRAE 2006].

A continuación, se realizarán los cálculos necesarios para obtener la carga térmica a congelar que es la variable fundamental para la selección de los componentes del sistema.

2.2.3.1 Componentes de la carga térmica

Los componentes involucrados para la determinación de la carga de térmica requerida en el sistema de congelación de este proyecto son los siguientes:

- ✓ Carga por Transmisión: Flujo de calor a través de las paredes del espacio refrigerado.
- ✓ Carga del Producto: Flujo de calor producido por el enfriamiento y congelamiento del producto.
- ✓ Carga Interna: Flujo de calor necesario para enfriar el material de transporte y de envasado del producto.
- ✓ Carga de Infiltración: Flujo de calor asociado al ingreso de aire a la máquina.
- ✓ Carga relativa a los equipos: Es el flujo de calor asociado a la operación de los equipos de refrigeración como los motores de los ventiladores de los evaporadores, calor generado en el descongelamiento del evaporador cuando este opera a temperaturas por debajo del punto de congelación.

Los primeros cuatro componentes de carga constituyen la carga principal de calor y son la base para el diseño de la máquina congeladora. Para seleccionar los equipos se tomara como carga total la carga principal más la carga de calor procedente de los equipos de refrigeración.

➤ Carga por transmisión

La carga por transmisión de calor a través de las paredes, techo y base de la máquina, para un régimen estacionario. Se obtendrá a partir de la siguiente expresión:

$$Q_t = U \times A \times \Delta t \quad \dots (2.25)$$

Donde:

- A : Superficie externa de la máquina [m²]
- Q_t : Flujo de calor que atraviesa la máquina [kW]
- U : Coeficiente global de transmisión [kW/(m² °C)]

Δt : Diferencia de temperatura entre el ambiente externo y evaporador [°C]

El coeficiente global de transmisión (U) puede ser obtenido a partir de la expresión desarrollada para paredes:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k_p} + \frac{1}{h_o}} \quad \dots (2.26)$$

Siendo:

h_i : Coeficiente convectivo de la superficie interna de pared [kW/(m² °C)]

h_o : Coeficiente convectivo de la superficie externa de pared [kW/(m² °C)]

k_p : Conductividad térmica del panel aislante [kW/(m °C)]

U : Coeficiente global de transmisión [kW/(m² °C)]

x : Espesor de panel aislante [m]

Para un ambiente con poco movimiento de aire o con aire calmado se puede considerar un valor de coeficiente convectivo de 10 W/(m² °C), como es el caso de h_o ; y para una superficie expuesta a un flujo de aire que circula con una velocidad del orden de 5 m/s se estima un coeficiente convectivo de 35 W/(m² °C), como es el caso de h_i , estos valores se emplearan para un cálculo preliminar, el cual luego se recalculara con la selección de los equipos principales del congelador.

➤ Carga de Productos

Es el calor que se debe absorber para reducir la temperatura de los productos hasta la temperatura deseada. El calor a remover debido a los productos, puede ser calculado mediante las expresiones siguientes:

- Calor a remover Q_1 : para enfriar el producto sobre el punto de congelación desde la temperatura (t_i) hasta la temperatura (t_f) mayor o igual a la temperatura de congelación, pero sin producir congelamiento:

$$Q_1 = m \times c_1 \times (t_i - t_f) \quad \dots (2.27)$$

Por otra parte, para este caso no se tomará en cuenta el calor de respiración debido a que el sistema analizado no es una cámara de almacenamiento y el producto se encuentra envasado al ingreso a la cámara.

- Calor a remover Q_2 : para congelar el choclo:

$$Q_2 = m \times h_{sf} \quad \dots (2.28)$$

- Calor a remover Q_3 : para enfriar los productos desde el punto de congelación (t_f) hasta la temperatura (t_c) recomendada por el CODEX:

$$Q_3 = m \times c_2 \times (t_f - t_c) \quad \dots (2.29)$$

La carga térmica del producto se determinará a partir del tiempo requerido para obtener el enfriamiento y congelación del maíz.

$$Q_p = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3600 \times t} \quad \dots (2.30)$$

En las ecuaciones anteriores:

- c_1 : Calor específico del producto antes de la congelación [kJ/(kg °C)]
- c_2 : Calor específico del producto después de la congelación [kJ/(kg °C)]
- h_{sf} : Calor latente de cambio de fase [kJ/kg]
- m : Masa del producto [kg]
- Q_1 : Calor de enfriamiento [kJ]
- Q_2 : Calor de cambio de fase [kJ]
- Q_3 : Calor de congelación [kJ]
- Q_p : Carga térmica del producto [kW]
- t : Tiempo total de congelamiento del producto [h]
- t_c : Temperatura final de congelamiento del producto [°C]
- t_f : Temperatura inicial de congelamiento del producto [°C]
- t_i : Temperatura de ingreso del producto al congelador [°C]

Los siguientes valores se reemplazaran en las ecuaciones anteriores para la obtención de la carga térmica del producto. Para el detalle del cálculo véase el Anexo B.3.

c_1	= 3.62 kJ/(kg °C)	(Tabla 2.4)
h_{sf}	= 254 kJ/kg	[ASHRAE 2006: Ch. 09, pp. 9.3]
c_2	= 1.98 kJ/(kg °C)	(Tabla 2.4)
t_f	= -0.6 °C	(Tabla 2.3)

➤ Carga interna

Como componentes de carga interna se tienen: La energía eléctrica disipada como calor dentro del espacio refrigerado proveniente de la iluminación, equipos de elevación o almacenaje y personal que labora dentro del espacio refrigerado. Para nuestro caso esta carga será debido al embolsado de EPS en la cual se encuentra el producto al ingreso al congelador, las bandejas y los carros que son colocados dentro de la cámara de congelado.

$$Q_i = \sum G_n \times c_n \times \Delta t \quad \dots (2.31)$$

Donde:

- c_n : Coeficiente de transmisión de calor de la carga interna [kJ/(kg K)]
- G_n : Peso de las diversas piezas y materiales [kg]

Q_i : Carga interna del material de transporte y de envasado [kW]

Δt : Diferencia de temperatura entre el ambiente externo y evaporador [°C]

➤ Carga de infiltración

Al ser una máquina de congelación estática cerrada las únicas infiltraciones que se producirían sería por la diferencia de densidad entre el aire externo e interno si existiera algún tipo de abertura o mal sello. Para el diseño se evitará contar con estos inconvenientes.

➤ Carga relativa a los equipos de refrigeración

La carga térmica obtenida como la suma de las anteriores debe corregirse después de la preselección de los equipos debido a la incorporación de dos cargas térmicas adicionales que vienen con los equipos.

- *Carga debida a los motores eléctricos de los evaporadores.* Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = N^{\circ}evap \times (N^{\circ}motor \times P_{motor}) \times t_e \quad \dots (2.32)$$

Donde:

$N^{\circ}evap$: Número de evaporadores [-]

$N^{\circ}motor$: Número de motores por evaporador [-]

P_{motor} : Potencia de cada motor del ventilador [kW]

Q_m : Calor aportado por motores del evaporador [kW]

t_e : Tiempo de funcionamiento del evaporador [h/d]

- *Calor de descongelamiento* si el evaporador opera a temperatura debajo del punto de congelamiento, debe ser descongelado periódicamente. En nuestro caso elegiremos un sistema de descongelamiento por resistencias eléctricas.

$$Q_d = N^{\circ}evap \times (Q_{descong} \times t_d) \times F \quad \dots (2.33)$$

Donde:

F : Ingreso de calor a la cámara por descongelamiento [%]

0.5: Descongelamiento por resistencias eléctricas

0.4: Descongelamiento por gas caliente

$N^{\circ}evap$: Número de evaporadores [-]

Q_d : Calor de descongelamiento del diseño [kW]

$Q_{descong}$: Calor de descongelamiento por resistencias eléctricas [kW]

t_d : Tiempo de descongelamiento [h/d]

➤ Factor de seguridad

Por lo general el valor de la carga total de enfriamiento debe ser incrementado por un factor de seguridad, para permitir discrepancias posibles entre los criterios del diseño y las condiciones reales de operación. Un valor común del factor de seguridad es incrementar las cargas en 10 % [ASHRAE 2006 Cap. 13.7]. El cual se empleará como factor para todas las cargas térmicas.

2.2.3.2 Determinación de la capacidad frigorífica

Se determinara la carga térmica necesaria que debe ser extraída por el refrigerante para congelar el producto a la temperatura recomendada de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los resultados permitirán hacer una pre-selección de los elementos principales para luego sumarle las cargas térmicas provenientes de los equipos y verificar si todavía trabajan dentro de los rangos permitidos.

A continuación, se detallaran los parámetros de operación del congelador:

- Carga del producto : 100 kg/h
- Tiempo estimado de congelación : 5.54 h
- Temperatura de ingreso del producto : $5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura en el centro térmico : $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de condensación : $45\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de evaporización : $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Dimensión del congelador : 3.0 x 2.1 x 2.9 m
- Dimensión del carro porta bandejas : 78 x 90 x 135 cm
 - Material : AISI 304L
 - Número de bandejas : 30 (75x39 cm)
 - Número de carros : 3
- Aislante utilizado : Poliuretano
 - Espesor mínimo = 120 mm [Yamada 2009]
 - Coefficiente térmico = $0.0256\text{ W}/(\text{m }^{\circ}\text{C})$ [ASHRAE 2006 Cap.13]

Reemplazamos los parámetros anteriores en cada uno de los componentes de la carga térmica que debe ser removida y se obtiene la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Carga térmica preliminar de la máquina

Componentes de carga de enfriamiento	Capacidad Frigorífica (kW)
Carga del producto	9.54
Carga de transmisión	0.33
Carga interna	0.40
Carga Térmica	10.27
Carga Térmica [ton]	2.92

El valor obtenido de **10.27 kW** es la capacidad frigorífica para congelar el producto a la temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para conocer el detalle del cálculo de la carga térmica véase el “Anexo B.3”.

2.2.4 Selección del tipo de refrigerante

Para la selección del refrigerante se tomara en cuenta principalmente la relación de compresión, la potencia de compresión, su efecto con el ambiente y disponibilidad en el mercado local. El ciclo de refrigeración con el cual trabajara la máquina de congelado de maíz choclo será por compresión de vapor.

A continuación, se comparara algunas características entre los refrigerantes para una temperatura de condensación de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una de evaporación de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabla 2.9).

Tabla 2.9 Características de refrigerantes para las condiciones de trabajo [BITZER 2010]

Refrigerante	Temperatura crítica [$^{\circ}\text{C}$]	Deslizamiento de temperatura [K]	P_{cond} [kPa]	P_{evap} [kPa]	$\frac{P_{cond}}{P_{evap}}$	R_p	OPD (R11=1.0)	GWP (CO ₂ =1,0)
R-22	96	0	1729.0	178.2	9.7	<10	0,055	1700
R-717	133	0	1781.9	131.5	13.6	>10	0	0
R-134a	101	0	1129.9	92.7	12.2	>10	0	1300
R-404a	73	0,7	2058.3	207.0	9.9	<10	0	3780
R-507a	71	0	2104.0	230.8	9.1	<10	0	3850

Ahora, se compara la potencia necesaria en el compresor para una potencia frigorífica de 10.01 kW (tabla 2.10).

Tabla 2.10 Potencia preliminar necesaria en el compresor [ASHRAE 2005]

Refrigerante	$H_3 = H_4$ [kJ/kg]	H_1 [kJ/kg]	ΔH_{14} [kJ/kg]	m_R [kg/s]	H_2 [kJ/kg]	W [kW]	HP
R-22	255	396	141	0,07	455	4,1	3,1
R-717	405	1450	1045	0,01	1825	3,5	2,6
R-134a	265	382	117	0,08	440	4,9	3,7
R-404a	270	350	80	0,12	405	6,8	5,1
R-507a	270	345	75	0,13	395	6,6	4,9

Donde:

GWP : Potencial de calentamiento Global [-]

H_1, H_2, H_3, H_4 : Entalpías del ciclo de compresión de vapor [kJ/kg]

m_R : Flujo másico del refrigerante [kg/s]

OPD : Potencial de reducción de la capa de ozono [-]

P_{cond} : Presión de condensación [kPa]

$\frac{P_{cond}}{P_{evap}}$: Relación de presiones condensación – evaporación [-]

P_{evap}	: Presión de evaporación [kPa]
W	: Potencia de compresión [kW]
ΔH_{14}	: Variación de entalpía de evaporación [kJ/kg]

Analizando las tablas 2.9 y 2.10, se seleccionara un refrigerante que pueda realizar la carga frigorífica en una sola etapa de compresión y para este caso tenemos las posibilidades: R-22, R-404a y R-507a. Además, no se tomara en cuenta el R-22 por su alto potencial de reducción de la capa de ozono. Ahora, entre los dos que restan se seleccionara el **R-404a** por su gran disponibilidad en el mercado y por poseer un menor potencia de calentamiento global (Efecto invernadero). Pese a que este pueda tener un mayor consumo de potencia en el compresor.

2.2.5 Selección de componentes principales

En la selección de los componentes principales se recurre a productos cuyos distribuidores o representantes de equipos se encuentren disponibles en el mercado peruano, siendo las consideraciones principales: el costo y las ventajas técnicas que brindan ciertas marcas respecto a otras.

Para el proceso de selección de equipos se siguió el procedimiento del manual “2006 ASHRAE Refrigeración Handbook”, empleando la información del Capítulo 43 (Component and Balancing in Refrigeration Systems).

La selección de los componentes esenciales está conformada por:

- a) Unidad condensadora
- b) Evaporador
- c) Válvula de expansión

2.2.5.1 Selección de la unidad condensadora

Para el sistema de congelado se planteó seleccionar una unidad condensadora por su practicidad y por la mediana capacidad frigorífica del congelador. En la selección de la unidad condensadora enfriada por aire, es necesario conocer el tipo de refrigerante usado en el sistema (R-404a), la potencia frigorífica, la temperatura de evaporación, la temperatura ambiente máxima de trabajo, valor del recalentamiento del gas aspirado por el compresor, además de la frecuencia y tensión de alimentación eléctrica.

Luego de revisar diferentes proveedores en el mercado se decidió trabajar con la empresa BITZER. Para la preselección de las unidades condensadoras se utilizó el programa “Bitzer Software Versión 6.3”, figura 2.7, en el cual se ingresaron los siguientes datos para sistema de congelación, tabla 2.11.

Tabla 2.11 Parámetros de selección de la Unidad Condensadora

Parámetros solicitados por el software	Parámetros del Sistema de Refrigeración
Tipo de Unidad condensadora	Estándar
Tipo de Refrigerante	R-404a
Temperatura de Referencia para la selección	Temperatura media del refrigerante por ser una mezcla
Tipo de compresor	Solo compresor sin variador de frecuencia
Potencia Frigorífica	10.27 kW (tabla 2.6)
Temperatura de Evaporación	-30 °C
Temperatura Ambiente	30 °C*
Recalentamiento del gas de aspiración	10 K**
Recalentamiento Útil	100 %
Frecuencia de la Red	60 Hz

* Como el congelador está diseñado para trabajar en la ciudad de Lima se selecciona la mayor temperatura promedio de esta ciudad.

** El valor de recalentamiento como practica estándar oscila entre los 5 y 10 K, si es menor a 5 K podría existir la posibilidad de entrada de líquido en el compresor y por encima de 10 K aumenta el consumo de potencia en este.

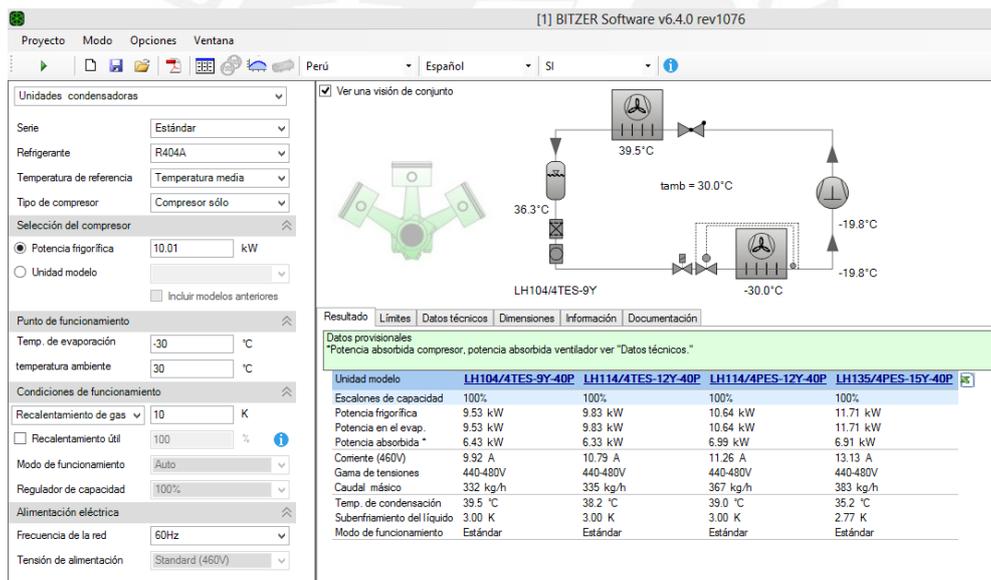


Figura 2.7 Utilización del programa “Bitzer Software 6.3” en la selección de la Unidad Condensadora

De las propuestas dadas por el sistema se pre-seleccionan los siguientes modelos: LH114/4TES-12Y-40P, LH114/4PES-12Y-40P y LH135/PES-15Y-40P. A continuación, se analizará la variación de la capacidad frigorífica de las unidades condensadoras al variar la temperatura de evaporación. Los valores presentados en la tabla 2.12 se obtuvieron para un valor de recalentamiento de 10 Kelvin.

Tabla 2.12 Variación de la capacidad frigorífica en las Unidades de condensación Bitzer pre-seleccionadas

Unidad Condensadora Bitzer Tamb. = 30°C (R404A)					
Modelo		Temperatura de Evaporación [°C]			
		-40	-35	-30	-25
LH 114/4TES-12Y-40P	Capacidad [kW]	5.50	7.49	9.83	12.54
LH 114/4PES-12Y-40P		5.83	8.05	10.64	13.62
LH 135/4PES-15Y-40P		6.20	8.69	11.71	15.30

Ahora, se procede a seleccionar los evaporadores que operarán en el congelador, para luego hacer un balance de la carga térmica y encontrar el punto de equilibrio de trabajo entre las unidades de condensación y los evaporadores, seleccionando el par de equipos que trabaje dentro de la solicitud de la carga frigorífica del congelador en diseño.

2.2.5.2 Selección del evaporador

En la selección de los evaporadores del tipo convección forzada, es necesario conocer la capacidad de refrigeración, la temperatura de evaporación, temperatura final del producto a congelar y el tipo de refrigerante a utilizar. Además, se empleará como referencia en la selección el capítulo 42 del manual ASHRAE "Forced-Circulation Air Coolers" [ASHRAE 2006, Ch. 42]

De los representantes más importantes de evaporadores se ha elegido a la empresa HELPMAN en la categoría de evaporadores industriales THOR-B con descongelamiento eléctrico. Además, se tendrá en cuenta que de acuerdo a la conformación del congelador los evaporadores deberán instalarse de manera equitativa a lo largo de la máquina procurando que se obtenga un flujo uniforme de aire frío en el producto, así mismo, deberán ocupar la mayor parte del largo de la máquina para evitar pérdidas de by-pass en el producto. Luego, de revisar el catálogo de la marca HELPMAN, se procede a pre-seleccionar evaporadores que satisfagan los requerimientos de la carga térmica. Seguidamente se evalúa los valores de capacidad frigorífica proporcionados en el catálogo, estos se encuentran calculados para una temperatura de evaporación de -8 °C y una diferencia de temperatura con el flujo de aire de 8 K. Cabe resaltar que la temperatura de congelación final del producto es de -18 °C por lo que se tomara una temperatura de aire a congelar de -20 °C. A continuación, se aplica un factor de ajuste de acuerdo a la diferencia de temperaturas entre el evaporador y la temperatura del aire de 9, 10 y 11 Kelvin, manteniendo la temperatura de evaporación constante a -30 °C. En la tabla 2.13, se muestran las capacidades frigoríficas de los tres evaporadores pre-seleccionados y su flujo volumétrico de aire respectivo.

Tabla 2.13 Capacidad Frigorífica de los evaporadores pre-seleccionados para una diferencia de temperaturas entre el evaporador y el producto congelado de 9. 10 y 11K

Evaporador Helpman Tevap. = -30 °C					
Catalogo		Operación			
Δt [°C] Evap. Y Air-on	8	9	10	11	
Temp. Evaporador [°C]	-8	-30	-30	-30	
Factor de Ajuste	1	1.11	1	0.9	
Modelo	Capacidad de refrigeración				m^3/h
THOR B 324-12	11.60	12.88	11.60	10.44	14 700
THOR B 224-08	10.50	11.66	10.50	9.45	10 500
THOR B 416-12	10.20	11.32	10.20	9.18	9 090

Por último, se procede a realizar un balance de carga térmica mediante un gráfico donde se observe el punto de equilibrio de trabajo entre las unidades condensadoras y los evaporadores. En base a este análisis se seleccionaran los equipos que cumplan con los requerimientos establecidos. Además, se obtendrá la temperatura de evaporación, y la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el aire frío de trabajo. En la figura 2.8, se representa las curvas de las Unidades de Condensación BITZER y los evaporadores HELPMAN pre-seleccionados.

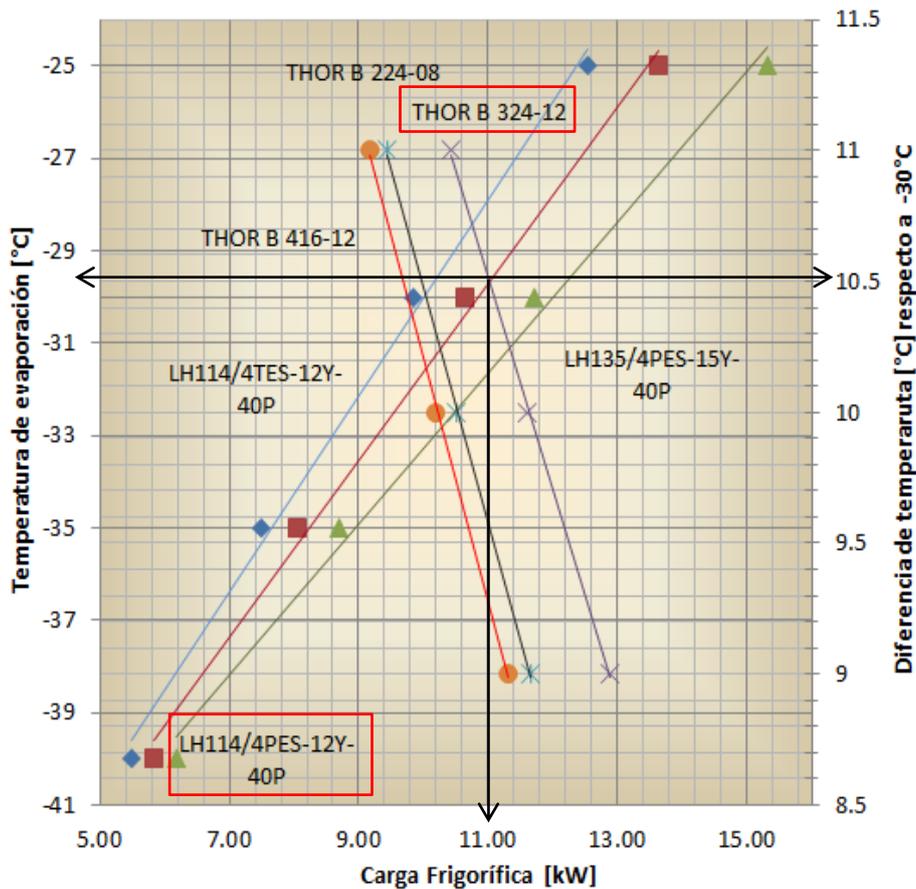


Figura 2.8 Punto de equilibrio de trabajo entre las Unidades condensadoras y los Evaporadores pre-seleccionados

A continuación, se seleccionara una pareja de equipos con un punto de equilibrio de trabajo por encima de la carga frigorífica hallada hasta el momento (10.27 kW), debido a que se tiene que realizar el recalcu de la capacidad de refrigeración tomando en consideración la carga térmica de los ventiladores de los evaporadores y del sistema de descongelamiento eléctrico.

Después de analizar las consideraciones mencionadas se selecciona de la figura 2.8 el evaporador Helpman **THOR-B 324-12** que opera junto con la unidad condensadora Bitzer **LH114/4PES-12Y-40P**, con una capacidad frigorífica de **11.05 kW** a una temperatura de evaporación de $-29.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con una diferencia de temperaturas entre el evaporador y el aire a congelar de 10.5 K. Es decir, que la temperatura de aire a congelar para una temperatura final de producto congelado de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, será igual a $-19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Luego, se procederá a realizar el recalcu del tiempo de congelación y la carga térmica para los equipos seleccionados, y verificar si la selección asumida está dentro de los rangos de operación del congelador.

2.2.5.3 Recalcu del coeficiente convectivo y de la carga térmica

Luego de seleccionar el evaporador, se procede a obtener el coeficiente convectivo que fue asumido en la tabla 2.6, $20\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$, en el cálculo del tiempo de congelamiento para los ventiladores del evaporador THOR-B 324. Luego, se recalcula la carga térmica y se adiciona la carga que generan los ventiladores y el sistema de descongelamiento. Para al final, verificar si el sistema recalculado con las cargas adicionales opera aún dentro de los rangos establecidos.

➤ Cálculo del coeficiente convectivo

El evaporador seleccionado de la marca Helpman tienen un flujo de aire nominal igual a $14\ 700\text{ m}^3/\text{h}$ que es utilizado para las cámaras de almacenamiento, pero en este proyecto se está diseñando un sistema de congelación por lo que se requiere mayores flujos volumétricos de aire. Consultando con el representante de la marca en el país (Alfa Laval) se solicitó que el equipo pueda tener un flujo de $30\ 000\text{ m}^3/\text{h}$, siendo la respuesta afirmativa, aumentando la potencia de los motores de los ventiladores. Es por ello, que para calcular la velocidad del tiro de aire dentro de la máquina se utilizará el valor de $3000\text{ m}^3/\text{h}$ aplicando la ecuación 2.34.

$$f_v = A_{ef} \times v \quad \dots (2.34)$$

Siendo:

A_{ef} : Área efectiva que atraviesa el flujo de aire [m^2]

f_v : Flujo volumétrico de aire total de los evaporadores [m^3/h]

v : Velocidad del flujo de aire [m/s]

En la figura 2.9, se puede observar el flujo de aire que circulara por el producto a congelar, además se aprecia la presencia de dos deflectores uno en la parte superior y otro en la inferior para evitar pérdidas por by-pass, concentrándose de esta forma la mayor parte del flujo del evaporador al producto a congelar. Además, para el cálculo de la velocidad del flujo de aire en el congelador se tendrá en cuenta el área efectiva de paso, la cual es la suma del área entre las bandejas de producto a congelar y el área de by-pass que no puede ser evitado por los deflectores. Siendo el área efectiva de diseño igual a 0.84 m^2 .

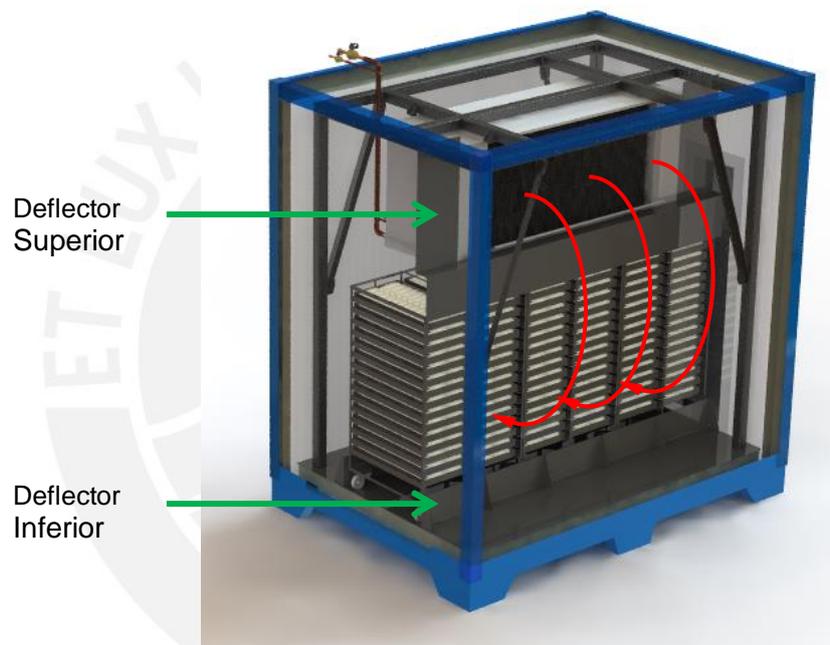


Figura 2.9 Flujo de aire del evaporador a los carros transportadores de maíz

Para poder obtener el valor del coeficiente convectivo se necesita hallar primero el número adimensional de Nuselt (Nu), el cual representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través de un fluido y el que se transferiría si solo existiera conducción. Este número se obtiene de manera empírica a través de correlaciones que relacionan los números adimensionales de Reynolds y Prandtl. Donde el número de Reynolds (Re) indica cual es el tipo de flujo de un fluido que puede ser laminar, turbulento o una mezcla de ambos (etapa transitoria no desarrollada). Mientras que el número de Prandtl (Pr) es la relación entre la velocidad con la cual se difunde el calor o la cantidad de movimiento molecular en el fluido, esto tiene un efecto en el espesor de la capa límite con respecto a un sólido con el cual transfiere calor.

Para el caso del diseño, el maíz se encuentra en bandejas y el flujo de aire lo atraviesa tanto por la parte superior como inferior, como se muestra en la figura 2.10, es por esta razón que se modela la transferencia de calor por convección como una placa plana con flujo externo. A continuación, se calculará el valor del número de Reynolds y se comparará con el valor del Reynolds crítico para saber si el flujo se encuentra en régimen laminar, turbulento o mezcla. El Reynolds crítico para este tipo de condiciones oscila de 1×10^5 hasta 30×10^5 [ÇENGEL 2011]. Un valor recomendado de diseño es el valor de 5×10^5 [ÇENGEL 2011], el cual se empleará en este proyecto.

Además, Las propiedades del aire se evaluarán a la temperatura promedio entre la temperatura del evaporador y la del ingreso del producto.

$$t_{prom} = \frac{t_i + t_m}{2} \quad \dots (2.35)$$

$$Re = \frac{\rho_a \times v \times L}{\mu} \quad \dots (2.36)$$

Siendo:

- L : Longitud que atraviesa el aire a través del producto [m]
- Re : Número de Reynolds [-]
- t_i : Temperatura de ingreso del producto al congelador [°C]
- t_m : Temperatura del evaporador [°C]
- t_{prom} : Temperatura promedio del aire [°C]
- v : Velocidad del flujo de aire [m/s]
- μ : Viscosidad dinámica del aire a la temperatura promedio [Pa s]
- ρ_a : Densidad del aire a la temperatura promedio [kg/m³]

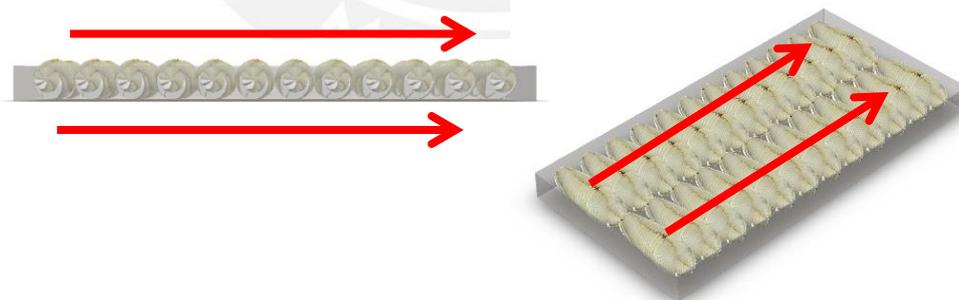


Figura 2.10 Flujo de aire en la bandeja de maíz a ser congelado

En este caso, el valor del Reynolds obtenido es cercano al valor del Reynolds crítico por lo que el flujo de aire se encuentra en una etapa de transición o de mezcla, Con estos datos se aplicará la correlación, ecuación 2.37 [Cruz 2009], con lo que se asume que el maíz en las bandejas se asemejan a una pared plana y el flujo es externo.

$$Nu = (0.037 \times Re^{0.8} - 871) \times Pr^{1/3} \quad \dots (2.37)$$

$$x_{crit} = 5 \times 10^5 \times \frac{\mu}{\rho_a \times v} \quad \dots (2.38)$$

Para poder utilizar la ecuación 2.37, el Reynolds obtenido tiene que ser menor a 1×10^8 , el Prandtl tiene que estar entre los valores de 0.6 y 60, y las propiedades del aire deben ser evaluadas a la temperatura promedio. Para finalizar una vez obtenido el número de Nusselt se procede a calcular el coeficiente convectivo, h:

$$h = \frac{Nu \times k_a}{L} \quad \dots (2.39)$$

En las ecuaciones anteriores:

- h : Coeficiente convectivo [W/(m² K)]
- k_a : Conductividad térmica del aire a la temperatura promedio [W/(m K)]
- L : Longitud que atraviesa el aire a través del producto [m]
- Nu : Número de Nusselt [-]
- Pr : Número de Prandtl [-]
- Re : Número de Reynolds [-]
- v : Velocidad del flujo del aire [m/s]
- x_{crit} : Longitud crítica a la cual la capa limite se encuentra en zona laminar [m]
- μ : Viscosidad dinámica del aire a la temperatura promedio [Pa s]
- ρ_a : Densidad del aire a la temperatura promedio [kg/m³]

A continuación, se muestra la tabla 2.14 con los resultados obtenidos al efectuar las ecuaciones anteriores. Para conocer el detalle del cálculo véase el “Anexo B.4”.

Tabla 2.14 Coeficiente convectivo debido a los evaporadores THOR-B 324

Coeficiente convectivo			
velocidad del aire	v	9.94	m/s
flujo volumétrico	f_v	8.33	m ³ /s
Área efectiva	A_{ef}	0.84	m ²
Número de Reynolds Crítico	Re_{crit}	5×10^5	
Número de Reynolds	Re	6.3×10^5	
temperatura promedio	t_{prom}	260.5	K
Longitud que atraviesa el aire	L	0.78	m
Longitud crítica	x_{crit}	0.62	m
Número de Nusselt	Nu	664.8	
Coeficiente convectivo	h	19.71	W/(m² K)

➤ Recalculo de la carga térmica

Con el nuevo coeficiente convectivo se procederá a recalculer el tiempo de congelamiento y la carga térmica. Reemplazando el nuevo valor en las ecuaciones anteriores, se obtiene la tabla 2.15.

Tabla 2.15 Tiempo de congelación para el evaporador THOR-B 324

Tiempo de congelación para un cilindro finito			
Relación dimensional			
Coeficiente β_1	β_1	1.71	
Coeficiente β_2	β_2	5.14	
Constantes geométricas			
	G_1	2	
	G_2	0	
	G_3	0	
Coeficiente de dimensión equivalente			
coeficiente ϕ	ϕ	0.128	
Coeficiente $X(\phi)$	$X(\phi)$	0.353	
Coeficiente E_2	E_2	0.063	
Coeficiente equivalente	E	2.063	
tiempo de congelación para sup. Infinita	θ_{slap}	10.06	h
tiempo de congelación teórico	θ_t	4.88	h
Factor de sobrecarga	FS	1.15	
Tiempo estimado de congelado	θ	5.61	h

Ahora, reemplazando este nuevo tiempo de congelamiento (5.61 h) en la carga térmica y además adicionando la carga que representan los motores eléctricos de los evaporadores y la carga del sistema de descongelamiento, tenemos la siguiente tabla 2.16, para conocer el detalle del cálculo véase el “Anexo B.5”. Cabe resaltar que en el cálculo se ha considerado una temperatura de condensación de 39 °C y un sub-enfriamiento de 3 K, estos valores han sido brindados por el fabricante para las condiciones del sistema de congelación.

Tabla 2.16 Carga térmica total para los evaporadores THOR-B 324

Componentes de carga de enfriamiento	Capacidad Frigorífica [kW]
Carga de motores eléctricos	0.62
Carga de descongelamiento	0.16
Carga térmica por equipos	0.78
Carga térmica preliminar	10.14
Carga Térmica Total	10.92
Carga Térmica Total [ton]	3.11

Observando la figura 2.8 para la carga térmica total de **10.92 kW**, el punto de equilibrio (11.05 kW) del sistema unidad condensadora y evaporador siguen trabajando dentro

de los rangos exigidos. Por lo tanto, no habrá modificaciones en los equipos seleccionados.

2.2.5.4 Selección de la válvula de expansión

La selección de la válvula de expansión se realiza tomando en cuenta la diferencia de presiones de condensación y evaporación, además de tomar en cuenta la caída de presión en la línea de líquido ($\Delta P = 15.37$ bar); la capacidad de refrigeración (Carga térmica total de los evaporadores) y el tipo de refrigerante (R-404a). Se selecciona una válvula con una capacidad igual o ligeramente superior a la capacidad de refrigeración. De las marcas disponibles en el mercado se elige Sporlan, se selecciona el modelo tipo S correspondiente al refrigerante R-404a con una capacidad nominal de refrigeración de 4 toneladas de refrigeración. Aplicando los factores de corrección especificados por el fabricante para la condición de nuestro sistema se obtiene una carga térmica de 3.59 toneladas que es ligeramente superior a la carga térmica total del sistema, 3.10 toneladas. Además, la válvula cuenta con un regulador externo de $\frac{1}{4}$ ". Por tanto, se selecciona el modelo: **SEE- 4 – 2.94 1/2 x 5/8 x 1/4 x 5"**

2.2.6 Selección de componentes secundarios

Además, de la elección de los componentes esenciales o principales es necesario contar con elementos que faciliten la operación, mantenimiento, control y seguridad del sistema. Esto para conseguir una operación confiable y segura. De forma similar como ocurrió con los componentes principales, en la selección de los elementos o componentes secundarios se utilizarán las marcas más reconocidas del mercado; y además, se utiliza como referencia el manual ASHRAE-Refrigeration [ASHRAE 2006, Ch.44, pp.1-22] en la selección.

Es importante mencionar que la selección de los diversos componentes se realiza considerando una temperatura de evaporación con un valor de -30 °C y una temperatura de condensación con un valor de 39 °C. Además, algunos componentes vienen instalados o son a pedido en la unidad condensadora, los cuales vienen pre ensamblados en fábrica. Como es el caso del receptor de líquido (recipiente colector) y el separador de aceite. A continuación, se detalla la lista de componentes secundarios y el esquema de principio del congelador diseñado (Fig. 2.11).

- Elementos de operación y mantenimiento:
 - Acumulador de succión
 - Filtro secador en la tubería de líquido
 - Válvula Check
 - Válvula de paso

- Visor de líquido
- Elementos de control de operación:
 - Control de Temperatura o Termostato
 - Válvula de regulación de presión en el cárter
 - Válvula solenoide
- Elementos de seguridad de operación:
 - Control dual de presión

ESQUEMA DE PRINCIPIO

SISTEMA DE REFRIGERACION DE UNA SOLA ETAPA CON UNIDAD DE CONDENSACION

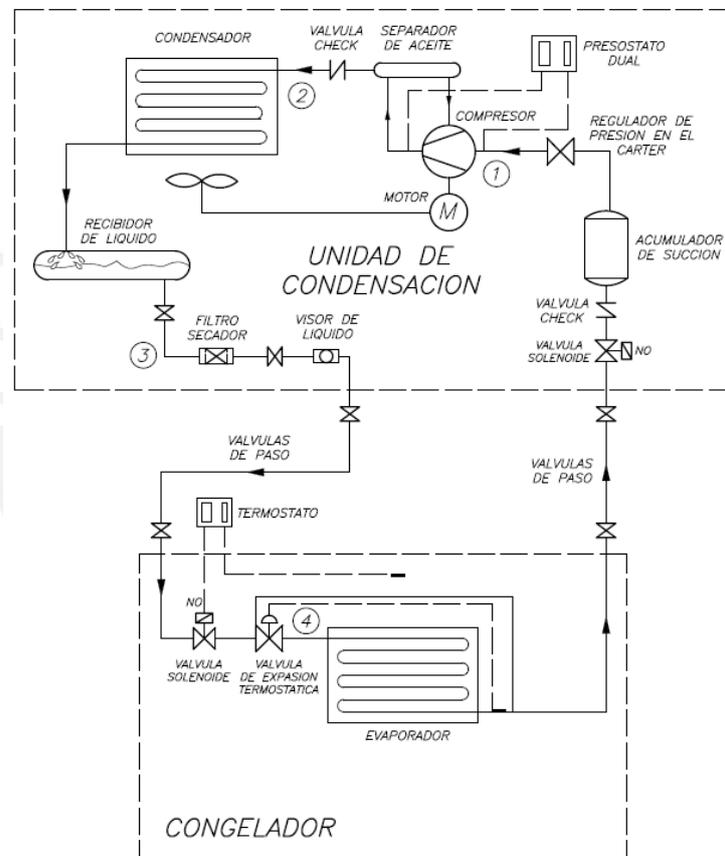


Figura 2.11 Esquema de principio del sistema de refrigeración
(Ver plano: EC-DIAG-PD-010)

2.2.6.1 Elementos de operación y mantenimiento

➤ Acumulador de succión

Para la selección del acumulador se tiene que tomar en cuenta el tipo de refrigerante, la temperatura de evaporación y la carga frigorífica en toneladas de refrigeración.

Del catálogo de Henry Technologies, se selecciona el modelo: **S-7063S**.

➤ Filtro secado

En la selección del filtro secador (línea de líquido), se requiere conocer la capacidad de refrigeración, el tipo de refrigerante y temperatura de evaporación. Del catálogo de la marca Sporlan se procede a seleccionar el siguiente modelo: **C-R425** para la línea de líquido.

➤ Válvula de check o de retención

En la selección de la válvula de check se requiere conocer la capacidad de refrigeración, el tipo de refrigerante y el diámetro de la tubería en donde se va a instalar. Seleccionando del catálogo de Danfoss para una válvula de retención tipo NRV. Se seleccionaron los siguientes modelos de acuerdo a los diámetros:

1 1/8" Modelo: **NRV 28s** Código: **020-1029** Línea de descarga
1 3/8" Modelo: **NRV 35s** Código: **020-1026** Línea de succión

➤ Válvula de paso

En la selección de la válvula de paso se utiliza el diámetro de la tubería en la cual se instalará. Seleccionando del catálogo de Danfoss para una válvula de bola tipo GBC y con la posibilidad de instalar un manómetro se seleccionaron los siguientes modelos de acuerdo a los diámetros:

5/8" Modelo: **GBC 16s** Código: **009G7023**
1 3/8" Modelo: **GBC 35s** Código: **009G7027**

➤ Visor de líquido e indicador de humedad

Para la selección del indicador de humedad se toma en cuenta el tipo de refrigerante, las conexiones para entrada y salida, además del máximo contenido de humedad en el refrigerante. Del catálogo de productos Danfoss, se selecciona los modelos: **SGN 16s** con código **014-0184**.

2.2.6.2 Elementos de control de operación

➤ Control de temperatura

En la selección del control de temperatura o termostato, se toma en cuenta el rango de temperatura en el cual se trabaja.

De la marca Danfoss se selecciona el modelo: **KP 61** el cual tiene un rango de trabajo de -30 a 15 °C y es de rearme automático. El código de venta es: **060L11066**.

➤ Regulador de presión en el cárter

Para la selección del regulador de presión en el cárter se tiene en cuenta la carga térmica del sistema, el tipo de refrigerante, la temperatura de aspiración antes del compresor, de líquido antes de la válvula de expansión, temperatura de aspiración máxima después del regulador, tipo de conexión y el diámetro de la conexión.

Del catálogo de Danfoss se selecciona el modelo: **KVL 35** el cual se adecua a la carga que tiene el sistema. El código de pedido es: **034L0052**.

➤ Válvula solenoide

Para la selección de la válvula solenoide se necesita tomar en cuenta la carga frigorífica, el tipo de refrigerante, el estado del refrigerante que atraviesa la válvula, y la temperatura de evaporación para aplicar un factor de corrección a la capacidad nominal de la válvula.

Del catálogo de la empresa Danfoss se selecciona las válvulas siguientes válvulas con caja terminal para realizar la conexión eléctrica.

5/8" Modelo: **EVR 15** Código: **032F2193** Línea de Líquido

1 3/8" Modelo: **EVR 25** Código: **032F2207** Línea de Aspiración

2.2.6.3 Elementos de seguridad de operación

➤ Control de presión dual

En la elección del control dual de presión, se necesita conocer el tipo de refrigerante y el rango de trabajo del equipo.

Del catálogo la marca Danfoss se selecciona el modelo **KP 15** con código comercial: **060-124166**.

2.3 Sistema estructural

La máquina está compuesta por una estructura metálica que esta ensamblada en dos partes. A la primera, se le denomina "Estructura soporte", este se encarga de soportar el peso del evaporador, la carga interna del refrigerante y accesorios. Mientras que a la segunda parte de la estructura metálica se denominará "Estructura base", la cual tiene la función de soporte de todo el congelador, el cual incluye: la estructura soporte, paneles aislantes, evaporador, peso del refrigerante, accesorios y puertas frigoríficas, ver figura 2.12. A continuación, se mostraran los cálculos y selección de los perfiles estructurales en acero al carbono ASTM A36 para la construcción del sistema estructural. Cabe resaltar que para evitar la corrosión la estructura será galvanizada

según la norma ASTM A123:2000 y además se realizara un tratamiento de pintura según la norma ISO 12944:1998. La capa de pintura de acabado deberá disponer de un certificado alimentario por estar trabajando con alimentos. El proceso de soldadura a seguir en la construcción se realizará según la norma ISO 4063:1992 (ANSI/AWS - SMAW). Por otra parte, los carros contenedores del producto y las bandejas de choclos serán construidos en acero inoxidable AISI 304.



Figura 2.12 Representación de la estructura soporte y base

2.3.1 Estructura soporte

2.3.1.1 Fuerzas, momentos y deformaciones en la estructura

La estructura está sometida a la carga que representa el peso del evaporador, la masa de refrigerante y el peso de los accesorios en el evaporador. En la figura 2.13, se muestra la estructura de la máquina a analizar. Las dimensiones de la estructura soporte se pueden encontrar en el plano EC-ESTRUC- PD-010.

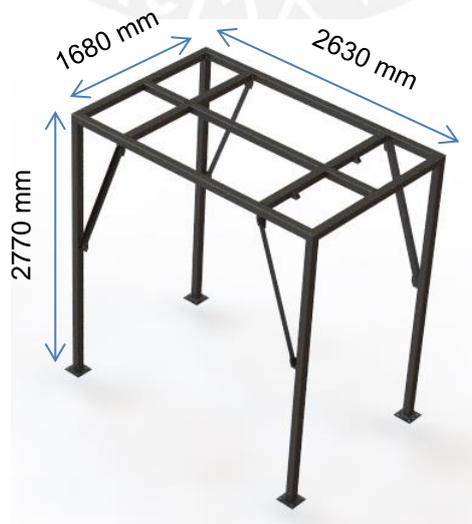


Figura 2.13 Estructura Soporte del Congelador

A continuación, se tienen los siguientes pesos:

Evaporador:	160	kg (sin carga)
Refrigerante R-404a:	16.2	kg
Accesorios:	3.0	kg

Por tanto, la carga total será de 180 kg y esta carga se repartirá entre los cuatro puntos en donde se ancla el evaporador. En la figura 2.14 se muestra un esquema de la carga. Además, para calcular los efectos de: la carga, propio peso de la estructura y el efecto de la temperatura; se deberán obtener las fuerzas cortantes, momentos flectores y torsores en la sección más cargada. Por otro lado, el aire que circula dentro de la máquina no se tomara en cuenta debido a que la fuerza que genera en la estructura es despreciable, aproximadamente de 20 N, además, que la mayor parte de su recorrido se realiza de forma paralela a las columnas de la estructura. Al ser la estructura un conjunto de elementos soldados la estructura debería analizarse como un solo elemento es por eso que se decidió hacer uso del programa “SolidWorks Simulation” para calcular las fuerzas y deformaciones en la estructura.

Para el cálculo de la estructura se tuvo como referencia la norma técnica peruana de edificación E.090: Estructuras metálicas, respaldado por la AISC (American Institute of Steel Construction). La cual menciona que para el método de cálculo LRFD (Load and Resistance Factor Design) el peso propio de la estructura debe ser aumentado en 1.2, mientras que para el caso de cargas vivas en 1.6. En este proyecto se asumirá como carga viva la carga puntual que representa el peso del evaporador, refrigerante y accesorios, ya que esta carga está sujeta a vibraciones debido a los motores de los ventiladores. Bajo estas consideraciones la carga puntual en cada apoyo para el diseño será de 710 N. En el caso del efecto de la temperatura se tomara para el cálculo una temperatura inicial de 20 °C y una temperatura final de -35 °C, siendo el factor de multiplicación igual a 1.

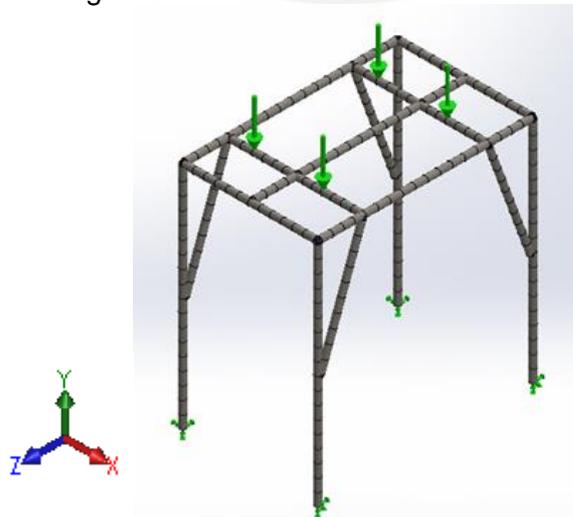


Figura 2.14 Puntos de carga en la estructura del congelador

A continuación, se mostrara la deformación, acción de las fuerzas normales, momentos torsores, cortantes y flectores en la estructura producto de las cargas combinadas y, también, se analizara la sección más cargada para verificar los perfiles seleccionados. Para más detalle de las cargas en cada perfil véase el “Anexo B.6”.

Los perfiles estructurales que se seleccionaron previamente son:

Marco: TS 3 x 3 x 3/16
Viga de refuerzo: L 2 x 2 x 3/16

En la figura 2.15, se muestra una numeración de las columnas y vigas en la estructura la cual se usara al momento de analizar la sección más crítica. Los segmentos de viga 09, 10 y 11 así 12, 13 y 14 conforman un solo elemento entero el cual se encuentra segmentado para un mejor análisis de los efectos de la carga puntual en la estructura. Además, se ha tomado en el análisis que los apoyos son de tipo empotrado.

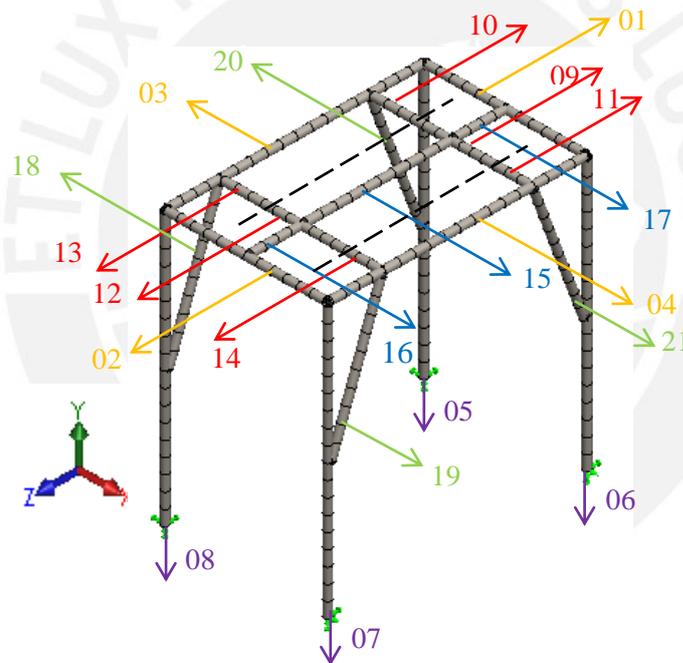


Figura 2.15 Numeración de columnas y vigas

Fuerza normal y momento torsor:

En el lado izquierdo de la figura 2.16, se muestra la acción de la fuerza normal, la cual se da en mayor proporción por compresión y una pequeña parte por tracción en las vigas 03 y 04. Mientras que en el lado derecho, se muestra el efecto debido a la torsión, la cual tiene mayor proporción en las vigas 03 y 04.

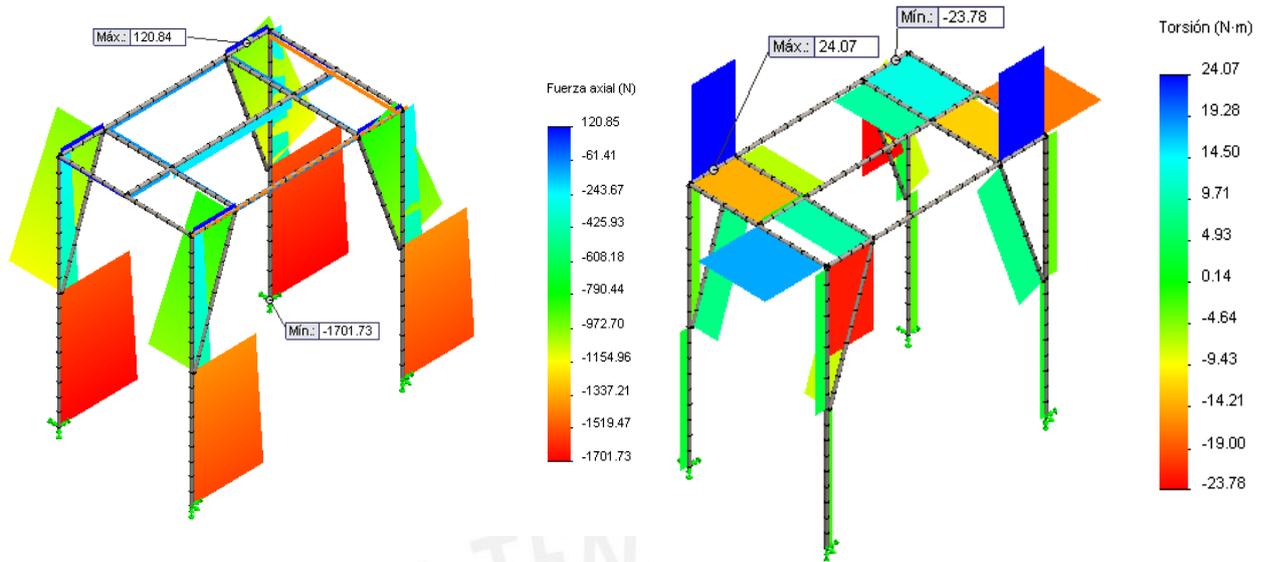


Figura 2.16 Fuerza axial y momento torsor en las columnas y vigas por el efecto combinado de las carga

Fuerza cortante:

En la figura 2.17, se presenta la acción en dos planos. Al lado izquierdo, se representa la acción en el plano YZ, mientras que al lado derecho, la acción en el plano XZ.

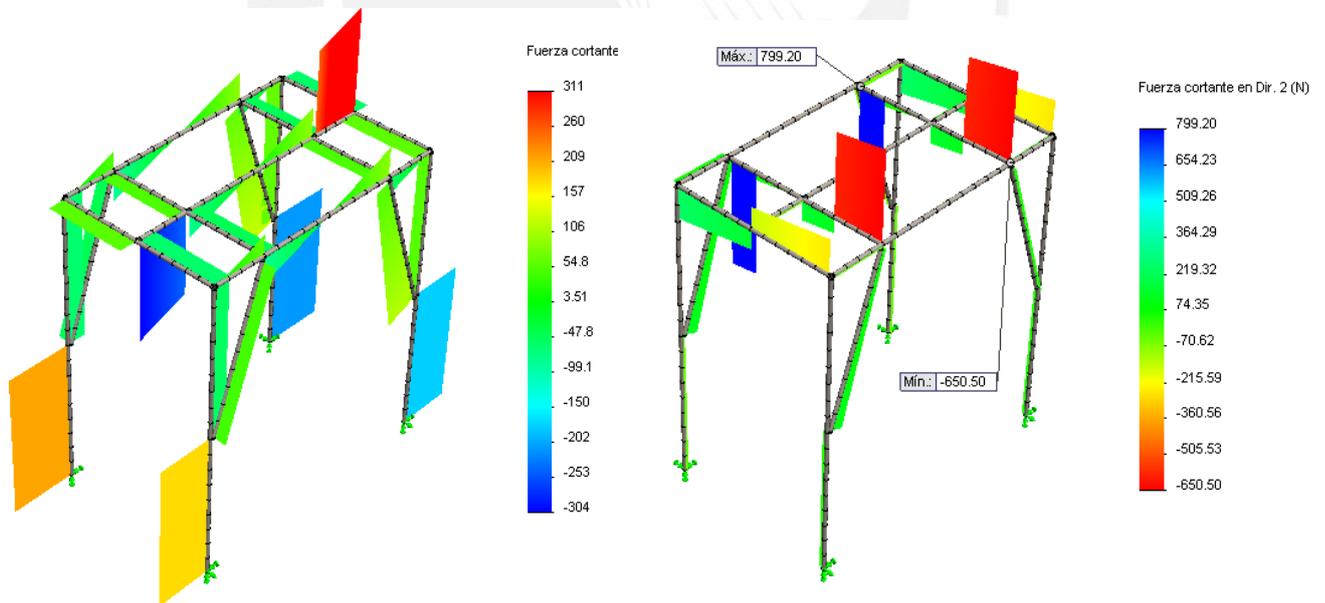


Figura 2.17 Fuerza cortante producido por las cargas combinadas

Momento flector:

En la figura 2.18, se presenta la acción en dos planos. Al lado izquierdo, se representa la acción en el plano YZ, mientras que al lado derecho, la acción en el plano XZ.

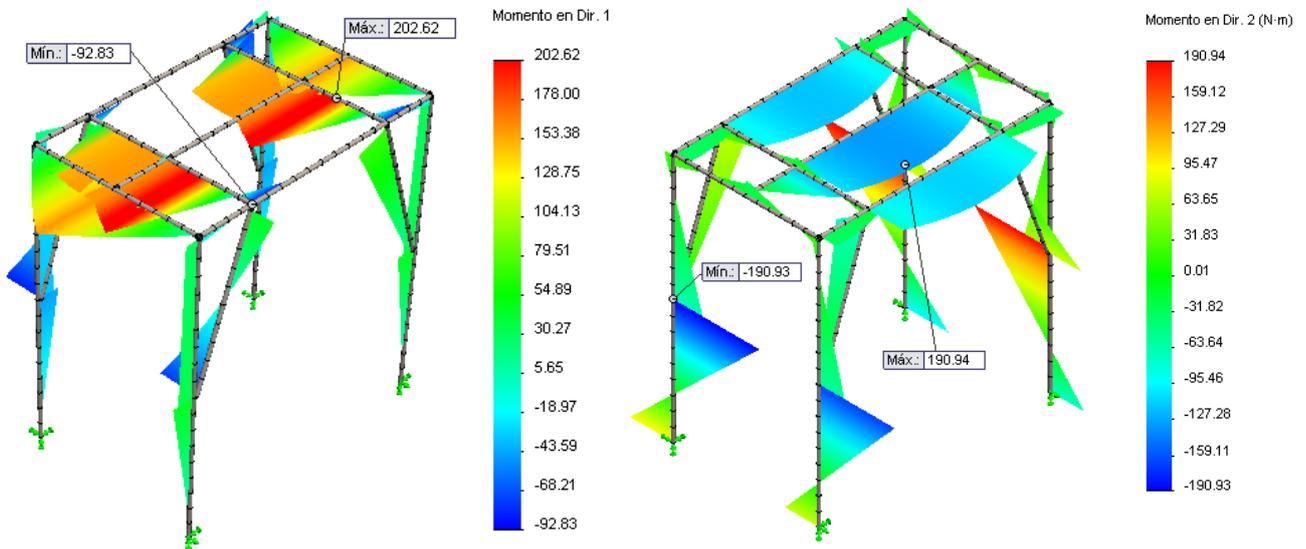


Figura 2.18 Momento flector producido por las cargas combinadas

Deformación:

A continuación, se mostrara la deformación a la cual están sometidos los elementos debido a su propio peso (Fig. 2.19), la carga del evaporador (Fig. 2.20) y por la temperatura (Fig. 2.21). Para luego evaluar si la deformación máxima se encuentra entre los límites permitidos (Fig. 2.22). Para el cálculo se tomó que la temperatura del material al inicio es de 20 ° C y final de -35 ° C, y los factores de multiplicidad dados en la norma peruana de estructuras metálicas E.090.

- *Peso propio*

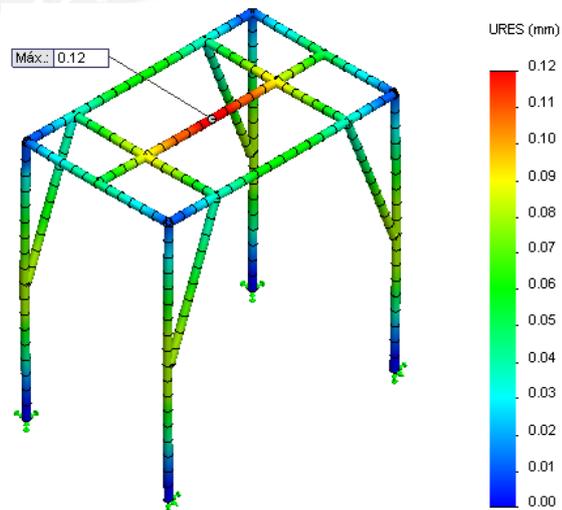


Figura 2.19
Deformación producida por el peso propio en la estructura

- Carga puntual

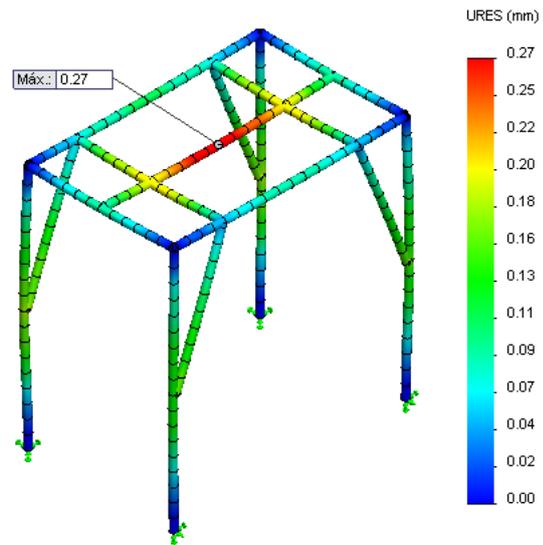


Figura 2.20
Deformación producida por la carga puntual en la estructura

- Temperatura

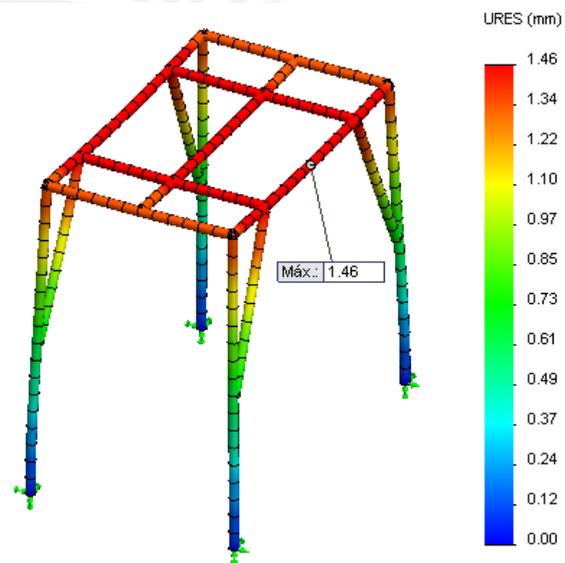


Figura 2.21
Deformación producida por la temperatura en la estructura

- Carga Combinada

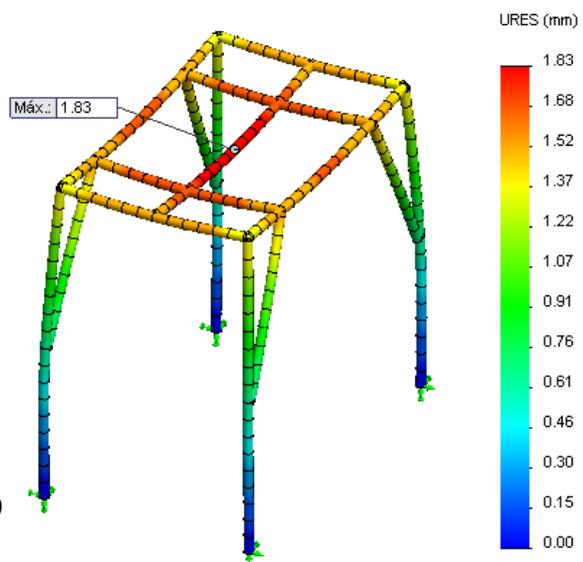


Figura 2.22
Deformación por la carga combinada total aumentado 200 veces

Los valores de las fuerzas y los momentos se encuentran detallados para cada viga en el “Anexo B.6”. De los datos encontrados se seleccionara las secciones críticas y se verificara si la estructura no falla.

2.3.1.2 Análisis de las secciones críticas

A continuación, se analizará las secciones más cargadas en cada viga. Para el análisis se toma la carga combinada por efecto de la carga puntual, el propio peso de la estructura y los efectos de la temperatura. Además, ya que la base de la estructura se encuentra emperrada a la estructura base, se representa esto en el análisis como apoyos empotrados. Ahora, se presentaran en la tabla 2.17, las propiedades de los perfiles de material ASTM A36 según la norma AISC que serán de ayuda en el cálculo, además de las condiciones para el esfuerzo admisible.

Tabla 2.17 Propiedades de los perfiles de la estructura

Propiedades	TS 3x3x3/16	L 2x2x3/16
L_x, L_y	76.2	50.8
espesor [mm]	4.8	3.175
x_c, y_c	38.1	13.6
A_p	1303.2	320
I_x, I_y	1082202	79000
J	1781470.6	1000
i_x, i_y	28.70	16
σ_F	253.0	ASTM A36
FS	2.5	
σ_{adm}	101.2	N/mm ²

Donde:

- A_p : Área transversal del perfil estructural [mm²]
- FS : Factor de seguridad [-]
- I_x, I_y : Momento de inercia en las direcciones x e y [mm⁴]
- i_x, i_y : Radio de giro en las direcciones x e y [mm]
- J : Momento polar de inercia [mm⁴]
- L_x, L_y : Dimensión en la dirección x e y [mm]
- x_c, y_c : Coordenadas del centroide del perfil [mm]
- σ_F : Esfuerzo de fluencia [N/mm²]
- σ_{adm} : Esfuerzo admisible [N/mm²]

Cálculo por resistencia

Se aplicara la teoría de falla de máxima energía de distorsión desarrollada con más detalle por R. von Mises y H. Hencky [Rodriguez 2008] la cual formula el esfuerzo equivalente igual a:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_n + \sigma_f)^2 + 3 \times (\tau_t^2 + \tau_c^2)} \quad \dots (2.40)$$

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_p} \quad \dots (2.41)$$

$$\sigma_f = \frac{M_{f,i} \times d}{I_i} \quad \dots (2.42)$$

$$\tau_t = \frac{M_{t,i} \times r}{J} \quad \dots (2.43)$$

$$\tau_c = \frac{V}{A_p} \quad \dots (2.44)$$

Donde:

A_p	: Área transversal del perfil estructural [mm ²]
d	: Distancia al punto más crítico [mm]
F_n	: Fuerza normal [N]
I_i	: Momento de inercia en la dirección i [mm ⁴]
J	: Momento polar de inercia [mm ⁴]
$M_{f,i}$: Momento flector en la dirección i [N mm]
$M_{t,i}$: Momento torsor en la dirección i [N mm]
r	: Radio crítico [mm]
V	: Fuerza cortante [N]
σ_{eq}	: Esfuerzo de fluencia [N/mm ²]
σ_f	: Esfuerzo admisible [N/mm ²]
σ_{eq}	: Esfuerzo equivalente [N/mm ²]
σ_n	: Esfuerzo normal [N/mm ²]
τ_c	: Esfuerzo cortante promedio [N/mm ²]
τ_t	: Esfuerzo torsor [N/mm ²]

A continuación, en la tabla 2.18, se muestran los esfuerzos normales, flectores, torsos y equivalentes para la sección más cargada en cada columna y viga de la Estructura Soporte. Además, en la figura 2.23, se muestra una representación gráfica de los esfuerzos combinados en la Estructura Soporte.

Tabla 2.18 Esfuerzo equivalente en la sección más cargadas en la estructura soporte

Nombre Columna/viga	σ_n [N/mm ²]	σ_f dir.1 [N/mm ²]	σ_f dir.2 [N/mm ²]	τ_t [N/mm ²]	σ_{eq} [N/mm ²]	σ_{adm} [N/mm ²]
1	0.05	5.66	-1.06	0.47	6.74	101.20
2	0.05	5.60	1.07	-0.49	6.69	101.20
3	0.09	0.68	4.14	-0.67	4.30	101.20
4	0.09	-0.49	3.94	0.62	4.00	101.20
5	-1.31	-1.62	-6.72	-0.09	9.52	101.20
6	-1.20	1.59	-5.91	0.10	8.58	101.20
7	-1.20	1.59	5.91	-0.10	8.57	101.20
8	-1.30	-1.61	6.72	0.09	9.51	101.20
9	-0.08	7.14	-0.75	0.33	7.38	101.20
10	-0.08	5.14	0.79	-0.26	5.54	101.20
11	-0.05	7.14	0.62	0.33	7.38	101.20
12	-0.08	7.13	0.73	-0.27	7.36	101.20
13	-0.08	5.14	-0.79	0.19	5.53	101.20
14	-0.05	7.13	-0.62	-0.27	7.36	101.20
15	-0.16	0.06	4.69	0.00	4.91	101.20
16	-0.09	0.27	4.14	-0.03	4.50	101.20
17	-0.09	0.26	3.91	0.03	4.25	101.20
18	-0.88	-2.99	-2.60	-0.21	5.15	101.20
19	-0.76	-2.66	2.49	0.21	4.74	101.20
20	-0.88	-2.60	-2.98	0.21	5.13	101.20
21	-0.76	2.49	-2.66	-0.21	4.73	101.20

*La numeración asignada a cada viga y columna se encuentra representado en la figura 2.15

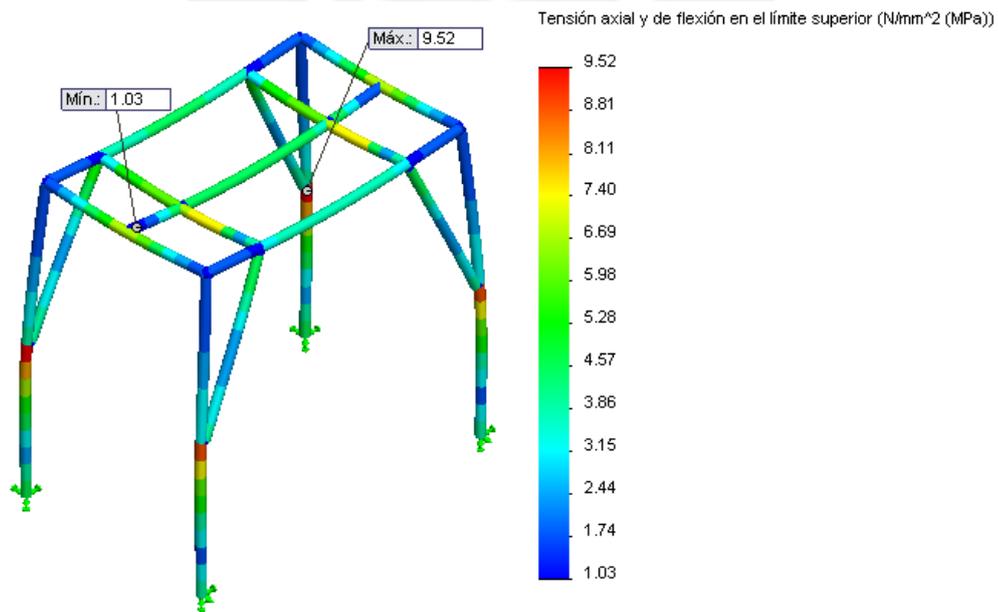


Figura 2.23 Esfuerzo Equivalente producido por las cargas combinadas

Como se puede apreciar los perfiles seleccionados no fallan por el método de energía de la deformación. Pero ahora se procederá a analizar la falla por pandeo en las columnas, debido a que son elementos de una longitud relativamente grande. Para su análisis se usará el Método de Europeo (Tetmajer Modificado) [Rodríguez Cap. 6 pp.15-18]. Este método tiene tres rangos de falla:

$$F: \text{Falla por Fluencia} \quad \alpha_{adm} = \frac{\sigma_F}{FS_p} \quad \text{si } 0 \leq \lambda \leq 60 \quad \dots (2.45)$$

$$R: \text{Falla por pandeo según Tetmajer} \quad \alpha_{adm} = \frac{a_1 - a_2 \lambda}{FS_p} \quad \text{si } 60 \leq \lambda \leq 100 \quad \dots (2.46)$$

$$E: \text{Falla por pandeo según Euler} \quad \alpha_{adm} = \frac{\pi^2 E'}{FS_p \lambda^2} \quad \text{si } \lambda \geq 100 \quad \dots (2.47)$$

$$\lambda = \frac{L_p}{i} \quad \dots (2.48)$$

$$\sigma_n < \sigma_{adm} = \frac{\sigma_p}{FS_p} \quad \dots (2.49)$$

$$\frac{\sigma_F}{FS_p} = \sigma_F adm \quad \dots (2.50)$$

En las ecuaciones anteriores:

- α_1, α_2 : Constantes de la falla de pandeo según Tetmajer [-]
- E' : Módulo de elasticidad longitudinal del ASTM A36 [N/mm²]
- FS_p : Factor de seguridad de pandeo (para este diseño = 10) [-]
- i : Radio de giro del perfil en la dirección que favorece el pandeo [mm]
- L_p : Longitud efectiva de la columna [mm]
- λ : Grado de esbeltez mecánica [-]
- σ_{adm} : Esfuerzo admisible [N/mm²]
- σ_F : Esfuerzo de fluencia [N/mm²]
- $\sigma_F adm$: Esfuerzo de fluencia admisible de pandeo [N/mm²]
- σ_n : Esfuerzo normal [N/mm²]
- σ_p : Esfuerzo de pandeo [N/mm²]

Una vez obtenido el valor del grado de esbeltez se procederá a definir cuál es el rango de operación en que se encuentra el caso a analizar y se obtendrá el esfuerzo admisible para el caso analizado. Luego, se procederá a verificar si el esfuerzo normal en la columna analizada no supera el esfuerzo admisible por pandeo para asegurar que no falle. Por otro lado, para aplicar este método se tiene que utilizar la longitud efectiva al pandeo que es un factor que multiplica al valor real de la altura de la columna y que depende de los apoyos que posea en sus límites. En este caso, los apoyos de la columna son: en la base, empotrada y en la parte superior se asume

empotrada mono deslizante, siendo para este caso el factor de longitud igual a 1 [Rodríguez Cap.6 pp.10]. Por lo que la longitud de la columna se operara sin variación. A continuación, se muestra la tabla 2.19 donde se verifica la falla por pandeo para la columna con mayor carga de compresión. Con los datos de la tabla 2.18, las ecuaciones 2.48 y 2.49 se procede a comprobar si el perfil de la columna 5 falla por pandeo.

Tabla 2.19 Verificación por pandeo según el método de Euler

Método Euler						
E'	λ	σ_p	FS_p	σ_{adm}	σ_n	
N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²	
210 000	96.62	222.02	10	22.2	1,31	OK!

Como se puede apreciar tanto las columnas como los perfiles seleccionados no fallan por resistencia. A continuación, se procederá a realizar el cálculo por rigidez en los perfiles críticos.

Cálculo por rigidez

Para el caso de análisis por rigidez se analizara la deflexión lineal en el elemento con mayor deflexión y se verificará si se encuentra dentro de los límites permitidos. Que según la norma peruana E0.90 la deflexión lineal máxima de una estructura metálica es el valor de su longitud dividido en 360 veces. La deflexión se puede hallar por el método gráfico de momento de área [Hibbler 2006], este se muestra en la ec. 2.51.

$$\delta_{A/B} = \int_A^B m' \times \frac{M}{E \times I} dm' \quad \dots (2.51)$$

Siendo:

$\delta_{A/B}$: Deflexión en que existe entre los puntos A y B [mm]

m' : Distancia en la dirección m' (a lo largo del perfil) [m]

En este caso el perfil crítico es la viga denominada con el número15 (figura 2.15), el cual posee la mayor deformación, 1.83 mm (figura 2.22) y una longitud de 1 474 mm. Por lo que el valor máximo admisible es de 4.1 mm. Verificándose que la deformación en la estructura metálica está dentro de los rangos admisibles.

De los cálculos y verificaciones anteriores se puede afirmar que los perfiles previamente seleccionados no fallan a las cargas solicitadas. Por otro lado, analizando perfiles más económicos se procede a realizar el mismo procedimiento de cálculo para los perfiles inmediatamente inferiores a los seleccionados y estos fallan por rigidez, motivo por el cual se mantendrá esta selección.

2.3.2 Estructura Base

2.3.2.1 Fuerzas y momentos en la estructura.

La estructura base soporta todo el peso del congelador incluyendo la carga de los coches transportadores con producto. Esta carga toma contacto con el suelo a través de los seis apoyos que se muestran en el lado derecho de la figura 2.24, los cuales son fabricados con el perfil W 8"x15 lb/pie. A continuación, se presentaran los efectos de las cargas en las vigas de refuerzo de la estructura base que también se aprecian en el lado derecho de la figura 2.24, además del cálculo por aplastamiento en los apoyos. Las dimensiones de la estructura base se pueden apreciar en el plano EC-ESTRUC- PD-020.

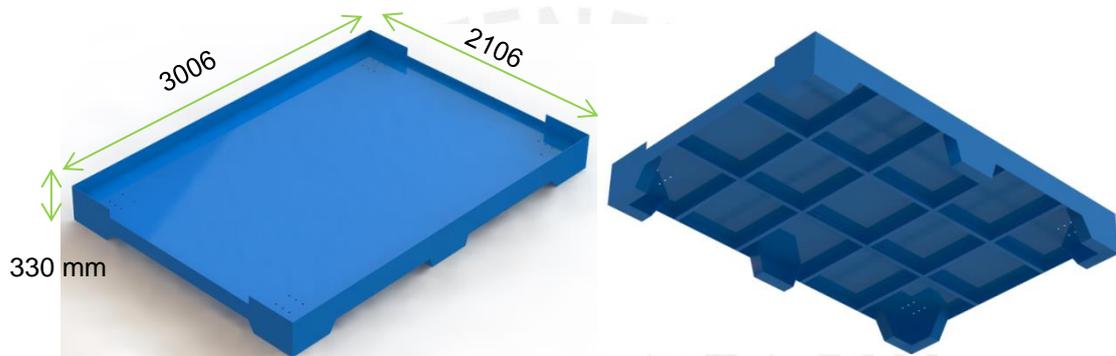


Figura 2.24 Estructura Soporte del congelador

A continuación, se tienen los siguientes pesos:

Congelador de maíz	1700	kg (sin carga).
Carro transporte de maíz	400	kg c/u

Por tanto, la carga total será de 2900 kg y se tomará como carga para el diseño el valor de 3000 kg. Esta carga se transmite primero a la plancha base de 3 mm que se observa al lado izquierdo de la figura 2.24, la cual se encuentra soldada y apoyada en los seis apoyos de la estructura, así mismo la plancha base se encuentra rigidizada con vigas de refuerzo, las cuales se analizaran a continuación. En la figura 2.25, se muestra el esquema de carga.

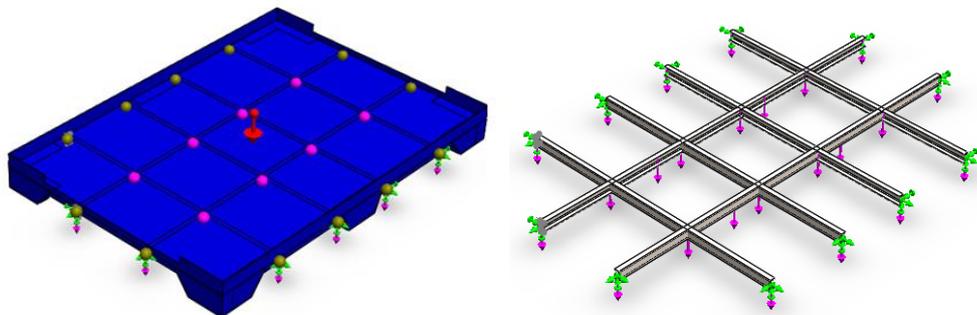


Figura 2.25 Puntos de carga del modelo original y el modelo analizado

Para calcular los efectos de la carga se deberán obtener las fuerzas cortantes, momentos flectores y torsores en la sección más cargada. Al igual que en la estructura soporte se utilizó del programa “SolidWorks Simulation” para calcular las fuerzas y deformaciones en la estructura. Este programa trabaja con elementos finitos.

Para el cálculo, al igual que para la estructura soporte se ha tomado como referencia la norma técnica peruana de edificación E.090: Estructuras metálicas. En este caso, se tomará como carga muerta la carga a la cual está sometida la estructura. Bajo estas consideraciones la carga que se presenta es una carga distribuida a lo largo de los perfiles siendo igual a 250 N/m lineal. Además, el análisis se toma el efecto del peso propio como carga muerta y aplicando los factores de corrección necesarios según la norma E.090.

A continuación, se mostrara la acción de las fuerzas normales, momentos torsores, cortantes, flectores y la deformación en la estructura producto de las cargas combinadas. También, se analizara la sección más cargada para verificar los perfiles seleccionados. Para más detalle de las cargas en cada perfil véase el “Anexo B.6”.

El perfil estructural que se seleccionó previamente es:

Vigas: C 3” x 4.1 lb/pie

En la figura 2.26, se muestra una numeración de las vigas en el modelo de la estructura base, la cual se usara al momento de analizar la sección más crítica. Se ha tomado en el análisis que los apoyos son de tipo empotrado. Además, las vigas con numeración 03, 04, 05 y 06 que se presentan como un elemento solido son en realidad el conjunto de 3 vigas soldadas a las vigas principales 01 y 02, según el método de construcción realizado. Véase el plano EC-ESTRUC-PD-020.

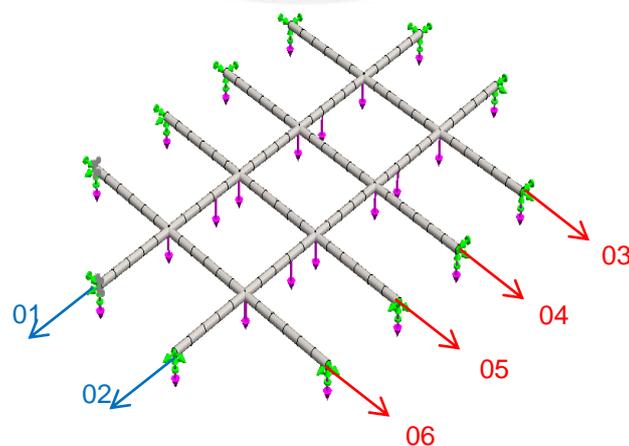


Figura 2.26 Numeración de vigas Estructura Base

Fuerza normal y momento torsor:

La acción de la fuerza normal es despreciable en el análisis por ser menor de 1 N. En la figura 2.27 se muestra el efecto debido a la torsión.

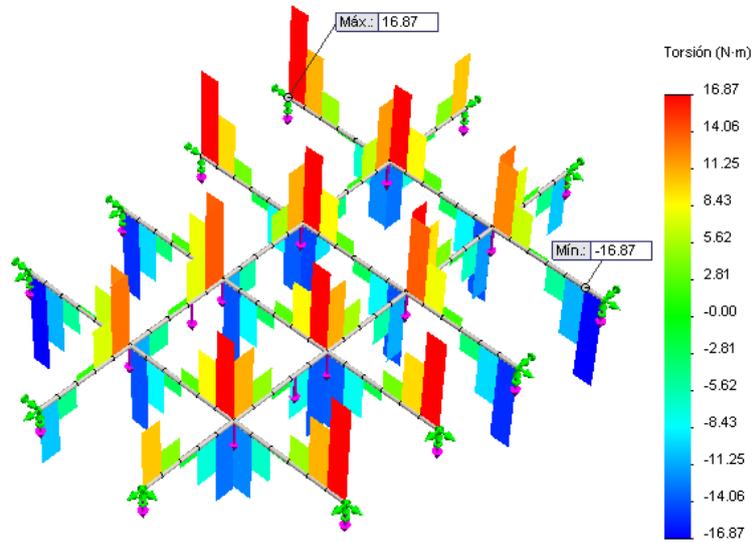


Figura 2.27 Momento torsor en las vigas por el efecto combinado de las cargas

Fuerza cortante:

En la figura 2.28, se presenta la acción de la fuerza cortante en el plano YZ, ya que las fuerzas que se presentan en el plano XZ son despreciables menores a 1 N.

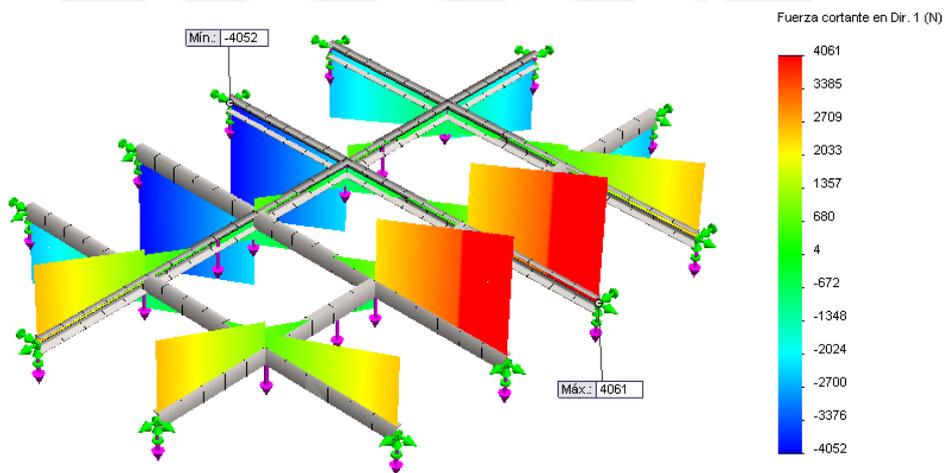


Figura 2.28 Fuerza cortante producido por las cargas combinadas

Momento flector:

En la figura 2.29, se presenta la acción en el plano XZ, ya que la influencia del momento flector en el plano YZ es casi nula.

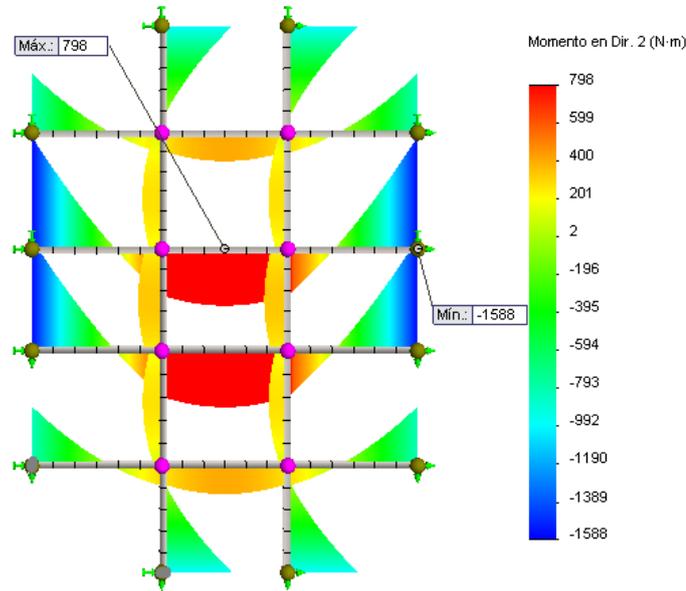


Figura 2.29 Momento flector producido por las cargas combinadas

Deformación:

A continuación, se mostrara la deformación a la cual están sometidos los elementos debido a su propio peso (Fig. 2.30), la carga producto y de todos los componentes en el congelador (Fig. 2.31), además del efecto combinado de ambos (Fig. 2.32). Para luego, evaluar si la deformación máxima esta entre los límites permitidos. Para el análisis, las cargas iniciales han sido sometidas al factor de cálculo según la norma peruana E090.

- Peso propio

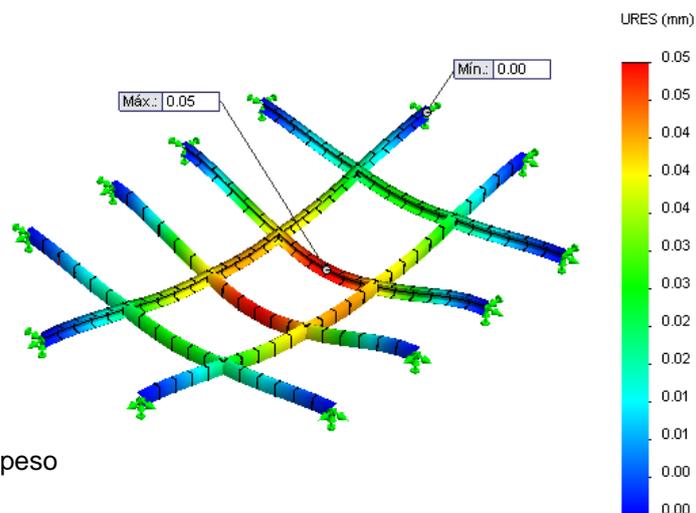


Figura 2.30

Deformación producida por el peso propio en la estructura

- Carga puntual

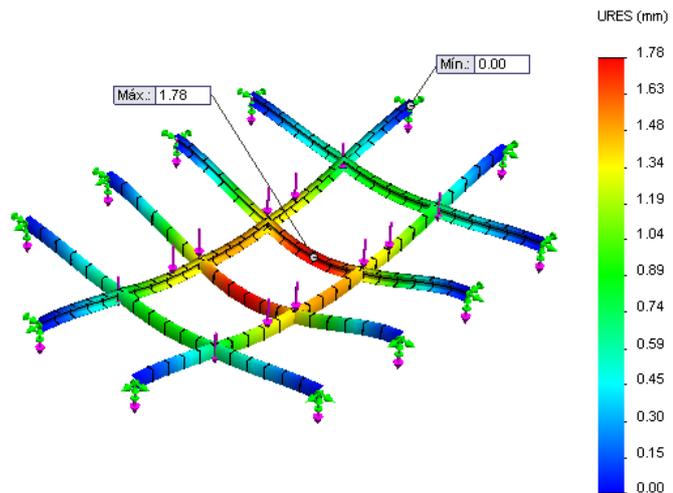


Figura 2.31

Deformación producida por la carga puntual en la estructura

- Carga Combinada

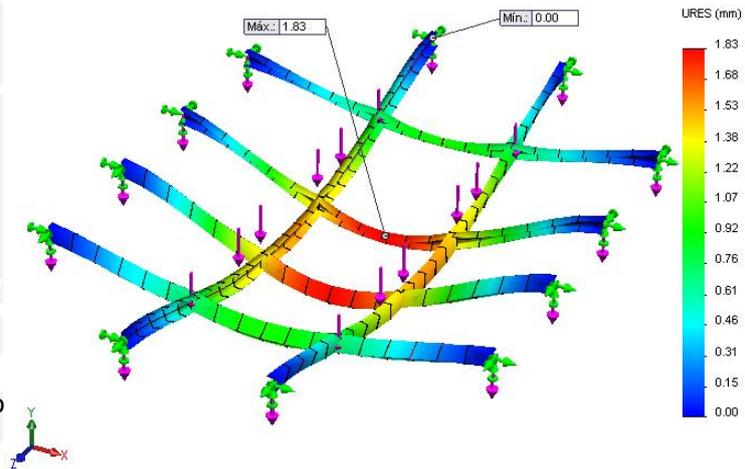


Figura 2.32

Deformación por la carga combinada total aumentado

Los valores de las fuerzas y los momentos se encuentran detallados para cada viga en el “Anexo B.6”. De los datos encontrados se seleccionara las secciones críticas y se verificara si la estructura no falla.

2.3.2.2 Análisis de las secciones críticas

A continuación, se analizará las secciones más cargadas en cada viga. Para el análisis se toma la carga combinada por efecto de la carga distribuida y el de su propio peso. Además, en el análisis se tomó los apoyos como empotrados. Ahora, en la tabla 2.20, se presentaran las propiedades del perfil a analizar y de material ASTM A36 según la norma AISC, además de las condiciones para el esfuerzo admisible.

Tabla 2.20 Propiedades de los perfiles de la estructura

Propiedades	C 3" x 4lb/pie		
L_x [mm]	36	L_y [mm]	76.2
Espesor [mm]	4.32		
x_c [mm]	11.1	y_c [mm]	38.1
A_p [mm ²]	770		
I_x [mm ⁴]	690 000	I_y [mm ⁴]	80 000
J [mm ⁴]	11 000		
i_x [mm]	30	i_y [mm]	10
σ_F	253.0	ASTM A36	
FS	2.5		
σ_{adm}	101.2	N/mm ²	

Siendo:

- A_p : Área transversal del perfil estructural [mm²]
- FS : Factor de seguridad [-]
- I_x, I_y : Momento de inercia en las direcciones x e y [mm⁴]
- i_x, i_y : Radio de giro en las direcciones x e y [mm]
- J : Momento polar de inercia [mm⁴]
- L_x, L_y : Dimensión en la dirección x e y [mm]
- x_c, y_c : Coordenadas del centroide del perfil [mm]
- σ_F : Esfuerzo de fluencia [N/mm²]
- σ_{adm} : Esfuerzo admisible [N/mm²]

Cálculo por resistencia

Se aplicara la teoría de falla de máxima energía de distorsión; aplicado y detallado en el cálculo de resistencia para la estructura soporte del congelador.

A continuación, se muestra en la tabla 2.21, los esfuerzos normales, flectores, torsores y equivalentes para la sección más cargada en cada viga de la Estructura Base. Además, en la figura 2.33 se muestra una representación gráfica de los esfuerzos equivalentes en la Estructura Base.

Tabla 2.21 Esfuerzo equivalente en la sección más cargadas en la estructura base

Nombre Columna/viga	σ_n [N/mm ²]	σ_f dir.1 [N/mm ²]	σ_f dir.2 [N/mm ²]	τ [N/mm ²]	σ_{eq} [N/mm ²]	σ_{adm} [N/mm ²]
1	0.00	0.00	54.73	75.00	54.73	101.20
2	0.00	0.00	54.73	-74.91	54.73	101.20
3	0.00	0.00	46.37	85.91	46.37	101.20
4	0.00	0.00	87.88	-78.84	87.88	101.20
5	0.00	0.00	87.53	78.88	87.53	101.20
6	0.00	0.00	46.27	-85.78	46.27	101.20

*La numeración asignada a cada viga se encuentra representado en la figura 2.26

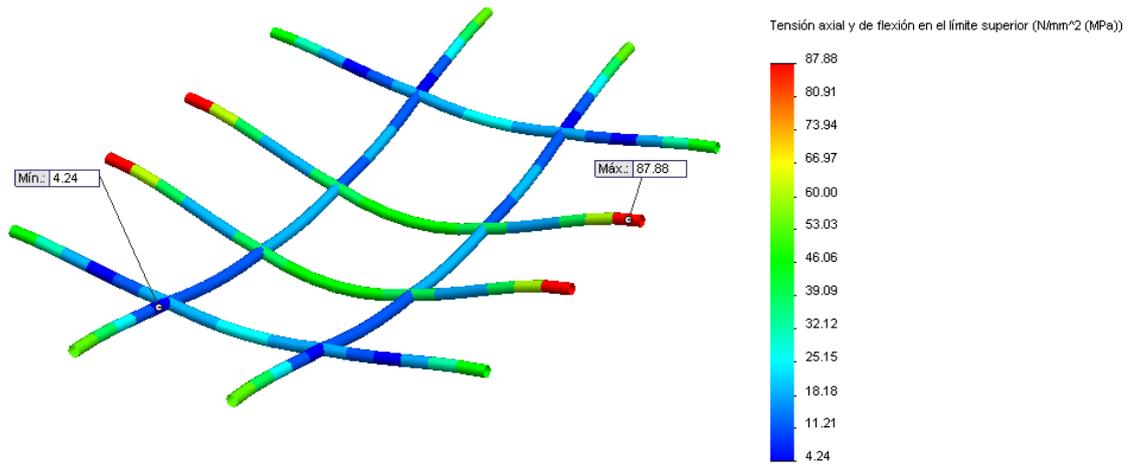


Figura 2.33 Esfuerzo equivalente en la estructura base producido por las cargas combinadas

Como se puede apreciar los perfiles seleccionados no fallan por el método de energía de la deformación. Además, cabe resaltar que analizando la falla en los apoyos se realizó la verificación por aplastamiento en la sección de menor área obteniéndose un esfuerzo normal de 0.25 N/mm^2 , por lo que se verificó que los apoyos, perfiles W 8"x15 lb/pie, no fallan por aplastamiento.

Cálculo por rigidez

Para el caso de análisis por rigidez se analizara la deflexión lineal en el elemento con mayor deflexión y se verificará si se encuentra dentro de los límites permitidos. Que según la norma peruana E0.90 la deflexión lineal máxima de una estructura metálica es el valor de su longitud dividido en 360 veces.

Para este caso el perfil crítico es el perfil denominado con el número 04 (figura 2.26) en la sección media, el cual posee la mayor deformación (1.83 mm) y con una longitud de 700 mm. Por lo que el valor máximo admisible es de 1.94 mm. Verificándose que la deformación en la estructura metálica está dentro de los rangos recomendables.

De los cálculos y verificaciones anteriores se puede afirmar que los perfiles previamente seleccionados no fallan a las cargas solicitadas, motivo por el cual se mantendrá esta selección.

2.4 Sistema de control

Los sistemas de control utilizados en instalaciones frigoríficas son muy diversos y dependen esencialmente del tipo de proceso de congelado. Es por ello que no existe una relación única de componentes de control a utilizar, sin embargo, es posible seguir una guía para el diseño y disposición general del sistema de control a través del conocimiento de las funciones a controlar. El handbook ASHRAE “Refrigerated Facility Design”-Fundamentals propone cuatro principales áreas de control en toda instalación frigorífica a analizar, las cuales son: control en el compresor, control en el condensador, control en el evaporador y administración del flujo de refrigerante [ASHRAE 2009, Ch. 14]. Para este caso se centrará el análisis en los tres primeros, definiendo las tareas de control (tabla 2.22) y determinando los controladores necesarios (tabla 2.23). Para luego diseñar la lógica de control y determinar el interfaz con el usuario.

➤ Definición de las tareas de control

Para el congelador las tareas de control se muestran en la tabla 2.22.

Tabla 2.22 Definición de las tareas de control del congelador

Tareas de control	Descripción
Encendido y apagado	Se realizará al motor del compresor, motores de los ventiladores del condensador y evaporador.
Parada de seguridad o emergencia	Ante una sobrecarga o cortocircuito en el sistema, se desconectará el equipo de la red.
Ciclo de operación sin carga	Al detectarse que no hay carga en el congelador, el sistema de control apagará el motor del compresor y lo volverá a encender de ser necesario.
Ciclo de operación con carga	Una vez llegado a la temperatura de congelación si la temperatura comienza a descender por debajo de los valores admisibles se apaga el motor. Además, si la temperatura de condensación se eleva por encima de los valores admitidos también se apagará el motor del compresor.
Ciclo de descongelamiento	Ante la formación de escarcha y la disminución de temperatura en el evaporador, el sistema de control encenderá el sistema de descongelamiento, el cual para el evaporador seleccionado es por resistencias eléctricas.
Señales y alarmas	Se comunicara visualmente el correcto encendido de la unidad de condensación, evaporador y el inicio de operación. Además, se emitirán señales luminosas o sonoras ante alguna parada de seguridad o emergencia indicando de donde ha provenido esta.

➤ Selección de dispositivos

Para el presente diseño los dispositivos de operación y control utilizados se presentan en la tabla 2.23.

Tabla 2.23 Dispositivos de operación del sistema de control

Tareas de control	Descripción
Encendido y apagado	Se realizará a través de pulsadores electromagnéticos. En el caso del motor del compresor, el cual arranca por el sistema de arrollamiento estatórico dividido Y-YY (220-440V), se empleará también una válvula solenoide normalmente abierta a la succión, para que el arranque con un solo arrollamiento (bobinado parcial) se realice a baja carga.
Parada de seguridad o emergencia	Fusibles y Relé térmicos
Ciclo de operación sin carga	Se empleará un termostato en el evaporador y una válvula solenoide normalmente abierta en la línea de líquidos, ante una disminución de la temperatura por no haber carga en la cámara, la válvula se cerrará y el presostato de baja apagará el motor del compresor.
Ciclo de operación con carga	Se empleará un presostato de alta en la línea de descarga, ante una sobre presión, el dispositivo apagará el motor del compresor, además, se utilizará un presostato en el condensador para el encendido y apagado de uno de los ventiladores del condensador ante la variación de temperatura ambiental en el cambio de estación.
Ciclo de descongelamiento	Se empleará un termostato en el evaporador, el cual ante un aumento de temperatura por escarchamiento enciende el sistema de descongelamiento.
Señales y alarmas	Se emplearán alarmas luminosas en el panel de control del congelador, así como alarmas sonoras para el caso del compresor.

➤ Lógica de control

En la lógica de control se detalla el orden en el cual se accionan e interactúan los dispositivos de control. En este diseño, se detallan estas interacciones en los siguientes planos eléctricos: EC-ELECT-PD-010, EC-ELECT-PD-011 y EC-ELECT-PD-012.

➤ Interfaz con el usuario

A continuación, se muestra en la figura 2.34 un esquema de principio del tablero de control del congelador el que ha sido extraído en parte del plano EC-ELECT-PD-010.

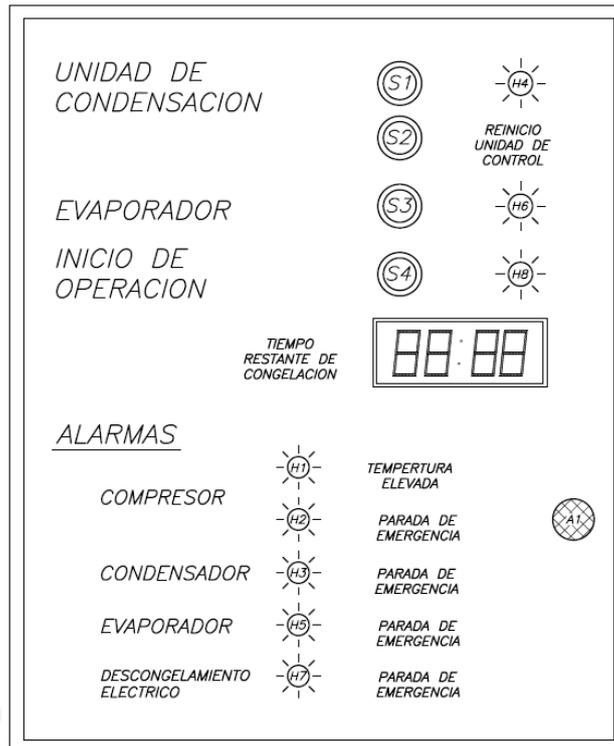


Figura 2.34 Esquema de principio del tablero de control

2.5 Sistema eléctrico

Entre los elementos que constituyen el circuito eléctrico se encuentran: los conductores eléctricos, los dispositivos de protección y maniobra. Se seleccionaran estos componentes tomando como variable principalmente el valor de la carga eléctrica. En los planos EC-ELECT-PD-010, EC-ELECT-PD-011 y EC-ELECT-PD-012, se muestra los diagramas eléctricos de fuerza y control.

En la selección de los elementos del circuito eléctrico se evaluarán:

- Conductores eléctricos para las cargas del sistema de refrigeración: motor del compresor, ventilador del condensador, ventilador del evaporador y resistencias del sistema de descongelamiento
- Elementos de maniobra y protección

2.5.1 Conductor eléctrico

En la selección del calibre de los conductores eléctricos se utilizan, los valores de potencia de motor, voltaje de alimentación, eficiencia, factor de potencia, longitud del conductor y temperatura ambiente.

Para efectos prácticos de cálculo, se considera los valores de factor de potencia y eficiencia iguales a 0.8 aproximadamente.

Para el motor del compresor y los ventiladores del evaporador utilizan un sistema trifásico de 440 V - 60 Hz, mientras que los ventiladores del condensador y las resistencias del sistema de descongelamiento del evaporador utilizan un sistema monofásico 220 V - 60 Hz, estos son los parámetros dados en sus respectivos catálogos de selección.

La tabla 2.24 muestra las potencias nominales de los equipos que conforman el sistema de refrigeración. Dicho valor permite determinar la corriente admisible con la ecuación 2.52.

Tabla 2.24 Potencia nominal de los componentes del sistema de refrigeración

Sistema de Congelación		
Componentes	Cantidad	Potencia nominal [W]
Compresor	1	16900
Evaporador	2	1200
Ventiladores Condensador	2	445
Resistencias de Descongelamiento	7	2020
Carga Total (W)	34330	

A continuación, se realiza el siguiente procedimiento de cálculo:

➤ Cálculo de corriente admisible

Se calcula en función a la expresión siguiente:

$$I_N = \frac{P_E}{\sqrt{3} \times U_V \times \cos\phi \times \eta} \quad \dots (2.52)$$

Siendo:

$\cos\phi$: Factor de potencia del motor [-]

I_N : Corriente admisible [A]

P_E : Potencia eléctrica del motor [W]

U_V : Voltaje del motor [V]

η : Eficiencia del motor [%]

Con el valor de la corriente admisible (I_N), se obtiene la corriente de diseño (I_D), que según el CNE (Código Nacional Eléctrico) debe ser 25% superior a la admisible. [Del Rosario, 2004]

$$I_D = 1.25 \times I_N \quad \dots (2.53)$$

Esta corriente debe ser corregida por dos factores: K_{TP} y K_N .

- K_N : Factor de corrección por agrupación de conductores (tabla 2.25). Se aplica, si en las canalizaciones se agrupan más de tres conductores a la vez.

Tabla 2.25 Factor de corrección por agrupación de conductores K_N

[Del Rosario, 2004]

Cantidad de conductores	Factor K_N
4 a 6	0.8
6 a 24	0.7
25 a 42	0.6
Sobre 42	0.5

- K_{TP} : Factor de corrección por temperatura (tabla 2.26). Se aplica, cuando la temperatura de ambiente es mayor a los 30 °C.

Tabla 2.26 Factor de corrección por temperatura K_{TP} [Del Rosario, 2004]

Temperatura ambiente [°C]	K_{TP} para Temperatura máxima de operación del conductor	
	TW (60 °C)	THW (75 °C)
31 a 40	0.82	0.88
41 a 45	0.71	0.82
46 a 50	0.58	0.75
51 a 55	0.41	0.67
56 a 60	-	0.58

En el circuito de refrigeración del sistema se usará cinco conductores eléctricos: tres de ellos son las líneas R, S, T, y los otros dos: una línea neutro y una puesta a tierra.

$$I_{Corregido} = \frac{I_D}{K_{TP} \times K_N} \quad \dots (2.54)$$

Con el valor de la corriente de diseño corregida, se procede a seleccionar la sección nominal de los conductores eléctricos. Para lo cual se procede a utilizar la tabla 2.27.

Tabla 2.27 Capacidades de corriente de los conductores rígidos
[Del Rosario, 2004]

Sección nominal (mm ²)	CAPACIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE			
	Temperatura máxima de Operación del conductor			
	Instalación en tubo			
	60°C	75°C	90°C	105°C
	TW-MTW-TWT	THW	THW-90	THHW
0,5	4	-	-	-
0,75	6	-	-	-
1	8	-	-	-
1,5	10	12	22	10
2,5	18	20	27	17
4	25	27	34	25
6	35	38	42	33
10	46	50	60	46
16	62	75	-	-
25	80	95	-	-
35	100	120	-	-
50	125	145	-	-
70	150	180	-	-
95	180	215	-	-
120	210	245	-	-

En la tabla 2.28, se muestra la corriente de diseño corregida y la selección del conductor eléctrico por cada componente del sistema de refrigeración.

Tabla 2.28 Selección de los conductores eléctricos para los componentes principales del sistema de congelación

Sistema de Congelación		
Componentes	Corriente de diseño corregido (A)	Conductor seleccionado
Compresor	61.5	TW 16
Evaporador	8.7	TW 10
Ventiladores Condensador	5.2	TW 0.75
Sistema de Descongelamiento	82.4	THW 25

➤ Verificación de la caída de tensión

Es necesario realizar la verificación por caída de tensión. En la cual se evalúa que la corriente que circula por el conductor eléctrico seleccionado no genere una caída de tensión superior a la caída de tensión admisible recomendada por Código Nacional Eléctrico (CNE).

Para la verificación de la caída de tensión se empleará la ecuación 2.55.

$$\Delta U\% = \frac{K_E \times I \times L_C \times (R_c \cos\phi + X_c \sin\phi) \times 100}{U_V} \leq \Delta U\%_{admisible} \quad \dots (2.55)$$

Siendo:

$\cos\phi$: Factor de potencia del motor [-]
I	: Intensidad de la corriente de línea [A]
K_E	: Constante que depende del tipo de circuito 3Ø ó 1Ø [-] Circuito 3Ø = $\sqrt{3}$, circuito 1Ø = 2
L_C	: Longitud total del conductor [km]
R_c	: Resistencia eléctrica efectiva del conductor [Ω /km]
X_c	: Reactancia del conductor [Ω /km]
U_V	: Voltaje del motor [V]
$\Delta U\%$: Caída de tensión en porcentaje [%]
ϕ	: Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente [°]

El valor de la caída de tensión admisible según el CNE en circuitos de fuerza motriz es de: 5% en régimen y 15% durante el arranque. [Del Rosario, 2004]

Para este proyecto se desarrollara la ecuación 2.55 de forma aproximada, es decir se asumirá que la tensión y la corriente se encuentran en fase ($\cos\phi = 1$). Bajo esta consideración, se obtiene que todos los conductores, previamente seleccionados, cumplen con la exigencia del CNE.

2.5.2 Elementos de Maniobra y Protección

La selección de los elementos de maniobra y protección se realiza en función de la corriente de trabajo.

La cual se halla con la expresión siguiente:

$$I_T = \frac{P_E \times FD}{\sqrt{3} \times U_V \times \cos\phi \times \eta} \quad \dots (2.56)$$

Siendo:

$\cos\phi$: Factor de potencia del motor [-]
FD	: Factor de demanda [-]
I_T	: Corriente de trabajo de los elementos de maniobra y protección [A]
P_E	: Potencia eléctrica del motor [W]
U_V	: Voltaje del motor [V]
η	: Eficiencia del motor [-]

Para la selección se tomará en cuenta los siguientes criterios [Del Rosario, 2004]:

- Contactor : $FD = 1$
- Relé térmico : $FD = 1.1$
- Interruptor Termomagnético : $FD = 2$

Las tablas 2.29, 2.30 y 2.31 muestran la selección de los dispositivos de protección de las marcas Simens (Interruptores) y Telemecanique (Contactores y Relays).

Para el caso del compresor y el condensador ambos tienen un mismo interruptor termomagnético debido a que pertenecen a la unidad de condensación suministrada por la empresa Bitzer. De igual forma sucede para el evaporador y el sistema de descongelamiento.

Tabla 2.29 Tabla de selección de interruptores termomagnéticos

Interruptores termomagnéticos (3 polos)		
Componentes	Cantidad	Modelo
Unidad Condensadora	1	5SX1 380-7
Evaporador / Descongelamiento	1	5SX1 370-7

Tabla 2.30 Tabla de selección de contactores

Contactores Tripolares		
Componentes	Cantidad	Modelo
Compresor	1	LC1D38
Evaporador	1	LC1D09
Ventiladores Condensador	1	LC1D09
Sistema de Descongelamiento	1	LC1D32

Tabla 2.31 Tabla de selección de relés de protección térmica

Relés de Protección Térmica		
Componentes	Cantidad	Modelo
Compresor	1	LRD35
Evaporador	1	LRD10
Ventiladores Condensador	1	LRD08
Sistema de Descongelamiento	1	LRD32

2.6 Diseño final

Para finalizar este segundo capítulo de la tesis, se presentaran las figuras 2.35, 2.36 y 2.37 que representan la modelación del diseño final del congelador de maíz entero con capacidad de 100kg/h. Diseño que ha sido obtenido como resultado de la aplicación de las normas de diseño VDI 2221 y 2225; además, de la definición del sistema térmico, estructural, de control y eléctrico de la máquina.

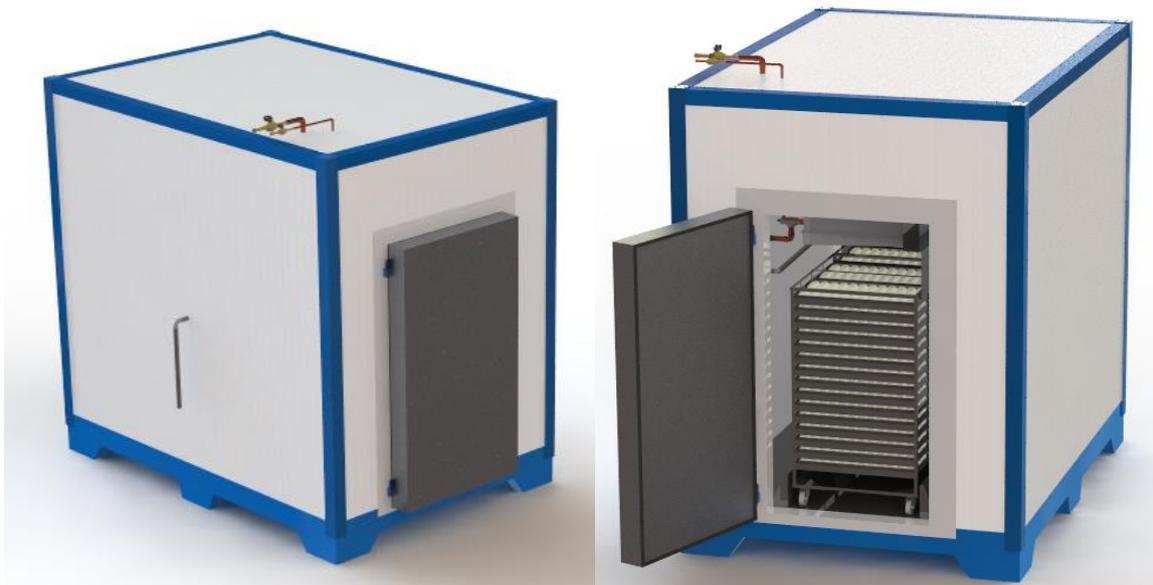


Figura 2.35 Vistas exteriores del congelador de maíz

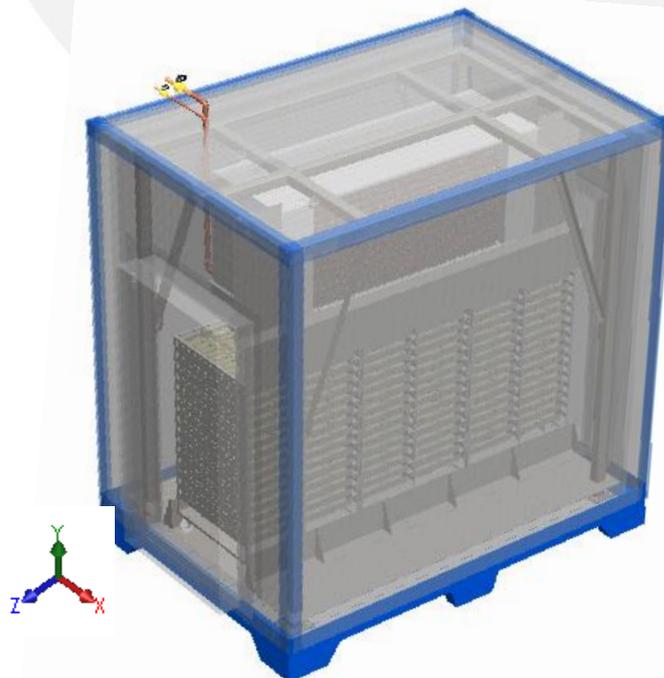


Figura 2.36 Vista interior del congelador de maíz

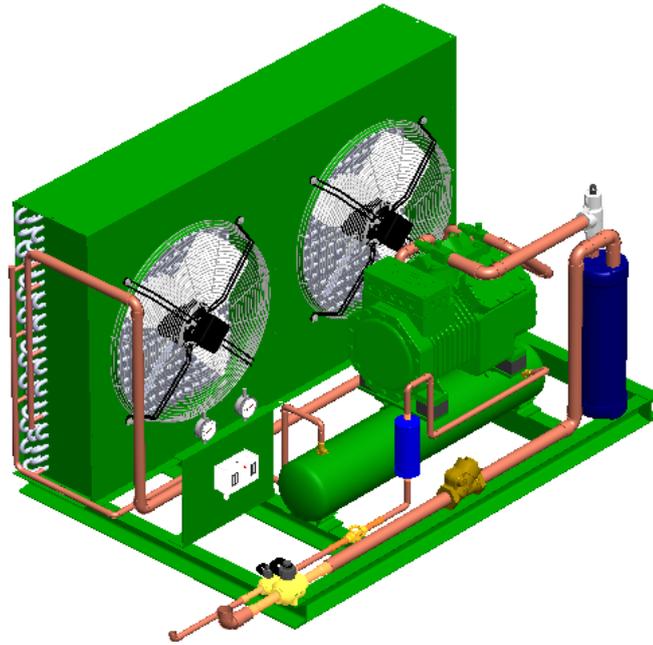


Figura 2.37 Unidad Condensadora y componentes secundarios

El congelador ha sido diseñado bajo las siguientes condiciones: instalación del congelador dentro de una zona de procesos refrigerada a 12 °C; una temperatura de ingreso del producto a congelar de 5 °C, el cual se encuentra embolsado [ASHRAE 2006, Ch.27, pp.3-4]; una temperatura final de congelación del maíz de -18 °C, una temperatura ambiente de 30 °C, además, la unidad de condensación se instala en la sala de máquinas de la planta procesadora.

Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que la distancia de instalación entre el congelador y la unidad condensadora, presenta límites máximos para que el equipo opere con caídas de presiones en las líneas de líquido, succión y descarga menores a un equivalente de 1 kelvin, respectivamente y velocidades admisibles en sus respectivas tuberías. Estos límites son los siguientes: longitud horizontal entre la unidad condensadora y congelador debe ser menor de 40 metros o la longitud de tubería vertical para un flujo ascendente debe ser menor de 10 metros. Estos límites máximo fueron calculados en base al manual ASHRAE – Refrigeration: “System Practices for Halocarbon Refrigerants” [ASHRAE 2006, Ch.2, pp.1-17].

Además, se verificó que la temperatura de pared exterior del congelador es mayor que la temperatura de rocío de la zona de procesos (9 °C). Por lo que se puede descartar condensación en las paredes del congelador y por tanto un deterioro del mismo.

Referencias del Capítulo 2:

- ASHRAE
2009 "Refrigerated Facility Design" (Chapter 14). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. New York: ASHRAE Inc.
"Thermophysical Properties of Refrigerants" (Chapter 30). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. New York: ASHRAE Inc.
- 2006 "System Practices for Halocarbon Refrigerants" (Chapter 02). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Thermal Properties of Food" (Chapter 09). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Cooling and Freezing Times of Foods" (Chapter 10). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Refrigeration Load" (Chapter 13). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Processed, Precooked, and Prepared Foods" (Chapter 27). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Forced-Circulation Air Coolers" (Chapter 42). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
"Refrigerant-Control Devices" (Chapter 44). *ASHRAE Handbook Refrigeration*. New York: ASHRAE Inc.
- BITZER
2010 "Refrigerant Properties". Refrigerant. Sindeelfingen, 2010, Report 16, pp. 36-37.
- ÇENGEL, Yunus & GHAJAR, Afshin
2011 "Convección externa forzada". *Transferencia de Calor y masa: Fundamentos y Aplicaciones, 4a. ed.* McGRAW-HILL, Inc. México. Pág. 422
- CRUZ R., Juan
2009 *Transferencia de calor*. Material de enseñanza. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima – Perú
- Del ROSARIO, Raúl
2004 "Los Conductores Eléctricos". Material de enseñanza. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Pág. 14
- HIBBELER, R. C.
2006 "Deflexión de vigas y ejes". *Mecánica de Materiales 6a. ed.* Traducido: J. Cera, V. González. Juárez: Pearson Education
- RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Jorge
2008 "Capítulo 1: Teorías de falla". *Resistencia de materiales 2*. Material de enseñanza. Sección de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Pág. 21-24
"Capítulo 6: Pandeo". *Resistencia de materiales 2*. Material de enseñanza. Sección de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Pág. 1-32
- YAMADA TANAKA, Luis
2010 "Carga de Enfriamiento". Material de enseñanza. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú
- 2009 "Cálculos de Carga Térmica". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú

CAPÍTULO 3

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A continuación, se detallan las especificaciones técnicas de los equipos que conforman el sistema de refrigeración del equipo de congelado.

3.1 Componentes principales

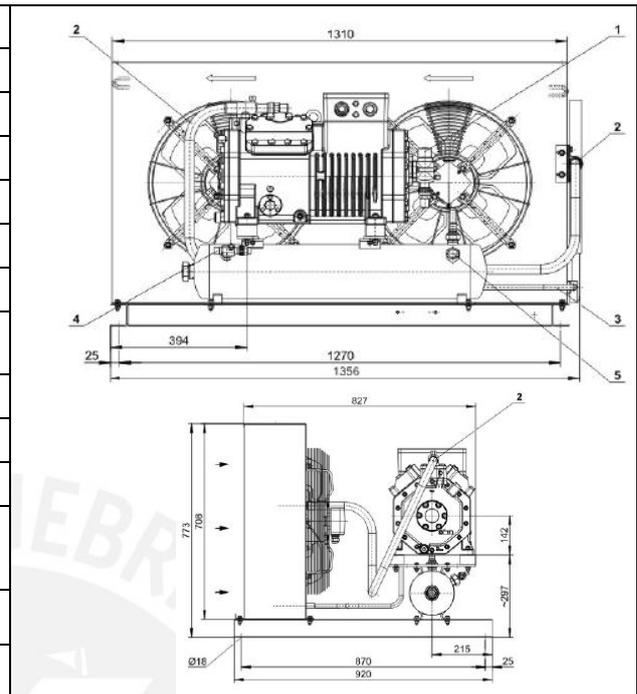
- Evaporador

Tipo	Convección forzada
Fabricante	HELPMAN
Modelo	THOR-B 324-10 H2/5 400
Cantidad	1
Refrigerante	R-404a
Carga de refrigerante	4.7 kg
Capacidad frigorífica	11 kW
No. de ventiladores	2
Flujo de aire (a pedir)	30 000 m ³ /h
Tipo de descongelamiento	E2 – Electric Defrost Heavy 230V
Descongelamiento	Eléctrico (14.14 kW)
Tipo de motor	IP55
Motor eléctrico	1200 W
Tensión	440 / 3 / 60
Peso del equipo	137 kg
Longitud x Altura x Ancho [mm]	2120 x 1065 x 880
Distancia mínima de instalación	500 mm
Conexión de succión	1 3/8" (35 mm)
Distribuidor interno	5/8" (16 mm)



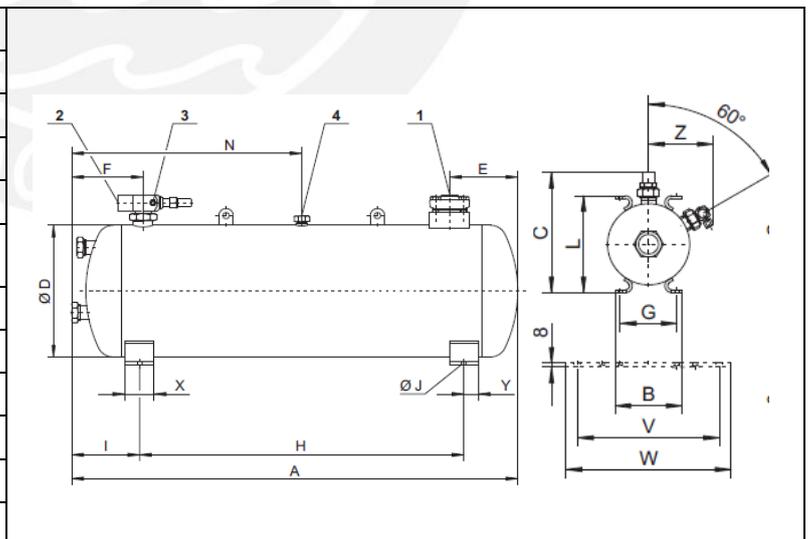
- Unidad condensadora

Tipo	Enfriado por aire
Fabricante	BITZER
Modelo	LH114/4PES-12Y
Cantidad	1
Refrigerante	R-404a
Capacidad frigorífica	10.64 kW
Núm. de ventiladores	2
Compresor	BITZER (semi-hermético)
No. compresores	1
Tensión	440 / 3 / 60
Peso del equipo	268 kg
Longitud x Altura x Anchura [mm]	1356 x 920 x 773
Conexión de succión	1 3/8" (35 mm)
Línea líquida	5/8" (16 mm)
Recibidor de líquido	F152H
Opcionales (pedidos) [Montados en fabrica]	Separador de Aceite



- Recibidor de líquido (incluido en la unidad condensadora)

Marca	BITZER
Tipo	Horizontal
Refrigerante	R-404a
Modelo	F152H
Capacidad	6.8 kg
Conexión (in - outlet)	7/8" - 5/8"
Tipo de conexión	Roscado
Dimensiones [mm]	A: 873
	F: 127
	B: 130
	G: 110
	C: 242
	H: 740
	D: 159
	I: 82
	E: 96



- Válvula de expansión termostática

Marca	Sporlan	
Modelo	SEE- 4 – 2.94 1/2 x 5/8 x 1/4 x 5"	
Conexión externa	1/4" (ODF Solder)	
Refrigerante	R-404a	
Tipo de conexión	ODF Solder	
Conexión entrada	1/2"	
Conexión salida	5/8"	
Peso	2 lb	
Dimensiones [in]	A: 1.29	
	B: 1.57	
	c: 1.36	
	C: 0.5	

3.2 Componentes secundarios

3.2.1 Elementos de operación y mantenimiento

- Acumulador de succión

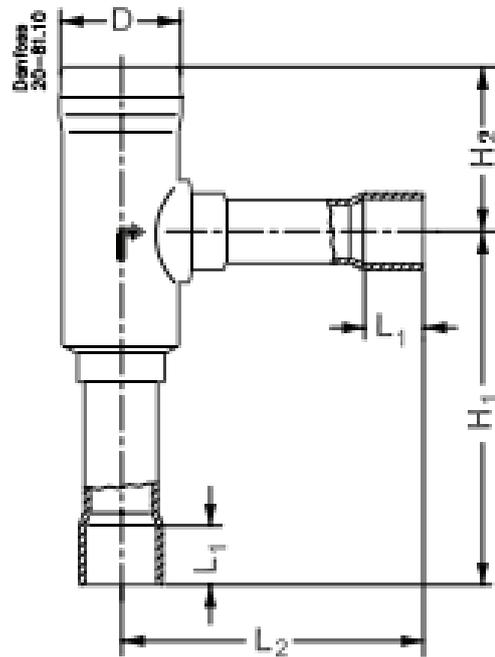
Marca	Henry Technologies	
Tipo	Vertical	
Refrigerante	R-404a	
Modelo	S-7063S	
Conexión	1 3/8" (35 mm)	
Tipo de conexión	Roscado (ODS)	
Presión max. trab.	450 psi	
Dimensiones [in]	A: 6	
	C: 3	
	B: 20.25	

- Filtro secado

Línea de líquido		
Marca	Sporlan	
Tipo	Núcleo reemplazable (Catch-all)	
Refrigerante	R-404a	
Modelo	C-R425	
Tipo de conexión	ODF Solder	
Conexión	5/8" (16 mm)	
Tipo de filtro	RCW-48	
Longitud x diámetro [mm]	230 x 66	

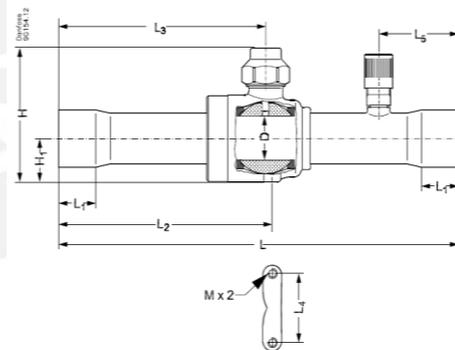
- Válvula check o válvula de retención

Marca	Danfoss	
Refrigerante	R-404a	
Tipo de conexión	ODF Soldar	
Caída de Presión	0.04 bar	
Línea de Succión		
Modelo	NRV-35S	
Código	020-1026	
Conexión	1 3/8"	
Línea de descarga		
Modelo	NRV-28S	
Código	020-1029	
Conexión	1 1/8"	
Dimensiones [mm]	NRV-28S	NRV-35S
H1	141	141
H2	67	67
L1	22	25
L2	123	123
D	49	49
Peso	1.24	1.25



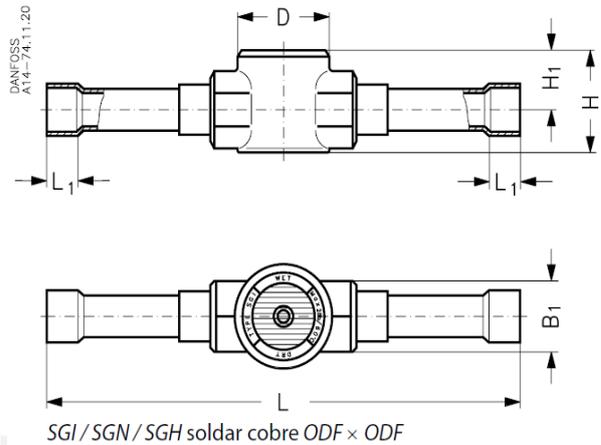
- Válvula de paso

Marca	Danfoss		
Refrigerante	R-404a		
Presión max. trabajo	45 bar		
Tipo de válvula	Válvula de bola (GBC)		
Tipo de conexión	ODS Solder		
Especificación	Modelo	Código	Conexión
	GBC 16s	009G7023	5/8"
	GBC 35s	009G7027	1 3/8"
Peso (kg)	0.2	1.4	
Dimensiones [mm]	GBC 16s	GBC 35s	
H	54	91	L ₄
H ₁	15	30	L ₅
L	160	251	M
L ₁	12	25	D
L ₂	85	136	D
L ₃	83	130	



- Visor de líquido e indicador de humedad

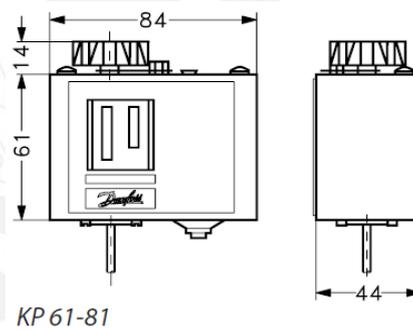
Marca	Danfoss
Tipo	ODF Soldar
Refrigerante	R-404a
Modelo	SGN 16s
Código	014-0184
Conexión	5/8"
Contenido de Humedad en ppm	
Verde – Seco	< 25
Color Intermedio	25-100
Amarillo - Húmedo	> 100
Dimensiones [mm]	L: 146
H ₁ : 18	L ₁ : 12
B ₁ : 22	H: 30
	Ød: 27



3.2.2 Elementos de control de operación

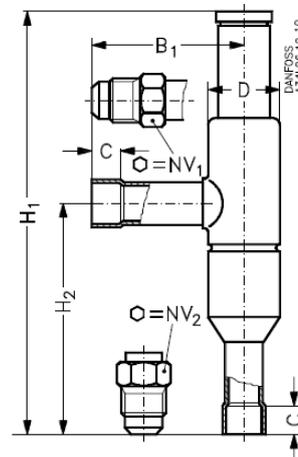
- Control de la temperatura

Marca	Danfoss
Modelo	KP 61
Código	060L110066
Refrigerante	R-404a
Rango de trabajo	-30 → 15
Tipo de bulbo	Capilar recto
Designación del bulbo	A
Longitud tubo capilar	2 m
Rearme	Automático



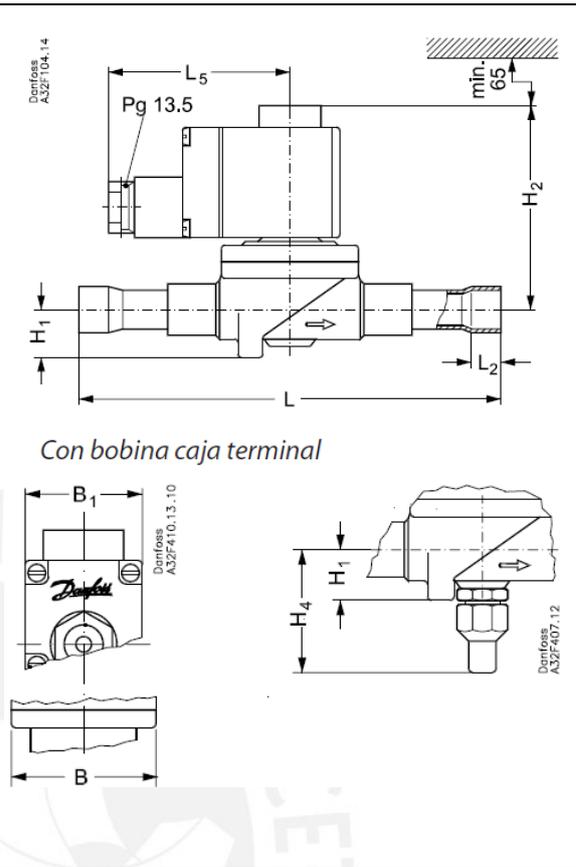
- Regulador de presión en el cárter

Marca	Danfoss
Refrigerante	R-404a
Modelo	KVL 35
Código	034L0052
Conexión	1 3/8" ODF Soldar
Presión de consigna	4 bar
Gama de ajuste	2 - 4 bar
Perdida de carga en el regulador	0.2 bar
Dimensiones [mm]	H1: 259
C: 25	H2: 151
ØD: 43	B1: 105

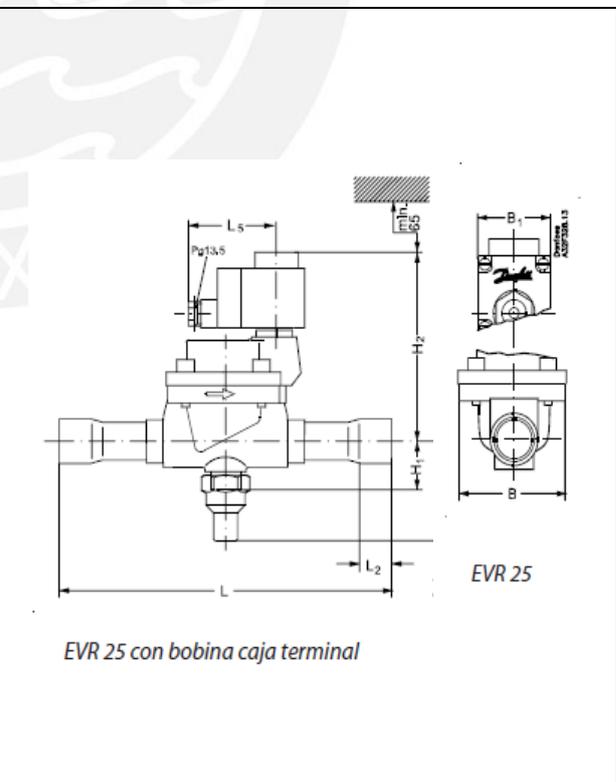


• Válvula de solenoide

Marca	Danfoss
Tipo	Normally open
Refrigerante	R-404a
Estado	Línea de líquido
Tipo de válvula	EVR 15
Código	032F2193
Tipo de pedido	Válvula completa
	Caja terminal
Tipo de bobina	10 W c.a.
Apéndice	32
Tensión	220 - 230 V
Frecuencia	50 / 60 Hz
Potencia Absorbida	10 W
Conexión	5/8" ODF Soldar
Presión máxima	21 bar
Peso con bobina	1 kg
Dimensiones [mm]	H1: 19
	H2: 78
	L2: 12
	H4: 49
	L5: 75
	L:176
	B1: 68



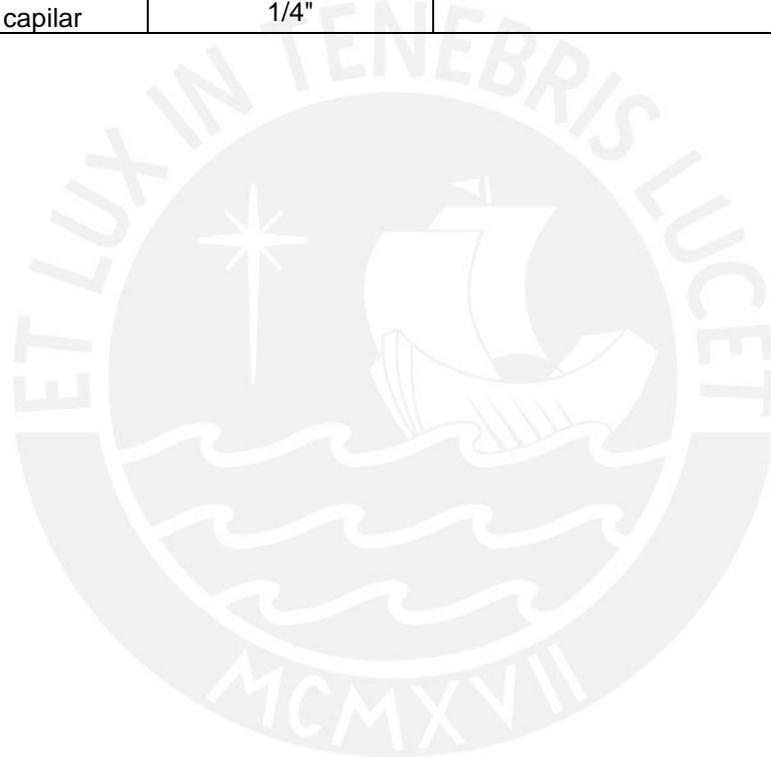
Marca	Danfoss
Tipo	Normally open
Refrigerante	R-404a
Estado	Línea de aspiración
Tipo de válvula	EVR 25
Código	032F2207
Tipo de pedido	Cuerpo de la válvula
Conexión	1 3/8" ODF Soldar
Tipo de Apertura	Manual
Solicitar	Bobina/Caja terminal
Potencia Absorbida	10 W
Tensión	220 V
Frecuencia	60 Hz
Peso con bobina	3.3 kg
Dimensiones [mm]	H1: 38
	H2: 138
	L2: 25
	H4: 72
	L5: 75
	L:281
	B1: 68



3.2.3 Elementos de seguridad de operación

- Control de presión dual

Marca	Danfoss	
Modelo	KP 15	
Código	060-124166	
Refrigerante	R-404a	
Rango de regulación [bar]		
Baja presión (LP)	-0.2 → 7.5	
Alta presión (HP)	8 → 32	
Sistema de contactos	SPDT + señal LP	
Tipo de conexión	Abocada	
Longitud tubo capilar	1/4"	



CAPÍTULO 4

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

El presente capítulo consiste en la determinación del costo del proyecto. Para poder obtenerlo es necesario realizar dos procedimientos. El primero es el metrado de los planos y esquemas. El metrado consiste en la elaboración de un listado de todos los elementos que se fabricarán o comprarán y servicios que se brindarán por terceros. El segundo paso es el presupuesto, que resulta de obtener el costo de los elementos metrados y de los trabajos desarrollados para la instalación y puesta en marcha que permitirán la operación del congelador. En el presente proyecto, como se mencionó en la parte introductoria de la Tesis, abarca lo referente al proceso de congelación del maíz choclo. Debido a esto, en el presente capítulo se desarrolla los presupuestos para su construcción. Además, en la evaluación de los diferentes costos se toma como base precios patrones utilizados por empresas líderes en el mercado peruano, tanto en lo referente a importación de equipos, como en los trabajos de instalación y fabricación de estos. El costo total se analizará mediante el costo de equipos adicionando, el costo de instalación y puesta en operación del sistema. A continuación, se muestra el detalle del presupuesto elaborado.

4.1 Costo de equipos principales

Se debe tener presente que para el caso de equipos con representantes en el mercado local, se cotizó con precios que incluyen además del precio FOB, costos de fletes, embarques y despachos de aduanas, tabla 4.1.

Tabla 4.1 Costo total de equipos principales

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Costo Parcial US\$
1	Unidad de condensación BITZER	u	1	8 047.20	8 047.20
2	Evaporador HELPMAN	u	1	4 795.00	4 795.00
3	Válvula de expansión termostática	u	1	120.00	120.00
Costo total de equipos principales seleccionados					12 962.20
				IGV	2 333.20
Costo total de equipos principales seleccionados					15 295.40

4.2 Costo de equipos secundarios

Conformado por los elementos de operación, mantenimiento, control y seguridad del sistema de refrigeración. Los precios de dichos elementos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Costo total de equipos secundarios

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Precio Parcial US\$
1	Acumulador de succión	u	1	150.00	150.00
2	Filtro secador de líquido	u	1	120.00	120.00
3	Control de temperatura (termostato)	u	2	66.59	133.18
4	Control dual de presión (presostato)	u	1	81.74	63.93
5	Válvula check 1 3/8"	u	1	54.00	54.00
6	Válvula check 1 1/8"	u	1	48.00	48.00
7	Válvula de paso 1 3/8"	u	2	110.33	220.66
8	Válvula de paso 5/8"	u	4	45.29	181.16
9	Válvula de regulación de presión en el carter	u	1	235.00	235.00
10	Válvula solenoide 1 3/8"	u	1	132.00	132.00
11	Válvula solenoide 5/8"	u	1	66.00	66.00
12	Visor indicador de humedad	u	1	16.80	16.80
Subtotal de costo de equipos principales seleccionados					1 438.54
				IGV	258.94
Costo total de equipos principales seleccionados					1 697.48

4.3 Costo de tuberías y accesorios

Representa el costo de las tuberías y accesorios de cobre empleados en la instalación del sistema de congelación, tabla 4.3.

Tabla 4.3 Costo total de tuberías y accesorios

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Precio Parcial US\$
1	Tubería de cobre 1 3/8"	m	9	10.85	97.65
2	Tubería de cobre 5/8"	m	10	3.00	30.00
3	Codo 90° RL 1 3/8"	u	9	1.83	16.47
4	Codo 90° RL 5/8"	u	16	0.20	3.20
5	Reducción 5/8- 1/2	u	1	0.53	0.53
6	Unión 1 3/8"	u	2	1.20	2.40
7	Unión 5/8"	u	2	0.20	0.40
Subtotal de costo de equipos principales seleccionados					150.65
				IGV	27.12
Costo total de equipos principales seleccionados					177.77

4.4 Costo de panel aislante

Representa la cantidad en m² de paneles de poliuretano necesarios para la construcción de las paredes del congelador, además, del costo de las puertas frigoríficas del diseño, tabla 4.4.

Tabla 4.4 Costo total de panel aislante

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Precio Parcial US\$
1	Panel de poliuretano de 125 mm	m ²	40.14	53.96	2 165.95
2	Puerta aislante	u	2	260.00	520.00
Subtotal de costo de equipos principales seleccionados					2 685.95
				IGV	483.47
Costo total de equipos principales seleccionados					3 169.43

4.5 Costo de equipos diseñados

Entre los equipos diseñados del sistema de refrigeración, se encuentra la estructura soporte y la estructura base, además de los carros transportadores de producto con sus respectivas bandejas. Se consultó con empresas del sector metal-mecánico, las cuales proporcionaron un costo promedio válido para estimar el costo de fabricación en función del peso de los componentes. Dicho costo es US\$ 2.5/kg de acero trabajado.

Siendo el peso del recipiente de la estructura soporte igual a 235 kg, para la estructura base 255 kg, los pesos de los coches con bandejas son de 105 kg (3x). Por lo que el peso total a fabricar asciende a 805 kg, siendo el costo de fabricación de los componentes US\$ 2 012.50. Dicho costo incluye el material directo e indirecto, los consumibles, mano de obra, equipos, supervisión y ensayos requeridos.

4.6 Costo de Elementos del Circuito Eléctrico

Conformado por el costo de los conductores eléctricos y dispositivos de protección del sistema eléctrico del congelador, estos costos se aprecian en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Costo de elementos del circuito eléctrico

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Precio Parcial US\$
1	Conductor eléctrico THW 25	m	10	1.72	17.20
2	Conductor eléctric. TW 16	m	10	1.45	14.50
3	Conductor eléctric. THW10	m	10	1.10	11.00
4	Conductor eléctric. THW0.75	m	10	0.30	3.00
5	Contacto LC1D38	u	01	56.35	56.35
6	Contacto LC1D32	u	01	46.00	46.00
7	Contacto LC1D09	u	02	17.70	35.40

Tabla 4.5 Costo de elementos del circuito eléctrico (continuación)

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario US\$	Precio Parcial US\$
8	Relay Térmico LRD35	u	01	39.00	39.00
9	Relay Térmico LRD32	u	01	36.50	36.50
10	Relay Térmico LRD10	u	01	30.00	30.00
11	Relay Térmico LRD08	u	01	27.45	27.45
12	Interruptor termomag. 5SX1 380-7	u	01	58.50	58.50
13	Interruptor termomag. 5SX1 370-7	u	01	55.50	55.50
Subtotal de costo de equipos principales seleccionados					430.40
				IGV	77.47
Costo total de equipos principales seleccionados					507.87

4.7 Costo Total del Proyecto

A continuación, se presenta la tabla 4.6 que representa el costo total de los elementos necesarios para la construcción del congelador.

Tabla 4.6 Costo de total de equipos y accesorios del congelador

Ítem	Descripción	Costo Total US\$
1	Costo total de equipos principales seleccionados	15 295.40
2	Costo total de equipos secundarios seleccionados	1 697.48
3	Costo total de tuberías y accesorios	150.65
4	Costo de paneles aislantes	3 169.43
5	Costo total de equipos diseñados	2 012.50
6	Costo total de elementos del circuito eléctrico	507.87
Costo total de equipos y accesorios del Congelador		22 833.33

En la tabla 4.7, se presenta el costo total del congelador, incluyendo los gastos necesarios para la instalación y puesta en marcha del proyecto, además del costo de la ingeniería de diseño, los cuales se asumieron como un valor equivalente al 20 % del costo total de equipos y accesorios del congelador.

Tabla 4.7 Costo de total del congelador

Ítem	Descripción	Costo Total US\$
1	Costo total de equipos y accesorios del Congelador	22 833.33
2	Costo total de instalación y puesta en operación	4 566.67
Costo total del proyecto		27 400.00

CONCLUSIONES

Para culminar el presente trabajo de tesis se desarrollaran conclusiones de los resultados obtenidos, el cumplimiento de los objetivos de la tesis y los aportes en el campo de la agro-industria.

1. En el presente diseño de un congelador de maíz amiláceo (choclo) entero, orientado al sector agro-industrial, se obtuvieron los siguientes resultados, para una capacidad de procesamiento de 100 kg/h: dimensiones generales del diseño 2.1 x 3.0 x 3.2 metros de ancho, largo y alto respectivamente, carga térmica total del sistema de 10.92 kW y un tiempo de congelación de 5.61 h. Siendo, el presupuesto total del equipo de \$ 27 400.00 dólares americanos, el cual incluye costo de equipos, costos de ingeniería de diseño, instalación y puesta en marcha.
2. En la elaboración del presente proyecto se diseñaron los siguientes componentes: Estructura base y soporte de la máquina, deflectores de flujo de aire del evaporador para minimizar las pérdidas por by-pass y los carros transportadores de producto. Además, se seleccionaron los componentes principales y secundarios del sistema de refrigeración, así como, el método de congelación, el tipo de refrigerante y panel aislante a utilizar, por último, también se seleccionó los componentes eléctricos de la máquina.
3. El método de congelación seleccionado en el diseño es un túnel de congelación estático, el cual se basa en la congelación del producto por aire forzado (convección). Este tipo de equipos presenta gran flexibilidad, adaptándose a la capacidad de procesamiento, las dimensiones y forma del producto.
4. El refrigerante seleccionado para el diseño es de tipo zeotrópico (R-404a) que es el comúnmente empleado para aplicaciones de baja y media temperatura de evaporación. El R-404a tiene un valor de ODP (Ozone Depletion Potential) casi de cero y por ende no representa un potencial de destrucción de la capa de Ozono. Además, presenta una amplia disponibilidad en el mercado nacional.
5. La carga térmica total (10.92 kW / 100 %) obtenida en el diseño del congelador está compuesto por: la carga del producto (9.42 kW / 86.2 %); la carga de transmisión (0.33 kW / 3.0 %); la carga interna, que incluye la carga que representa los carros transportadores de producto con sus respectivas bandejas (0.37 kW / 3.4 %), el embolsado en EPS, en el cual se encuentra el producto al

ingreso del congelador, y los puentes térmicos en el congelador (0.02 kW / 0.2 %); y la carga térmica de los equipos, que incluye la carga de los motores eléctricos del evaporador (0.62 kW / 5.6 %) y del sistema de descongelamiento (0.16 kW / 1.5 %).

6. Los equipos seleccionados para el congelador se dividen en componentes principales (unidad condensadora, evaporador de tiro forzado y válvula de regulación termostática); componentes secundarios o auxiliares (acumulador de succión, filtro secador, controles de temperatura o termostatos, control dual de presión, válvulas check, válvulas de paso, válvula de regulación de presión en el cárter, válvulas solenoides y visor líquido). Además, de los componentes eléctricos como: conductores eléctricos; y elementos de maniobra y protección (contactores, relés térmicos e interruptores termomagnéticos).
7. Por último, los parámetros de operación del congelador para la carga térmica a procesar y los equipos seleccionados, son los siguientes: temperatura de condensación, 39 °C; temperatura de evaporación, -29.7 °C; temperatura final del producto en el centro térmico, -18 °C; temperatura ambiente de diseño, 30 °C, sobrecalentamiento a la succión de 10 K y un sub-enfriamiento en la línea de líquidos de 3 K. Además, la presión de condensación es de 17.8 bar y la presión de evaporación, 2.07 bar, ambas presiones absolutas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE
2009 *ASHRAE Handbook Fundamentals*. ASHRAE Inc. New York
2006 *ASHRAE Handbook Refrigeration*. ASHRAE Inc. New York
- [2] BARRIGA GAMARRA, E. B.
2009 *Métodos de diseño en ingeniería mecánica*. Materia de enseñanza. Sección Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú
- [3] ÇENGEL, Yunus & GHAJAR, Afshin
2011 *Transferencia de Calor y masa: Fundamentos y Aplicaciones, 4ª. ed.* McGRAW-HILL, Inc. México
- [4] DIRECCIÓN GENERAL DE COMPETIVIDAD AGRARIA
2012 *Maíz amiláceo: Principales Aspectos de la Cadena Agroproductiva, 1ª ed.* Ministerio de Agricultura. Lima – Perú
- [5] DIRECCIÓN GENERAL DE ELECTRICIDAD
2006 *Código nacional de electricidad: utilización, 1ª ed.* Ministerio de Energía y Minas. Lima - Perú
- [6] GORDON, Jeffrey M. & NG, Kim Choon
2001 *Cool Thermodynamics: The Engineering and Physics of Predictive, Diagnostic and Optimization Methods for Cooling Systems*. Cambridge International Science Publishing. England
- [7] INCROPERA, Frank P.
1999 *Fundamentos de Transferencia de Calor, 4ª ed.* Prentice Hall. México
- [8] KIDE
2009 *Especificaciones Técnicas: Panel Frigorífico Industrial KIDE*. KIDE Camaras frigoríficas. Bizkaia - España
- [9] MOTT, Robert L.
2006 *Diseño de elementos de máquinas, 4ª ed.* Pearson Educación. México
- [10] RODRIGUEZ HERNANDEZ, Jorge
2008 *Resistencia de Materiales 2*. Material de enseñanza. Sección de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú
- [11] SENCICO (Servicio Nacional Capacitación en la Industria de la Construcción)
2004 *Norma técnica de edificación: E.090 Estructuras metálicas*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima - Perú
- [12] VARGAS-MACHUCA S., Federico
1990 *Máquinas Eléctricas Rotativas*. Megaprint Ediciones S.A. Lima - Perú
- [13] VEREIN DUTSCHER INGENIEURE (VDI)
1987 *Systematic Approach to the Design of Technical Dystems and Products (VDI 2221)*. VDI Design Handbook. Berlin
- [14] YAMADA TANAKA, Luis
2002 *Refrigeración Industrial*. Material de enseñanza. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú