

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Dimensionamiento y Selección de un Túnel de Congelación para  
el Procesamiento de Banano (*Musa Sapientum*) con Paleta”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

**GUSTAVO LUCAS HIDALGO**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2016

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre y mi Padre que hicieron posible mi educación y me guiaron en cada momento de mi vida.

A mis amigos que de una u otra manera colaboraron con la realización de esta Tesis de Grado y en especial al Ing. Jorge Duque R., Director del Trabajo de graduación, por su invaluable ayuda.

# DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI FAMILIA

A MIS AMIGOS

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



---

Ing. Jorge Duque R.  
DIRECTOR



---

Ing. Gonzalo Zabala O.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



---

Gustavo Alfredo Lucas Hidalgo

## RESUMEN

El presente trabajo se centra en la solución para la falta de capacidad de producción en una empresa agroindustrial, que se especializa en el procesamiento de banano con paleta congelado, para abastecer la creciente demanda de sus clientes en el extranjero. La capacidad deseada es de 750 kg/h de banano con paleta por lo que la empresa realizó adecuaciones en sus equipos, las cuales resultaron insuficientes.

Se presenta el cálculo energético, la estimación del tiempo de congelamiento y, el dimensionamiento y selección de un equipo de congelación para suplir la demanda requerida y adicionalmente, en el trabajo se recoge la experiencia de los procesos utilizados actualmente para mejorar la calidad del producto, como es el uso de un sistema de Congelamiento rápido Individual ó IQF (por sus siglas en inglés) y la utilización eficiente de los recursos energéticos de la planta.

Se realizó el cálculo de cargas térmicas para la congelación del banano con paleta y se estimó el tiempo de congelación mediante un modelo que contempló los efectos multidimensionales en sólidos finitos con conducción transiente. La carga térmica obtenida de 123 kW, se utilizó

para dimensionar y seleccionar el evaporador con su sistema de válvulas para amoníaco y, a su vez, para analizar las capacidades del sistema de refrigeración instalado. Con el tiempo de congelación estimado de 40 min, y el flujo de producto se seleccionó un sistema de transporte para el banano con paleta.

Finalmente, con toda la información obtenida y los atributos deseados por la empresa, se realizó la comparación entre equipos y la selección final de un Túnel de Congelación IQF y un estimado de los costos de inversión para la adquisición y montaje del equipo.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ABREVIATURAS.....	vii
SIMBOLOGÍA.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE PLANOS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. ANTECEDENTES.....	3
1.1. Antecedentes del Proyecto. ....	3
1.2. Etapa de Congelación. ....	7
1.3. Requerimientos del Proyecto. ....	17
1.3.1. Consideraciones de los Requerimientos.....	20
1.4. Definición Revisada del Problema .....	20



## CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS ENERGÉTICO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO DE CONGELACIÓN .....	23
2.1. Metodología de Diseño .....	23
2.2. Cálculo de Cargas Térmicas .....	25
2.2.1. Carga Térmica del Producto .....	26
2.2.2. Carga Térmica por Material de Empaque .....	30
2.2.3. Carga Térmica por Equipos Eléctricos .....	31
2.2.4. Carga por Aislamiento .....	33
2.2.5. Carga por Cambios de Aire ó Filtraciones .....	34
2.3. Estimación del Tiempo de Congelación del banano .....	36
2.3.1. Validación del Tiempo de Congelación Estimado .....	50
2.4. Selección de Evaporador de Amoniaco .....	54
2.5. Capacidades y Dimensionamiento de Tuberías y Válvulas .....	56
2.5.1. Esquema de Instalación de Válvulas .....	60
2.6. Análisis de la Capacidad de Refrigeración Instalada en el Sistema de Refrigeración .....	60
2.7. Selección de Sistema de Transporte de Producto .....	62

## CAPÍTULO 3

3. SELECCIÓN DE EQUIPO DE CONGELACIÓN .....	69
3.1. Parámetros de Selección .....	69

3.2. Análisis y Selección de Túnel de Congelación IQF .....	72
3.3. Esquema de Ubicación en Planta .....	76
CAPÍTULO 4	
4. ANÁLISIS DE COSTO DE INVERSIÓN .....	77
4.1. Costo de Inversión e Instalación del Túnel .....	77
CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

## ABREVIATURAS

BTU/HP.h	Btu por Caballo de Potencia por hora
C	grado Centígrado
Cp1	Calor específico 1
Cp2	Calor específico 2
FM	Factor de motor
HP	Caballos de Potencia
J/kg.K	Julios por Kilogramo Kelvin
°K	grado Kelvin
kg/h	Kilogramo por hora
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
kJ/kg	Kilojulios por Kilogramo
kW	Kilovatio
m	masa
m/s	metros por segundos
m <sup>2</sup> /s	metro cuadrado por segundo
min	Minutos
NB	Número de bombillos
PB	Potencia de Bombillos
PM	Potencia del motor
Pr	Prandtl
Q	Calor
TO	Tiempo de operación
W/m.K	Vatio por metro grado kelvin

## SIMBOLOGÍA

$\nu$	Viscosidad Cinemática
$D$	Diámetro
$K$	Conductividad térmica
$L$	Calor latente de fusión
$N$	Número de paletas
$Re_D$	Número de Reynolds
$T$	Tiempo de congelación
$T_1$	Temperatura inicial del producto
$T_2$	Temperatura final del producto
$T_c$	Temperatura de congelación
$T_e$	Temperatura de evaporación
$T_f$	Temperatura de película
$T_{inf}$	Temperatura infinito
$T_s$	Temperatura de superficie
$V$	Velocidad
$\rho$	Densidad

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exportaciones de banana con paleta.....	4
Figura 1.2. Flujo del procesamiento de banano con paleta.....	7
Figura 1.3. Túnel de congelación estático.....	9
Figura 1.4. Túneles IQF de lecho fluidizado.....	11
Figura 1.5. Defectos en el banano con paleta IQF.....	14
Figura 1.6. Comparación del producto terminado de los túneles de congelación.....	15
Figura 2.1. Etapas de congelación de un producto.....	30
Figura 2.2. Solución multidimensional para un cilindro corto.....	36
Figura 2.3. Modelado de convección por flujo externo en cilindro.....	37
Figura 2.4. Modelado de conducción transitoria bidimensional en un cilindro corto.....	41
Figura 2.5. Prueba de congelación en túnel estático.....	53
Figura 2.6. Prueba de congelación en túnel IQF.....	53
Figura 2.7. Compresor de tornillo.....	61
Figura 2.8. Arreglo de producto sobre banda.....	64
Figura 2.9. Túnel IQF lineal.....	65
Figura 2.10. Túnel IQF en espiral.....	67
Figura 3.1. Distribución de producto por área.....	71
Figura 3.2. Arreglo por capas en túnel de lecho fluidizado.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros y capacidades del túnel estático vs túnel IQF....	16
Tabla 2	Categorización de los requerimientos.....	19
Tabla 3	Parámetros requeridos en túnel IQF.....	21
Tabla 4	Propiedades físicas del banano.....	26
Tabla 5	Factores de equivalencia térmica para motores.....	33
Tabla 6	Propiedades físicas del aire.....	38
Tabla 7	Propiedades del banano.....	42
Tabla 8	Valores de Fourier en función del tiempo.....	44
Tabla 9	Coefficientes de la solución exacta en pared plana.....	45
Tabla 10	Temperatura adimensional en el centro de la pared plana....	46
Tabla 11	Valores de Fourier en función del tiempo.....	47
Tabla 12	Coefficientes de la solución aproximada en cilindro infinito...	47
Tabla 13	Temperatura adimensional en el centro del cilindro infinito...	48
Tabla 14	Producto de las temperaturas.....	49
Tabla 15	Temperatura en el centro del banano.....	50
Tabla 16	Condiciones y parámetros iniciales de congelación.....	51
Tabla 17	Tiempos y temperaturas de congelación estimados.....	52
Tabla 18	Resultados de tiempos y temperaturas del producto.....	54
Tabla 19	Descripción de evaporador para amoníaco.....	56
Tabla 20	Sistema de válvulas en evaporador de túnel nuevo.....	58
Tabla 21	Dimensiones externas de túneles.....	68
Tabla 22	Parámetros requeridos en túnel IQF.....	70
Tabla 23	LSJ Spiral Quick-Freezing Machine. (Opción #1).....	73
Tabla 24	Gyrocompact P42. (Opción #2).....	74
Tabla 25	Cuadro de comparación entre túneles IQF en espiral.....	75
Tabla 26	Costo de inversión del proyecto.....	78

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Diagrama de flujo de Túnel IQF
- PLANO 2 Distribución de equipos del sistema de refrigeración

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del siguiente trabajo abarca principalmente lo siguiente:

En el capítulo 1 se describirán los antecedentes del proyecto, incluyendo una descripción de los equipos existentes que la empresa utiliza en su intento por aumentar su capacidad de producción de bananos en paleta. Se presentaran los requerimientos del cliente y la definición revisada del problema.

En el capítulo 2, se realizará el cálculo energético para la selección del equipo de congelación. Esto incluirá los cálculos de carga térmica durante el congelamiento del banano con paleta y las cargas adicionales que intervienen durante su congelación. Se realizará un modelo para estimar el tiempo de congelación del producto deseado, así como la validación de la metodología utilizada.

A continuación, en el capítulo 3 se realizará un análisis de los requerimientos del proyecto y sus posibles soluciones o adecuaciones en la selección del



equipo de congelación IQF para mejorar la producción de la línea de congelados.

En el capítulo 4, se analizarán los costos de inversión para adquisición del equipo, pero sólo considerando los equipos necesarios para la instalación del Túnel IQF en espiral. Esto incluirá el valor del Túnel y el lote de válvulas requeridos para la interconexión al sistema de refrigeración actual.

Finalmente en el capítulo 5 se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones del sistema propuesto.

# CAPITULO 1

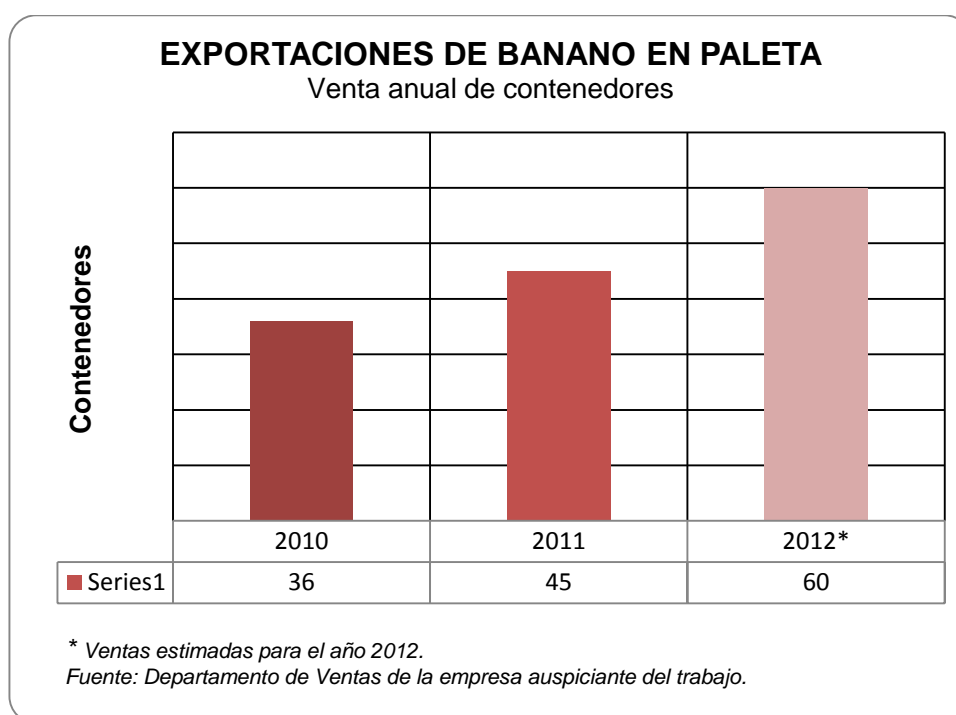
## 1. ANTECEDENTES.

En este capítulo, se describen los antecedentes del proyecto motivo del estudio, incluyendo los equipos existentes que la empresa usó en su intento por aumentar su capacidad de producción de bananos en paleta, producto en el que se centra este trabajo. Se presentan los requerimientos del cliente y la definición revisada del problema que se resuelve. Finalmente se describe el contenido del trabajo.

### 1.1. Antecedentes del proyecto.

La empresa auspiciante del presente trabajo se especializa en la producción y exportación de banano con paleta congelado y durante los últimos dos años ha existido un incremento en la demanda del producto por parte de los clientes en el mercado extranjero, por lo que se ha visto en la necesidad de buscar alternativas para incrementar su capacidad de producción.

Esta tendencia del mercado extranjero se puede apreciar en la Figura 1.1, donde se muestra el crecimiento de las exportaciones de contenedores de banano con paleta de la empresa auspiciante. Y se estima un incremento del 15 %, aproximadamente en las ventas anuales para el siguiente año, de acuerdo a contratos verbales con los clientes interesados en el producto.



**FIGURA 1.1. EXPORTACIONES DE BANANA CON PALETAS.**

Para entender las acciones tomadas por la empresa en su afán de buscar incrementar la capacidad de producción, se analizará brevemente el flujo del proceso de producción del banano con paleta que se muestra en la Figura 1.2. Cabe mencionar que el

procesamiento del banano con paleta es manual, en la mayoría de sus etapas, ya que la influencia de la mano de obra en el proceso es importante. El banano madurado con un Brix de 19° a 21° es seleccionado y lavado manualmente antes de ingresar al área de proceso. La selección consiste en medir la superficie externa para que cumpla con el diámetro de 35mm y la longitud de 90mm, considerando 5 mm adicionales por el espesor de la cáscara. Una vez que se encuentra en el área de proceso se remueve la cáscara y el banano se coloca en mesas de proceso, donde se revisa la superficie externa para eliminar cualquier defecto físico visible.

Existen moldes de acero inoxidable, con las medidas especificadas por el cliente, donde se coloca el banano pelado, para ser cortado. Una vez que se realiza el corte del banano, se introduce la paleta en cada banana. La paleta es de madera de Abedul, de procedencia China, la cual ya viene desinfectada y lista para ser utilizada en el proceso. La paleta tiene las siguientes dimensiones: largo, 93 mm; ancho mayor, 18 mm y ancho menor, 11 mm, con una tolerancia de 1 mm, según especificaciones; y un espesor de 2 mm con tolerancia de 0.1 mm.

En esta etapa del proceso, el banano con paleta se ingresa a uno de los túneles de congelación dependiendo de la capacidad de producción requerida por la empresa, hasta que se congela el banano a una temperatura final de  $-18^{\circ}\text{C}$ . El tiempo estimado de esta etapa depende del túnel utilizado.

Después de la congelación del banano, este es descargado a mesas de inspección para realizar la última revisión, que consiste en detectar problemas de calidad durante el proceso de congelación, que incluyen las paletas golpeadas, bananos dañados, objetos extraños pegados en el producto y la oxidación del banano, antes de ser empacados en cajas de 198 unidades. Estos problemas generalmente se dan por desprendimiento de materiales de los equipos involucrados en las diferentes etapas del proceso.

Para este estudio, se analizó detalladamente la capacidad de producción de la etapa de congelación del flujo de proceso, para lo cual se realiza una descripción de los equipos de congelación utilizados por la empresa.

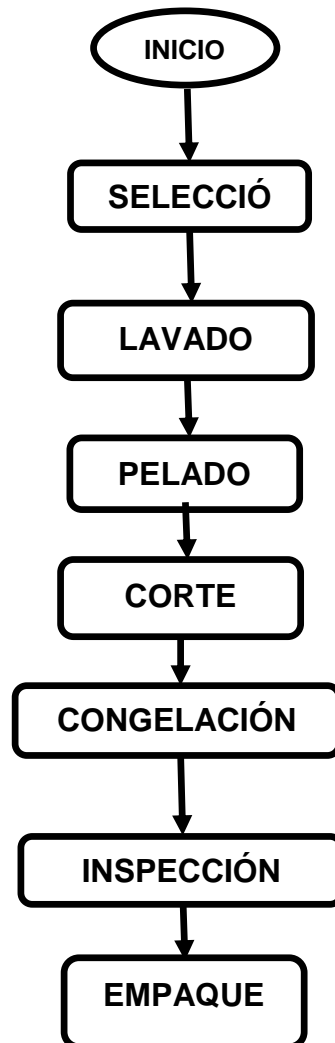


FIGURA 1.2. FLUJO DEL PROCESAMIENTO DE BANANO CON PALETA

### 1.2. Etapa de Congelación.

Inicialmente, la empresa realizaba la etapa de congelación del banano con paleta en un Túnel Estático, el cual es una cámara refrigerada de dimensiones 10 m x 5 m, y una altura de 3 m. La transferencia de calor inicial es elevada en el túnel, pues se parte del

producto caliente introducido con frecuencia a temperaturas entre 20°C y 25°C. durante las primeras horas de producción, por ello es necesario considerar la potencia del compresor durante estos instantes.

La velocidad del aire se encuentra alrededor de los 2 – 3 m/s, y la temperatura promedio del aire está entre -22°C y -26°C. Bajo estas condiciones, los tiempos aproximados de congelación del producto son de 50 a 65 min, obteniendo un oscurecimiento de la superficie del producto como reacción química de oxidación propia del banano.

Las capacidades de este túnel varían entre 250 – 350 kg/h. considerando una mano de obra de 26 a 32 personas y la capacidad de refrigeración instalada de 69 kW, en el evaporador del túnel. Para la generación de esta capacidad de refrigeración son necesarios 75 kW de potencia eléctrica del compresor.



**FIGURA 1.3. TÚNEL DE CONGELACIÓN ESTÁTICO.**

**Fuente:** Túnel Estático de la empresa auspiciante.

En la Figura 1.3., se observa el Túnel Estático de la planta, en este se pueden identificar los coches con las bandejas de banano con paleta durante la congelación, también se aprecian gavetas que se utilizan para la congelación de otros productos dentro de la cámara.

Por la configuración del túnel, este tipo de proceso se realiza en dos etapas. La primera etapa consiste en voltear los moldes en bandejas de 72 unidades, donde se utilizan fundas azules para evitar el contacto directo del producto con el metal. El color azul es utilizado por control de calidad del producto ya que puede ser identificado mediante inspección visual en caso de encontrarse material extraño en el banano. Las bandejas se arreglan en coches con capacidad



para 29 bandejas, considerando que el peso de cada banano con paleta es de 56 gr, se tiene que la capacidad en cada coche es de 117 kg. Una vez preparados los coches con producto, son transportados al Túnel para su congelación.

La segunda etapa consiste en la descarga del banano congelado de los coches hasta ser empacados. Esta doble etapa aumenta el tiempo total del proceso, incrementando los costos de la mano de obra involucrada.

Bajo este proceso, tener listo un contenedor refrigerado lleno de producto, toma 5 días laborables de 22 horas diarias de proceso, lo que genera gastos adicionales por recargo del 50% en el costo de la mano de obra durante el turno nocturno. Este túnel tiene una capacidad mensual de 4 contenedores.

Posteriormente, con el incremento de la demanda a 7 contenedores mensuales y en temporada alta entre 10 a 12 contenedores, se buscó incrementar la productividad de esta etapa mediante el uso de un Túnel IQF de la planta, que originalmente fue diseñado para la congelación de banano entero.

Se decidió utilizar este túnel, teniendo como referencia la capacidad de producción estándar de 650 kg/h de banano entero, según el historial de la empresa; tomando en cuenta que el banano entero, como materia prima, posee las mismas características físicas y químicas que el banano con paleta.



**FIGURA 1.4. TÚNELES IQF DE LECHO FLUIDIZADO.**

**Fuente:** Tomada del Área de Proceso IQF. Túneles Octofrost de la empresa auspiciante.

El túnel IQF de lecho fluidizado continuo, mostrado en la figura 1.4 es un sistema para congelación individual del producto. A diferencia del Túnel de Congelación Estático, en este, existe un flujo constante de producto.

Para lograr la rápida congelación de los productos, estos se construyen con grandes evaporadores especialmente diseñados para

maximizar la transferencia de calor y ventiladores axiales de alto rendimiento que garanticen las altas caídas de presión y velocidad del aire.

El Túnel tiene una altura de 3.5 m. un ancho de 3 m y una longitud total de 5 metros. El transporte del producto se realiza sobre dos placas perforadas de polietileno, que tienen un movimiento alternativo para producir el desplazamiento del producto. Primero, el banano es depositado en la primera placa, con dimensiones de 0.90 m x 2.10 m y perforaciones de diámetro 10 mm, donde se congela superficial para evitar que el producto se pegue entre sí durante la congelación; después que cae en la segunda placa de igual ancho pero con longitud total de 3.20 m, se termina de congelar el producto hasta el centro.

La capacidad de refrigeración instalada en este equipo es de 186 kW con una potencia eléctrica de 262 kW, manejando refrigerante amoniaco con temperatura de evaporación de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La velocidad del aire se encuentra alrededor de los 3 – 5 m/s, y la temperatura promedio del aire está entre  $-26^{\circ}\text{C}$  y  $-29^{\circ}\text{C}$ . Bajo estas

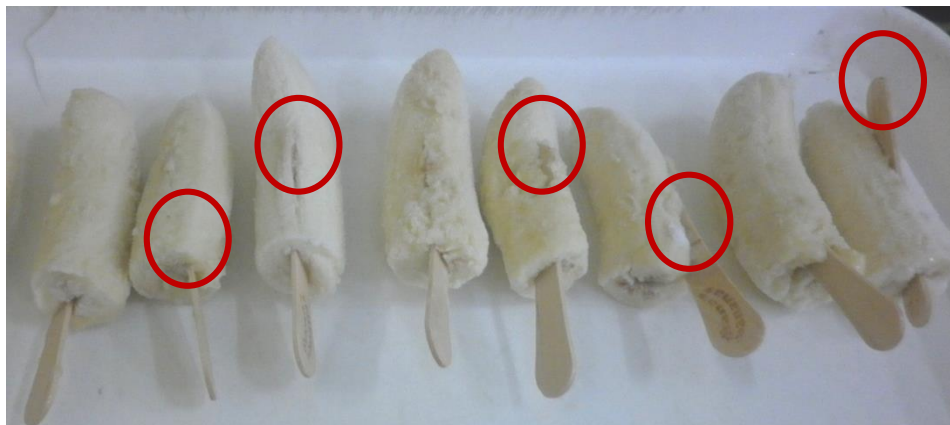
condiciones, los tiempos aproximados de congelación del producto son de 20 a 35 min, evitando la oxidación del banano.

La capacidad de producción depende de las temperaturas iniciales de ingreso de fruta al túnel, calidad y dimensiones del producto, así como de la temperatura final deseada. También se considera la forma de alimentación al túnel, por la consistencia del banano antes de ingresar y el arreglo del producto dentro de estos túneles, el cual se realiza mediante la formación de capas de banano sobre las placas de congelación.

Para este túnel, se modificó el ingreso y se construyó una banda transportadora, donde los moldes de banano con paleta son volteados antes de ingresar al equipo. Esto para evitar que el producto se golpee al ingresar a las placas del túnel.

Después de las pruebas realizadas en el equipo por el personal de la empresa, la capacidad de producción estándar quedó determinada en 273 kg/h con 26 personas, con una generación de desperdicios del 7.35% del producto congelado final. Este desperdicio se forma porque el banano se golpea dentro del túnel por el tipo de transporte utilizado. Los defectos más comunes de las paletas ya congeladas

que se muestran en la Figura 1.5., son las paletas fuera de posición y los bananos partidos.



**FIGURA 1.5. DEFECTOS EN EL BANANO CON PALETA IQF**

**Fuente:** Muestras tomadas por el Dpto. Desarrollo de la empresa.

Adicionalmente, cabe mencionar que durante las pruebas, al querer aumentar la velocidad de producción a 300 kg/h, el desperdicio aumentó al 26,7%, lo que representa una caída de los rendimientos del producto por lo que se mantiene su capacidad de producción estándar de 273 kg/h.

Con el uso del Túnel IQF, se logró mejorar la apariencia del producto terminado, evitando la oxidación del producto al disminuir el tiempo de congelación, como se observa en la Figura 1.6.



**FIGURA 1.6. COMPARACIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO DE LOS TÚNELES DE CONGELACIÓN.**

**Fuente:** Muestras tomadas por el Dpto. de Calidad de los productos terminados de los Túneles IQF y estático, respectivamente.

Como el sistema IQF es continuo, se logró disminuir las horas de mano de obra en un 33%; esto quiere decir, que un contenedor refrigerado lleno de producto, toma 5 días laborables, pero sólo de 15 horas diarias de proceso. Este túnel da una capacidad mensual de 6 contenedores, cuando se trabaja en las mismas condiciones que el túnel estático.

Para realizar la comparación entre ambos equipos, se ha recogido la información de ambos túneles, mostrados en la tabla 1.

**TABLA 1**  
**PARÁMETROS Y CAPACIDADES DEL TÚNEL ESTÁTICO vs**  
**TÚNEL IQF**

		<b>Túnel Estático</b>	<b>Túnel IQF</b>	
<b>Parámetros de Producción</b>	Capacidad de Producción	306	273	Kg/h
	Mano de Obra	32	26	Personas
	Tiempo de Congelación	55 – 65	25 – 30	Min
	Porcentaje de Desperdicios	1.0	7.36	%
	Capacidades Mensuales	4	6	Contenedores
	Tiempo de Producción Diario	22	22	Horas
<b>Capacidades en Equipo Instalado</b>	Sistema de Transporte	Coche para bandejas	Lecho fluidizado / placas perforadas	
	Velocidad del Aire	2,5	5	m/s
	Temperatura del Aire	-22 / -26	-26 / -30	°C
	Capacidad de Refrigeración	69	186	Kw
	Consumo Energético	75	262	Kw
	Temperatura de Evaporación.	-33	-40	°C

**Fuente:** Tomado de los datos de operación de los túneles y hojas de proceso de la empresa. Resumen elaborado por Autor.

A pesar de estas modificaciones y alternativas utilizadas, la capacidad de producción requerida por la empresa no fue alcanzada en las temporadas altas. Incluso, como alternativa se buscó utilizar ambos túneles para la congelación del banano con paleta, simultáneamente, pero esto ha provocado extender los horarios

### **1.3. Requerimientos del Proyecto.**

La empresa auspiciante busca aumentar su capacidad de producción mediante la modificación de la etapa de congelamiento del procesamiento de banano con paleta. En este estudio, se recoge la experiencia de los procesos y equipos actuales, descritos en los antecedentes, utilizados en la planta para mejorar su productividad. Con el nuevo requerimiento, se espera suplir la demanda del producto, así como mejorar los costos involucrados durante el proceso de producción; para esto, la etapa de congelamiento debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Producto a congelar: Banano con paletas.
- Capacidad de producción del equipo de 750 kg/h.
- Las dimensiones del banano a congelar son: diámetro, 35 mm x longitud, 90 mm. (140 mm, incluida la paleta.)



- Temperatura del producto: Ingreso 20°C. Salida -18°C.
- El tiempo de congelación del producto debe ser menor a 50 minutos.
- Disminuir el porcentaje de desperdicios que se genera durante la congelación en el interior del túnel.
- La capacidad de refrigeración requerida debe ser menor a 186 kW. con temperatura de evaporación de -40°C.
- Utilizar refrigerante amoníaco – NH<sub>3</sub>.
- Las dimensiones máximas del equipo de congelación serán de 12 m. de largo x 12 m. de ancho x 6 m. de altura.
- Facilidad de limpieza del equipo y fácil acceso a sus componentes.
- Material del equipo de acero inoxidable,
- Bajo costo de inversión inicial.

Para el análisis y proceso de selección, se realizó una categorización de los requerimientos del proyecto, mostrados en la tabla 2 donde se indica los objetivos, restricciones y funciones.

**TABLA 2**  
**CATEGORIZACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS**

<b>Objetivos</b>
Congelar Banano con paleta.
Capacidad de producción de 750 kg/h.
Congelamiento de banano con temperatura de ingreso a 20°C y salida a -18°C.
Fácil de limpiar.
Bajo costo de inversión inicial.
Disminución de la formación de desperdicios o producto fuera de especificaciones.
<b>Restricciones</b>
Las dimensiones máximas del equipo de congelación serán de 12 m. de largo x 12 m. de ancho x 6 m. de altura.
Material en acero inoxidable.
Capacidad de refrigeración menor a 186 kW.
Utilizar Refrigerante Amoniaco – NH <sub>3</sub> .
<b>Funciones</b>
Congelar Banano en paletas con dimensiones: Diámetro: 35mm y Longitud: 90 mm.
Tiempo de congelación menor a 1 hora.

**Fuente:** Información proporcionada por la empresa. Elaborado por el Autor.

Esta categorización permite darle un grado de valor a cada uno de los requerimientos de la empresa auspiciante para definir con exactitud los atributos deseados en el equipo a seleccionar.

### **1.3.1. Consideraciones de los Requerimientos.**

Para el análisis y definición del problema se debe considerar las siguientes premisas:

- Las propiedades físicas del banano, tanto el diámetro como la longitud, y el proceso de maduración de la fruta, por ende el Brix inicial, influyen en la consistencia del producto, así como en la temperatura de salida del producto una vez finalizado el proceso de congelación en continuo.
- Las propiedades químicas para este proceso, ya que el banano es un producto sensible a la oxidación manifestándose un oscurecimiento rápido.

### **1.4. Definición Revisada del Problema.**

La empresa agroexportadora auspiciante busca solucionar su problema de falta de capacidad de producción, utilizando la información y experiencia adquirida en los procesos para cumplir con los requerimientos solicitados.

En la Tabla 3, se detallan los requerimientos de la empresa para facilitar el análisis de este trabajo,

**TABLA 3**  
**PARÁMETROS REQUERIDOS EN TÚNEL IQF**

<b>Datos del Producto</b>		
Producto a congelar	Banano con paletas	
Capacidad de Producción	750	kg/h
Dimensiones del Producto	Diámetro. 35	mm
	Longitud 90	mm
Peso del Producto	56	g
Distribución del Producto	<b>Por definir</b>	g/m <sup>2</sup>
Tiempo de Congelación	<b>Por definir</b>	min
Temperatura de Alimentación	20	°C
Temperatura de Salida	-18	°C
<b>Carga de Refrigeración</b>		
Capacidad de Refrigeración Requerida	<b>Por definir</b>	kW
Temperatura de Evaporación	-40	°C
Refrigerante	Amoniaco	NH <sub>3</sub>
Tasa de Recirculación	4:1	
<b>Datos del Equipo</b>		
Tipo de Equipo	IQF	
Modelo	<b>Por definir</b>	
Sistema utilizado	<b>Por definir</b>	
Área Útil mínima de Banda	<b>Por definir</b>	
Dimensiones máximas del equipo	12 x 8 x 6	(L x A x H) m
Material del Equipo	Acero inoxidable	
Sistema de Deshielo	Gas caliente	
Voltaje / Frecuencia	220 V / 60 Hz	

**FUENTE:** Datos proporcionados por la empresa y el Autor.

Para esto se han considerado las siguientes premisas:

- La información del producto considera las características físicas del banano con paleta solicitados por el cliente.
- Las temperaturas de ingreso y salida del producto, fueron tomadas del proceso actual tomando en cuenta el flujo del proceso del banano.
- La capacidad de refrigeración está condicionada a los equipos existentes en la planta. Esto quiere decir, que se utilizará uno de los sistemas IQF con sus respectivas capacidades.
- El espacio físico disponible en la planta es una de las limitaciones de este equipo.

Finalmente con estos objetivos, funciones y restricciones, se realiza el análisis para el dimensionamiento y selección de un equipo de congelación.

## **CAPITULO 2**

### **2. ANÁLISIS ENERGÉTICO PARA LA SELECCIÓN DEL EQUIPO DE CONGELACIÓN**

En este capítulo, se realiza el cálculo energético para la selección del equipo de congelación que incluye, el cálculo de la carga térmica durante el congelamiento del banano con paleta y las cargas adicionales que intervienen durante su congelación. Se realiza un modelo para estimar el tiempo de congelación del producto deseado, así como la validación de la metodología utilizada. Finalmente, esta carga energética sirve para definir la capacidad de refrigeración requerida en el túnel a seleccionar.

#### **2.1. Metodología de Diseño.**

Para la selección del equipo, se realiza el cálculo energético para determinar la carga de refrigeración necesaria para la congelación del banano con paleta, de acuerdo a la capacidad requerida.

Adicionalmente, se consideran las cargas o factores que influyen durante el proceso de congelación, como son:

- Los cambios de aire o filtraciones, presentes en las puertas de ingreso y salida de producto al equipo,
- Los equipos eléctricos dentro del área, como difusores y ventiladores utilizados.
- La iluminación interna del equipo, y
- Las pérdidas a través de los paneles con respecto al ambiente de trabajo.

Con el requerimiento de refrigeración obtenido, se analiza el sistema de refrigeración instalado en la empresa, con sus respectivas capacidades para determinar si es necesaria la modificación o instalación de nuevos equipos para suplir los requerimientos del equipo de congelación seleccionado.

Posteriormente, se determina el tiempo de congelación del producto, para esto se considera la temperatura de ingreso a 20°C (temperatura más crítica de la materia prima), para llegar a la temperatura de congelación deseada de -18°C.

Finalmente, se dimensiona y selecciona el sistema de válvulas de acuerdo a la capacidad requerida para la instalación en el túnel seleccionado, y contemplando los procesos adicionales en el equipo como es el sistema de deshielo por gas caliente.

## **2.2. Cálculo de Cargas Térmicas.**

Para la determinación de la carga térmica del equipo se consideran los siguientes puntos [1]:

- Carga Térmica del Producto: Congelación del producto desde la temperatura inicial de 20°C hasta la temperatura deseada de -18°C.
- Carga Térmica por material de empaque o envase: Se considera disminuir la temperatura de la paleta de madera que se encuentra en el banano.
- Carga Térmica por equipos eléctricos en túnel: viene determinado por el calor que generan los equipos eléctricos que se encuentran dentro del túnel como iluminación y motores.
- Carga por aislamiento: a través de las paredes del túnel con respecto al área de proceso.



- Carga por cambios de aire ó filtraciones que se dan en las aperturas donde ingresa y sale el producto.

### 2.2.1. Carga Térmica del Producto.

Para el cálculo de la carga térmica del producto se consideran las 3 etapas del proceso de congelación y las propiedades físicas del banano dado en la Tabla 4, ver Apéndice A.

**TABLA 4**  
**PROPIEDADES FÍSICAS DEL BANANO**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	980
Conductividad Térmica, k (W/m.°K)	0.481
Calor específico1, Cp1 (J/Kg.°K)	3350
Calor específico2, Cp2 (J/Kg.°K)	1775.65
Calor Latente, L (kJ/Kg)	250.68
Temperatura de Congelación, °C	0.7

**Fuente:** Tomado del ASHRAE, 1971 y U.S.D.A. Handbook 66 (Wright et al., 1954)

La primera etapa, considera la extracción de calor sensible para disminuir la temperatura del banano desde 20°C hasta la

temperatura de congelación, de 0,7°C., mostrado a través de la ecuación (2.1)

$$Q_1 = m \cdot Cp_1 \cdot \frac{(T_1 - T_c)}{t} \quad (2.1)$$

Dónde: m: masa del alimento.

Cp<sub>1</sub>: Calor específico promedio por encima de su temperatura de congelación.

T<sub>1</sub>: Temperatura inicial del alimento

T<sub>c</sub>: Temperatura de congelación del alimento

t: Tiempo de enfriamiento deseado.

$$Q_1 = 750 \frac{kg}{h} \times 3350 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot \frac{(20^\circ - 0.7^\circ)}{3600 s} \times 1h$$

$$Q_1 = 13,469.79 W$$

$$Q_1 = 13.47 kW$$

La segunda etapa, considera el calor de fusión para congelar el producto a la temperatura de 0,7°C. Calor necesario para realizar el cambio de fase que se calcula por medio de la ecuación (2.2)

$$Q_c = m \cdot L \quad (2.2)$$

Dónde: m: masa del alimento.

L: Calor latente de fusión del alimento

$$Q_c = 750 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 250,680 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_c = 52,23 \text{ kW.}$$

Y la tercera etapa, calor sensible de congelación para llegar a la temperatura deseada de  $-18^\circ\text{C}$ ., dado a través de la ecuación (2.3)

$$Q_2 = m \cdot Cp_2 \cdot \frac{(T_c - T_2)}{t} \quad (2.3)$$

Dónde: m: masa del alimento.

Cp<sub>2</sub>: Calor específico promedio por debajo de su temperatura de congelación.

T<sub>2</sub>: Temperatura final del alimento

T<sub>c</sub>: Temperatura de congelación del alimento

t: Tiempo de enfriamiento deseado.

$$Q_2 = 750 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 1775.65 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (0.7^\circ - (-18^\circ)) \times \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}}$$

$$Q_2 = 6.92 \text{ kW}.$$

Por lo tanto, la carga térmica total del producto es la sumatoria de los tres calores obtenidos, mostrado a través de la ecuación (2.4)

$$Q_{\text{producto}} = Q_1 + Q_C + Q_2 \quad (2.4)$$

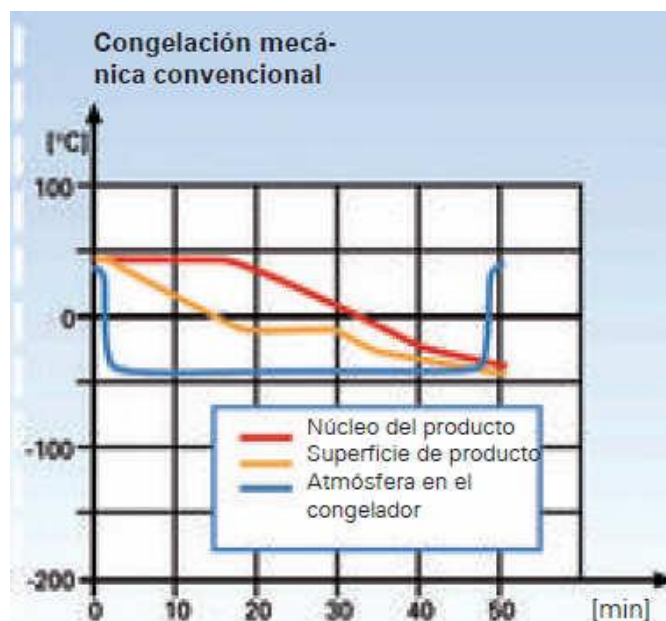
$$Q_{\text{producto}} = 13.47 + 52.23 + 6.92 \text{ kW}.$$

$$Q_{\text{producto}} = 72.62 \text{ kW}.$$

De esto se considera un factor del 90%. Por lo tanto,

$$Q_{\text{producto}} = 72.62 / 90\% = 80.69 \text{ kW}$$

Las etapas de congelación de un producto se muestran en la Figura 2.1.



**FIGURA 2.1. ETAPAS DE CONGELACIÓN DE UN PRODUCTO.**

Fuente: Elaborado por el Autor

### 2.2.2. Carga Térmica por Material de Empaque.

Se considera el calor sensible a extraer por material utilizado para el empaque o para considerar la paleta de madera incorporada en el banano desde la temperatura del proceso a 20°C hasta disminuir la temperatura a -18°C, mostrada a través de la ecuación (2.5)

$$Q_{paleta} = N \cdot m \cdot C_p \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{t} \quad (2.5)$$

Dónde: N: cantidad de paletas

m: masa de la paleta de madera.

Cp: Calor específico promedio de la madera

T<sub>1</sub>: Temperatura inicial de la madera

T<sub>2</sub>: Temperatura final de la madera

t: Tiempo de enfriamiento deseado.

$$Q_{paleta} = 13636 \times 0,005 \text{ Kg} \times 2720 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times \frac{(20 - (-18))}{1}$$

$$Q_{paleta} = 1.96 \text{ kW}.$$

### 2.2.3. Carga Térmica por Equipos Eléctricos.

Los equipos eléctricos en el área de congelación, tanto luminarias, ventiladores y motores generan calor durante su operación. Este calor se puede estimar a partir de las ecuaciones (2.6) y (2.7).

Para luces eléctricas:

$$Q_{elec} = 3.42 \times (NB \cdot TO \cdot PB) \frac{0.293 \text{ watts}}{\text{watt} \cdot \text{bombillo}} \quad (2.6)$$

Dónde: NB: Número de luces en equipo.

TO: Tiempo de operación

PB: Potencia de cada bombillo

$$Q_{elec} = 3.42 \times (4 \text{ bombillo} \times 1 \text{ h} \times 32 \text{ watt}) \frac{0,293 \text{ watts}}{\text{watt} \cdot \text{bombillo}}$$

$$Q_{elec} = 0.13 \text{ kW}.$$

Para el cálculo de carga térmica de los ventiladores, se utiliza la Tabla 5, mostrada a través de la ecuación (2.7):

$$Q_{elec} = (FM \cdot TO \cdot PM) \quad (2.7)$$

Donde: FM: Factor de equivalencia térmica, (BTU/HP.h)

Ver Apéndice B.

TO: Tiempo de operación (hr)

PM: Potencia del motor.(HP)

$$Q_{elec} = 3700 \frac{0,293 \text{ watts}}{\text{HP} \cdot \text{h}} \times 1 \text{ h} \times 3 \text{ HP} \times 4 \text{ ventiladores}$$

$$Q_{elec} = 13 \text{ kW}$$

**TABLA 5**  
**FACTORES DE EQUIVALENCIA TÉRMICA PARA MOTORES**

<b>Potencia del Motor (HP)</b>	<b>Motor y Trabajo realizados dentro del Espacio</b>
0.125 – 0.5	4250
0.5 – 0.3	3700
3 – 20	2950

**Fuente:** Tomado del ASHRAE, 1949, citado en Dossat, 1991.

#### **2.2.4. Carga por Aislamiento.**

Para este caso, se ha considerado las pérdidas de calor a través del aislamiento de las paredes del equipo con respecto a la temperatura ambiente de trabajo de 18°C.

El valor de la pérdida de calor máxima permitida para este equipo en función del área es de 8 W/m<sup>2</sup> para temperaturas bajo cero °C. [2] y tomando en cuenta las dimensiones máximas del equipo se determinó el área superficial.



Con esto, se realizó el cálculo del espesor de aislamiento necesario utilizando la ecuación (2.8):

$$e = \lambda x \left[ \frac{\Delta t}{Q/S} - \left( \frac{1}{h_i} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_o} \right) \right] \quad (2.8)$$

- Dónde:
- e: espesor de aislamiento necesario
  - $\lambda$ : Conductividad del aislamiento seleccionado.
  - $\Delta t$ : Diferencia de temperatura del exterior e interior del equipo
  - Q/S: Perdida de calor fijada para el túnel.
  - e/k: Espesores y conductividad de materiales que componen el aislamiento.
  - $h_i$ : Convección del aislamiento al interior.
  - $h_o$ : Convección del aislamiento al exterior.

El espesor del aislamiento recomendado es de 10.71 cm y la carga térmica por perdidas en aislamiento es de 1.56 kW..

### **2.2.5. Carga por Cambios de Aire o Filtraciones.**

Se considera el calor generado por ingreso o renovaciones de aire por las fisuras a través del aislamiento, puertas y orificios. Estas filtraciones dependen del número de veces que el equipo

se abre o cierra para movilizar la carga, el tiempo que está abierto, la temperatura y humedad del aire dentro y fuera del equipo.

Bajo este concepto, la carga por filtraciones es muy difícil de estimar y varía notablemente con el tipo de equipo y uso que se destine. Por motivos de simplificación, se estimó esta carga como el 5% de la carga total para la selección del equipo. Lo que equivale a 5.27 kW.

Para futuras referencias se puede utilizar la ecuación (2.9) para el calor de renovación del aire:

$$Q = Vx \frac{1}{V_e} x N^{\circ} renovaciones x (h_{ext} - h_{int}) \quad (2.9)$$

Dónde: Q: Calor por renovaciones de aire. kW/día

V: Volumen de la cámara. m<sup>3</sup>

1/V<sub>e</sub>: Densidad del aire kg/m<sup>3</sup>

h<sub>int</sub>: Entalpía del aire interior, kJ/kg.

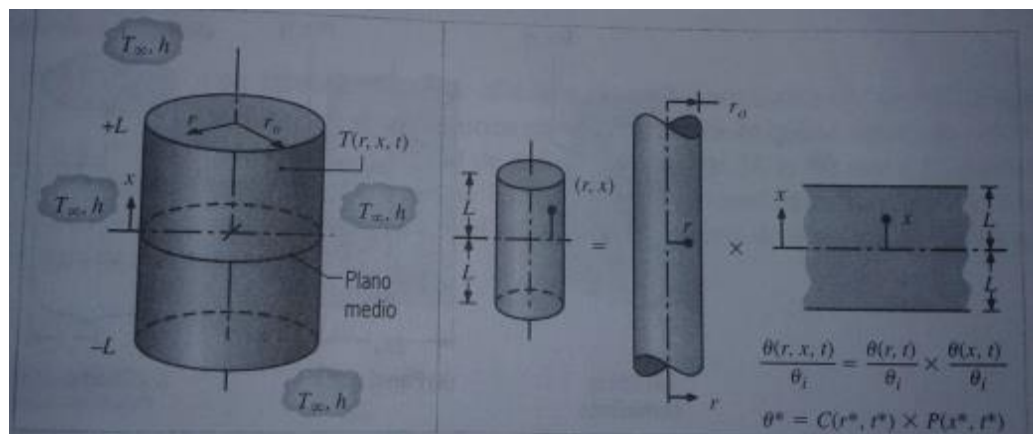
h<sub>ext</sub>: Entalpía del aire exterior, kJ/kg.

Generalmente, se asume un margen del 15%, con el cual la Carga Térmica Total es de 123 kW.

### 2.3. Determinación del Tiempo de Congelación del Banano.

Para cuestión de análisis en la determinación del tiempo de congelación del banano con paleta, se plantea el siguiente modelo basado en los datos de producción de los túneles IQF de la planta.

El método a utilizar para la estimación del tiempo de congelación del banano, es la Solución para sistemas multidimensionales considerando los Efectos Multidimensionales en Sólidos Finitos con Conducción Transitoria [3].



**FIGURA 2.2. SOLUCIÓN MULTIDIMENSIONAL PARA UN CILINDRO CORTO**

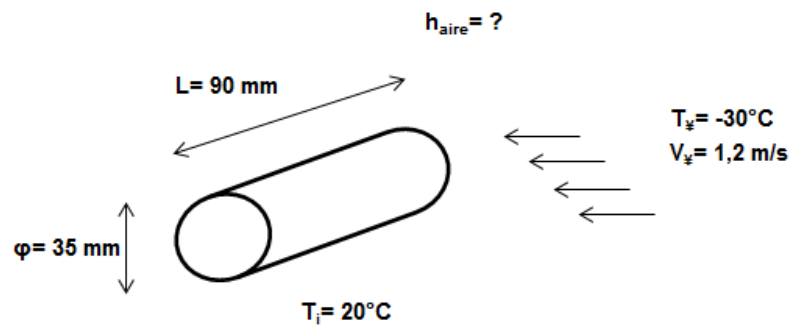
Fuente: Apéndice C.

Primero es necesario, determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección modelando el proceso de congelación como flujo

cruzado externo alrededor de un cilindro finito, con los siguientes datos del proceso.

- Temperatura inicial del banano:  $20^{\circ}\text{C}$ .
- Temperatura del aire estimada:  $-30^{\circ}\text{C}$ .
- Velocidad de aire estimada:  $1,2\text{ m/s}$ .

El esquema 1 utilizado se muestra en la Figura 2.3.



**FIGURA 2.3. MODELADO DE CONVECCIÓN POR FLUJO EXTERNO EN CILINDRO FINITO**

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

Para efecto de estimación se tomó las siguientes suposiciones:

- 1.- Condición de estado estable.
- 2.- Propiedades constantes.

Las propiedades del Aire a utilizar son evaluadas a la temperatura de película  $T_f$ , mostrada en la Tabla 6. Ver Apéndice D.

**TABLA 6**  
**PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE**

<b>Propiedades (268°K)</b>	<b>Valor</b>
Viscosidad cinemática, $\nu \cdot 10^6$ , (m <sup>2</sup> /s)	13.02
Conductividad Térmica, $k \cdot 10^3$ , (W/m.K)	23.74
Prandtl, Pr	0.715

**Fuente:** Fundamentos de Transferencia de Calor por Frank P. Incropera. Tabla A.4  
Propiedades del Aire.

Con las propiedades evaluadas en la temperatura de película  $T_f$  ( $T_f = T_s - T_{inf.}$ ), se determina el número de Reynolds,  $Re_D$ , a través de un cilindro finito, de acuerdo a la ecuación (2.10)

$$Re_D = \frac{V D}{\nu} = \frac{2 \frac{m}{s} \times 0.035 m}{13.02 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 5377.8 \quad (2.10)$$

Se evalúa el valor de  $Re_D Pr > 0.2$ , como condición para la utilización de las correlaciones de transferencia de calor por convección externa en cilindros finitos, dado por la ecuación (2.11)

$$Re_D Pr = 5377.8 \times 0.715 = 3845.13 \quad (2.11)$$

Bajo estas condiciones, se recomienda utilizar la correlación de Churchill y Bernstein, para determinar el valor de Nusselt promedio, dado a través de la ecuación (2.12), dónde las propiedades se evalúan a la temperatura de película de 268°K: Como referencia revisar el Apéndice E.

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.12)$$

Con este valor el coeficiente global de transferencia de calor por convección es

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 (5377.8)^{1/2} (0.715)^{1/3}}{\left[1 + (0.4/0.715)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{5377.8}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 (5377.8)^{1/2} (0.715)^{1/3}}{\left[1 + (0.4/0.715)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{5377.8}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 (73.33)(0.8943)}{\left[1 + (0.6787)\right]^{1/4}} \left[1 + (0.08)\right]^{4/5}$$

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{40.663}{1.1383} 1.07$$

$$\overline{Nu_D} = 38.41$$

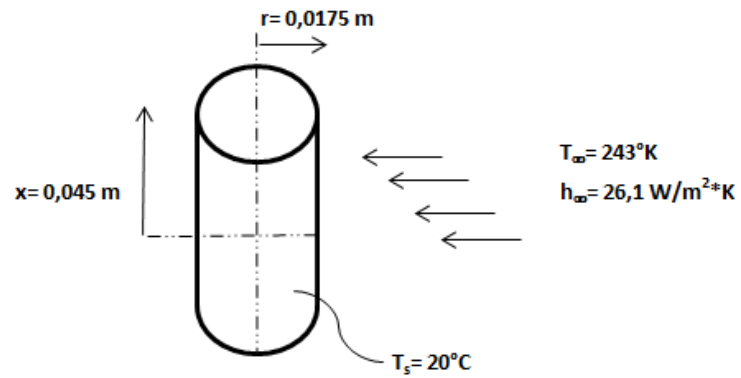
El coeficiente de calor por convección es calculado a través de la ecuación (2.13).

$$h = \overline{Nu}_D \frac{k}{D} = 38.41 \frac{23.74 \times 10^{-3}}{0.035} \quad (2.13)$$

$$h = 26.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Una vez obtenido el coeficiente de convección, se estima el tiempo de congelación del banano modelando el proceso como conducción transitoria bidimensional en un cilindro corto. Para obtener este tiempo se utiliza el método de Soluciones Bidimensionales, que considera que la longitud y el diámetro son comparables; por lo tanto, la temperatura dependerá significativamente de ambas coordenadas.

El esquema 2 utilizado se muestra en la Figura 2.4.



**FIGURA 2.4. MODELADO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIA  
BIDIMENSIONAL EN UN CILINDRO CORTO**

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

Para la estimación se toman las siguientes suposiciones:

- 1.- Conducción bidimensional en  $r$  y  $x$ .
- 2.- Propiedades constantes.

Las propiedades del banano se describen en la Tabla 7,



**TABLA 7**  
**PROPIEDADES DEL BANANO**

<b>Propiedades (300°K)</b>	<b>Valor</b>
Densidad, $\rho$ , (Kg/m <sup>3</sup> )	3350
Calor específico, $C_p$ , (J/Kg*K)	980
Conductividad Térmica, $k$ , (W/m.K)	0.491
$\alpha = k/\rho c$ , m <sup>2</sup> /s	$1.47 \times 10^{-7}$

**Fuente:** Tomado Fundamentos de Transferencia de Calor por Frank P. Incropera.  
Tabla A.3 Propiedades de Otros materiales.

El banano se puede modelar como un cilindro corto, y la temperatura en cualquier punto en el cilindro se expresa como el producto de las soluciones unidimensionales.

$$\frac{T(r, x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = P(x, t)C(r, t)$$

Esto quiere decir que la temperatura en el centro del banano es, el producto de las temperaturas de los centros de una pared plana y de un cilindro infinito, respectivamente.

Primero se realiza el cálculo de la temperatura en la Pared plana, para lo que se determina el número de Biot, dado en la ecuación (2.14)

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hL} = \frac{0.491 \text{ W/m.K}}{26.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 0.045 \text{ m}} = 0.419 \quad (2.14)$$

Después, se evalúa el número de Fourier, Fo; mostrado a través de la ecuación (2.15)

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times t}{(0.045 \text{ m})^2} = Fo(t) \quad (2.15)$$

En la Tabla 8, se indican los valores de Fourier para diferentes tiempos, de esta manera se puede observar la tendencia de la temperatura en la pared plana con respecto al tiempo.

**TABLA 8**  
**VALORES DE FOURIER EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

Tiempo	Fo(t)
t <sub>25 min</sub>	0.111
t <sub>30 min</sub>	0.133
t <sub>35 min</sub>	0.155
t <sub>40 min</sub>	0.177

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

Se utiliza la ecuación (2.16) de la solución exacta adimensional en una pared plana, para determinar la temperatura del plano medio ( $x=0$ ),

$$Q_o^* = \sum C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \quad (2.16)$$

Dónde:  $Q_o^*$ : representa la temperatura en el plano medio ( $x=0$ ),  
en el centro del banano

Con la ecuación (2.17) de los coeficientes  $C_n$  y los eigenvalores  $\xi$  del Apéndice F se pueden determinar las raíces de la conducción transitoria en pared plana.

$$C_n = \frac{4\text{Sen}\xi}{2\xi + \text{sen}(2\xi)}, \quad \text{con Bi}=2.387; \quad (2.17)$$

Para simplificación, sólo se utiliza la primera raíz que se determina a partir de los valores de la extrapolación, según la Tabla 9

**TABLA 9**  
**COEFICIENTES DE LA SOLUCIÓN EXACTA EN PARED**  
**PLANA**

<b>Biot</b>	<b>C<sub>n</sub></b>	<b>ξ</b>
<b>2</b>	<b>1.18</b>	<b>1.08</b>
2.3877	1.19	1.12
<b>3</b>	<b>1.21</b>	<b>1.19</b>

**Fuente:** Tomado Fundamentos de Transferencia de Calor por Frank P.

Utilizando los valores de Fourier de la Tabla 8 y la ecuación (2.18); se obtiene, en forma adimensional, la temperatura de la línea central de la pared plana en función del tiempo mostrado en la Tabla 10.

$$Q_0^* = 1.19 \exp(-1.12^2 Fo(t)) \quad (2.18)$$

**TABLA 10**  
**TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN EL CENTRO DE LA**  
**PARED PLANA**

<b>Q<sub>0</sub>* (t)</b>	<b>Valor</b>
Q <sub>0</sub> * (25 min)	1.0364
Q <sub>0</sub> * (30 min)	1.0079
Q <sub>0</sub> * (35 min)	0.9802
Q <sub>0</sub> * (40 min)	0.9532

**Fuente:** Elaborado por Autor.

De manera similar para el centro del cilindro infinito, se sigue los pasos tomados para una pared plana,

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hr} = \frac{0.491 \text{ W/m.K}}{26.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 0.0175 \text{ m}} = 1.077$$

Los valores de Fourier (Fo) a diferentes tiempos (t), se presentan en la Tabla 11

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times t}{(0.0175 \text{ m})^2} = Fo(t)$$

**TABLA 11**  
**VALORES DE FOURIER EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

<b>Tiempo</b>	<b>Fo(t)</b>
t <sub>25 min</sub>	0.733
t <sub>30 min</sub>	0.879
t <sub>35 min</sub>	1.026
t <sub>40 min</sub>	1.172

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

Se utiliza la ecuación (2.16) de la solución aproximada para cilindro infinito,

$$Q_o^* = \frac{Q_o}{Q_i} = C_1 \exp(-\xi_1^2 Fo)$$

Los coeficientes de la Solución aproximada, se obtienen al interpolar los valores de la Tabla 12.

**TABLA 12**  
**COEFICIENTES DE LA SOLUCIÓN APROXIMADA EN**  
**CILINDRO INFINITO**

<b>Biot</b>	<b>C<sub>n</sub></b>	<b>ξ</b>
<b>0.9</b>	<b>1.1902</b>	<b>1.2048</b>
0.9286	1.1950	1.2194
<b>1.0</b>	<b>1.2071</b>	<b>1.2558</b>

**Fuente:** Tomado Fundamentos de Transferencia de Calor por Frank P. Incropera.  
Capítulo 5. Elaborado por Autor.

Utilizando los valores de Fourier de la Tabla 12 y la ecuación (2.19); se obtiene en forma adimensional, la temperatura para el centro del cilindro en función del tiempo mostrado en la Tabla 13.

$$Q_0^* = 1.1950 \exp(-1.2194^2 Fo(t)) \quad (2.19)$$

**TABLA 13**  
**TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN EL CENTRO DEL**  
**CILINDRO INFINITO.**

<b>Q<sub>0</sub><sup>*</sup> (t)</b>	<b>Valor</b>
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (25 min)	1.0364
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (30 min)	1.0079
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (35 min)	0.9802
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (40 min)	0.9532

**Fuente:** Elaborado por Autor.

La temperatura del centro del banano, se obtiene de la Solución multidimensional para un Cilindro Finito como se observa en la Figura 2.2. y viene dado por la ecuación (2.20)

$$\frac{T(r, x, t)}{T_i - T_\infty} = P(x, t)C(r, t) = \frac{T(0, L, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \times \frac{T(0, L, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.20)$$

PARED PLANA                      CILINDRO INFINITO

Para los diferentes tiempos estimados, se obtiene la Tabla 14, con los valores de los productos de las temperaturas en la pared plana y cilindro infinito.

**TABLA 14**  
**PRODUCTO DE LAS TEMPERATURAS**

<b>Tiempo</b>	$\frac{T(r, x, t)}{T_i - T_\infty} = P(x, t) \cdot C(r, t)$
t <sub>25 min</sub>	0.4168
t <sub>30 min</sub>	0.3260
t <sub>35 min</sub>	0.2550
t <sub>40 min</sub>	0.1994

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

De esta información y utilizando la ecuación (2.20), se obtiene la temperatura en el centro geométrico del banano, considerando los diferentes tiempos de congelación. Los niveles de temperatura se muestran en la Tabla 15.

$$T(0, L, t) = 243 K + \frac{T(r, x, t)}{T_i - T_\infty} \cdot (295 - 243) K$$



**TABLA 15**  
**TEMPERATURA EN EL CENTRO DEL BANANO**

<b>Tiempo</b>	$T(0.0175, 0.045, t)$
t <sub>25 min</sub>	-9.16°
t <sub>30 min</sub>	-13.70°
t <sub>35 min</sub>	-17.25°
t <sub>40 min</sub>	-20.03°

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

De la Tabla 15, se estima que el tiempo necesario para llegar a la temperatura de congelación de  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro del banano está entre 35 a 45 minutos, considerando un 10 % de margen de error.

### 2.3.1. Validación del tiempo de congelación estimado.

Para la validación del método utilizado para la obtención del tiempo de congelación del túnel nuevo, se procedió a utilizar esta metodología para determinar los tiempos de congelación de los túneles, Estático e IQF de la empresa auspiciante, estos valores obtenidos serán comparados con los valores de pruebas reales realizadas en los equipos de la planta durante las corridas de producción.

En la Tabla 16, se resumen los parámetros tomados de los datos de placa de los equipos y de condiciones iniciales del producto para los cálculos y estimaciones de los tiempos.

**TABLA 16**  
**CONDICIONES Y PARÁMETROS INICIALES DE**  
**CONGELACIÓN**

<b>Condiciones iniciales</b>	<b>Túnel Estático</b>	<b>Túnel IQF</b>
$T_{\infty}$ , Aire °C	-22	-30
$T_o$ , Banano °C	20	20
$T_f$ , °K	273	269
Velocidad del aire, m/s	2,5	5
Diámetro, mm	35	35
Longitud, mm	90	90
T. inicial producto, °C	20	20
T. final producto, °C	-18	-18

**Fuente:** Tomado de la Hoja de Procesos de línea de congelados en la empresa, Datos de Placa de Equipos. Elaborado por el Autor.

En la Tabla 17, se muestran los tiempos estimados en los diferentes túneles de la planta y sus temperaturas respectivas, los cálculos se presentan en el Apéndice G.

**TABLA 17**  
**TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE CONGELACIÓN**  
**ESTIMADOS**

<b>Tiempo</b>	<b>T<sub>IQF #1</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>T. TÚNEL</b> <b>ESTÁTICO</b> <b>(°C)</b>
t <sub>25 min</sub>	-15.00°	-5.08°
t <sub>30 min</sub>	-19.30°	-9.04°
t <sub>35 min</sub>	-22.38°	-12.07°
t <sub>40 min</sub>	-	-14.39
t <sub>50 min</sub>	-	-17.53
t <sub>55 min</sub>	-	-18.58

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

A continuación se observan las Figuras 2.5 y 2.6 de las pruebas realizadas en ambos túneles de congelación con los tiempos obtenidos y las respectivas mediciones de temperaturas al centro del banano.



**FIGURA 2.5. PRUEBA DE CONGELACIÓN EN TÚNEL ESTÁTICO.**

**Fuente:** Prueba realizada en conjunto con el Dpto. Desarrollo de la planta.  
Tiempo: 60.4 minutos.



**FIGURA 2.6. PRUEBA DE CONGELACIÓN EN TÚNEL IQF.**

**Fuente:** Prueba realizada en conjunto con el Dpto. Desarrollo de la planta.  
Tiempo: 35.2 minutos.

El resumen de los valores obtenidos para realizar la comparación y validación con los cálculos realizados se presentan en la Tabla 18.

**TABLA 18**  
**RESULTADOS DE TIEMPOS Y TEMPERATURAS DEL**  
**PRODUCTO**

<b>Resultados</b>	<b>Túnel Estático</b>	<b>Túnel IQF</b>
<b>Teóricos</b>		
Temperatura al centro, C	-18,58	-22,38
Tiempo estimado, min	55	35
<b>Prácticos</b>		
Temperatura al centro, C	-17	-24
Tiempo obtenido, min	60.4	35.2

**Fuente:** Elaborado por el Autor.

De estos resultados se puede determinar que el error en el método utilizado se encuentra alrededor del 10% lo cual es aceptable.

#### **2.4. Selección de Evaporador de Amoniaco.**

Con la carga térmica determinada, se procede a la selección de un evaporador para congelación IQF del banano con paleta. Para esto es necesario considerar las siguientes características y condiciones

de operación del túnel, así como las propiedades del refrigerante a utilizar, en este caso el amoníaco:

- Refrigerante: Amoníaco,  $\text{NH}_3$
- Temperatura de evaporación,  $-40^\circ\text{C}$
- Capacidad de Refrigeración, 125 kW (considerando 10% de margen)
- Tasa de recirculación: 4:1
- TD: 10 (Temperatura de evaporación – Temperatura de aire)
- Velocidad de aire, 2.5 m/s.
- Material, acero inoxidable.
- Aleteado, aluminio.

Con esta información, se realiza la selección directa de un catálogo de proveedores de evaporadores para refrigerantes. Las características principales del equipo se encuentran en la Tabla 19.

**TABLA 19.**  
**DESCRIPCIÓN DE EVAPORADOR PARA AMONIACO.**

Marca	Güntner
Modelo	AGHN 090.2H/2A-H0L/6P.M
Capacidad	126.1 kW
Refrigerante	Amoniaco NH <sub>3</sub>
Velocidad del Aire	2.5 m/s
Temperatura de Aire	-30°C
Material	Acero inoxidable

**Fuente:** Tomado del Manual de Evaporadores Inundado

Güntner tipo AGHN

Una vez determinada la capacidad del evaporador seleccionado se procede al dimensionamiento del sistema de válvulas para amoniaco de acuerdo a sus capacidades.

### **2.5. Capacidades y Dimensionamiento de Válvulas.**

Para el dimensionamiento y selección del sistema de válvulas, se utiliza como referencia los principios de la refrigeración por compresión mecánica [4] y [5], y las capacidades de válvulas para

amoníaco [6], en los cuales se pueden mencionar los siguientes lineamientos:

- Las velocidades del fluido refrigerante, en los diferentes estados físicos, limitan los diámetros de las tuberías a utilizar.
- La capacidad del compresor viene determinada por la masa del fluido a succionar.
- Las capacidades de refrigeración y las caídas de presión a través de las válvulas a utilizar representan variaciones de temperatura adicionales que se deben considerar en las capacidades de refrigeración instaladas en los equipos.
- El tipo de sistema empleado, para el caso del túnel se utiliza un sistema recirculado y con una tasa de recirculación de 4:1. Esto nos indica la capacidad de evaporación del refrigerante en el evaporador instalado en el túnel.

Se pueden revisar los Apéndices H e I para mayor información de los modelos de válvulas seleccionadas, las cuales se presentan en la Tabla 20.



TABLA 20.

**SISTEMA DE VÁLVULAS EN EVAPORADOR DE TÚNEL NUEVO**

Sistema	Válvula	Caída de Presión (bar)	Capacidad (kW)
Líquido	Válvula Solenoide HS7, 20 mm	0,2	228
	Válvula de Expansión RWB101H, 25 mm	1,5	339
Succión	Reguladora piloteada por Gas, HCK5W, 80 mm	0,02	154
	Reguladora de presión HA4AB, 65 mm	0,15	214

**FUENTE:** Tomado del Refrigerant Valve Capacity Tables for Ammonia. Hansen Technologies Corporation.

De la Tabla 20, se puede acotar lo siguiente:

- La válvula de expansión se selecciona considerando la tasa de circulación de 4:1, y al 50% de la capacidad requerida en el equipo, es decir, si la capacidad necesaria para el túnel es de 123 kW, la capacidad de la válvula debe ser de mínimo 246 kW. esto fue tomado del Catálogo Hansen para la selección de Válvulas de Expansión.
- Para evitar los golpes de ariete al momento de activarse la solenoide adyacente y conservar las velocidades máximas permisibles en líquido enfriado, se debe considerar la distancia con

respecto a la válvula instalada. Esta válvula de “regulación” permite disminuir la presión o carga generada por el bombeo de refrigerante hacia el evaporador.

- El caso más crítico se considera en la succión del evaporador. La caída de presión a través de la válvula está relacionada con la temperatura. Para el caso de la válvula HCK, la caída de presión implica una caída de temperatura de 0.5°C y para la Reguladora HA4A, 2.5°C, Esta caída de temperatura se traduce en un aumento en el consumo energético del sistema de compresión y pérdidas en la capacidad frigorífica instalada.
- Para el caso de las válvulas de cierre se considera el uso de válvulas angulares por tener menores caídas de presión y por su bajo costo.

Cabe mencionar que en la práctica, las dimensiones de las tuberías y válvulas instaladas en los sistemas de refrigeración son idénticas.

### **2.5.1. Esquema de instalación de válvulas.**

Se adjunta el Plano 1 del esquema de instalación de las tuberías y válvulas en el evaporador del Túnel a seleccionar, con los modelos y especificaciones de las válvulas a utilizar.

### **2.6. Análisis de la capacidad de refrigeración requerida en el nuevo sistema de refrigeración.**

La planta posee un sistema de refrigeración mecánica por compresión utilizando como refrigerante el amoníaco.

El suministro de líquido utilizado para los sistemas IQF instalados en Planta es el sistema tipo recirculado. Este tipo de alimentación posee un sistema de bombeo forzado constituido por tres bombas Teikoku, que suministran una cantidad de refrigerante líquido en una tasa de 3 a 5 veces mayor que la requerida en los evaporadores. Según esto, aproximadamente entre 80 y 90% del refrigerante se encuentra en estado líquido al salir del evaporador.

El sistema de bombeo cuenta con un reservorio o Tanque de Baja presión cuya función es garantizar la presencia de refrigerante líquido

a baja temperatura en todo momento para que sea succionado con las bombas y suministrado al evaporador del sistema IQF. Una vez evaporado parcialmente, el refrigerante regresa al Tanque de líquido de baja presión donde es separado el líquido y el vapor, siendo este ultimo aspirado por el compresor de baja o BOOSTER.

El sistema IQF utiliza dos sistemas de compresión; el primero, en doble etapa y el segundo que emplea un compresor de una sola etapa. Ambos túneles se encuentran interconectados, lo que permite utilizarlos en cualquiera de los dos sistemas.

El sistema de compresión mecánica de doble etapa posee una capacidad frigorífica de 249 kW a Temperatura de evaporación de amoniaco de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Mediante dos compresores de tornillo Mycom con un consumo energético combinado de 250 HP.



**FIGURA 2.7. COMPRESOR DE TORNILLO**

**FUENTE:** Tomado del Catálogo MYCOM Screw Compresors, V Series

El sistema de simple etapa, posee un compresor de tornillo Mycom con capacidad de 232 kW a Temperatura de evaporación de amoníaco de  $-40^{\circ}\text{C}$  y un consumo energético, mayor que la doble etapa, de 350 HP.

Los requerimientos de capacidad de refrigeración del túnel a seleccionar para la congelación de 750 kg/h de banano son de 123 kW, por motivos de inversión se propone realizar una interconexión al sistema actual de túneles IQF, para alternar el funcionamiento del Túnel IQF #1, contemplando la capacidad instalada de 232 kW. Estas modificaciones y capacidades pueden ser revisadas en el Balance de Cargas del Apéndice J.

Esta decisión permitiría a la empresa auspiciante disminuir los costos de inversión hasta amortizar el capital invertido en el proyecto.

## **2.7. Selección de Sistema de Transporte del producto.**

Como se ha notado en los sistemas de transporte del producto durante su congelación utilizados en ambos túneles, el uso de coches para bandejas representa un costo adicional de mano de obra por doble procesamiento, y el uso del lecho fluidizado mediante placas un

aumento en la generación de desperdicios; razón por la cual, recogiendo esta información y para optimizar el proceso, se pretende el uso de una banda transportadora.

En este tipo de banda se puede arreglar el banano de tal forma que no exista contacto entre el producto para evitar que se peguen entre sí, ya que a diferencia del lecho fluidizado se evita la formación de capas sobrepuestas de producto; adicionalmente permite evitar los golpes del banano durante la congelación ya que relativamente no existen movimientos bruscos entre el banano con paleta y la banda transportadora, lo que ayuda en la disminución del desperdicio generado durante la congelación.

Para determinar el área óptima de trabajo necesaria para la capacidad requerida, se realizó un arreglo aleatorio sobre una banda para estimar la densidad de producto. La prueba se muestra en la Figura 2.8, donde se delimitó sobre una mesa de trabajo un área conocida y se colocó aleatoriamente el producto. De esta prueba se estimó un arreglo de 210 unidades por metro cuadrado, esto en peso representa una densidad de  $11.76 \text{ kg/m}^2$ , por lo que, para congelar los 750 kg/h de producto, es necesario tener una superficie de transporte de 63.78 metros cuadrados.



**FIGURA 2.8. ARREGLO DE PRODUCTO SOBRE BANDA.**

**Fuente:** Dpto. de Desarrollo de la empresa auspiciante, Realizada por Autor.

Para determinar el tipo de banda seleccionado, se tomó como referencia dos modelos de túneles que utilizan bandas transportadoras para el producto,

Para el primer caso, se puede utilizar una banda lineal mostrada en la Figura 2.9, las cuales poseen un ancho estándar de 36" (91.44 cm) ó personalizado de hasta 48" (121.92 cm). Considerando esto y la densidad del producto se calcula un largo mínimo de banda para el túnel, mediante la ecuación (2.21).

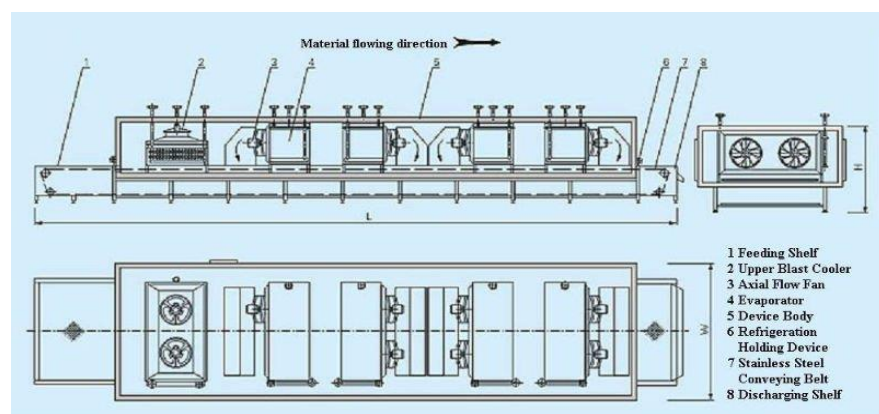
$$\rho_p A = CT \quad (2.21)$$

- Dónde:
- $\rho_P$ : Densidad de producto.
  - A: Área de contacto de la banda.
  - C: Capacidad de producción.
  - T: Tiempo de congelación del producto.

$$11.76 \frac{kg}{m^2} (x \cdot 1.2192 m) = 750 \frac{kg}{h} 40 \text{ min}$$

$$x = 34.87 m$$

De aquí se obtiene que la longitud mínima de la banda transportadora lineal debe ser de 34.87 metros. Esta longitud se encuentra fuera de las restricciones de dimensiones máximas del túnel requeridas por la empresa por lo que en este caso sería conveniente realizar un arreglo del producto mediante capas sobre la banda lineal pero esto también aumentaría la generación de desperdicios.



**FIGURA 2.9. TÚNEL IQF LINEAL**

**Fuente:** Refrin S.A.I.y C. LINEAR CONTINUOUS IQF FREEZING TUNNEL



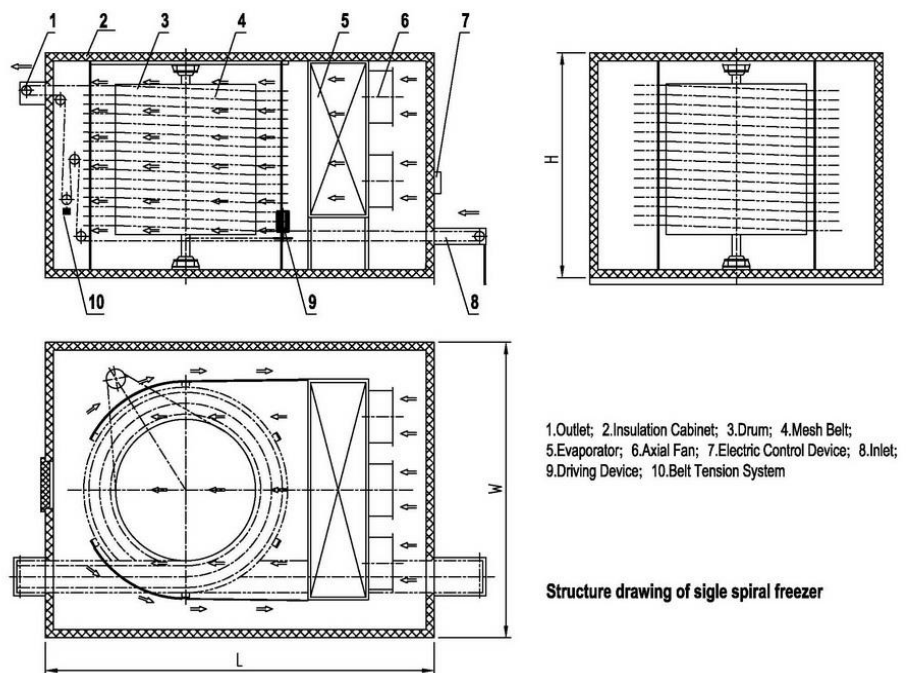
El segundo caso, es el uso de una banda transportadora en espiral, mostrada en la Figura 2.10. Este tipo de banda permite ahorrar espacio tanto en longitud como en ancho y aprovechar la altura en muchos casos donde se tienen restricciones como las presentadas por la empresa.

Para el espiral se toma de referencia dos dimensiones de túneles conocidos que permitan determinar las dimensiones máximas del espiral a seleccionar.

Primero, considerando una banda con un ancho útil de 375 mm, una altura de producto de 44.5 mm y un diámetro del tambor de 2160 mm, se obtiene una superficie útil de banda de 2.14 m<sup>2</sup> por anillo del espiral. Si se divide esta cantidad para la densidad de producto superficial, se obtiene que para transportar los 750 kg de producto dentro del túnel, será necesario utilizar un espiral de 30 vueltas.

Tomando en cuenta estas características, las dimensiones de la estructura del transportador y del evaporador se tiene que las medidas exteriores del túnel, considerando un espesor estándar de aislamiento de 100 mm, son de largo: 5430 mm, ancho: 2450 mm y alto: 3430 mm.

La segunda alternativa, considera una banda con ancho útil de 615 mm, altura de producto de 65 mm y diámetro de tambor de 3500 mm, para obtener una superficie útil de banda de 5.7 m<sup>2</sup>. Para este caso, serán necesarios 12 vueltas en el espiral, pero a diferencia de la primera opción, las medidas externas del túnel son mayores. Este posee un largo de 7500 mm, ancho de 4200 mm y una altura de 3600 mm.



### FIGURA 2.10. TÚNEL IQF EN ESPIRAL

Fuente: Frigoscandia. CONTINUOUS SELF-STACKING SPIRAL FREEZER

En la Tabla 21 se presenta la información obtenida a partir de las diferentes dimensiones de bandas transportadoras para determinar la opción que cumpla con los requisitos entregados por la empresa.

**TABLA 21**  
**DIMENSIONES EXTERNAS DE TÚNELES.**

<b>TÚNEL</b>	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Altura</b>
Lineal	34.87	2.50	3.54
Espiral, Opción 1	7.50	4.20	3.60
Espiral, Opción 2	5.43	2.45	3.43

**Fuente:** Dimensiones de túneles Ross, Frigoscandia, JBT Foodtech.

De la tabla 21 se infiere, que para mantenerse dentro de las restricciones de dimensiones exteriores máximas para el túnel de congelación, es necesario el uso de un transportador en espiral. Y de las opciones presentadas, se considera conveniente el uso de una de mayor número de vueltas en el espiral para minimizar el espacio requerido para el túnel.

## **CAPITULO 3**

### **3. SELECCIÓN DE EQUIPO DE CONGELACION**

A continuación, se realizó un análisis de los requerimientos del proyecto y sus posibles soluciones o adecuaciones en la selección del equipo de congelación IQF para mejorar la producción de la línea de congelados.

#### **3.1. Análisis de Requerimientos Obtenidos.**

Para cuestión de análisis se elabora la Tabla 22 resumiendo la información obtenida, tanto de la empresa auspiciante como de los cálculos realizados, para la selección del equipo de congelación.

Esta información también fue proporcionada y solicitada por los proveedores de equipos para congelación de frutas para realizar las ofertas de los equipo que representan o fabrican.

TABLA 22

## PARÁMETROS REQUERIDOS EN TÚNEL IQF

<b>Datos del Producto</b>		
Producto a congelar	Banano con paletas	
Capacidad de Producción	750	kg/h
Dimensiones del Producto	Diámetro. 35	mm
	Longitud 90	mm
Peso del Producto	56	g
Distribución del Producto	11,76	g/m <sup>2</sup>
Tiempo de Congelación	<b>40</b>	min
Temperatura de Alimentación	20	°C
Temperatura de Salida	-18	°C
<b>Carga de Refrigeración</b>		
Capacidad de Refrigeración Requerida	<b>125</b>	kW
Temperatura de Evaporación	-40	°C
Refrigerante	Amoniaco	NH <sub>3</sub>
Tasa de Recirculación	4:1	
<b>Datos del Equipo</b>		
Tipo de Equipo	IQF	
Modelo	Túnel en espiral	
Sistema utilizado	Banda metálica perforada	
Área Útil mínima de Banda	64	m <sup>2</sup>
Dimensiones máximas del equipo	5 x 5 x 6	(L x A x H) m
Material del Equipo	Acero Inoxidable	
Sistema de Deshielo	Hot Gas	
Voltaje / Frecuencia	220 V / 60 Hz	

**FUENTE:** Datos proporcionados por la empresa y el Autor.

Cabe mencionar que para la alimentación del producto al túnel nuevo y para evitar el daño del producto se propone realizar el siguiente arreglo sobre la placa o banda del túnel.



**FIGURA 3.1. DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO POR ÁREA.**

**FUENTE:** Tomado de prueba de Distribución realizada por el Dpto. de Desarrollo de la empresa.

Este arreglo del banano con paletas evita que la paleta se salga de su posición durante la congelación en el túnel, adicionalmente permite determinar el tipo de túnel a utilizar, y que para el caso de los túneles de lecho fluidizado, tanto de placas como de banda, como se observa en la Figura 3.2, generalmente el arreglo del producto se realiza a través de capas sobrepuestas, lo que ocasiona que el banano con paletas se golpee entre sí y la respectiva generación excesiva de desperdicios.



**FIGURA 3.2. ARREGLO POR CAPAS EN TÚNEL DE LECHO FLUIDIZADO.**

**FUENTE:** Foto tomada de la Segunda Placa del Túnel IQF de la empresa.

Considerando este arreglo la banda a utilizar, en caso de ser un túnel de tipo lineal, estaría fuera de las dimensiones máximas proporcionadas por la empresa, razón por la cual se ha decidido utilizar un túnel en espiral.

### **3.2. Selección de túnel de congelación IQF.**

Con esta información, se realizó la búsqueda y cotización de modelos de túneles IQF que cumplan con estas características, de los cuales,

para el análisis y selección, se ha tomado las siguientes dos opciones presentadas en las Tablas 23 y 24.

**TABLA 23.**

**LSJ SPIRAL QUICK-FREEZING MACHINE. (Opción #1)**

Marca	Shangyu Kanglong
Modelo	LSJ-I-750 Spiral Quick-Freezing Machine
Procedencia	China
Capacidad de Producción	750 kg/h
Refrigerante	Amoniaco, NH <sub>3</sub> , 125 kW @ 40°C
Tiempo de Congelación	20 – 60 min.
Dimensiones (LxAxH) m	10.5 x 5.3 x 4.3
Material	Acero inoxidable
Precio (F.O.B)	\$ 96500

**Fuente:** Manual del LSJ Spiral Quick-Freezing Machine. [7].

En estas Tablas se describen las principales características de Túneles IQF en espiral de diferentes proveedores.



**TABLA 24.****GYROCOMPACT P42. (Opción #2)**

Marca	Frigoscandia, JBT Foodtech
Modelo	GCP-42-06-38-07 Spiral Freezer
Procedencia	Suecia
Capacidad de Producción	750 kg/h
Refrigerante	Amoniaco, NH <sub>3</sub> , 125 kW @ -40°C
Tiempo de Congelación	40 min.
Dimensiones (LxAxH) m	5.43 x 2.41 x 3.42
Material	Acero inoxidable
Precio (F.O.B)	\$ 115500

**Fuente:** Tomado del Manual del Gyrocompact P42, Frigoscandia, JBT Foodtech.

De las dos opciones presentadas, se realiza un cuadro comparativo presentado en la Tabla 25, mediante el cual se opta por seleccionar el Túnel Frigoscandia, debido a que adicionalmente a cumplir con los requisitos de la empresa, se ha recibido buenas referencias de este equipo para la congelación de banano. Ver Apéndice K.

Se observa que los tiempos de congelación indicados por el proveedor en las especificaciones técnicas están acordes a los tiempos estimados con la metodología de este trabajo.

TABLA 25

## CUADRO DE COMPARACIÓN ENTRE TÚNELES IQF EN ESPIRAL.

Marca	Estado	País	Modelo	Config	Cap. Kg/h	Tiempo de congelac.	Req Refrig.	# de espiras	Long. Banda m	L m.	A m	H m	Precio CIF	Área efectiva m <sup>2</sup>
Frigoscandia	Usado	Suecia	ESPIRAL	N-N	750	35 - 45	125 kW	38	224	5,4	2,4	3,4	115.000	80
YANTAI MOON	Nuevo	China	ESPIRAL	N-N	900	40	160 kW	16	255	8,9	8,3	3,8	168.650	170
Tameinsa	Nuevo	España	ESPIRAL	N-S	1000	30-40	150 kW	17	121	4,1	4,1	4,4	257.415	121

**FUENTE:** Tomado de las especificaciones de Túneles IQF en Espiral de proveedores. Resumen realizado por el Autor.

### **3.3. Esquema de Distribución y montaje en Planta.**

Una vez seleccionado el túnel y con las especificaciones proporcionadas por el proveedor, se procederá a sugerir la posible distribución del túnel IQF en el sistema de refrigeración actual. Para esto, se ha considerado que se conservarán los equipos existentes de las dos líneas de congelados IQF, teniendo sistemas excluyentes entre sí.

En el Plano 2, se muestra la distribución de los equipos en el sistema de refrigeración. Este plano es solamente esquemático y para mostrar el balance final del sistema de refrigeración. La ubicación de los equipos en planta, tendido de válvulas y tuberías será definida por el Departamento de Proyectos de la empresa auspiciante.

## **CAPITULO 4**

### **4. ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN**

Para el análisis de los costos de inversión del equipo, sólo se han considerado los equipos necesarios para la instalación del Túnel IQF en espiral. Esto incluye: el Túnel y el lote de válvulas requeridos para la interconexión al sistema de refrigeración actual. Los servicios adicionales requeridos para el montaje en planta del Túnel como, soldadura, interconexiones electromecánicas, bandas transportadoras, mesas de trabajo, herramientas y accesorios, corren por cuenta de la empresa auspiciante.

#### **4.1. Costo de inversión e instalación del túnel.**

Dentro de los costos de inversión para la instalación del túnel, se consideró los siguientes aspectos:

- Túnel IQF en espiral. (Dentro de estos costos se incluye el tablero de control, por lo que sólo será necesario realizar las conexiones eléctricas al sistema eléctrico general).
- Sistema de válvulas para amoniaco para el correcto funcionamiento del túnel e interconexión con el sistema de refrigeración actual.

Estos costos se encuentran resumidos en la Tabla 26. Por políticas de confidencialidad de la empresa auspiciante sólo se presentan los resultados de las cotizaciones realizadas.

**TABLA 26**  
**COSTO DE INVERSIÓN DEL PROYECTO**

<b>Item</b>	<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Subtotal</b>
1	1	Túnel IQF en Espiral. FRIGOSCANDIA, GCP 42-06-38-07 Capacidad 750 kg/h. Dimensiones: 5x2,5x3,5 metros Material de la banda en Acero inoxidable. Requerimiento de refrigeración: NH <sub>3</sub> , 125 kW, -40°C, T 4:1.	\$ 132.250,00
2	1	Lote de Válvulas Lote de válvulas en marca HANSEN O DANFOSS, para correcto funcionamiento del túnel IQF.	\$ 7.314,00
<b>SUBTOTAL DEL PROYECTO</b>			<b>\$ 139.564,00</b>

El costo del proyecto por la instalación del Túnel IQF en espiral en la empresa auspiciante es de USD \$ 139.564,00.

# **CAPITULO 5**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **CONCLUSIONES.**

El presente estudio proporciona una solución al problema de falta de capacidad de producción de una empresa Agroexportadora, para su procesamiento de fruta congelada.

El análisis y determinación de las cargas térmicas, así como la estimación de los tiempos de congelación del producto proporcionan una guía práctica para los procesos de congelamiento de frutas utilizados ampliamente en nuestras industrias.

Las pruebas realizadas en los equipos de la empresa auspiciante permiten validar los resultados obtenidos a través de las correlaciones utilizadas.

## **RECOMENDACIONES.**

Siempre es recomendable realizar un estudio de la capacidad energética instalada en los sistemas de refrigeración cuando se realizan modificaciones. Esto nos permite minimizar los costos de producción, los cuales están relacionados directamente con las capacidades de refrigeración y las temperaturas deseadas.

Se recomienda capacitar a los operadores y técnicos del sistema de refrigeración, debido al cuidado y manejo seguro que se debe tener al manejar amoníaco como refrigerante.



## **APÉNDICES**

# APÉNDICE A

## PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS ALIMENTOS.

**Tabla 7-1.** Propiedades térmicas de algunos alimentos. De ASHRAE, 1971, y U.S.D.A. Handbook 66 (Wright *et al.*, 1954).

DATOS TERMOFÍSICOS DE ALIMENTOS  
T2: PUNTO MEDIO CONGELACIÓN Q<sub>lat</sub>: CALOR LATENTE CONGELACIÓN  
Cp: CALOR ESPECÍFICO. K: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA. 1: PRODUCTO  
DESCONGELADO. 2: PRODUCTO CONGELADO.

ALIMENTOS	T °F	Q <sub>lat</sub> Btu/ lb	Cp <sub>1</sub> Btu/ lb/°F	Cp <sub>2</sub> Btu/ lb/°F	K <sub>1</sub> Btu/ hr/ft <sup>2</sup> /°F	K <sub>2</sub> Btu/ hr/ft <sup>2</sup> /°F
ACEITE VEGETAL						
ACEITUNAS	29.40	108	0.80	0.42	0.28	1.10
ACHICORIA (ENVIDIA)			0.96			
AGUACATE	31.50	94	0.72	0.40	0.26	0.97
AGUATURMA, ALCACHOFA JERUSALEM	27.50	114	0.84	0.44	0.28	1.15
AJO SECO	30.50	89	0.69	0.40	0.25	0.92
ALBARICOQUE	30.10	112	0.87	0.46	0.29	1.22
ALCACHOFA	29.90	120	0.87	0.45	0.29	1.20
ALCACHOFA TUBEROSA						
CHINA						
ALFALFA-HARINA	---	---	---	---	---	---
ALIMENTO ENLATADO	---	---	---	---	---	---
ALIMENTOS SECOS	---	---	---	---	---	---
APIO	30.00	122	0.88	0.45	0.29	1.22
APIO ESPAÑA, CELERY	31.10	135	0.95	0.48	0.31	1.33
APIO NABO	30.30	126	0.92	0.46	0.30	1.26
ARANDANO-AMERICANO	30.40	124	0.90	0.46	0.29	1.25
ARANDANO-AZUL/MIRTILO	29.70	118	0.86	0.45	0.29	1.22
ARANDANO-ROJO	17-33	21-38	42-71	---	125-200	---
ARTOCARPA, JAGUEIRA						
AVES	---	---	---	0.42	0.41	1.61
CONGELADAS, EVICERADAS						
AVES FRESCAS	30.90	111	0.82	0.43	0.28	1.13
BANANA CAVENDISH MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.27	1.10
BANANA CAVENDISH/ ENANA/G/ENANA VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA GROS MICHEL	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LACATAN MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LACATAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LATUNDAN MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LATUNDAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA POONAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BATATA, BONIATO	30.60	129	0.92	---	0.30	1.28

## APÉNDICE B

### FACTORES DE EQUIVALENCIA TÉRMICA PARA MOTORES ELÉCTRICOS EN DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

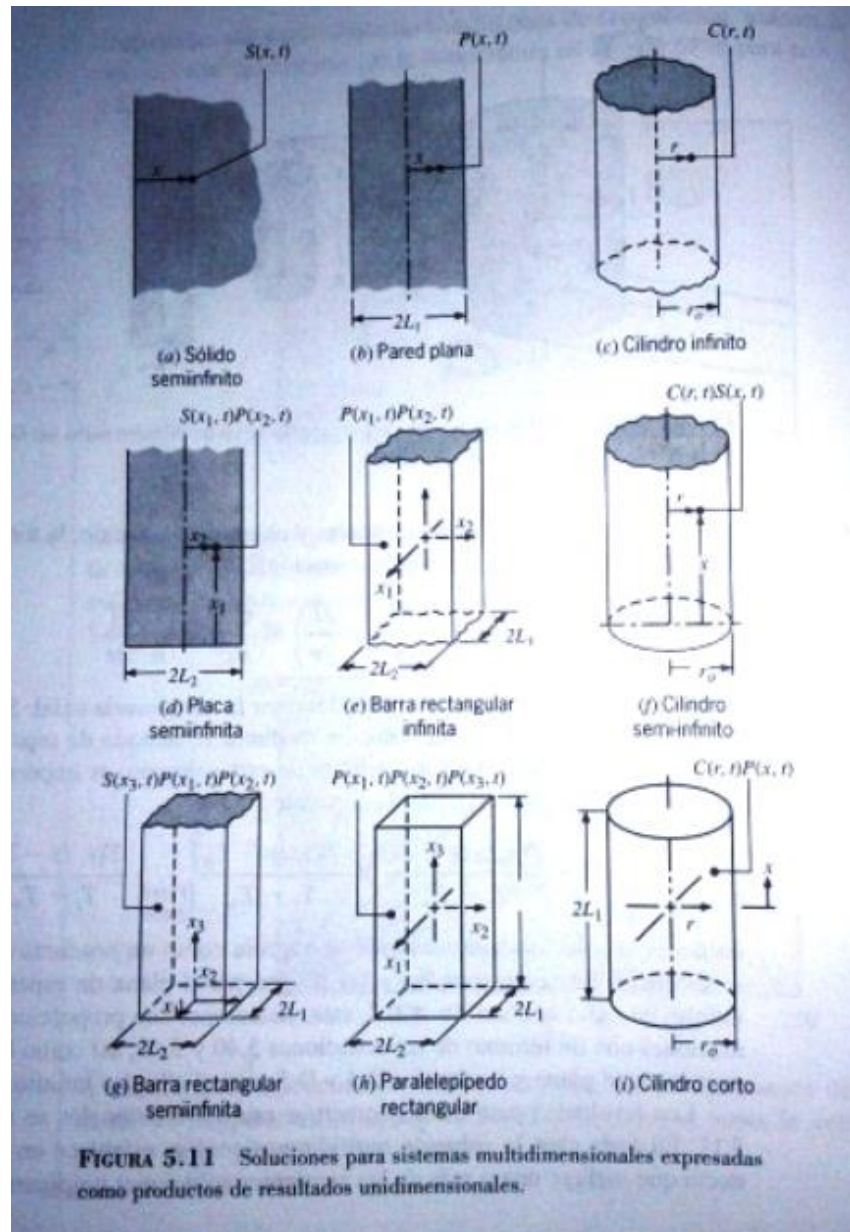
**Tabla 7-6.** Factores de equivalencia térmica para motores eléctricos en distintas condiciones de operación (De ASHRAE, 1949, citado en Dossat, 1991).

POTENCIA DEL MOTOR (HP)	MOTOR Y TRABAJO REALIZADOS DENTRO DEL ESPACIO  (1)	MOTOR FUERA Y TRABAJO REALIZADO DENTRO DEL ESPACIO REFRIGERADO  (2)	MOTOR DENTRO Y TRABAJO REALIZADO FUERA DEL ESPACIO REFRIGERADO  (3)
0.125 – 0.5	4250	2545	1700
0.5 – 3	3700	2545	1150
3 – 20	2950	2545	400

- a. Tanto el motor como el trabajo son realizados dentro del espacio refrigerado, como por ejemplo, los ventiladores (impulsores), enfriadores de circulación forzada, montacargas eléctricos.
- b. El motor disipa el calor fuera del espacio refrigerado, pero el trabajo útil se realiza dentro de éste, como por ejemplo una bomba fuera que circula salmuera o agua de enfriamiento dentro del espacio refrigerado; un motor fuera y el impulsor dentro del espacio refrigerado.
- c. El motor disipa el calor dentro del espacio refrigerado, pero el trabajo se efectúa fuera de éste.

# APÉNDICE C

## SOLUCIONES PARA SISTEMAS MULTIDIMENSIONALES EXPRESADAS COMO PRODUCTO DE RESULTADOS UNIDIMENSIONALES.



## APÉNDICE D

### PROPIEDADES TÉRMICAS DEL AIRE.

**TABLA A.4** Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica\*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

## APÉNDICE E

### CORRELACIÓN DE CHURCHILL

**TABLA 7.2** Constantes de la ecuación 7.55b para el cilindro circular en flujo cruzado [13, 14]

$Re_D$	$C$	$m$
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40,000	0.193	0.618
40,000-400,000	0.027	0.805

Se sugieren otras correlaciones para el cilindro circular en flujo cruzado [8, 16, 17]. La correlación, que se debe a Zhukauskas [16], es de la forma

$$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (7.56)$$

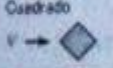
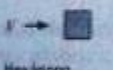


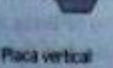
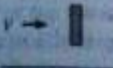
$$\left[ \begin{array}{l} 0.7 < Pr < 500 \\ 1 < Re_D < 10^6 \end{array} \right]$$

donde todas las propiedades se evalúan en  $T_s$ , excepto  $Pr_s$ , que se evalúa en  $T_f$ . En la tabla 7.4 se presentan valores de  $C$  y  $m$ . Si  $Pr \leq 10$ ,  $n = 0.37$ ; si  $Pr > 10$ ,  $n = 0.36$ . Churchill y Bernstein [17] propusieron una sola ecuación de gran extensión que cubre todo el rango de  $Re_D$  para el que se dispone de datos, así como un amplio rango de  $Pr$ . La ecuación se recomienda para toda  $Re_D Pr > 0.2$  y tiene la forma

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (7.57)$$

donde todas las propiedades se evalúan a la temperatura de película.

**TABLA 7.3** Constantes de la ecuación 7.55b para cilindros no circulares en flujo cruzado de un gas [15]

Geometría	$Re_D$	$C$	$m$
Cuadrado 	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
Hexágono 	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$	0.160	0.638
	$1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.0385	0.782
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
Placa vertical 	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731

## APÉNDICE F

### PRIMERAS CUATRO RAÍCES PARA CONDUCCIÓN TRANSITORIA EN PARED PLANA

#### B.3

*Primeras cuatro raíces de la ecuación trascendental,  
 $\xi_n \tan \xi_n = Bi$ , para conducción  
transitoria en una pared plana*

$Bi = \frac{hL}{k}$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$
0	0	3.1416	6.2832	9.4248
0.001	0.0316	3.1419	6.2833	9.4249
0.002	0.0447	3.1422	6.2835	9.4250
0.004	0.0632	3.1429	6.2838	9.4252
0.006	0.0774	3.1435	6.2841	9.4254
0.008	0.0893	3.1441	6.2845	9.4256
0.01	0.0998	3.1448	6.2848	9.4258
0.02	0.1410	3.1479	6.2864	9.4269
0.04	0.1987	3.1543	6.2895	9.4290
0.06	0.2425	3.1606	6.2927	9.4311
0.08	0.2791	3.1668	6.2959	9.4333
0.1	0.3111	3.1731	6.2991	9.4354
0.2	0.4328	3.2039	6.3148	9.4459
0.3	0.5218	3.2341	6.3305	9.4565
0.4	0.5932	3.2636	6.3461	9.4670
0.5	0.6533	3.2923	6.3616	9.4775
0.6	0.7051	3.3204	6.3770	9.4879
0.7	0.7506	3.3477	6.3923	9.4983
0.8	0.7910	3.3744	6.4074	9.5087
0.9	0.8274	3.4003	6.4224	9.5190
1.0	0.8603	3.4256	6.4373	9.5293
1.5	0.9882	3.5422	6.5097	9.5801
2.0	1.0769	3.6436	6.5783	9.6296
3.0	1.1925	3.8088	6.7040	9.7240
4.0	1.2646	3.9352	6.8140	9.8119
5.0	1.3138	4.0336	6.9096	9.8928
6.0	1.3496	4.1116	6.9924	9.9667
7.0	1.3766	4.1746	7.0640	10.0339
8.0	1.3978	4.2264	7.1263	10.0949
9.0	1.4149	4.2694	7.1806	10.1502
10.0	1.4289	4.3058	7.2281	10.2003
15.0	1.4729	4.4255	7.3959	10.3898
20.0	1.4961	4.4915	7.4954	10.5117
30.0	1.5202	4.5615	7.6057	10.6543
40.0	1.5325	4.5979	7.6647	10.7334
50.0	1.5400	4.6202	7.7012	10.7832
60.0	1.5451	4.6353	7.7259	10.8172
80.0	1.5514	4.6543	7.7573	10.8606
100.0	1.5552	4.6658	7.7764	10.8871
$\infty$	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956

## APÉNDICE G

### ESTIMACIÓN DE TIEMPOS PARA TÚNEL IQF Y ESTÁTICO

Evaluación del Número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{V D}{\nu} = \frac{2 \text{ m/s} \times 0.035 \text{ m}}{13.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 5377.8 \quad (2.10)$$

	Velocidad del Aire [m/s]	Diámetro	Número de Reynolds [Re]
<b>IQF #1</b>	5	0,035	13352,5
<b>TUNEL #3</b>	2,5	0,035	6498,1

Determinación del Número de Nusset:

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.12)$$

	T	v	K	Pr	Nu <sub>D</sub>
<b>IQF #1</b>	269	13,11	23,82	0,7151	63,1786735
<b>TUNEL #3</b>	273	13,47	24,14	0,7140	42,4867421



Coefficiente de convección por flujo externo:

$$h = \overline{Nu}_D \frac{k}{D} = 38.41 \frac{23.74 \times 10^{-3}}{0.035} \quad (2.13)$$

	<b><i>h</i></b>
<b>IQF #1</b>	43,0
<b>TUNEL #3</b>	29,3

Determinación de Biot y Fourier:

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hL} \quad (2.14)$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (2.15)$$

<b>PARED PLANA</b>	<b>T</b>	<b>h</b>	<b>Bi-1</b>	<b>Fo<sub>25</sub></b>	<b>Fo<sub>30</sub></b>	<b>Fo<sub>35</sub></b>	<b>Fo<sub>40</sub></b>	<b>Fo<sub>50</sub></b>	<b>Fo<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	269	43,0	0,254	0,111	0,133	0,155	0,177	-	-
<b>TUNEL #3</b>	273	29,3	0,372	0,111	0,133	0,155	0,177	0,222	0,244

<b>CILINDRO INFINITO</b>	<b>T</b>	<b>h</b>	<b>Bi-1</b>	<b>Fo<sub>25</sub></b>	<b>Fo<sub>30</sub></b>	<b>Fo<sub>35</sub></b>	<b>Fo<sub>40</sub></b>	<b>Fo<sub>50</sub></b>	<b>Fo<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	269	43,0	0,653	0,733	0,879	1,026	1,172	-	-
<b>TUNEL #3</b>	271	29,3	0,957	0,733	0,879	1,026	1,172	1,465	1,612

Solución exacta adimensional en Pared Plana y Cilindro Infinito.

$$Q_o^* = \sum C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \quad (2.16)$$

<b>PARED PLANA</b>	<b>Q<sub>25</sub></b>	<b>Q<sub>30</sub></b>	<b>Q<sub>35</sub></b>	<b>Q<sub>40</sub></b>	<b>Q<sub>50</sub></b>	<b>Q<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	1,0295	0,9939	0,9595	0,9264	-	-
<b>TUNEL #3</b>	1,0353	1,0051	0,9758	0,9473	0,8928	0,8667

<b>CILINDRO INFINITO</b>	<b>Q<sub>25</sub></b>	<b>Q<sub>30</sub></b>	<b>Q<sub>35</sub></b>	<b>Q<sub>40</sub></b>	<b>Q<sub>50</sub></b>	<b>Q<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	0,2803	0,2070	0,1528	0,1128	-	-
<b>TUNEL #3</b>	0,3714	0,2931	0,2313	0,1826	0,1137	0,0898

Solución multidimensional para un Cilindro Finito:

$$\frac{T(r,x,t)}{T_i - T_\infty} = P(x,t)C(r,t) = \frac{T(0,L,t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \times \frac{T(0,L,t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.20)$$

PARED PLANA                      CILINDRO INFINITO

		<b>T<sub>25</sub></b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>35</sub></b>	<b>T<sub>40</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>	<b>T<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	269°K	0,2886	0,2057	0,1466	0,1045	-	-
<b>TUNEL #3</b>	273°K	0,3845	0,2946	0,2257	0,1730	0,1015	0,0778

Temperatura en el centro geométrico del banano:

$$T(0, L, t) = 243 K + \frac{T(r, x, t)}{T_i - T_\infty} \cdot (295 - 243) K$$

<b>EQUIPO</b>	<b>T. inicial</b>	<b>T<sub>25</sub></b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>35</sub></b>	<b>T<sub>40</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>	<b>T<sub>55</sub></b>
<b>IQF #1</b>	243°K	-15,57	-19,72	-	-	-	-
<b>TUNEL #3</b>	251°K	-5,85	-9,63	-12,52	-14,74	-17,74	-18,73

# APÉNDICE H

## TABLA DE CAPACIDADES DE VÁLVULAS DE REFRIGERACIÓN PARA AMONIACO.

**Solenoid Valves**  
4 mm to 150 mm Port Size  
Type HS6, HS8, HS7, HS4A, HS4W

**Pumped Liquid Line Valve Capacities (kW Ammonia, 4:1 Recirculation)**

Pressure Drop Across Valve (bar)	HS6	HS8	HS7				HS4A						HS4W		
	Port Size														
	4	13	20	25	32	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
0.2	11	81	228	293	465	179	325	455	975	1,333	2,178	2,926	4,682	6,795	11,807
0.3	14	100	279	358	557	219	396	557	1,195	1,633	2,668	3,584	5,734	8,322	14,215
0.4	16	115	322	414	644	253	460	644	1,379	1,885	3,081	4,138	6,621	9,610	16,415
0.5	18	129	360	463	720	283	514	720	1,542	2,108	3,444	4,627	7,402	10,744	18,352
Kv	0.35	2.5	7	9	14	5.5	10	14	30	41	67	90	144	209	357

**Notes:** Ammonia capacities are based on -10°C liquid temperature and -10°C evaporator temperature. For evaporator temperatures between -40°C and +10°C capacities are within 5%. Based on 4:1 recirculation. For other recirculation rates, divide 4 by the new recirculation rate and multiply values in table to arrive at new capacity.

Ammonia

**Gas-Powered Suction Stop Valves**  
32 mm to 150 mm Port Size  
Type HS9B, HCK2, HCK5

**Suction Line Valve Capacities (kW Ammonia)**

Evap. Temp. °C	Pressure Drop Across Valve (bar)	Port Size (mm)							
		32	40	50	65	80	100	125	150
-35	0.02	27	64	76	122	174	379	482	619
	0.04	38	90	106	171	243	531	675	866
	0.07	50	117	138	223	317	692	880	1,129
	0.15	70	164	193	312	443	969	1,232	1,580
-40	0.02	24	57	67	109	154	337	429	550
	0.04	34	80	94	152	216	471	599	768
	0.07	44	104	122	197	280	611	777	997
	0.15	60	142	167	269	383	836	1,063	1,364
-45	0.02	21	51	59	96	136	298	379	486
	0.04	30	70	83	133	190	414	527	676
	0.07	38	90	106	172	244	534	679	871
	0.15	53	124	146	236	335	732	931	1,195
-50	0.02	19	44	52	84	119	261	332	426
	0.04	26	61	72	116	165	361	459	589
	0.07	33	78	92	148	211	461	586	751
	0.15	44	103	121	195	277	606	770	989
-55	0.02	16	38	45	73	104	226	288	369
	0.04	22	53	62	100	142	310	394	506
	0.07	28	66	78	126	179	391	497	637
	0.15	36	84	99	159	227	495	630	808
-60	0.02	14	33	39	63	89	194	247	317
	0.04	19	45	52	85	120	263	334	429
	0.07	23	55	65	104	148	324	412	529
	0.15	27	65	76	123	175	382	485	623
Kv		17	41	48	77	109	239	303	389

Ammonia

Metric

# APÉNDICE I

## SYSTEM PRACTICE FOR AMMONIA REFRIGERANT, ASHRAE REFRIGERATION HANDBOOK

**Table 1 Suction Line Capacities in Kilowatts for Ammonia with Pressure Drops of 0.005 and 0.01 K/m Equivalent**

Steel Nominal Line Size, mm	Saturated Suction Temperature, °C					
	-50		-40		-30	
	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 12.1$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 24.2$ Pa/m	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 19.2$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 38.4$ Pa/m	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 29.1$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 58.2$ Pa/m
10	0.19	0.29	0.35	0.51	0.58	0.85
15	0.37	0.55	0.65	0.97	1.09	1.60
20	0.80	1.18	1.41	2.08	2.34	3.41
25	1.55	2.28	2.72	3.97	4.48	6.51
32	3.27	4.80	5.71	8.32	9.36	13.58
40	4.97	7.27	8.64	12.57	14.15	20.49
50	9.74	14.22	16.89	24.50	27.57	39.82
65	15.67	22.83	27.13	39.27	44.17	63.77
80	28.08	40.81	48.36	69.99	78.68	113.30
100	57.95	84.10	99.50	143.84	161.77	232.26
125	105.71	153.05	181.16	261.22	293.12	420.83
150	172.28	248.91	294.74	424.51	476.47	683.18
200	356.67	514.55	609.20	874.62	961.85	1402.03
250	649.99	937.58	1107.64	1589.51	1782.31	2545.46
300	1045.27	1504.96	1777.96	2550.49	2859.98	4081.54

Steel Nominal Line Size, mm	Saturated Suction Temperature, °C					
	-20		-5		+5	
	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 42.2$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 84.4$ Pa/m	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 69.2$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 138.3$ Pa/m	$\Delta t = 0.005$ K/m $\Delta p = 92.6$ Pa/m	$\Delta t = 0.01$ K/m $\Delta p = 185.3$ Pa/m
10	0.91	1.33	1.66	2.41	2.37	3.42
15	1.72	2.50	3.11	4.50	4.42	6.37
20	3.66	5.31	6.61	9.53	9.38	13.46
25	6.98	10.10	12.58	18.09	17.79	25.48
32	14.58	21.04	26.17	37.56	36.94	52.86
40	21.99	31.73	39.40	56.39	55.53	79.38
50	42.72	61.51	76.29	109.28	107.61	153.66
65	68.42	98.23	122.06	174.30	171.62	245.00
80	121.52	174.28	216.15	308.91	304.12	433.79
100	249.45	356.87	442.76	631.24	621.94	885.81
125	452.08	646.25	800.19	1139.74	1124.47	1598.31
150	733.59	1046.77	1296.07	1846.63	1819.59	2590.21
200	1506.11	2149.60	2662.02	3784.58	3735.65	5303.12
250	2731.90	3895.57	4818.22	6851.91	6759.98	9589.56
300	4378.87	6237.23	7714.93	10973.55	10810.65	15360.20

Note: Capacities are in kilowatts of refrigeration resulting in a line friction loss per unit equivalent pipe length ( $\Delta p$  in Pa/m), with corresponding change in saturation temperature per unit length ( $\Delta t$  in K/m).

### Pipe Joints

Joints between lengths of pipe or between pipe and fittings can be threaded if the pipe size is 32 mm or smaller. Pipe 40 mm or larger should be welded. An all-welded piping system is superior.

**Threaded Joints.** Many sealants and compounds are available for sealing threaded joints. The manufacturer's instructions cover compatibility and application method. Do not use excessive amounts or apply on female threads because any excess can contaminate the system.

**Welded Joints.** Pipe should be cut and beveled before welding. Use pipe alignment guides to align the pipe and provide a proper gap between pipe ends so that a full penetration weld is obtained. The weld should be made by a qualified welder, using proper procedures such as the Welding Procedure Specifications, prepared by the National Certified Pipe Welding Bureau (NCPWB).

**Gasketed Joints.** A compatible fiber gasket should be used with flanges. Before tightening flange bolts to valves, controls, or flange unions, properly align the pipe and bolt holes. When flanges are used to straighten pipe, they put stress on adjacent valves, compressors, and controls, causing the operating mechanism to bind. To prevent leaks, flange bolts are drawn up evenly when connecting the

flanges. Flanges at compressors and other system components must not move or indicate stress when all bolts are loosened.

**Union Joints.** Steel (21 MPa) ground joint unions are used for gage and pressure control lines with screwed valves and for joints up to 20 mm. When tightening this type of joint, the two pipes must be axially aligned. To be effective, the two parts of the union must match perfectly. Ground joint unions should be avoided if at all possible.

### Pipe Location

Piping should be at least 2.3 m above the floor. Locate pipes carefully in relation to other piping and structural members, especially when the lines are to be insulated. The distance between insulated lines should be at least three times the thickness of the insulation for screwed fittings, and four times for flange fittings. The space between the pipe and adjacent surfaces should be three-fourths of these amounts.

Hangers located close to the vertical risers to and from compressors keep the piping weight off the compressor. Pipe hangers should be placed no more than 2.5 to 3 m apart and within 0.6 m of a change in direction of the piping. Hangers should be designed to bear on the outside of insulated lines. Sheet metal sleeves on the lower half of the insulation are usually sufficient. Where piping penetrates a wall,

**Table 2 Suction, Discharge Line, and Liquid Capacities in Kilowatts for Ammonia (Single- or High-Stage Applications)**

Steel Nominal Line Size, mm	Suction Lines ( $\Delta T = 0.02$ K/m)					Discharge Lines $\Delta T = 0.02$ K/m, $\Delta P = 684.0$ Pa/m			Steel Nominal Line Size, mm	Liquid Lines	
	Saturated Suction Temperature, °C					Saturated Suction Temp., °C				Velocity = 0.5 m/s	$\Delta P = 450.0$
	-40 $\Delta P = 76.9$	-30 $\Delta P = 116.3$	-20 $\Delta P = 168.8$	-5 $\Delta P = 276.6$	+5 $\Delta P = 370.5$	-40	-20	+5			
10	0.8	1.2	1.9	3.5	4.9	8.0	8.3	8.5	10	3.9	63.8
15	1.4	2.3	3.6	6.5	9.1	14.9	15.3	15.7	15	63.2	118.4
20	3.0	4.9	7.7	13.7	19.3	31.4	32.3	33.2	20	110.9	250.2
25	5.8	9.4	14.6	25.9	36.4	59.4	61.0	62.6	25	179.4	473.4
32	12.1	19.6	30.2	53.7	75.4	122.7	126.0	129.4	32	311.0	978.0
40	18.2	29.5	45.5	80.6	113.3	184.4	189.4	194.5	40	423.4	1469.4
50	35.4	57.2	88.1	155.7	218.6	355.2	364.9	374.7	50	697.8	2840.5
65	56.7	91.6	140.6	248.6	348.9	565.9	581.4	597.0	65	994.8	4524.8
80	101.0	162.4	249.0	439.8	616.9	1001.9	1029.3	1056.9	80	1536.3	8008.8
100	206.9	332.6	509.2	897.8	1258.6	2042.2	2098.2	2154.3	—	—	—
125	375.2	601.8	902.6	1622.0	2271.4	3682.1	3783.0	3884.2	—	—	—
150	608.7	975.6	1491.4	2625.4	3672.5	5954.2	6117.4	6281.0	—	—	—
200	1252.3	2003.3	3056.0	5382.5	7530.4	12195.3	12529.7	12864.8	—	—	—
250	2271.0	3625.9	5539.9	9733.7	13619.6	22028.2	22632.2	23237.5	—	—	—
300	3640.5	5813.5	8873.4	15568.9	21787.1	35239.7	36206.0	37174.3	—	—	—

Notes:  
 1. Table capacities are in kilowatts of refrigeration.  
 $\Delta P$  = pressure drop due to line friction, Pa/m  
 $\Delta T$  = corresponding change in saturation temperature, K/m  
 2. Line capacity for other saturation temperatures  $\Delta T$  and equivalent lengths  $L_e$

$$\text{Line capacity} = \text{Table capacity} \left( \frac{\text{Table } L_e}{\text{Actual } L_e} \times \frac{\text{Actual } \Delta T}{\text{Table } \Delta T} \right)^{0.85}$$

3. Saturation temperature  $\Delta T$  for other capacities and equivalent lengths  $L_e$

$$\Delta T = \text{Table } \Delta T \left( \frac{\text{Actual } L_e}{\text{Table } L_e} \right)^{1.18} \left( \frac{\text{Actual capacity}}{\text{Table capacity}} \right)^{1.18}$$

4. Values in the table are based on 30°C condensing temperature. Multiply table capacities by the following factors for other condensing temperatures:

Condensing Temperature, °C	Suction Lines	Discharge Lines
20	1.04	0.86
30	1.00	1.00
40	0.96	1.24
50	0.91	1.43

5. Liquid line capacities are based on -5°C suction.

**Table 3 Liquid Ammonia Line Capacities in Kilowatts**

Nominal Size, mm	Pumped Liquid Overfeed Ratio			High-Pressure Liquid at 21 kPa*	Hot-Gas Defrost*	Equalizer High Side <sup>b</sup>	Thermosiphon Lubricant Cooling Lines Gravity Flow <sup>c</sup>		
	3:1	4:1	5:1				Supply	Return	Vent
40	513	387	308	1544	106	791	59	35	60
50	1175	879	703	3573	176	1055	138	88	106
65	1875	1407	1125	5683	324	1759	249	155	187
80	2700	2026	1620	10150	570	3517	385	255	323
100	4800	3600	2880	—	1154	7034	663	413	586
125	—	—	—	—	2089	—	1041	649	1062
150	—	—	—	—	3411	—	1504	938	1869
200	—	—	—	—	—	—	2600	1622	3400

Source: Wile (1977).  
 \*Hot-gas line sizes are based on 0.34 kPa pressure drop per equivalent metre of pipe at 690 kPa (gpg) discharge pressure and 3 times the evaporator refrigeration capacity.

<sup>b</sup>Line sizes are based on experience using total system evaporator kilowatts.  
<sup>c</sup>From Frick Co. (1995). Values for line sizes above 100 mm are extrapolated.

a sleeve should be installed; and where the pipe penetrating the wall is insulated, it must be adequately sealed.

Piping to and from compressors and to other components must provide for expansion and contraction. Sufficient flange or union joints should be located in the piping that components can be assembled easily during initial installation and also disassembled for servicing.

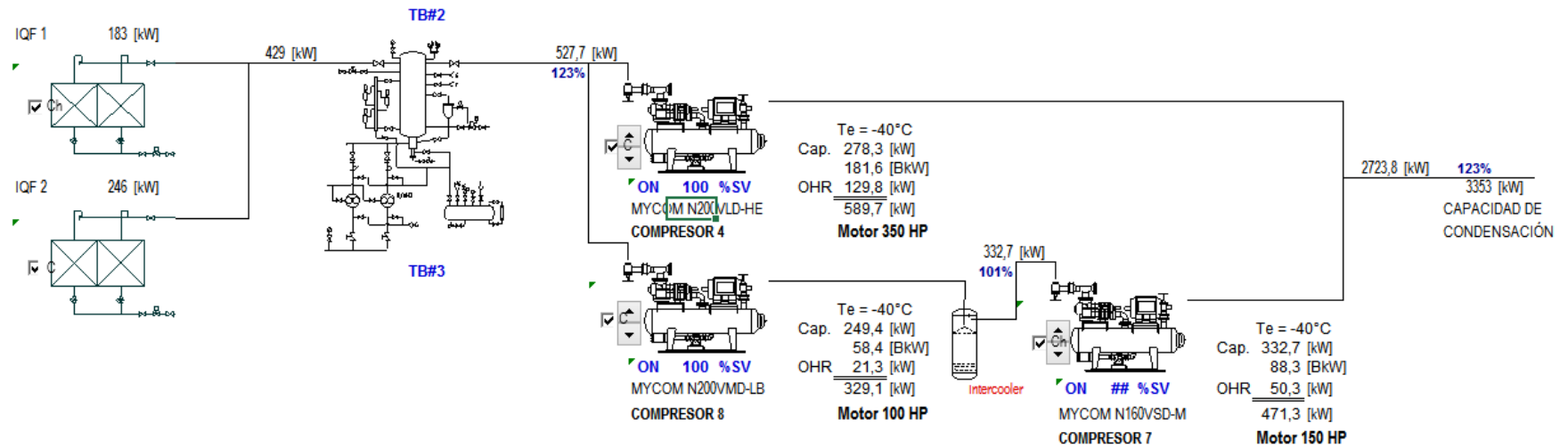
**Pipe Sizing**

Table 1 presents practical suction line sizing data based on 0.005 K and 0.01 K differential pressure drop equivalent per metre

total equivalent length of pipe. For data on equivalent lengths of valves and fittings, refer to Tables 10, 11, and 12 in Chapter 2. Table 2 lists data for sizing suction and discharge lines at 0.02 K differential pressure drop equivalent per metre equivalent length of pipe, and for sizing liquid lines at 0.5 m/s. Charts prepared by Wile (1977) present pressure drops in saturation temperature equivalents. For a complete discussion of the basis of these line sizing charts, see Timm (1991). Table 3 presents line sizing information for pumped liquid lines, high-pressure liquid lines, hot-gas defrost lines, equalizing lines, and thermosiphon lubricant cooling ammonia lines.

# APÉNDICE J

## BALANCE DE CARGAS DE LA EMPRESA AUSPICIANTE



# APÉNDICE K

## ESPECIFICACIONES DE TÚNELES EN ESPIRAL

### FRIGOSCANDIA



#### 1. SPECIFICATION OF EQUIPMENT

This Proposal is for the supply, installation and commissioning of:

- One (1) Frigoscandia GYRoCOMPACT® Classic Spiral Freezer
  - Model GCP-42-06-38-07

##### 1.1. INCLUSIONS

PVF White insulated enclosure outside and inside.  
34 tiers.  
SS/Al evaporator (R717, Ammonia) with 1,092.8 m<sup>2</sup> of cooling surface.  
Stainless steel spiral belt FRIGoBELT® (no drum and cage required).  
Mesh belt M9 x 1.7.  
North-South (NS) lay out orientation (according to attached specs).  
Counter clockwise rotation (CCR).  
Product Zone Cleaner (PZC) cleaning system.  
Spare part set, standard.  
Extended refrigeration signals.  
HMI splash cover.  
Supervision of installation and commissioning (1 man/21 days).  
Supervisor accommodation and travel expenses (air tickets, lodging meals and local transportation). 2 Trips included.

#### 2. TECHNICAL SPECIFICATIONS

##### 2.1. PRODUCT SPECIFICATION

<i>Product 1</i>	
Product name.....	Half Bananas with stick
Product description (pre-treatment, etc) .....	Raw, peeled
Product dimensions.....	90 mm x 35 mm φ
Product weight.....	.56 g
Water content.....	.75 %
Infeed temperature .....	20.0 °C
Equalized discharge temperature .....	- 18.0 °C
Total heat load (-40°C evaporation temperature, NH3 pump).....	125 kW
Product capacity.....	750 kg/h

\*10% safety margin included



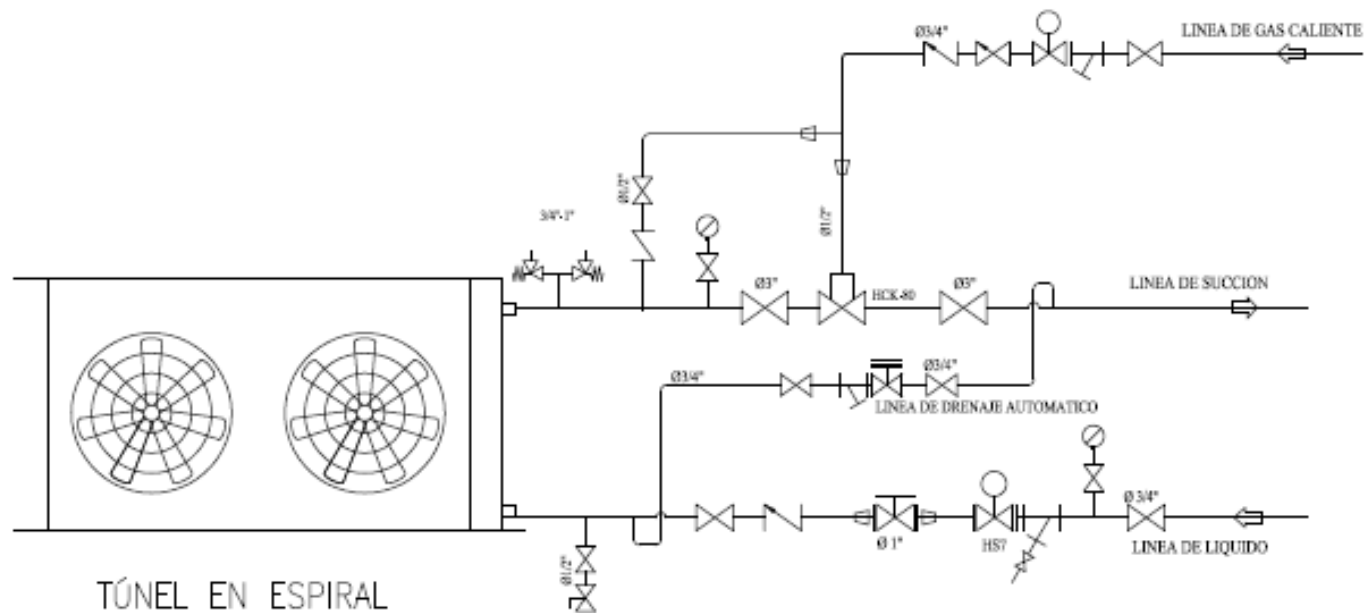
## 2.2. REFRIGERATION SPECIFICATION

Maximum refrigeration required.....	125 kW *
<i>*10% safety margin included</i>	
Cooling surface (standard design, size 14).....	1,092.8 m <sup>2</sup>
Coil internal volume.....	566 liters
Refrigerant type & conditions.....	Pump or gravity feed, R717 (Ammonia)
Pump circulation ratio.....	4 - 6 times
Refrigerant evaporating temperature (at the freezer coil).....	- 40 °C
Defrost system.....	Potable water and/or hot-gas

## 3. STANDARD CONSTRUCTION MATERIALS

- Internal steel structure: stainless steel support structure, stainless steel return rails.
- Evaporator unit: **SS/Al**; stainless steel supports and sheeting.
- **Stainless steel** infeed and outfeed unit.
- Frigoscandia FRIGoBELT® Conveyor in **stainless steel**.
- Frigoscandia FRIGoDRIVE® System in **stainless steel**.
- Insulated floor: **stainless steel** top.
- **Stainless steel** internal belt rinser and drier.
- Insulated enclosure: wall thickness **100 mm** of polyurethane.

## **PLANOS**



TÚNEL EN ESPIRAL  
CAP. -40°C 125 kW.

# FIMCP - ESPOL

FECHA:	AGO.15	NOMBRE:	G. Lucas
DIBUJO:	AGO.15	REVISÓ:	Ing. Duque

PROYECTO:  
**SELECCIÓN DE TÚNEL DE CONGELACIÓN**

PLANO No.

ESCALA:

CONTIENE:

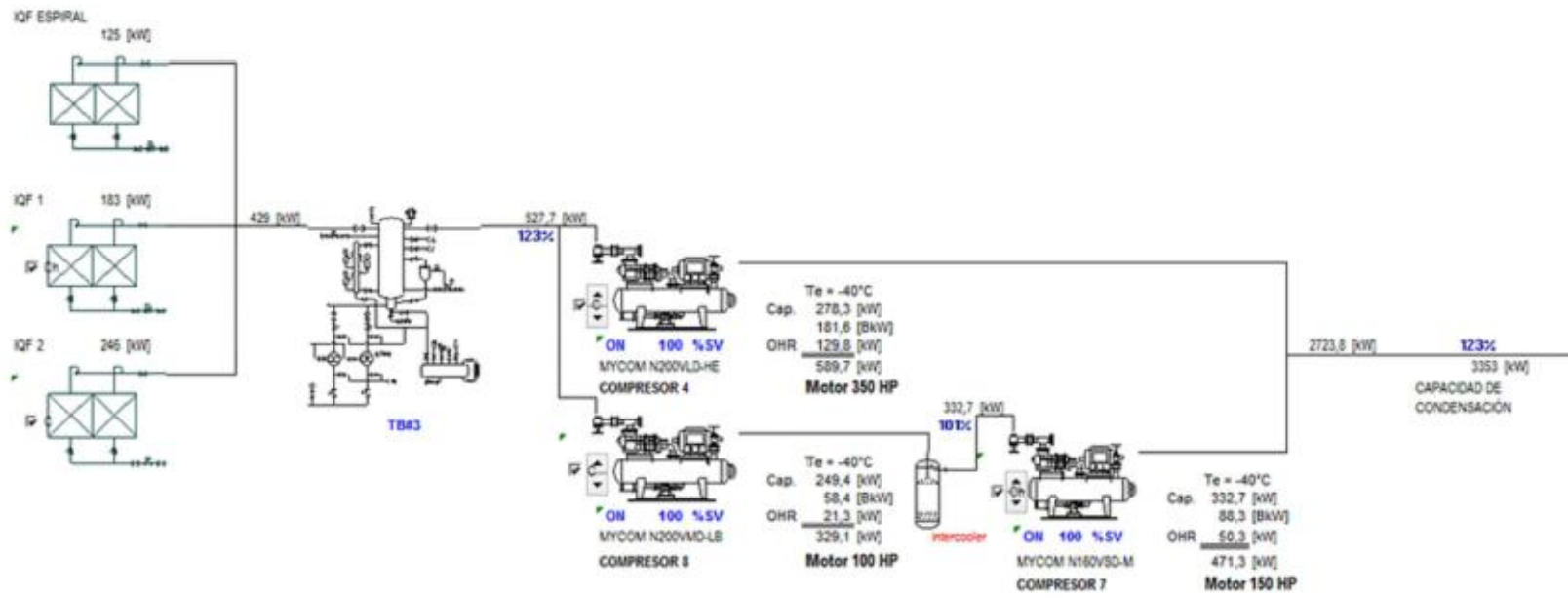
S/E

Diagrama de Flujo del Túnel IQF.

DETALLE:

ESQUEMA DE UBICACIÓN DE VÁLVULAS

# 1



<h1>FIMCP - ESPOL</h1>		FECHA:	NOMBRE:	
		DIBUJO:	AGO.2015	G. Lucas
		REVISO:	OCT.2015	Ing. Duque
PROYECTO: <b>SELECCIÓN DE TÚNEL DE CONGELACIÓN</b>		PLANO No.		
ESCALA: <b>S/E</b>	CONTIENE: Distribución de Equipos del Sistema de Refrigeración	<h1>2</h1>		
	DETALLE: <b>ESQUEMA DE UBICACIÓN PROPUESTO</b>			

## BIBLIOGRAFIA

- [1] José A. Barreiro y Aleida J. Sandoval B., “*Operaciones de Conservación de Alimentos por bajas temperaturas*”, Editorial Equinoccio, Primera Edición, 2006.
- [2] *Instalaciones de Refrigeración Industrial*, Disponible en <http://www.slideshare.net/martorque/calculo-carga-refrigeracin>
- [3] Frank P. Incropera, “*Fundamentos de Transferencia de Calor*”, Pearson Educación, Cuarta Edición, Capítulo 5.
- [4] H. J. Macintire, S. B., M. M. E. “*The Principles of Mechanical Refrigeration*”, McGraw-Hill Book Company. Inc, Second Edition, 1928.
- [5] ASHRAE, “*System Practice for Ammonia Refrigerant*”, Refrigeration Handbook (SI). 2002.
- [6] Hansen Technologies Corporation, “*Refrigeration Valve Capacity tables for Ammonia*”, 1999, Disponible en [www.Hantech.com](http://www.Hantech.com)
- [7] Shangyu Kanglong Refrigeration and Fanner Equipment Co.,Ltd, “LSJ Spiral Quick-Freezing Machine”, Disponible en <http://kanlongjx.en.gongchang.com/product/3989252>.

[8] Mayekawa de Mexico S.A., “*Refrigeración Industrial: Principios, Diseño y Aplicaciones*”, Grupo IZAC S.A. DE CV.