

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL QUIMICO

# **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE CONGELACIÓN DE ALIMENTOS**

**Joaquín Valdés León**

Profesor Guía:  
Gianni Olguín Contreras

**Julio 2010**



## TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	5
<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>6</b>
1.1.- Introducción.....	6
1.2.- Problemática .....	8
1.3.- Alcance del Proyecto.....	8
1.4.- Objetivos .....	9
1.5.- Metodología.....	10
<b>Capítulo 2: Marco Teórico Parte I: Características Generales de los Alimentos.....</b>	<b>12</b>
2.1.- Congelación de la Carne .....	12
2.2.- Congelación del Pescado.....	14
2.3.- Congelación de Granos y Cereales.....	16
2.4.- Congelación de Frutas y Verduras .....	16
2.4.1.- Composición física y química de la uva .....	18
<b>Capítulo 3: Marco Teórico Parte II - Congelación .....</b>	<b>20</b>
3.1.- Etapas de la Formación de Cristales de Hielo.....	21
3.1.1.- Nucleación .....	21
3.1.2.- Crecimiento de Cristales de Hielo .....	22
3.1.3.- El Tamaño del Cristal.....	23
3.1.4.- Recristalizado .....	24
3.2.- Modificación de los Alimentos Durante la Congelación.....	25
3.2.1.- Causas y Efectos del Aumento de la Concentración de Sustancias en Solución ....	25
3.2.2.- Causas y Efectos de los Daños a Estructuras Celulares .....	34
3.2.3.- Congelación, Crecimiento Microbiano y Viabilidad Celular .....	37
3.2.4.- Modificaciones de los Alimentos Durante el Almacenamiento en Estado Congelado .....	41
3.3.- Tolerancia Tiempo Temperatura de los Alimentos Congelados .....	45
3.4.- Calculo de la Potencia Frigorífica .....	47
<b>Capítulo 4: Selección del Proceso de Congelación.....</b>	<b>50</b>
4.1.- Congelación LIN.....	50
4.2.- Congelación Mecánica .....	51
4.3.- Congelación con Anhídrido Carbónico .....	51
4.4.- Ventajas de la Congelación con LIN Sobre Otros Sistemas (por Anhídrido Carbónico, Frío Mecánico).....	52
4.4.1.- Congelación LIN v/s Congelación con Anhídrido Carbónico .....	52
4.4.2.- Comparación Entre Congelación LIN v/s Congelación FM .....	56
4.5.- Métodos de Congelación Criogénica Utilizando Nitrógeno Líquido.....	58
4.5.1.- Congelación por Inmersión .....	58
4.5.2.- Congelación por Aspersión .....	59
4.5.3.- Congelación por Placas .....	60
4.6.- Equipos para Realizar la Congelación con Nitrógeno Líquido en Alimentos por Aspersión .....	61
4.6.1.- Equipo de Congelación BATCH.....	61
4.6.2.- Túnel Criogénico.....	64

4.6.3.- Controles del Proceso.....	70
<b>Capítulo 5: Diseño del Proceso de Congelación.....</b>	<b>73</b>
5.1.- Parámetros Generales del Proceso.....	73
5.2.- Balance de Energía del Proceso .....	74
5.3.- Calculo de Variables de Diseño .....	77
5.3.1- Calculo de Perdidas de Calor en Piping de Alimentación LIN.....	81
5.3.2.- Calor de Convección Dentro del Equipo .....	83
5.4- Criterio de Diseño Estanque de Almacenamiento .....	87
5.4.1.- Calculo de Perdidas Estanque de Alimentación LIN .....	89
<b>Capítulo 6: Evaluación Económica .....</b>	<b>93</b>
6.1.- Estudio de Mercado:.....	94
6.2.- Descripción de las Instalaciones .....	95
6.3.- Costos de Alternativa 1: Equipos Existentes .....	99
6.4.- Rentabilidad Alternativa 1:.....	102
6.4.1.- Negocio para la Congelación de Uvas .....	102
6.4.2.- Trato del Negocio.....	102
6.5.- Ganancia de Alternativa 1 .....	104
6.6.- Alternativa 2 .....	105
6.6.1.-Costos Operacionales.....	106
6.6.2.-Financiamiento alternativa 2 .....	107
6.6.3.-Depreciación .....	108
6.6.4.-Flujo de caja neto (FCN) .....	109
<b>Conclusiones .....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>113</b>

## Resumen

En el presente proyecto de titulación se describe los distintos métodos de congelación existentes para la conservación de productos alimenticios, realizado en la empresa INDURA S.A.

El análisis de los distintos procesos de congelación nos lleva a la selección del proceso de congelación criogénica utilizando nitrógeno líquido (LIN) como fluido congelante.

Dentro de los métodos de congelación criogénica utilizando LIN como fluido congelante, se selecciona el método por aspersión, el cual entrega mejores resultados de acuerdo a la versatilidad de inyección de LIN, como también a los gastos asociados a este fluido y maquinarias para llevar a cabo el proceso satisfactoriamente.

Se selecciona la uva como alimento para aplicar el proceso de congelación, debido a que se presentó la oportunidad de procesar dicho alimento en la viña Casa La Postolle.

Luego de tener seleccionado el proceso que presenta mejores resultados en la conservación de los alimentos y el alimento representativo, se diseña la planta de conservación de alimentos, dando a conocer las partes de las maquinarias, funcionamiento con alimentos y el balance de energía el cual entregará la cantidad de LIN necesario para una cantidad de producto a procesar. Finalmente se da a conocer la evaluación económica, basada en el proceso de congelación de la uva, realizado en Casa La Postolle.

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1.- Introducción

Este trabajo fue realizado en la empresa Indura S.A., ubicada en Cerrillos, Santiago, Chile. Esta empresa parte en 1948 para satisfacer las necesidades del sector metalmeccánico con una moderna planta de electrodos. Trece años más tarde, entró en operaciones la planta para la producción de oxígeno, acetileno y nitrógeno. A partir de esta sólida base, INDURA se abrió al mundo.

Dentro de las técnicas de conservación de productos alimenticios, la congelación ha ido ganando terreno en los últimos años. Se prefiere, un producto congelado a uno en conserva, ya que el primero mantiene mejor sus características en relación al producto fresco. Aún así, todo alimento que ha sido congelado y posteriormente descongelado para su consumo, sufre un deterioro en su calidad manifestado en cambios no deseados en el sabor, color, aroma y la pérdida de peso por deshidratación. Con la evolución de las técnicas de refrigeración y congelación, se ha logrado hoy en día disminuir considerablemente estos efectos negativos, para así adquirir todos los beneficios que nos entregan los alimentos.

En Chile existen múltiples empresas de alimentos las cuales exportan sus productos hacia el exterior o simplemente las comercializan dentro del país, en toda época, no sólo en tiempos de cosecha. Para ello los productos deben presentar excelentes calidades, de acuerdo al producto fresco, al momento de descongelarlos para su consumo.

El nitrógeno líquido (LIN) es el elemento que entrega los mejores resultados para el proceso, ya sea por sus propiedades de fluido congelante, sino que también por su costo de fluido de proceso (el más económico de todos los gases criogénicos).

En el presente proyecto de titulación se presenta un proceso satisfactorio para la congelación de la uva, analizando el proceso paso a paso, revisando lo que ocurre bajo la congelación, para luego entregar un proceso

que entrega resultados aceptables para los que quieran adoptar esta tecnología.

## **1.2.- Problemática**

El problema en la actualidad de tanto empresas productoras de alimentos (frutas, verduras, carnes), como también de casinos o lugares que preparan alimentos, es como exportar, almacenar o vender estos productos, ya sean preparados o crudos, sin que éstos se vean afectados en sus propiedades organolépticas tales como: coloración, sabor, textura, olor, etc. Para ello se pretende emplear un método satisfactorio, que conserve las propiedades de los alimentos mencionados intactas para el momento que se requiera consumir asimilando al producto fresco.

## **1.3.- Alcance del Proyecto**

La finalidad del proyecto es encontrar una solución para conservar los alimentos, sin que las propiedades físicas y químicas de estos se vean afectadas, comparándolas con las propiedades organolépticas originales del producto fresco. Para términos prácticos se utilizará la uva como el alimento representativo a implementar en el proceso de congelación.

Se darán a conocer los distintos procesos de conservación, como congelación con anhídrido carbónico, frío mecánico (FM), y con nitrógeno líquido, para así demostrar cual es el proceso de conservación criogénica que entrega mejores resultados, para luego llevar a cabo el diseño de este y finalmente evaluarlo económicamente.



## **1.4.- Objetivos**

### **1.4.1.- Objetivo General**

Diseñar una planta de congelación de alimentos frescos o precocidos, que sea multipropósito.

### **1.4.2.- Objetivos Específicos**

- Estudiar el proceso de congelamiento de alimentos y sus fenómenos internos.
- Seleccionar un proceso de congelación criogénica adecuado para la conservación de los alimentos.
- Diseñar el proceso de congelación criogénica, seleccionado para la conservación de los alimentos.
- Elegir un alimento para aplicar en el proceso de congelación seleccionado.
- Analizar factibilidad económica del proceso elegido.

## 1.5.- Metodología

Para formular el proyecto de estudio se trabajó en conjunto con la empresa Indura S.A. desde el año 2008, en distintas etapas de trabajo, las cuales se mencionan a continuación:

- **Etapa 1:** Desde el 7 al 31 de octubre (2008) trabajo teórico y búsqueda de bibliografía (Valparaíso).
- **Etapa 2:** Desde 3 al 30 de noviembre (2008), Trabajo de ordenar material bibliográfico recopilado en Valparaíso y reunir trabajos realizados por Indura, confección del marco teórico capítulo 2 y 3 del trabajo de título (Avenida las Américas Santiago).
- **Etapa 3:** Desde el 1 de Diciembre al 30 de Enero (2008-2009), Trabajo como técnico en maquinarias de congelación, confección del capítulo sobre las maquinarias utilizadas en la congelación de los alimentos (Cerrillos Santiago).
- **Etapa 4:** Desde el 2 al 27 de Febrero (2009), se trabajó en la recopilación de datos prácticos realizados y confección del capítulo de selección del proceso (capítulo 4) (Avenida las Américas, Santiago).
- **Etapa 5:** Desde el 2 de Marzo hasta 31 de mayo 2009, se trabajó como operador de túnel criogénico para la Vendimia 2009 Casa La Postolle (A palta, Santa Cruz).
- **Etapa 6:** Desde el 1 de Junio hasta el 31 de Julio 2009, y diseño del proceso de congelación (capítulo 5), (Avenida las Américas, Santiago)
- **Etapa 7:** Desde el 1 al 31 de Agosto 2009, evaluación económica de la planta de congelación de alimentos (Capítulo 6), (Valparaíso).



## **Capítulo 2: Marco Teórico Parte I: Características Generales de los Alimentos**

### **2.1.- Congelación de la Carne**

En las carnes el agua es el constituyente principal. La mayor parte de esta agua es agua "libre", donde se disuelven los componentes celulares solubles, mientras que otra escasa proporción de agua está ligada mediante enlace químico o físico, a hidratos y complejos macromoleculares coloidales. Además, una gran parte de la solución acuosa está integrada en las estructuras gelificadas o fibrosas de la célula. La transformación de agua en hielo, fenómeno más aparente en el transcurso de la congelación, implica que el agua emigra desde el seno de los tejidos para luego solidificarse; este proceso sólo es parcialmente reversible en el momento de la descongelación; de ahí la formación de exudados y otras modificaciones.

El exudado procedente de la descongelación de los tejidos es en la práctica, difícil de distinguir de cualquier otra humedad superficial o de condensación. La humedad que se forma en la superficie al descongelar, propicia en ocasiones, la posibilidad de invasión de microorganismos. La congelación del agua aumenta la concentración de los componentes celulares solubles (hasta provocar, en ciertos casos, saturación y precipitación), modifica el pH de las soluciones y, por consiguiente, afecta al contenido de agua que retiene los complejos coloidales y en las estructuras gelificadas o fibrosas. La concentración de los componentes celulares conduce a fuertes concentraciones de electrolitos, algunos de los cuales interponen en las cadenas polipeptídicas de las proteínas, provocando su desnaturalización. En las células vivientes, este proceso implica, comúnmente, una acción letal (congelación y almacenamiento en estado congelado provocan una ligera reducción en la población para la mayoría de los microorganismos), pero en los alimentos, que están constituidos la mayoría de las veces por tejidos muertos, el proceso puede ocasionar, durante el almacenamiento, cambios irreversibles de textura (dureza y modificaciones bioquímicas desfavorables; por ejemplo, sabores indeseables de origen enzimático). Para comprender la congelación

hay que considerar en bloque toda su fenomenología (aspectos físicos, fisicoquímicos y bioquímicos).

La calidad microbiológica original de la carne varía considerablemente en función de factores complejos, no siempre fáciles de controlar completamente, principalmente el estado fisiológico del animal y las condiciones de sacrificio. La proliferación de gérmenes contaminantes, gérmenes de alteración y gérmenes patógenos, evolucionan a velocidades estrechamente vinculadas a la temperatura, hasta tal punto que la única forma de garantizar la seguridad del usuario y/o consumidor es “instalar” lo más rápidamente posible el primer eslabón de lo que será la “cadena de frío”. Y, aunque la acción del frío pudiera entrañar una pequeña disminución de las características organolépticas del producto, ello es irrelevante frente a la importancia del problema sanitario. Conviene, por lo tanto, considerar que el enfriamiento precoz y rápido sigue siendo siempre la regla de oro del elaborador. [1]

## 2.2.- Congelación del Pescado

Para el pescado al igual que los demás alimentos, interesa una congelación rápida, pero la calidad del producto final va a depender, como siempre, ante todo de la calidad del pescado al ser capturado (que se encuentre en buenas condiciones). Así aunque el pescado esté eviscerado, si antes estuvo varios días en el hielo, no debe congelarse, pues no es posible impedir el ablandamiento del tejido conjuntivo.

También es importante el momento en que se realiza la congelación; si se hace antes de alcanzar la rigidez cadavérica, esta se produce durante la congelación, este inconveniente se manifiesta sobre todo en caso de filetes hechos y congelados inmediatamente después de la captura; por el contrario resulta un textura final aceptable cuando la congelación se hace antes de la rigidez cadavérica, pero sobre pescados enteros. Se cree que la diferencia está en el hecho de que los filetes se descongelan rápidamente y que la rigidez actúa en un tejido flexible que se contrae fácilmente, mientras, que un pescado entero se descongela más lentamente y los músculos se mantienen extendidos. [1]

En la práctica cuando la congelación se efectúa en la mar sobre pescados enteros, se hace antes de la aparición de la rigidez cadavérica, por ejemplo, en atunes; el fluido refrigerante más frecuente es la salmuera o el aire. Por el contrario, en la preparación de filetes se prefiere trabajar después de la rigidez cadavérica, pues el pescado en este estado es difícil de filetear. Se puede acelerar el proceso, elevando la temperatura pero sin sobrepasar los 10 a 12° C. Actualmente la congelación tiende a realizarse con nitrógeno líquido; no obstante continúan empleándose los procedimientos clásicos por inmersión o contacto. Si antes de congelar se sumerge en una disolución con polifosfato, la pérdida de líquidos en la descongelación se reduce; este tratamiento actuaría por formación de una capa de proteínas hinchadas que impide la salida del agua. [3]

El almacenamiento prolongado del pescado congelado produce una desnaturalización de proteínas y un endurecimiento de la carne. Este fenómeno limita la duración del almacenamiento de los pescados magros, mientras en el caso de especies grasas el factor limitante del tiempo de conservación congelado, es la oxidación de sus lípidos.

El deterioro se retarda si se baja más la temperatura;  $-60^{\circ}\text{C}$  sería la temperatura apropiada para un almacenamiento de muy larga duración pero resultaría muy caro. En la práctica, el pescado congelado se almacena a  $-18^{\circ}\text{C}$ , aunque en ciertos países a  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Resulta peligroso dejar que aumente la temperatura a  $-5^{\circ}\text{C}$  o a  $-2^{\circ}\text{C}$ , pues afecta especialmente la textura del pescado congelado. Por otra parte, éste debe protegerse contra la deshidratación que presupone pérdida de peso, modificación de la textura, formación de manchas, así como una penetración del oxígeno y más fácil oxidación de los lípidos. Se puede proteger por un glaseado superficial, realizando sobre el pescado una pulverización de agua, adicionada a veces, de antioxidantes o mediante un embalaje bajo vacío en una película plástica, impermeable al vapor de agua.

El comportamiento a la descongelación depende de manera como se realizó el proceso de preparación y congelado; el volumen de exudado (goteo) da una idea de los daños sufridos por la proteínas del tejido muscular; la presencia de ciertas actividades enzimáticas en el líquido superficial de un pescado indica que se trata de un producto que fue congelado antes, ya que la congelación provoca la ruptura de numerosas células y liberación de enzimas intracelulares, que normalmente no se encuentra en la superficie de un pescado. [3]

Temperatura	$-9^{\circ}\text{C}$		$-21^{\circ}\text{C}$		$-29^{\circ}\text{C}$	
	B	NC	B	NC	B	NC
Pescado magro (eviscerado)	1 mes	4 meses	4 meses	15 meses	8 meses	4 años
Arenque (eviscerado)	1 mes	3 meses	3 meses	6 meses	6 meses	1,5 años

**B = BUENO**

**NC = NO CONSUMIBLE**

**Tabla Nº 1:** Estimación subjetiva de la calidad del pescado congelado, según períodos de almacenamiento a distintas temperaturas.

### **2.3.- Congelación de Granos y Cereales**

En general, la congelación de granos y cereales se da sólo en las condiciones de platos preparados ya que estos no sufren daños considerables al estar “crudos” con el tiempo, por esto se les denominan alimentos no perecibles. La congelación de estos se da en algunos casos en la que se quisiera tener un plato preparado (previa cocción del grano), para que el consumidor sólo necesite recalentar el plato para su consumo. [5]

### **2.4.- Congelación de Frutas y Verduras**

La congelación de frutas y verduras se inicia a escala comercial en Estados Unidos. Se empezó por congelar frutas que eran lavadas, preparadas y seleccionadas previamente. Unas variedades de frutas aguantan mejor el proceso de congelación que otras pero en general se pueden presentar diversos problemas tales como:

- Pardeamiento del color debido a la acción de enzimas en presencia del oxígeno del aire.
- Rotura de la estructura celular de la fruta, que suele ser muy delicada.

En cualquier caso, con la ayuda del ácido ascórbico, poderoso antioxidante, se puede evitar en gran parte el oscurecimiento de las frutas. También se ha comprobado que cuando se congelan las frutas con azúcar, conservan mejor su estructura, color, olor y sabor una vez descongeladas. Las frutillas son un ejemplo de congelación de frutas con azúcar. En este caso se lavan, inspeccionan, seleccionan y cortan las frutillas que luego son mezcladas con azúcar y envasadas, antes de entrar al proceso de congelación.

Algunas frutas como los duraznos y damascos se suelen lavar, cortar en dos mitades y deshuesar antes de su congelación. Si se deja el hueso en el producto congelado, puede transmitirle un sabor amargo.

En el caso de frutas tales como la manzana, pera y durazno, se ha popularizado últimamente la producción de cremogenados (purés de dichas frutas) que se conservan refrigerados o congelados y que se utilizan posteriormente para la preparación de jugos, néctares, postres, etc. También



se procede a la congelación de jugos y néctares de frutas para su mejor conservación.

Las verduras han pasado en la actualidad a ser un producto que se vende cada vez más en forma congelada, ya que ahorra mucho trabajo para la ama de casa. Es necesario llevar a cabo una serie de operaciones previas con las verduras antes de su congelación. Así tenemos:

1. La recolección se debe hacer antes de lo que es habitual cuando se van a consumir en fresco. Con el objeto de facilitar el trabajo de la fábrica se deben escalonar en la medida de lo posible las tareas de recolección.
2. Entre la recolección y la congelación debe transcurrir el menor tiempo posible. El transporte hasta la fábrica debe ser rápido y cuidadoso. En algunos casos (guisantes, judías) puede ser interesante refrigerar durante el citado transporte, para que la congelación posterior se haga en las mejores condiciones posibles.
3. Lavado de las verduras con agua. Dentro de la factoría es habitual hacer el transporte de los productos con agua, aunque actualmente se tiende a hacerlo con aire, ya que el agua puede disolver algunos componentes de las verduras (azúcares, sales) con lo que se disminuye su valor nutritivo.
4. Escaldado. Esta operación consiste en poner en agua caliente las verduras durante unos minutos (2 a 4) a una temperatura entre 86 y 99°C. De esta forma se consigue una importante destrucción bacteriana, así como de la actividad enzimática de los microorganismos, evitándose el oscurecimiento o pérdida de color de las verduras. El escaldado también se puede hacer con vapor. La presencia de ácido ascórbico, de carácter antioxidante, coopera para evitar las manchas, pérdida de color y pardeamiento de las verduras. Por otra parte, el escaldado equivale a una precocción, por lo que el ama de casa puede acortar el tiempo de cocción de las verduras.
5. Según tipos de verduras pueden prepararse y clasificarse de forma distintas antes de la congelación. Se suele hacer una refrigeración previa antes de pasar a la etapa siguiente.
6. La congelación suele hacerse en lecho fluidizado en muchos casos, siempre que el tamaño sea igual o inferior a 30mm. De diámetro ya que así se consigue un tratamiento más suave del producto.

En la actualidad se está produciendo un incremento fuerte en la congelación de todo tipo de verduras y de menestras (combinación de varias verduras). [3]

#### **2.4.1.- Composición física y química de la uva**

- **Composición física:**

La uva es una de las frutas más conocidas, especialmente porque es la base del vino. Hay muchas variedades, y visualmente se suelen dividir en uva blanca, que es la variedad más verde, y uva negra, que tiene un color negruzco.

El racimo está constituido por dos partes completamente distintas, las cuales son, el raspón o escobajo y el grano.

- Raspón o escobajo (2 a 5 %): Está formado por un eje central que se llama pedúnculo hasta la primera ramificación, y luego el raquis. Desde el raquis parten ramificaciones que luego se subdividen en otras ramificaciones secundarias, en cuyas extremidades están los pecíolos que soportan a los granos. El raspón o escobajo forma el esqueleto del racimo.
- El grano (98 a 95%): Básicamente constituida por el epicarpio llamado hollejo, el sarcocarpio llamado pulpa, y las semillas, el grano es de suma importancia, ya que dependiendo de su constitución, obtendremos un vino determinado. [13]

- **Composición química de la uva**

El escobajo esta compuesta principalmente por taninos (3%). Es la sustancia responsable del color, el gusto amargo, la astringencia, la capacidad de envejecer y el cuerpo del vino. Además de minerales Ca y K (2-3%) y Agua en un 80%.

El hollejo esta constituida por materiales colorantes, que son los antocianatos (rojo) y flavonoides (amarillo), el vino tinto posee ambos colorantes, no así el blanco que cuenta en su composición sólo de flavonoides, además el hollejo le da el aroma varietal propio de cada vino. También cuenta con sustancias pepticas (polisacáridos) que a veces presentan problemas en la vinificación, taninos y enzimas.

La pulpa, constituida por 700 a 800 g/lit de agua, Azúcares los cuales se componen de 50% de glucosa, 50% fructosa y solamente pentosas menos de 2 g/l. La glucosa y la fructosa se transforman en alcohol, de estos azucares formados cada 17 g/lit da 1° de alcohol. También posee la pulpa 2 a 3 g/lit sales minerales que principalmente son fosfatos, K y Na. Sustancias nitrogenadas 0.5 a 1 g/lit (ácidos, pépticos, sales de amonio), ácidos libres 2.5 g/lit y ácidos combinados 3 a 10 g/lit, como por ejemplo L-tartárico, L-málico, cítrico y otros, siendo los más importantes los dos primeros ya que entre ellos forman el 90% de los ácidos de la uva. [13]

## Capítulo 3: Marco Teórico Parte II - Congelación

La congelación al igual que la refrigeración, utiliza el descenso de temperatura para prolongar el período de conservación de los alimentos. Aunque las temperaturas empleadas en la congelación, son mucho más bajas que las usadas en refrigeración, la diferencia esencial entre ambos métodos es la formación de cristales de hielo en el interior de los alimentos. Durante la refrigeración, las células de los tejidos animales y más acusadamente las de los vegetales, continúan con vida por un tiempo más o menos largo y los metabolismos celulares son simplemente detenidos. Por el contrario, la congelación, paraliza casi de forma completa e irreversible, toda actividad metabólica. Por eso, en la congelación se necesita que el alimento a congelar haya logrado antes de su congelación un estado de desarrollo o de maduración que permita su consumo.

La congelación representa para muchos alimentos el mejor medio de conservación a largo plazo, pues asocia los efectos favorables de las bajas temperaturas a los de la formación del agua en hielo.

En efecto, ningún micro organismo puede desarrollarse a una temperatura inferior a  $-10^{\circ}\text{C}$ ; por lo tanto, el normal almacenamiento de los productos congelados a  $-18^{\circ}\text{C}$ , impide toda actividad microbiana; además, la velocidad de la mayoría de las reacciones químicas quedan notablemente reducidas (Ley de Arrhenius) y las reacciones metabólicas celulares se paralizan completamente; en fin, la transición agua-hielo tiene la ventaja de fijar la estructura al tejido y aislar el agua bajo la forma de cristales de hielo, agua que por lo tanto no está disponible ni como disolvente, ni como reactivo. Por ello la difusión de las otras especies químicas en el seno del tejido es muy lenta, lo que contribuye, al mismo tiempo que el descenso de temperatura, a disminuir la velocidad de la mayoría de las reacciones.

Por el contrario, la formación de cristales de hielo tiene el inconveniente de originar, un deterioro mecánico de la textura del tejido. [2]

### **3.1.- Etapas de la Formación de Cristales de Hielo**

#### **3.1.1.- Nucleación**

Como se sabe, la temperatura de fusión del hielo es 0°C, a la presión normal (760 mmHg.). Sin embargo, en el sentido inverso, es decir, cuando el agua pura se enfría progresivamente, la congelación no se produce hasta alcanzar la temperatura de 0°C; la formación de cristales (de hielo) o nucleación, va siempre precedida de una sobrefusión, o dicho de otra manera, el agua queda durante un cierto tiempo en el estado líquido a una temperatura inferior al punto de fusión. Este fenómeno también se observa con diversas soluciones acuosas.

La sobrefusión del agua es mucho más evidente en el caso de pequeños volúmenes, por ejemplo, gotas de tamaño inferior al milímetro; no se encuentra bien explicado dicho fenómeno, pero se piensa que contribuye a la dificultad de nucleación del agua en el interior de las células, especialmente en los microorganismos.

Durante la sobrefusión los agregados cristalinos de moléculas de agua estarían en un estado dinámico: formación muy rápida seguida de destrucción. Una vez sobrepasado un tamaño crítico el cristal sería estable y podría servir de germen al crecimiento cristalino. Este tamaño crítico podría depender de la temperatura, y sería tanto más pequeño cuanto más baja fuese la temperatura; la nucleación es muy poco probable a la temperatura del punto de fusión, pero su probabilidad aumenta cuando la temperatura desciende.

La nucleación resulta favorecida por la presencia de cristales de diversas sales insolubles o de diversas clases de partículas sólidas (por ejemplo: polvo). En los alimentos siempre se llega a un tipo de nucleación heterogénea, de tal forma que la sobrefusión es relativamente breve. [2]

### 3.1.2.- Crecimiento de Cristales de Hielo

El crecimiento de los cristales de hielo se debe al hecho que las moléculas de agua emigran hacia el medio y terminan agregándose a un germen existente; esto puede ocurrir incluso a una temperatura próxima al punto de congelación. En la práctica, en los alimentos, la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo depende de la velocidad a que se elimine calor, es decir, de la diferencia de temperatura entre el cristal y el medio que lo rodea. Cuando la temperatura del medio es inferior a  $-80^{\circ}\text{C}$ , todavía parece que la velocidad de crecimiento de los cristales pase por un máximo. A temperaturas muy bajas, el factor limitante lo constituye la transferencia de masa, por que la elevada viscosidad del medio retarda el desplazamiento de las moléculas de agua. Con los productos alimenticios la concentración actúa en el mismo sentido. Sustancias en solución, tales como sales, alcoholes, azúcares, proteínas, también retardan el crecimiento de los cristales de hielo: [2]

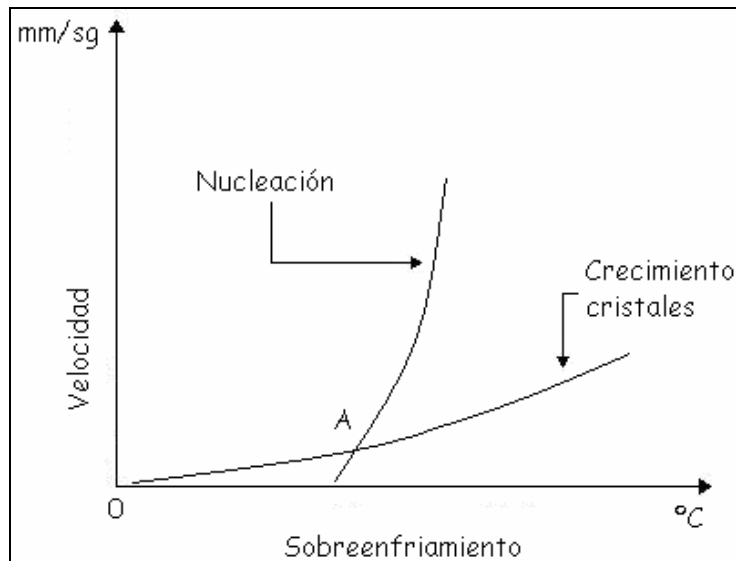
Soluciones	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Velocidad de Crecimiento del Cristal (mm/sg)
Agua	-9,1	61
NaCl (0,1 M)	-9,1	41
Etanol (0,1 M)	-9,1	29
Sacarosa (0,1 M)	-9,1	6,6

**Tabla Nº 2:** Velocidad de crecimiento de cristales de distintas soluciones.

### **3.1.3.- El Tamaño del Cristal**

El tamaño del cristal está directamente relacionado con el número de núcleos que se forman durante la congelación; la formación de pocos núcleos da como resultado pocos cristales grandes, mientras que el desarrollo de muchos núcleos produce muchos cristales pequeños. Esto indica que el tamaño de los cristales en un producto está relacionado directamente con el proceso de nucleación. Pero la nucleación depende del grado de sobreenfriamiento logrado y en consecuencia el tamaño de los cristales obtenido se vuelve dependiente de la velocidad de congelación.

En la figura 1 se aprecia que luego de un sobreenfriamiento característico, se inicia la nucleación y su velocidad aumenta rápidamente a medida que la temperatura decrece. La velocidad de nucleación aumenta rápidamente luego que se alcanza un grado crítico de sobreenfriamiento mientras que la velocidad de crecimiento de cristales aumenta de modo consistente con la temperatura decreciente. Si la velocidad de remoción de calor es lenta y se permite que la temperatura del alimento se sitúe entre 0 °C y durante un período significativo, cualquier núcleo que se forme crecerá considerablemente. En cambio para una remoción de calor rápida, la temperatura del producto bajará rápidamente hasta un punto por debajo de A y se formarán muchos núcleos y los cristales tendrán crecimiento limitado. [2]



**Figura Nº 1:** Velocidad de crecimiento de cristales de distintas soluciones.

“El tamaño medio de los cristales en el producto variará inversamente con el número de núcleos y el número de núcleos puede controlarse con la velocidad mediante la velocidad de remoción de calor”. [7]

### 3.1.4.- Recristalizado

Los cristales formados durante la congelación son inestables. Este hecho y las fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento tienen importancia decisiva para la calidad del producto. La velocidad de recristalización es dependiente de la temperatura., siendo alta a temperaturas cercanas al punto de fusión y muy baja a temperaturas muy bajas. El control de la recristalización puede realizarse efectivamente manteniendo temperaturas bajas y constantes en el almacenamiento congelado. [7]



## **3.2.- Modificación de los Alimentos Durante la Congelación**

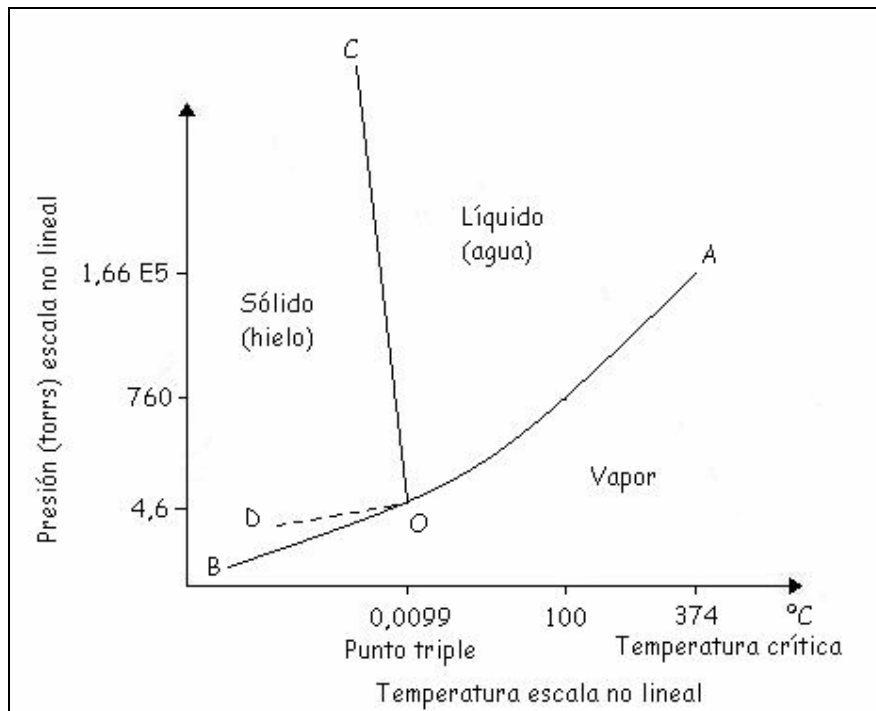
Ya se indicaron brevemente las principales ventajas de la congelación para conservar los alimentos. Vamos a examinar ahora, con un poco más de atención, los efectos desfavorables de la congelación, que se manifiestan por un deterioro de la calidad, especialmente de la textura del alimento, pues su conocimiento es indispensable para evitarlos.

El principal responsable de las modificaciones físico-químicas desfavorables, es el cambio de fase agua a hielo; estas se producen sobre todo durante la congelación y descongelación, pero también se manifiestan a veces, durante el almacenamiento en estado congelado. [2]

### **3.2.1.- Causas y Efectos del Aumento de la Concentración de Sustancias en Solución**

#### **Diagrama de Fases del Agua**

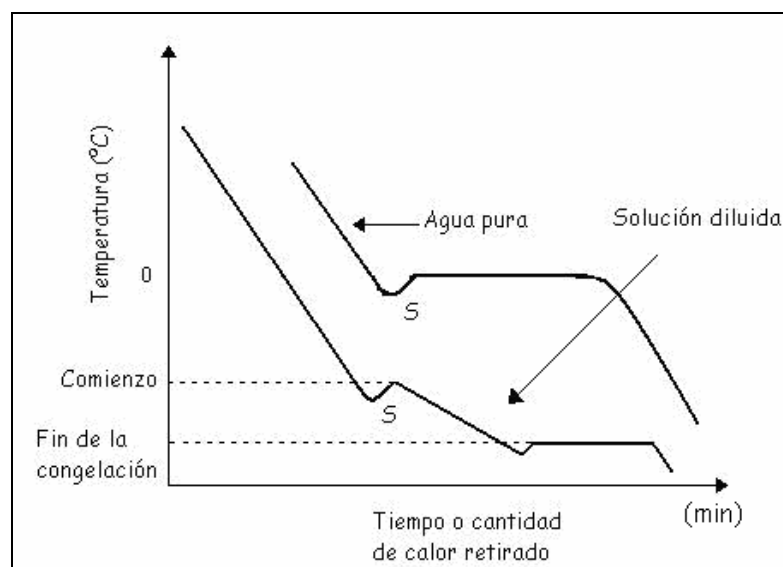
La figura 2, expresa las condiciones de equilibrio de las diversas fases del agua (pura). AO es la curva de equilibrio vapor-líquido (o curva de presión de vapor, o curva de puntos de ebullición); CO la curva de los puntos de fusión; BO la curva de sublimación. Se ve, por ejemplo, que sublimación del hielo sólo puede realizarse a una presión de vapor de agua inferior a 4,6 mmHg y a una temperatura inferior a 0,0099°C. DO representa la curva de presión de vapor del agua en sobrefusión. Este diagrama no indica las condiciones de equilibrio de las diferentes fases cristalinas sólidas que puede presentar el hielo; estas condiciones están muy alejadas de las que prevalecen en los alimentos congelados. [2]



**Figura N° 2:** Diagrama de fase del agua

### Curvas de Congelación y Formación de Eutéticos

Si se representan las variaciones que sufren durante la congelación, la temperatura del agua y de una solución acuosa diluida, se obtienen curvas como la figura 3.



**Figura N° 3:** Curvas de congelación del agua y de una solución acuosa.

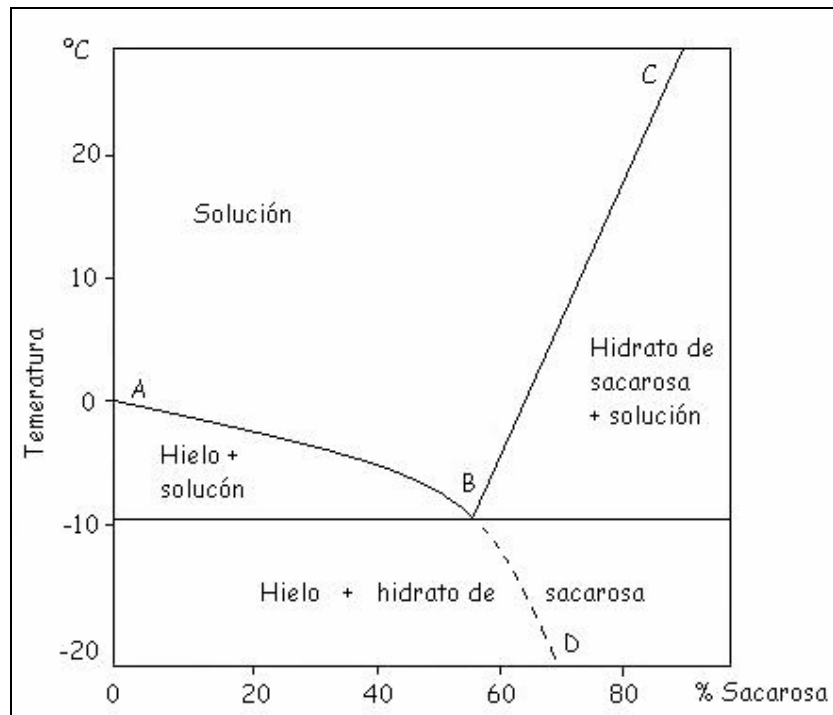
En el caso del agua pura, después de la sobrefusión (S), ocurre la formación de cristales de hielo y libera calor; la temperatura sube a 0°C y permanece constante durante toda la duración de la cristalización; cuando todo el agua se transformó en hielo, se reinicia el descenso de temperatura a una marcha más rápida que al principio, porque el calor específico del hielo es inferior al del agua. He aquí las constantes se aplican a las tres etapas del proceso.

<b>Calor específico del agua pura</b>	$1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$
<b>Calor latente de fusión del hielo</b>	$49,7 \text{ cal} / ^\circ\text{C}$
<b>Calor específico del hielo a 0°C</b>	$0,49 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$

**Tabla Nº 3:** Constantes de las tres etapas del agua.

En el caso de una solución diluida, la temperatura del comienzo de la congelación es inferior a 0°C; este descenso crioscópico es inversamente proporcional a la fracción molar del agua en la solución (ley del descenso crioscópico de Raoult). En este estado la congelación origina cristales de hielo puro (o casi puro) y la concentración de la solución aumenta, y como consecuencia prosigue el descenso posterior de la temperatura, según la ley de Raoult. Cuando la sustancia en solución en la fase líquida alcanza el punto de saturación, se produce una cristalización simultánea de hielo y de la sustancia en cuestión. Entonces la mezcla que cristaliza presenta una composición constante, correspondiente a la concentración saturante y se denomina mezcla eutéctica. La temperatura del fin de congelación, llamada temperatura eutéctica o criohídrica, es una característica invariable para una solución dada y permanece constante durante todo el tiempo de cristalización de la mezcla eutéctica. [2]

La figura 4 representa el diagrama de fases de una mezcla binaria simple (sacarosa-agua):



**Figura Nº 4:** Diagrama de fases de la mezcla sacarosa-agua.

La curva AB es la curva de los puntos de congelación (equilibrio entre hielo y solución); la línea BC es la curva de solubilidad o de saturación (equilibrio entre sacarosa sólida y solución); la curva BD corresponde a un equilibrio meta estable entre el hielo y una solución sobresaturada en sacarosa.

El punto B es el punto eutéctico. En el sistema sacarosa- agua, la sacarosa cristaliza en forma de hidrato, lo más frecuente con 3,5 moléculas de agua.

Las fases acuosas de los tejidos animales y vegetales y de numerosas preparaciones alimentarias, son soluciones, relativamente diluidas, de un gran número de solutos; su comportamiento durante la congelación es complejo porque los equilibrios sólido-líquido sólo se establecen muy lentamente y pueden persistir mucho tiempo equilibrios meta estables, sobre todo si la congelación es muy rápida; por otra parte, los eutécticos correspondientes a cada una de las especies químicas en solución, pueden estar modificados por la presencia de los otros solutos; en fin, durante la descongelación, se observa,

a veces, una transformación del estado amorfo vítreo (presente cuando la congelación fue muy rápida), en estado cristalino, antes de la fusión.

Este conjunto de condiciones hace que tratándose de alimentos, raramente se observa una transformación eutéctica clara. La temperatura de “fin de congelación” (congelación total del agua congelable, o solidificación máxima) de un alimento o de un tejido animal o vegetal, es por lo general inferior a la temperatura eutéctica más baja. En la práctica, es raro que los alimentos se intenten llegar a estas temperaturas tan costosas; por el contrario, la conservación a  $-80^{\circ}\text{C}$ , incluso a  $-196^{\circ}\text{C}$  resulta beneficiosa para conseguir la supervivencia de algunas células (hematíes, espermatozoides, microorganismos) o de algunos tejidos.

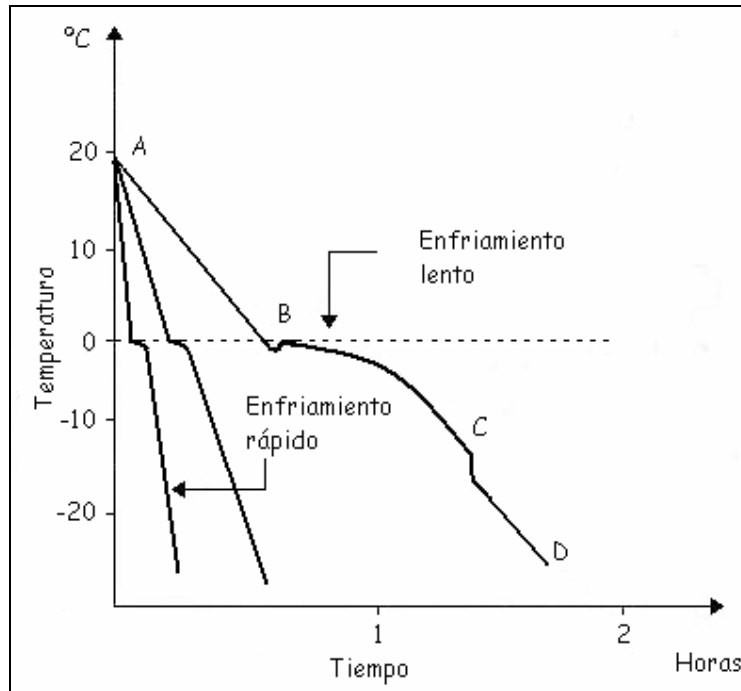
La tabla 4 indica las temperaturas iniciales de congelación y de “fin de congelación”, de algunas soluciones simples y de algunos alimentos.

Soluciones y alimentos	Temperatura de comienzo de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura de fin de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )
NaCl 1 Molal	-3,37	-21,13 (eutéctica, 5,7 molal = 22,4% en peso)
NaCl 2 molal	-6,9	-
Sacarosa 1 Molal	-2,06	-9,5 (eutéctica, 56,2% en peso)
Sacarosa 2 Molal	-4,6	-
Pescado, carne (músculo)	-0,8 a -1	$\approx -55$
Frutas legumbres	-0,5 a -3	$\approx -68$
Leche, Huevos, Pan	$\approx -0,5$	$\approx -70$

**Tabla Nº 4:** Temperatura inicial y final de congelación de algunas soluciones y alimentos.

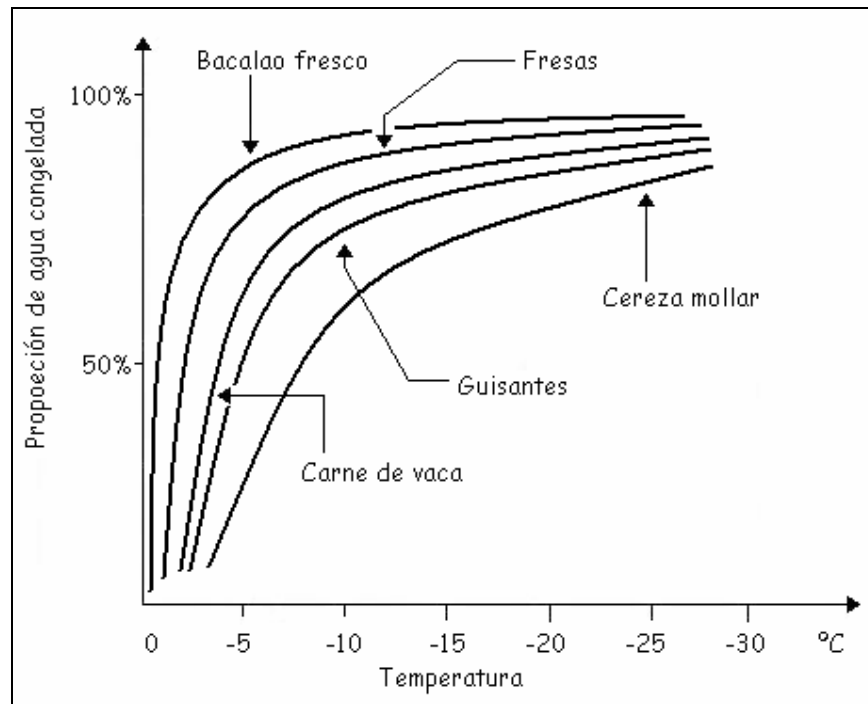
Cuando se mide la variación de la temperatura de un alimento durante la congelación, se obtiene curvas bastantes regulares, en las que, generalmente, no aparecen el comienzo de la congelación y los diversos eutécticos, a causa de las razones indicadas anteriormente. La forma de las curvas depende tanto de la velocidad con que se elimina el calor como de las características del producto. La figura 5, representa el caso de un mismo alimento sometido a enfriamiento más o menos rápido. La formación de sucesivos eutécticos se produce durante la última parte del segmento BC y entre C y D; va unida a un

fuerte aumento de la concentración de los solutos que aún no están en saturación. El descenso rápido de temperatura entre los puntos C y D se debe a la menor liberación de calor latente de fusión.



**Figura Nº 5:** Curva de congelación: comparación entre enfriamiento lento y rápido.

La figura 6 representa, en función de la temperatura, la proporción de agua que está en estado congelado en diversos alimentos cuyo contenido en materia seca soluble varía desde un 10% (bacalao fresco) a un 20% (cereza mollar). A la temperatura habitual de almacenamiento de los alimentos congelados ( $-18^{\circ}\text{C}$ ), una proporción apreciable del agua congelable aún está en estado líquido (2 a 15%) y posee propiedades de disolvente y reactivo; algunas de las reacciones de deterioro que prosiguen o intervienen específicamente en los productos congelados, se deben a la existencia de espacios líquidos residuales de elevada concentración en solutos; sería por lo tanto recomendable en muchos casos que se utilizasen temperaturas de almacenamiento inferiores a  $-18^{\circ}\text{C}$ . [2]



**Figura Nº 6:** Agua líquida residual en diversos alimentos durante la congelación.

La temperatura de “fin de congelación” de un alimento puede determinarse por medio de medidas calorimétricas o eléctricas. Sólo por debajo de esta temperatura está congelada toda el agua *congelable* de los espacios líquidos residuales; pero según el alimento, siempre hay de un 2 a un 10% de agua no congelable, especialmente agua fuertemente adsorbida. A -60°C, desaparecen las señales de resonancia magnética nuclear del agua; la resistencia eléctrica del alimento aumenta y se aproxima a la de los alimentos deshidratados. No obstante, aún queda agua no congelada (capa mono molecular); probablemente esta agua no se encuentre en forma líquida.

La congelación lenta origina la formación de cristales de hielo muy puros y por lo tanto, hay una concentración de solutos en los espacios líquidos residuales, más elevada que por la congelación rápida.

Por lo general, durante la congelación, hay un frente uniforme de congelación que avanza desde el exterior hacia el interior del alimento; su temperatura es la del comienzo de congelación. Sin embargo, cuando la eliminación de calor es muy rápida, puede haber sobrefusiones y la congelación no es más uniforme. [2]

## **Modificaciones Producidas en los Espacios Líquidos Residuales**

Como se indicó anteriormente, una de las consecuencias de la congelación es el aumento de la concentración de solutos presentes en los espacios líquidos de los alimentos.

Cuando se trata de solutos capaces de reaccionar entre sí, se observa, a pesar del descenso de temperatura pero de acuerdo con la ley de acción de masas, que la velocidad de las reacciones aumenta durante la congelación, a partir de  $-5^{\circ}\text{C}$ ; por el contrario, debajo de  $-15^{\circ}\text{C}$ , la velocidad de las reacciones disminuye, lo que está de acuerdo con ley de Arrhenius, pero también resulta de que el progreso de la solidificación retarda la difusión. Las mayores velocidades se observaron en el caso de reacciones de oxidación, de hidrólisis en catálisis ácida o alcalina, de insolubilización de las proteínas; por el contrario, y en general, las reacciones catalizadas por las enzimas no son aceleradas por la congelación.

La aceleración de algunas reacciones sólo representan una de las consecuencias del aumento de la concentración de solutos; en efecto, esto produce, frecuentemente, la modificación de diversas características del medio, tales como: pH, fuerza iónica, presión osmótica, potencial de oxidación-reducción, tensión superficial, presión de vapor, punto de congelación; la acción de estos factores, asociada al efecto de la desaparición de una parte del agua líquida, provoca otros cambios, con frecuencia desfavorables para la calidad del alimento.

Así, un descenso del pH, un aumento de la fuerza iónica, o la simple salida del agua, pueden originar la desnaturalización de proteínas (caseína de la leche, lipoproteínas de la yema del huevo); en parte, se atribuye a una desnaturalización semejante de la actomiosina el descenso del poder de retención del agua y como consecuencia el endurecimiento y sequedad a la masticación del músculo de pescado conservado por congelación.

Probablemente, el aumento de la fuerza iónica puede provocar la desestabilización del gel citoplasmático celular; las variaciones de la presión osmótica actúan sobre las membranas celulares; el aumento de la concentración en coloides hidrófilos, almidón, pectinas, puede originar un acusado incremento de la viscosidad.



Por otra parte, la congelación puede provocar la desestabilización, con descenso de la capacidad de retención de agua, de geles de almidón o pépticos; y también de emulsiones lipídicas, como por ejemplo, durante la desnaturalización de los glóbulos grasos en los productos lácteos congelados. Se precipitan sales y azúcares (lactosa en los helados); los gases quedan libres.

Estos distintos efectos resultan limitándolas cuando la congelación es rápida y la temperatura de almacenamiento es muy baja. Sin embargo, las temperaturas de almacenamiento inferiores a  $-20^{\circ}\text{C}$  resultan costosas. Probablemente, el beneficio de la congelación rápida se debe, en parte, a que algunos constituyentes se encuentren menos tiempo en soluciones hipertónicas (soluciones que presenta mayor concentración de soluto en el medio externo y por lo tanto pierden agua por la diferencia de la presión osmótica); con relación al almacenamiento a una temperatura muy baja, se concluirá que tiene el beneficio de realizar la solidificación casi completa del producto. [2]

### 3.2.2.- Causas y Efectos de los Daños a Estructuras Celulares

#### Variaciones de volumen

Cuando el agua se transforma en hielo, su volumen aumenta sobre un 9%. Como continua enfriándose, el hielo sufre una ligera contracción. Los otros constituyentes además del agua, especialmente los lípidos, también se contraen durante la congelación. Estas variaciones de volumen originan tensiones internas que pueden alcanzar varias centenas de bares.

La tabla 5, indica los aumentos de volumen de algunos alimentos durante su paso de -21 a -18°C.

Alimentos	Aumento de volumen
Jugo de manzana	8,3%
Solución de sacarosa al 20%	8,2%
Carne de vaca	8%
Frambuesas enteras	4%
Frambuesas trituradas	6,3%
Frutillas enteras	3%
Frutillas trituradas	8,2%

**Tabla Nº 5:** Aumento de volumen de algunos alimentos durante la congelación.

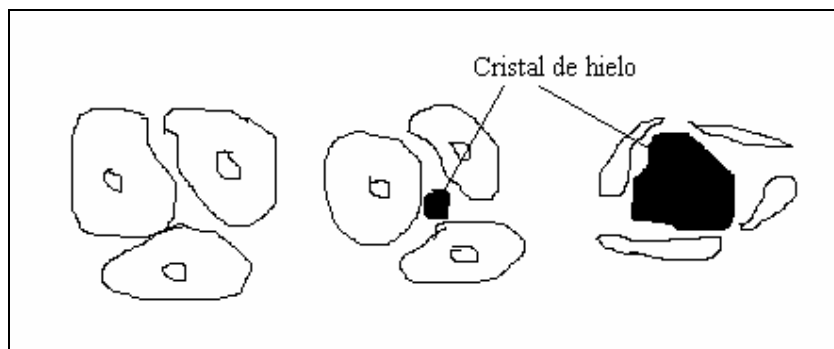
En general, el aumento de volumen es proporcional al contenido en agua del alimento. El mínimo aumento de volumen de las frutas enteras, se explica por la presencia de gas en las vacuolas; estos gases se comprimen y, en parte, se expulsan durante la congelación.

En el caso de frutas y legumbres los cambios de volumen que frecuentemente no son homogéneos, originan desgarraduras internas; probablemente rompen las paredes celulares y por lo tanto son causa de una pérdida de líquido (exudación) durante la descongelación; también pueden motivar la rotura completa de la fruta o legumbre, cuando la congelación y expansión del interior ocurre después de la formación de una costra externa congelada. Una congelación demasiado rápida, como ocurre durante la

inmersión en nitrógeno líquido, favorece mucho más esta ruptura, ya que la capa externa congelada se contrae cuando la temperatura es muy baja. [2]

### **Cristalización Extra e Intracelular, Fenómenos Osmóticos; Ruptura de Membranas Celulares, Reacciones Enzimáticas**

La congelación de un tejido se inicia por la cristalización del agua en los espacios extracelulares, debido a que la concentración de solutos, provoca, por ósmosis una deshidratación progresiva de las células. Se forman grandes cristales de hielo y aumentan los espacios extracelulares, mientras que las células plasmolizadas disminuyen considerablemente de volumen. Esta deshidratación de las células descende todavía más la probabilidad de una nucleación intracelular; en realidad, en la mayor parte de los tejidos o suspensiones de células congeladas lentamente, no se observan cristales intracelulares (con algunas raras excepciones: músculos de pescado antes de la rigidez cadavérica, células de plantas no resistentes al hielo, legumbres congeladas después del escaldado, tejidos congelados por segunda vez). La figura 7 expone esquemáticamente este comportamiento



**Figura Nº 7:** Desarrollo progresivo de cristales de hielo en los tejidos durante la congelación lenta

Este desplazamiento del agua, que puede hacerse irreversible si sobrepasa un cierto nivel, explica en gran parte el descenso de turgencia, el despegamiento de tejidos y la exudación que se observa de numerosos alimentos al descongelar, es la causa principal del ablandamiento de los tejidos vegetales.

La observación al microscopio indica que los grandes cristales de hielo extracelular separan las fibras y células entre sí, al mismo tiempo que las paredes de estas últimas están frecuentemente desgarradas; a menudo, esto motiva la muerte del tejido y contribuye al descenso de turgencia y a la exudación al descongelar.

La ruptura de las paredes celulares puede resultar de la acción mecánica de los grandes cristales de hielo (que, en los tejidos vegetales, se forman especialmente en las láminas intermedias), de una sustancia prolongada en un medio hipertónico o de un encogimiento excesivo de las células. Estas alteraciones microestructurales se producen también cuando los pequeños cristales resultantes de una congelación rápida se cristalizan durante el almacenamiento o descongelación.

La expulsión de una parte del contenido celular (que se puede evaluar según el ADN presente en el exudado) tiene a veces el efecto de poner en contacto enzimas y sus sustratos, especialmente polifenol oxidasas y polifenoles situados normalmente en compartimientos celulares separados, esto motiva en los tejidos no escalados, una aceleración del pardeamiento enzimático durante la descongelación, o incluso durante el almacenamiento (caso del melocotón). En el caso del pescado, la presencia de enzimas microsomas en el exudado permite distinguir entre pescado descongelado y fresco.

Cuando la congelación es rápida, la cristalización se produce casi simultáneamente en los espacios extracelulares y en el interior de las células (por nucleación en torno a sustancias celulares, aunque también puede ser por penetración de cristales extracelulares a través de las paredes de las células). El desplazamiento de agua es pequeño y se produce un gran número de cristales; las modificaciones de textura, motivadas por la salida del agua de las células, por ósmosis, son claramente menores que durante la congelación lenta.

Cuando la congelación es rápida se observa en el microscopio que las membranas vegetales están menos dañadas; por el contrario, en el músculo, el sarcolema (pared de la fibra muscular) es más frecuentemente desgarrado durante la congelación rápida, acompañado de la formación de más cristales intracelulares que durante la congelación lenta. Es necesario resaltar que la

formación de cristales intracelulares, cualquiera que sea su tamaño, siempre destruye la organización interna de las células (citoplasma, orgánulos), parando o modificando rotundamente el metabolismo y provocando la muerte de las células o el tejido.

Se realizaron numerosas experiencias con el fin de establecer efectivamente si una congelación rápida es preferible a una congelación lenta.

En el caso de las frutas, o al menos algunas de las frutas, la congelación rápida conservaría mejor la textura, contrariamente a lo que ocurre con las legumbres escaladas.

En lo que concierne a la carne, todavía es más fácil establecer conclusiones, generales, en razón a los numerosos parámetros que intervienen: raza, estado de los animales, fenómenos fisiológicos ante y post mortem (glicólisis, maduración); dimensiones de los trozos, duración del almacenamiento en estado congelado, etc. Por ejemplo, se sabe que la rigidez cadavérica debe producirse cuando la temperatura de la carne está comprendida entre 10 y 20°C para que la blandura sea máxima; si ésta se produce entre 0 y 10°C, el músculo se contrae y endurece. Tampoco se debe congelar la carne antes que se produzca la rigidez cadavérica, También se sabe que un pH elevado ( $\geq 6,4$ ) en el momento de la congelación, asegura tanto para la carne como para el pescado, una textura óptima y una exudación mínima.

Tanto para la carne como para el pescado una temperatura una temperatura alta durante el almacenamiento al estado congelado influye desfavorablemente sobre la blandura; por el contrario, la duración de la conservación parece afectar por sobre todo a la blandura del pescado. [2]

### **3.2.3.- Congelación, Crecimiento Microbiano y Viabilidad Celular**

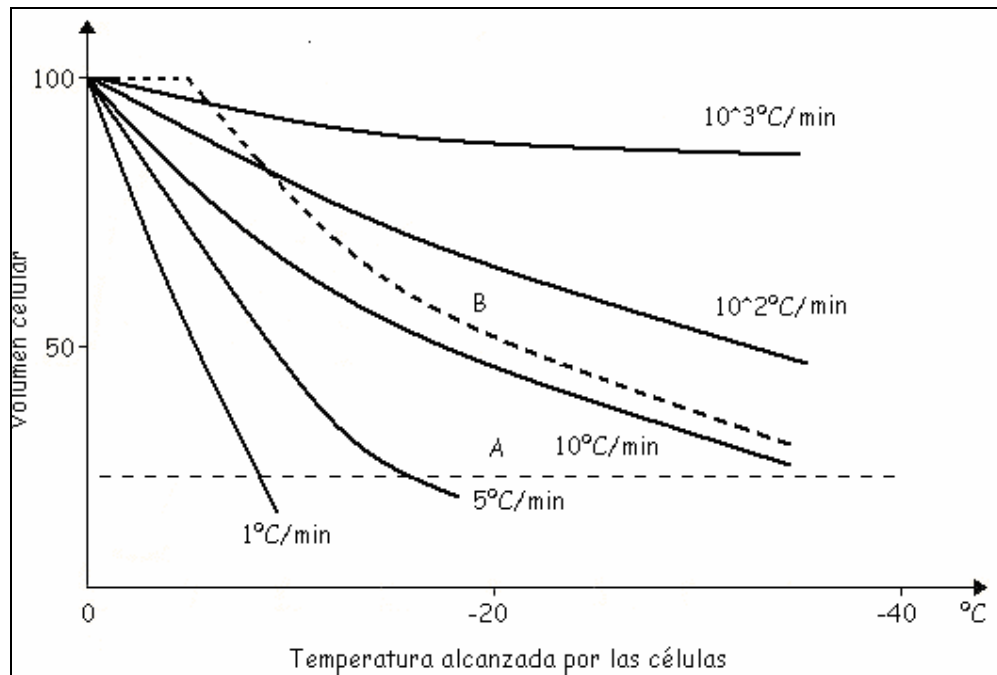
Los estudios de criobiología de los últimos treinta años, se orientan especialmente hacia prolongar la viabilidad de los hematíes, espermatozoides, microorganismos, tejidos y órganos; por el contrario, durante la congelación de los alimentos, no se busca la viabilidad celular pues tal como ya hemos indicado, incluso la congelación rápida ocasiona la muerte de los tejidos vegetales y animales.

No obstante, siguen interesando los estudios de criobiología y más concretamente a los especialistas de alimentos, por que permite conocer mejor los efectos de la congelación sobre la estructura de los tejidos; además, aportan a otros conocimientos sobre el comportamiento de los microorganismos a bajas temperaturas.

Esto último aspecto es muy importante. Ningún microorganismo patógeno o toxinógeno, con la excepción de algunos mohos, se multiplica por debajo de 0° C; el *C. botulinum*, tipo E, es el más criófilo entre los diversos tipos de esta especie, pero no se desarrolla ni produce toxina por debajo de 3°C. Hay algunas bacterias y mohos que se desarrollan (naturalmente, muy lento), entre -8 y -10°C, respectivamente; son perjudiciales en el sentido de que pueden motivar alteraciones de carácter organoléptico, pero no son patógenos, ni toxinógenos. La congelación y el almacenamiento a -18°C, tal como se practica corrientemente o incluso a temperaturas más bajas, no mata los microorganismos, algunas especies, especialmente bacterias gran negativas, desaparecen progresivamente; por ejemplo, la flora bacteriana del pescado disminuye considerablemente durante la conservación en estado congelado; por el contrario, otras no resultan prácticamente afectadas por la congelación: salmonella en las aves, numerosos coniformes en los platos preparados, esporas, virus, diversas bacterias gran positivas (*staphylococcus*, *micrococcus*, *streptococcus*) en las carnes, en los platos cocinados y en otros productos. Las levaduras y bacterias lácticas presentes en los jugos concentrados congelados de agrios.

Ahora se ve claramente, toda la importancia que tiene que se controlen rigurosamente las temperaturas de almacenamiento en estado congelado, de descongelación y de conservación temporal después del descongelado, con el fin de evitar la proliferación de microorganismos peligrosos.

La figura 8, representa de un modo esquemático los efectos de la congelación sobre la viabilidad de las células, en función de la velocidad de descenso de temperatura.



**Figura Nº 8.** Efecto de la congelación sobre el volumen de las células.

Cuando la congelación es lenta (por ejemplo 1 o 5 °C/min) existe una cristalización extracelular y la célula se deshidrata progresivamente por ósmosis; su volumen disminuye. Cuando la pérdida de agua alcanza en torno al 60% (línea A) la célula muere.

Cuando la congelación es muy rápida ( $\geq 10^2$  °C/min) se produce la cristalización intracelular que destruye el citoplasma y los orgánulos celulares, originando la muerte de la célula.

A una velocidad intermedia de congelación (del orden de 10°C/min), el grado de deshidratación es suficiente para impedir la cristalización intracelular, pero, sin embargo, no alcanza el umbral crítico. En esas condiciones la viabilidad de las células está preservada al máximo; no obstante, se necesita que posteriormente la descongelación sea muy rápida, con el fin de evitar el crecimiento de cristales que podría afectar la estructura celular. Esta velocidad óptima de congelación se sitúa, en la figura 10 entre las líneas A y B.

El esquema que se acaba de describir agrupa las experiencias efectuadas con diversos tipos de células e incluye cultivos de células en suspensión. Sin embargo, se observan diferencias notables según la naturaleza de las células, talla, edad, abundancia en el medio e incluso las

características de los medio de cultivo, suspensión, congelación y condiciones seguidas después de la descongelación.

Así, por ejemplo, para conservar de modo satisfactorio los hematíes por congelación, se puede proceder de dos maneras:

- 1) Congelación lenta (1 o 5 °C/min) en presencia de glicerol 4,5M (en torno a 42% p/v) ó de dimetilsulfóxido. Los hematíes hay que ponerlos en contacto con los agentes crioprotectores, de forma progresiva, antes de la congelación, con el fin de que puedan penetrar en las células. La descongelación debe ser rápida. El glicerol o el dimetilsulfóxido tiene que eliminarse, después de la descongelación, por lavado de los hematíes en condiciones apropiadas.
- 2) Congelación rápida ( $\geq 20$  °C/mn) en presencia de crioprotectores que no penetran en la célula, por ejemplo, lactosa, dextrano, polivinilpirrolidona. La descongelación debe ser siempre rápida.

En uno y otro caso los hematíes se conservan a -80 y aun -196°C (nitrógeno líquido).

Una congelación a velocidad intermedia permite disminuir la concentración de glicerol (en torno al 17% en lugar de 42%). También se emplea el glicerol como agente crioprotector para la conservación por congelación de espermatozoides destinados a la inseminación artificial.

Otro tipo de célula que se conserva con gran éxito mediante la congelación son las bacterias lácticas. El modo operatorio es; esquemáticamente, así: cultivo en un medio apropiado, separación de las bacterias por centrifugación, colocación en suspensión en leche descremada estéril, congelación y conservación a -196°C. Las bacterias lácticas, una vez descongeladas, recuperan casi instantáneamente su actividad.

No obstante, en el caso de algunas bacterias la congelación puede modificar de tal forma la permeabilidad de las membranas y el metabolismo, que tan sólo el empleo un medio nutritivo especialmente enriquecido, permite la supervivencia después de la descongelación.



Para algunas células, lo que asegura una alta supervivencia es una congelación ultra rápida, asociada a una descongelación rápida; en este caso, habría una vitrificación intracelular en lugar de la cristalización.

No está completamente aclarado el modo de acción de los agentes crioprotectores. Se piensa que el glicerol se intercambia por una parte de agua intracelular y queda en la célula durante la congelación lo que impide la cristalización y un aumento excesivo de la concentración salina. Esto se realiza tan sólo durante la congelación lenta; en caso de congelación rápida, por el contrario, la presencia de glicerol es desfavorable, porque en ausencia total de deshidratación de la célula el glicerol facilita la cristalización intracelular.

Pueden utilizarse con éxito, para la congelación de algunos alimentos, diversos agentes crioprotectores que penetran en la célula (glicerol, sorbitol, monosacáridos, sales, etc.); reducen concretamente la desnaturalización de las proteínas de la leche, yema de huevo, músculo del pescado. [2]

### **3.2.4.- Modificaciones de los Alimentos Durante el Almacenamiento en Estado Congelado**

Los alimentos congelados son inertes: su calidad desciende progresivamente durante el almacenamiento a causa de modificaciones químicas y físicas. [9]

#### **Duración del Almacenamiento**

La tabla 6, entrega, aproximadamente, los tiempos máximos de conservación que se pueden alcanzar con diversos alimentos, mientras mantienen su calidad a un nivel satisfactorio (en condiciones de embalaje satisfactorio).

Como se ve, la duración de la conservación está claramente ligada a la temperatura; varia de una forma casi inversamente exponencial con la temperatura de la cámara fría ( $y = a - b^x$ ).

Temperatura	-30°C	-18°C	-12°C	-7°C
	Meses			
<b>Jugo de naranja</b>	-	10	4	-
<b>Frutillas (con azúcar)</b>	-	12	2,4	0,3
<b>Porotos Verdes</b>	24	10	3	1
<b>Arbejas</b>	24	10	3	1
<b>Espinacas</b>	24	10	< 3	0,7
<b>Pollo eviscerado</b>	-	7	3	-
<b>Pollo asado</b>	14	3	< 1	< 0,6
<b>Carne de vaca (cruda)</b>	24	13	5	< 2
<b>Carne de cerdo (cruda)</b>	15	8	< 4	< 1,5
<b>Pescado magro</b>	8	3 a 5	< 2	< 1,5
<b>Pescado graso</b>	5	2	< 1,5	0,8

*Tabla Nº 6: Duración máxima de almacenamiento de diversos productos a distintas temperaturas.*

Teóricamente debería seleccionarse la temperatura de almacenamiento para cada producto en función del tiempo de conservación previsto, que depende de las demoras de transporte, de la renovación de los stocks, etc. En la práctica, la temperatura de -18°C es la que se adopta para la mayoría de los alimentos.

El decreto francés del 9 de Septiembre de 1964, concerniente al almacenamiento de los alimentos “supercongelados” indica que la mención “supercongelado” implica: 1) una congelación rápida a una temperatura igual o inferior a -18°C; 2) mantener el alimento a esta temperatura durante todo el proceso de almacenamiento.

Conviene recordar que el almacenamiento antes de la congelación puede representar una etapa crítica para la calidad del producto final; en el caso de los productos vegetales que aun mantienen una respiración intensa después de su recolección, es indispensable un enfriamiento inmediato. [9]

## Reacciones de Deterioro

Algunas reacciones de deterioro que ocurren durante el almacenamiento de los alimentos congelados y más aun mientras se congelan, están catalizadas por enzimas; un caso característico es el pardeamiento enzimático de frutas que se mantienen en estado crudo. La adición de ácido ascórbico, azúcar o anhídrido sulfuroso permite inhibir este pardeamiento antes y después de la congelación. La mayoría de las legumbres deben escaldarse antes de la congelación, debido especialmente a que algunas enzimas, mantienen cierta actividad, aun a temperaturas muy bajas. En el caso del pescado congelado, la actividad enzimática (lipasas) puede contribuir a la desnaturalización de las proteínas musculares.

Entre reacciones no enzimáticas que pueden ocurrir en los alimentos congelados, se deben mencionar la oxidación de los lípidos (pescados grasos, guisantes), de la vitamina C (frutilla), pigmentos carotenoides, aromas. La degradación de pigmentos antocianicos (frutilla) o de la clorofila también constituye un factor limitante para el periodo de almacenamiento.

La conservación de la leche en estado congelado, causa una gelificación parcial de los constituyentes proteicos. Los geles glucídicos hidratados, por ejemplo de pectinas, también pueden sufrir una desestabilización debido a su almacenamiento congelado (floculación de materias en suspensión, de algunos jugos de fruta).

La recristalización progresiva de los cristales de hielo, unida al aumento de su tamaño, modifica desfavorablemente la textura de diversos alimentos, tales como el pollo congelado, que toma un aspecto vítreo. Se retarda esta recristalización procurando mantener una temperatura baja y constante.

Las fluctuaciones de temperatura también contribuyen a aumentar el peligro de una desecación superficial; esto origina una pérdida de peso y al mismo tiempo favorece la oxidación de los lípidos (pescado), su endurecimiento (pescado y carne) y la aparición de manchas, pardas o verdosas en las aves, negras en la carne de vaca, denominadas en ingles "freeze burn" (quemaduras por hielo). El glaseado constituye una buena protección; también el embalaje, siempre que sea impermeable al vapor de agua y se adhiera al producto (envasado bajo vacío). Si el embalaje no se

adhiera al producto puede aparecer una desecación superficial de éste y la condensación de agua en la parte interior del embalaje.

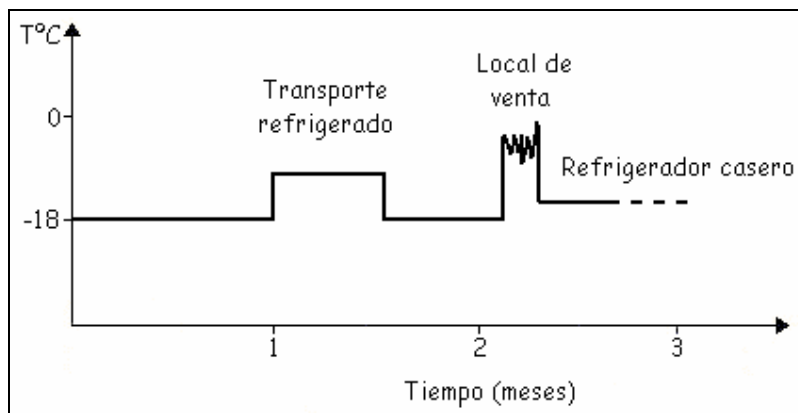
Estos fenómenos de desecación y oxidación justifican el interés de los embalajes impermeables, no sólo al vapor sino también al oxígeno, así como el acondicionamiento bajo vacío. También tiene importancia la protección contra la luz. Hoy surgen nuevos condicionantes para los productos congelados: embalajes resistentes al calor que permitan la descongelación en agua hirviendo o en los hornos de microondas, platos de aluminio para comidas completas listas para el consumo. [2]

### 3.3.- Tolerancia Tiempo Temperatura de los Alimentos Congelados

Durante su almacenamiento frigorífico, un alimento congelado se mantiene a una temperatura prácticamente constante; generalmente de -18°C. Por el contrario, durante el transporte, la exposición en lugares de venta al por menor y finalmente en los refrigeradores caseros o de los restaurantes, queda expuesto a los inevitables cambios de temperatura por periodos más o menos prolongados. Se puede representar esta serie de condiciones por un diagrama como el de la figura 9.

Si cada punto de ese trazado, se le aplica el valor de velocidad de degradación a la temperatura correspondiente y se llevan estos valores sobre la ordenada en función del tiempo, se obtiene una curva que delimita con el eje de abscisas una superficie proporcional a la degradación global resultante de la suma de degradaciones parciales surgidas a cada temperatura. Se puede entonces determinar experimentalmente la superficie máxima, sobrepasada la cual el alimento no es consumible. Esta relación es del tipo:

$$\text{Degradación global} = \int \text{velocidad de degradación a la temperatura } T * dt$$



**Figura Nº 9:** Variación de la temperatura durante la distribución.

Por ejemplo, en el caso de las fresas congeladas, la experiencia indica que un periodo de 10 días a -7°C motiva una degradación crítica del color; entonces se puede plantear cuál sería, a otra temperatura, la duración de almacenamiento para una degradación idéntica; también se puede, por la

medida del color, hacerse una idea del desconocido “pasado frigorífico” de un lote de fresas congeladas.

Estos cálculos referentes a los efectos tiempo-temperatura, sobre alimentos congelados sólo son aproximados: aunque el orden de los factores tiempo-temperatura no actúa y los efectos sean claramente aditivos parece que pequeñas variaciones de temperatura originan imprevisibles modificaciones de textura; por otro lado, las velocidades de degradación no siguen siempre la ley de Arrhenius; por último, es imposible evaluar el deterioro mediante un índice objetivo y medible. En concreto, estas consideraciones de orden teórico, por muy interesantes que sean tienen hasta el momento, más valor cualitativo que cuantitativo.

Como norma general, las reacciones de deterioro que ocurren durante las diversas fases de la conservación de un alimento congelado, tienden a atenuar las diferencias cualitativas debidas al modo de congelación rápida o lenta. Por lo tanto, es fundamental para no perder los beneficios de una congelación rápida o lenta, conseguir que las condiciones de almacenamiento, transporte, etc. Sean lo más favorables posibles. [2]

### 3.4.- Calculo de la Potencia Frigorífica

Desde el punto de vista termodinámico la congelación de un alimento consiste en retirar una cierta cantidad de calor, de manera que se haga pasar su temperatura de un determinado nivel a otro inferior que corresponda al deseado. La potencia frigorífica necesaria se define como la cantidad de calor a retirar por unidad de tiempo y se expresa por ejemplo kcal/min

La cantidad total de calor a retirar es igual al calor específico del alimento multiplicado por la diferencia entre la temperatura inicial y final.

$$q = \int C_p \cdot dt + \lambda \quad (1)$$

No obstante, hay que tener en cuenta el calor del cambio de estado del agua (y algunas veces el de los lípidos) del alimento debido al hecho de que el calor específico del hielo es inferior al del agua líquida. El cálculo se puede fraccionar como sigue:

- 1) Calor que hay que retirar para llevar el agua del alimento de la temperatura inicial hasta 0°C (es necesario conocer el contenido de agua del producto).
- 2) Calor latente de cristalización del agua; también es preciso introducir aquí una corrección, para el agua fuertemente adsorbida.
- 3) Calor que hay que retirar para descender la temperatura del hielo a 0°C a la temperatura final de congelación.
- 4) Calor que hay que retirar para llevar los componentes sólidos del producto de la temperatura inicial a temperatura final; los calores específicos de los diferentes constituyentes alimenticios se encuentran tabulados; en todo caso se puede considerar de forma general, 0,5 para los líquidos y 0,3 para los demás constituyentes sólidos (hielo excluido); se necesita, por tanto conocer la composición del producto. [2]

El cálculo puede hacerse también de forma mucho más sencilla gracias a tablas (anexo 1 pagina 109) que indican la composición de los alimentos y especialmente su contenido de agua; y junto con relaciones, que de acuerdo a

su composición nos entregan el calor específico global antes y después de la congelación; la temperatura media de congelación; el calor latente de fusión. Por lo tanto se puede estimar el calor específico antes de la congelación, calor latente de fusión y el calor específico después de la congelación con estas relaciones:

Producto	% Agua	Temperatura congelación (Te, °C)	Cp1 (kcal/kg.°C)	λ (kcal/kg)	Cp2 (kcal/kg.°C)
Espárragos	94	-1.2	0.93	75	0.47
Uva	85	-1.6	0.88	69	0.48
Vacuno limpio	72	-1.7	0.77	56	0.42
Pollo	74	-2.8	0.76	59	0.40
Pescado Limpio	73	-1.8	0.82	0.43	61
Ostras	80	-2.8	0.83	63	0.44

**Tabla Nº 7:** Propiedades de algunos alimentos (Según apuntes de Indura 2008, ver anexo 1).

- Conocida la composición de agua del alimento

$$C_p = 0,8 \cdot (\% \text{ Agua}) + 0,2 \quad \text{Desde la temperatura inicial hasta la de congelación en kcal/kg.°C (2)}$$

$$L = 80,0 \cdot (\% \text{ Agua}) \quad \text{Calor latente de fusión en kcal/kg (3)}$$

$$C_p = 0,3 \cdot (\% \text{ Agua}) + 0,2 \quad \text{Desde la temperatura de congelación a temperatura final de congelación en kcal/kg.°C (4)}$$

De una forma general, los alimentos que contienen poca agua exigen menos refrigerante para su congelación que lo que son ricos en agua, por que tanto el calor específico, como el calor latente de fusión son más elevados que los de los otros constituyentes de los alimento.

Una vez calculado el calor total a retirar, es posible calcular la potencia frigorífica necesaria. Supongamos, por ejemplo, que se utiliza nitrógeno líquido



a  $-195^{\circ}\text{C}$  y que el nitrógeno gaseoso obtenido al final de la congelación está a  $-50^{\circ}\text{C}$ . Cada gramo de nitrógeno empleado va a absorber su propio calor de vaporización a  $-195^{\circ}\text{C}$  y el producto del calor específico del nitrógeno gaseoso por la diferencia de temperatura entre  $-195$  y  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Para calcular la potencia frigorífica necesaria por unidad de tiempo, se necesita conocer la cantidad de alimento que se intenta congelar por unidad de tiempo.

## Capítulo 4: Selección del Proceso de Congelación

En general existen tres sistemas de congelación que se utiliza en la industria alimenticia estos son:

- Congelación con Nitrógeno Líquido (LIN).
- Congelación con frío mecánico.
- Congelación con anhídrido carbónico.

### 4.1.- Congelación LIN

Para obtener una alta velocidad de congelación se debe someter al producto a temperaturas muy bajas, ya que una alta diferencia de temperatura con el medio hace que la transferencia de calor sea muy rápida.

La congelación con Nitrógeno Líquido es, dentro de las técnicas de congelación, la que más ventajas presenta.

La técnica IQF (Individual Quick Frozen = Congelación Individual Rápida) busca precisamente una alta velocidad de congelación.

- La Congelación Criogénica está basada en el contacto de un líquido criogénico con el producto a congelar.
- El Nitrógeno Líquido (LIN) se encuentra a una temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ , por esto la congelación con LIN recibe la denominación de “ultrarrápida”.
- No existe otro método industrial de congelación a más baja temperatura, es decir, de una velocidad mayor.

## **4.2.- Congelación Mecánica**

Referida a los equipos de frío que utilizan la compresión - descompresión de un gas (R-12, R-502, NH<sub>3</sub>, HFC-1340, etc.) para obtener bajas temperaturas, se les denomina Equipos de Frío mecánico.

Estos tipos de equipos operan a temperaturas del orden de -20°C y en los más sofisticados y de mayor valor se obtienen temperaturas de hasta -40°C.

## **4.3.- Congelación con Anhídrido Carbónico**

En general este tipo de congelación utiliza el anhídrido carbónico como fluido congelante, este tipo de congelación utiliza el mismo principio que la utilizada con LIN, pero presenta desventajas frente a las dos restantes congelaciones por un punto de vista operacional que más adelante se comparará.

## **4.4.- Ventajas de la Congelación con LIN Sobre Otros Sistemas (por Anhídrido Carbónico, Frío Mecánico)**

### **4.4.1- Congelación LIN v/s Congelación con Anhídrido Carbónico**

La tabla 8 presenta la comparación entre la congelación por N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

En primer lugar, el nitrógeno pasa de líquido a gas a -196°C, mientras que el anhídrido carbónico lo hace a -79°C, lo que supone una diferencia de 117°C, como consecuencia que la congelación con nitrógeno líquido da una mayor rapidez de congelación. Un ejemplo es que el túnel de CO<sub>2</sub> de iguales características que uno de nitrógeno, entrega 2/3 de la producción de éste último.

En segundo lugar, el nitrógeno es un gas inerte que protege al producto, mientras que el anhídrido carbónico reacciona con la parte acuosa del alimento produciendo ácido carbónico, que puede dar un cierto sabor picante, cambiando las características del alimento en cuestión.

En tercer lugar, el nitrógeno al pasar de -196°C a -20°C (Temperatura normal de congelación de los alimentos), entrega 72 *kcal/lit*. Por su parte, un kilo de CO<sub>2</sub> al pasar del estado líquido (forma en que se encuentra almacenado) al sólido (nieve carbónica) proporciona 60 *kcal/kg*.

<b>Comparación entre la congelación por nitrógeno Líquido y anhídrido carbónico</b>			
<b>Elemento de Comparación</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Anhídrido Carbónico</b>	<b>Ventajas del N<sub>2</sub></b>
<b>1. Temperatura</b>	-196°C	-79°C	Mayor rapidez de congelación
<b>2. Reacciones</b>	Inerte	Forma ácido carbónico en contacto con el	Inerte
<b>3. Capacidad frigorífica</b>	90.8 kcal / kg (-196°C) – (-20°C)	60 kcal/kg	Mayor capacidad
<b>4. Costo</b>	1 US\$	1.5 US\$	Menor costo
<b>5. Almacenamiento</b>	Almacenamiento a temperatura ambiente	Almacenamiento en frío	Más seguro y barato
<b>6. Seguridad</b>	Inerte. En el aire está presente (78%)	Gas tóxico, produce asfixia	Más seguro
<b>7. Presión de almacenamiento</b>	Baja presión de almacenamiento (3 Kg./cm <sup>2</sup> )	20 Kg./cm <sup>2</sup>	Menor presión
<b>8. Peso en comparación con aire</b>	Menos pesado que el aire	Más pesado que el aire (peligro)	Menos denso
<b>9. Canalización</b>	Sin atascos	Atascos si se produce nieve carbónica	Sin atascos
<b>10. Túneles de congelación</b>	Fácil regulación	Difíciles de regular (nieve carbónica)	Más fácil de regular

**Tabla Nº 8:** Comparación esquemática entre congelación LIN vs. congelación con anhídrido carbónico.

En cuarto lugar, para el mismo precio de un kilo de nitrógeno líquido comparado con un kilo de CO<sub>2</sub>, este último tendría un costo como fluido de congelación del orden del 50% más, ya que veíamos que el N<sub>2</sub> entrega 90.8 kcal / kg y el CO<sub>2</sub> da 60 kcal/kg .

En quinto lugar, los tanques de almacenamiento de nitrógeno líquido van súper aislados a temperatura ambiente, con unas pérdidas diarias para un depósito de 20.000 litros del orden del 0,4% de su capacidad, sólo cuando no existe consumo. Los tanques de CO<sub>2</sub> llevan un equipo de frío a fin de licuar los gases que se producen por la evaporación de CO<sub>2</sub>, como consecuencia del calor que entra por las paredes (no súper aisladas). No existen pérdidas de CO<sub>2</sub> en estos tanques, pero en cambio necesita el equipo de frío mencionado y consumen energía eléctrica que se contrapone con las pérdidas del tanque de nitrógeno líquido. Por ejemplo, un depósito de 20.000 kilos de CO<sub>2</sub> lleva un equipo de frío de 6 CV equivalente a un consumo de energía eléctrica de 4,5 kw/h, lo que supone un costo algo mayor que el equivalente por pérdidas en el depósito de N<sub>2</sub>.

En sexto lugar, el nitrógeno ofrece mayor seguridad ya que al ser inerte y respirarlo continuamente (esta presente en el aire en una proporción del 78%) no presenta ningún riesgo para la salud, mientras que el CO<sub>2</sub> es tóxico y a dosis superiores al 4,6% acaba por producir la muerte por asfixia.

En séptimo lugar, el N<sub>2</sub> se almacena a baja presión (unos  $3\text{ kg/cm}^2$ ) lo que presenta muchos menos riesgos que el CO<sub>2</sub> que se conserva a  $20\text{ kg/cm}^2$  y a una temperatura de -20°C. La vigilancia y la seguridad deben controlarse muy cuidadosamente en el caso del CO<sub>2</sub>. Si el tanque baja de  $5,12\text{ kg/cm}^2$  (presión punto triple), todo el CO<sub>2</sub> líquido pasa a CO<sub>2</sub> sólido, tardándose días en deshacer el bloqueo, para lo que hay que tomar debidas precauciones, pues se corre el riesgo de explosión en los circuitos,

En octavo lugar, el CO<sub>2</sub> es mucho más pesado que el aire, lo que hace que se acumule en el fondo de los depósitos creando situaciones de peligro y haciendo difícil su evacuación. El N<sub>2</sub> es menos pesado que el aire.

En noveno lugar, el CO<sub>2</sub> líquido puede producir atascos en la canalización, debido a que se puede formar nieve carbónica que bloquea la conducción al pasar de  $20\text{ kg/cm}^2$  a la presión atmosférica, por lo que la congelación puede sufrir interrupciones.

En décimo lugar, los túneles de congelación de CO<sub>2</sub>, son difíciles de regular. Es normal ver salir del túnel junto con el producto, trozos de nieve

carbónica. Esto se debe a un mal intercambio térmico entre el gas y la superficie del producto a congelar.

#### 4.4.2.- Comparación Entre Congelación LIN v/s Congelación FM

En la actualidad las empresas que se han desarrollado para que sus productos tengan durabilidad en el tiempo, es decir que trabajan con productos congelados, han implementado grandes maquinarias que se basan fundamentalmente en la compresión y descompresión de gases refrigerante como los son R-12, R-502, NH<sub>3</sub>, HFC1340, etc. Estas grandes maquinarias aun que si son de uso rutinario en las empresas dedicadas a la congelación no siempre dan abastos a la producción siempre creciente de la alimentación por lo que tienden a ocupar además de sus métodos de frío mecánico en paralelo un método criogénico, a continuación se hace una comparación entre estos métodos.

<b>Comparación entre la congelación por nitrógeno Líquido y frío mecánico</b>			
<b>Elemento de Comparación</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Frío mecánico</b>	<b>Ventajas del N<sub>2</sub></b>
<b>1. Pérdidas de peso</b>	0.1%	2.5 - 3.2%	Menor pérdida
<b>2. Velocidad de congelación</b>	3 a 15 min.	20 a 180 min.	Congelación más rápida
<b>3. Fluido refrigerante</b>	Nitrógeno(-196°C)	R-12, R-502, NH <sub>3</sub> , etc (-25 a -40 °C)	Menor temperatura
<b>4. Precio de un túnel</b>	1 US\$	4 a 6 US\$	Menor costo inicial del equipo
<b>5. Mantenimiento</b>	1%	4 a 6 %	Menor costo de mantenimiento
<b>6. Calidad microbiológica</b>	Detención más rápida del crecimiento bacteriano	Detención más lenta	Mejor calidad microbiológica
<b>7. Calidad física</b>	Sin exudado, frescura, inertización	Exudado, color, oxidación por aire	Mejor calidad física.

**Tabla Nº 9:** Comparación esquemática entre congelación LIN vs congelación por frío mecánico.



Como se ve en la tabla 9, en primer lugar y debido a la rapidez de la congelación, las pérdidas de peso son imprescindibles (menos del 0.1%) en la congelación con N<sub>2</sub>, mientras que con frío mecánico estas pérdidas son 30 veces mayores

Segundo, en los túneles de congelación con nitrógeno líquido el tiempo que demoran los productos alimenticios en alcanzar la temperatura deseada de congelación normalmente variaran entre 3 a 15 minutos, dependiendo de las características (espesor, largo, área) y del tipo de producto (carne, vegetales, fruta, etc.), mientras que los túneles de frío mecánico, el tiempo de permanencia del producto en los mismos hasta alcanzar la temperatura fijada, puede variar desde 20 minutos hasta 3 horas (aproximadamente).

En tercer lugar, el nitrógeno es un gas inerte que se inyecta a una temperatura muy baja (-196°C), mientras que en los túneles de frío mecánico, es el aire el que circula a temperaturas más altas (-25 a -40°C). Además, la intensa circulación de aire sobre los productos no es buena ya que puede contribuir a la oxidación de los mismos.

En cuarto lugar, el precio de un túnel con equipo incorporado de frío es cuatro a seis veces más caro que un túnel de nitrógeno. También el mantenimiento de los túneles de frío mecánico tiene mayor costo (4 a 6% aproximadamente).

En sexto lugar tenemos un factor importantísimo de comparación: la calidad microbiológica. Debido a la velocidad más rápida de congelación con el nitrógeno líquido, la detención del crecimiento microbiano también es mucho más rápida que cuando se utiliza frío mecánico. Además, el nitrógeno es inerte, mientras que el aire en circulación que se utiliza en los túneles mecánicos contiene oxígeno que es necesario para la vida de los microorganismos.

En séptimo lugar tenemos otro importante punto de comparación: la calidad física. En el túnel de nitrógeno líquido se consigue una congelación rápida que mantiene muy bien las características iniciales del producto (color, olor, sabor, textura, frescura), Incluso al descongelar, apenas se produce exudado (pérdida de agua). Con los túneles de frío mecánico, la congelación es más lenta lo que puede favorecer la formación de cristales grandes en los espacios intercelulares de los tejidos de los alimentos. Esto lleva consigo una destrucción mayor de la estructura inicial del producto, dando lugar a pérdidas

del agua (exudado) en su posterior descongelación. También se puede producir cambios sensibles en otras características físicas del alimento (pardeamiento, oxidación por el aire, etc.).

#### **4.5.- Métodos de Congelación Criogénica Utilizando Nitrógeno Líquido**

Existen tres métodos mediante los cuales los productos alimenticios pueden ser congelados usando Nitrógeno Líquido:

##### **4.5.1.- Congelación por Inmersión**

Los productos alimenticios son directamente inmersos en un baño de Nitrógeno Líquido.

Los tiempos de residencia de este producto en el baño de inmersión pueden variar (y por lo tanto el consumo de LIN) ya sea entre algunos segundos y un minuto, de acuerdo a si se desea sólo un congelamiento superficial o llegando a congelar hasta el centro de los productos.

Este proceso es utilizado para selección y principalmente para pequeños productos que deben ser congelados en forma individual o separada.

La diferencia térmica entre un producto que es sumergido en el baño y el LIN, (cercana a  $-200^{\circ}\text{C}$ ) hace que se produzca una congelación pareja y casi instantánea sobre la superficie del producto, formándose una costra de congelado, acelerando en forma significativa el proceso, que puede continuarse con cualquier sistema adicional.

El nivel de profundidad del baño de inmersión, es controlado a través de los cambios de presión hidrostática en el fondo del recipiente.

Para lograr un total aprovechamiento del Nitrógeno, es recomendable conectar la salida del Nitrógeno gaseoso al túnel que da término a la congelación (sea éste frió mecánico o de Nitrógeno), ya que se utiliza también el calor sensible que puede entregar este gas a partir de los  $-196^{\circ}\text{C}$ , temperatura de salida del equipo.

#### **4.5.2.- Congelación por Aspersión**

Este método consiste en pulverizar el Nitrógeno Líquido a través de un difusor dentro de la cámara de congelación. De este modo, el Nitrógeno es evaporado completamente sobre el producto a través de una superficie de contacto muy amplia. Después de absorber el calor latente de vaporización, el gas comienza a absorber el calor sensible, enfriando simultáneamente el producto, mientras el gas se calienta previa salida de la cámara.

Empíricamente, se ha determinado que la temperatura de equilibrio que se alcanza entre gas y producto, es de 30°C superior a la de regulación de ciertos equipos. Es decir, si la regulación del equipo se ajusta en -60°C, el Nitrógeno sale del equipo a -30°C. Este remanente de energía en frío, se puede utilizar para pre-enfriar el producto. Para aumentar la eficiencia en la transferencia del calor, se combina la difusión de LIN con un sistema de ventilación forzada que hace que el contacto entre el fluido refrigerante y el producto sea óptimo.

Además de un enfriamiento eficiente, esta técnica reduce el choque térmico y ayuda a homogeneizar la temperatura dentro de la cámara.

Dentro del sistema de congelación por spray o aspersión de Nitrógeno Líquido, existen fundamentalmente dos tipos de equipos:

1. Cámara estacionaria, en que el producto se carga en un carro con bandejas.
2. Túneles de alimentación continua, en que el producto se mueve en una correa transportadora en contracorriente con el Nitrógeno Líquido.

#### **4.5.3.- Congelación por Placas**

Para el caso de cierto tipo de productos muy blandos que requieran mantener la preforma que se ha hecho durante el proceso, es posible utilizar congeladores continuos de placas enfriadas por Nitrógeno Líquido.

Los equipos que funcionan en estos casos, enfrían una cinta continua de placas de acero inoxidable, las que se encuentran en contacto con el producto a  $-150^{\circ}\text{C}$ .

A través de este proceso, es posible congelar los productos solamente en su base, pudiendo continuar el proceso con cualquier sistema, evitándose la marca generada por las cintas de transporte.

## **4.6.- Equipos para Realizar la Congelación con Nitrógeno Líquido en Alimentos por Aspersión**

En el estudio de la congelación con fluidos criogénicos y especialmente con nitrógeno líquido, encontramos que existen dos tipos de equipos utilizados para la congelación satisfactoria de alimentos, uno denominado Batch, el cual es un equipo que no es continuo (cámara estacionaria), y el túnel criogénico, el cual es un equipo que posee una cinta transportadora donde los alimentos pasan por el interior de este, por esta característica le da una cualidad de ser un equipo de operación continua.

### **4.6.1.- Equipo de Congelación BATCH**

Es un Equipo de Congelación estático, del tipo Criogénico, en el cual se utiliza Nitrógeno Líquido como refrigerante.

Este equipo de congelación es manufacturado completamente en acero inoxidable 304 y es diseñado para dar una alta calidad en el proceso de congelación de distintas plantas, lo que permite aplicar todo el beneficio del nitrógeno líquido.

En la cámara estacionaria el producto se carga en bandejas y se introduce en la cámara.

El LIN es pulverizado directamente sobre el producto en una amplia zona de contacto, en una primera etapa cambia de fase, se vaporiza, absorbiendo en forma casi instantánea el calor del producto. Después de absorber calor latente de vaporización, en donde solo hay un cambio de estado, la temperatura del Nitrógeno gaseoso es de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el gas de nitrógeno continúa absorbiendo calor del producto, hasta llegar a temperaturas de equilibrio entre el gas y el producto, posteriormente es evacuado a la atmósfera.

A continuación se describe esquemáticamente un Sistema de Congelación Criogénica, basado en un túnel estático.

### **Sistema Típico de Congelación Criogénica**

1. Estanque Criogénico, capacidad según requerimientos, su recarga debe efectuarse con frecuencia aproximada de una vez por semana.
2. Línea Aislada, transporta Nitrógeno Líquido a temperatura ultra baja desde el estanque hasta el equipo de congelación.
3. Equipo de Congelación, compuesto por un gabinete construido íntegramente en acero inoxidable, un sistema de aspersion de Nitrógeno Líquido, ventiladores para homogeneizar la temperatura de la cámara y un sistema electrónico para el control de la temperatura.
4. Sistema de Control de Temperatura, controla la inyección de Nitrógeno líquido al interior del equipo de congelación, mediante el accionamiento de una válvula solenoide que abre o cierra según los parámetros de tiempo y temperatura definidos por el operador en el panel de control.
5. Producto, se ingresa en carro con bandejas (equipamiento estándar del equipo), su capacidad de carga depende del modelo seleccionado (desde 100 *kg/h* hasta 400 *kg/h*).

La figura 10 muestra un equipo Batch de menores dimensiones que uno normal pero de operación similar.



**Figura Nº 10:** Mini Labb, equipo similar al equipo Batch, de igual forma de trabajo pero de dimensiones menores.

## **4.6.2.- Túnel Criogénico**

### **Descripción General**

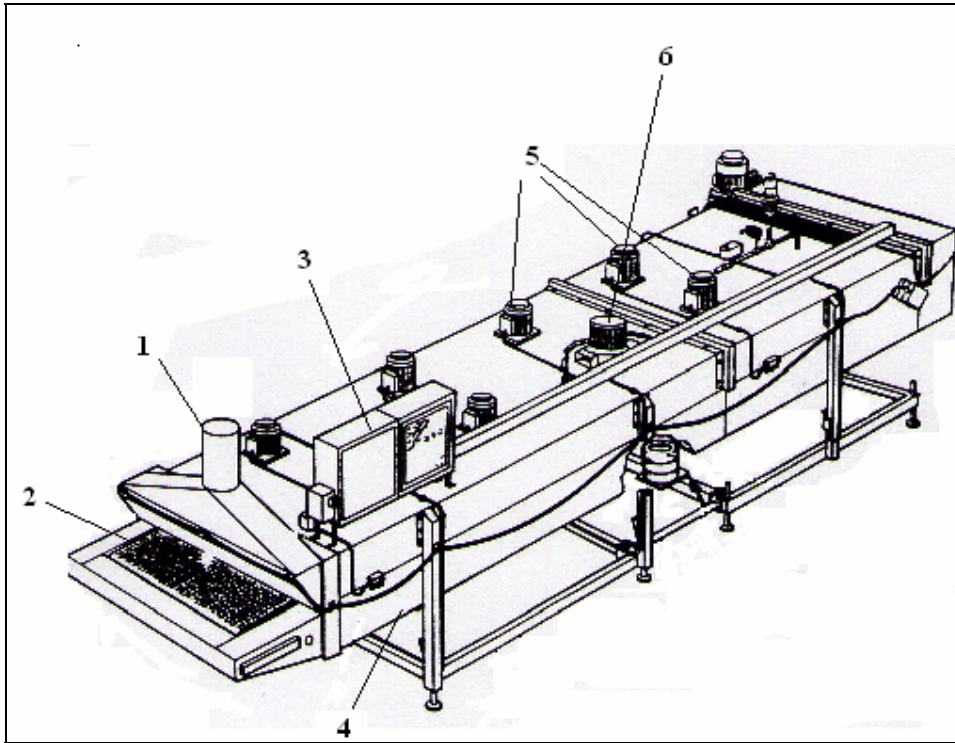
El Nitrógeno líquido es rociado en el interior del túnel para congelar los alimentos de manera rápida, consistente y uniforme. La mayor parte del gas es movida por ventiladores en dirección opuesta al sentido de movimiento de los alimentos, con lo cual se logra pre-enfriar los productos alimenticios aumentando así la eficiencia de enfriado.

### **Descripción del proceso**

El túnel opera como un intercambiador de calor. Consta de una cavidad aislada donde una cinta transportadora traslada los productos alimenticios desde un borde a otro, cruzando completamente el interior del túnel. Un extractor de gases localizado sobre la entrada de los productos extrae los gases utilizados a través del ducto de descarga, liberando los gases a en la atmósfera fuera del inmueble.

La operación del proceso es sencilla, principalmente consiste en encender el aire comprimido y los suministros eléctricos, cerrar la parte inferior del túnel, encender los ventiladores y finalmente digitar la temperatura deseada y velocidad de la cinta requerida. Cuando el túnel alcanza la temperatura deseada (temperatura en el set-point), el producto puede ser ingresado en el túnel. Al final de un período productivo, los ventiladores axiales son apagados. Mientras la sección inferior del túnel es bajada, la velocidad de la cinta transportadora es reducida automáticamente a un valor bajo, lo cual aumenta la seguridad durante la limpieza. Al final de un corto periodo de tiempo de calentamiento interno del túnel, el cual asegure que el agua de lavado no se congelará, el túnel puede ser lavado previo apagado de todos los suministros.





**Figura Nº 11:** Túnel criogénico continuo.

De acuerdo a la figura 11, se enumeran los siguientes componentes:

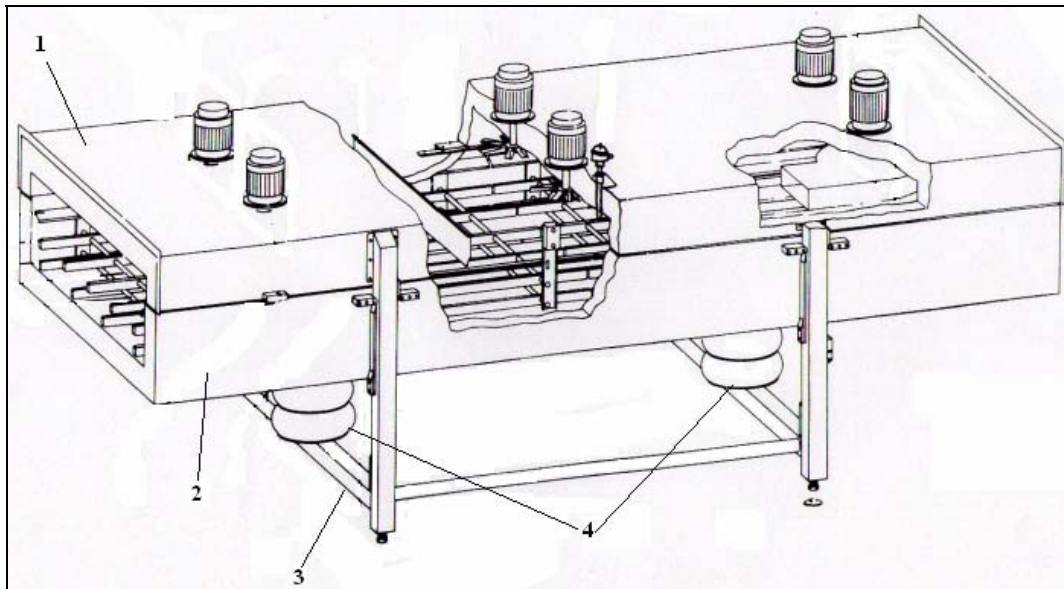
- 1.- Extractor de gases.
- 2.- Entradas de los productos.
- 3.- Panel para encender el aire comprimido y los suministros eléctricos.
- 4.- Parte inferior del túnel (parte móvil).
- 5.- Ventiladores axiales.
- 6.- Turbina.

## **Componentes Principales del túnel Criogénico**

### **Túnel**

Este túnel modular está fabricado en acero inoxidable. Cada sección está compuesta por 2 placas y tiene aproximadamente 125 [mm] de aislamiento térmico entre la capa interna y externa. Todas las secciones del túnel tienen partes separables inferior y superior, siendo esta última fija a la estructura del túnel. La parte inferior del túnel baja para dar acceso al interior del túnel y así facilitar una minuciosa limpieza, inspección y mantención. Las partes superiores de la sección central están atornilladas unas a otras y a las secciones de los extremos del túnel. Las partes inferiores de las partes central pueden ser puestas juntas hasta un máximo de 10 [m]. Cada sección del túnel esta montada sobre una estructura soportante rígida de acero inoxidable, la cual en la sección central está apernada a la parte superior del túnel (la parte superior del túnel es fija).

Los fuelles neumáticos, sujetos a la parte inferior de la estructura soportante, son utilizados para elevar las partes inferiores de las secciones centrales del túnel y así cerrar el túnel durante el procesamiento de productos alimenticios. La presión es mantenida en los fuelles durante la operación para asegurar que no existan filtraciones a través de las uniones entre la parte superior e inferior del túnel.



**Figura Nº 12:** Vista de una sección del túnel criogénico continuo.

De acuerdo al figura 12, se enumeran los siguientes componentes:

- 1.- Sección superior
- 2.- Sección Inferior (móvil)
- 3.- Estructura soportante.
- 4.- Fuelles neumáticos.

### **Sección de Ingreso de los Productos**

Esta sección de ingreso abarca los siguientes ítems:

- El extractor de gases, el cual saca los gases del túnel.
- La tabla de carga sobre la cual los productos alimenticios son cargados para procesar en el túnel.
- Ejes, ruedas y tensores de la cinta transportadora.

## **Secciones Centrales**

Las secciones centrales alojan los ventiladores axiales, los puntos de inyección de LIN y los estantes de soporte para la cinta transportadora. El número de ventiladores instalados depende del ancho y largo del túnel. Los sensores de temperatura, localizados bajo el techo del túnel cerca del centro del túnel, proveen una señal para el sistema de control de temperatura del túnel. Switches de proximidad son puestos en las secciones centrales para proveer lo siguiente:

### **Señales de apertura y cierre de sección**

Señales de dispositivos de seguridad para prevenir que el túnel sea encendido hasta que todas las secciones estén cerradas.

Señales de dispositivos de seguridad para asegurar que las secciones son abiertas y cerradas en la secuencia correcta.

### **Sección Motriz**

La sección motriz esta compuesta por el motor de impulsión de la cinta transportadora, el eje impulsor y los piñones asociados. El eje es impulsado por un motor eléctrico, por una unidad hidráulica de velocidad variable y una caja reductora de ángulo recto montada a un lado de la sección de impulsión. La velocidad de salida de la unidad hidráulica es controlada por un servomotor para dar la velocidad de la cinta requerida, la cual es programada en el gabinete de control. Las paradas mecánicas, sostenidas por microswitches en algunos equipos, son ajustadas en la unidad hidráulica para asegurar que la velocidad esta dentro de límites aceptables.

### **Cinta Transportadora**

La cinta transportadora es una cinta continua de acero inoxidable con cadenas en sus bordes para dar impulsión positiva. Las barras cruzadas de la cinta son tejidas con cables de acero inoxidable para soportar los productos

alimenticios. La cinta se desplaza sobre tiras de polietileno de alta densidad. Estas tiras recorren el largo completo de túnel y están ajustadas sobre los miembros cruzados de los estantes de soporte de la cinta. Las compensaciones para la contracción de la correa son proporcionadas por el arreglo tensor de cadena en la sección de la entrada.

### **Sistema de Paro de Emergencia**

Cuando el sistema de parada de emergencia es usado el suministro de LIN es cortado y son detenidos los ventiladores axiales y la cinta transportadora. Cualquier movimiento de la sección inferior es también detenido. El sistema de parada de emergencia puede ser tirado o girado para una parada de emergencia. Los botones de paro de emergencia están localizados en cada esquina del túnel y también hay uno en el panel de control.

La figura 13 que se muestra a continuación es un túnel criogénico continuo utilizado en la vendimia 2009 de la viña Casa La Postolle.



**Figura Nº 13:** Túnel criogénico continuo utilizado en la congelación de uvas en la viña Casa La Postolle.

#### **4.6.3.- Controles del Proceso**

Los controles de proceso están diseñados para permitir al túnel operar de manera autónoma.

##### **I. Inyección de LIN**

El flujo de LIN dentro del túnel está regulado de acuerdo a las capacidades de transferir calor del túnel. La cantidad de LIN inyectada es la requerida para mantener la temperatura ingresada en el controlador de temperatura del túnel. El sensor de control de temperatura monitorea la temperatura del túnel, y provee una señal de entrada para el controlador de temperatura del túnel.

##### **II. Ventiladores de Circulación**

Los ventiladores de circulación (axiales) aseguran que el gas frío tenga un diseño de flujo que optimice el enfriamiento de los productos alimenticios.

##### **III. Extractor**

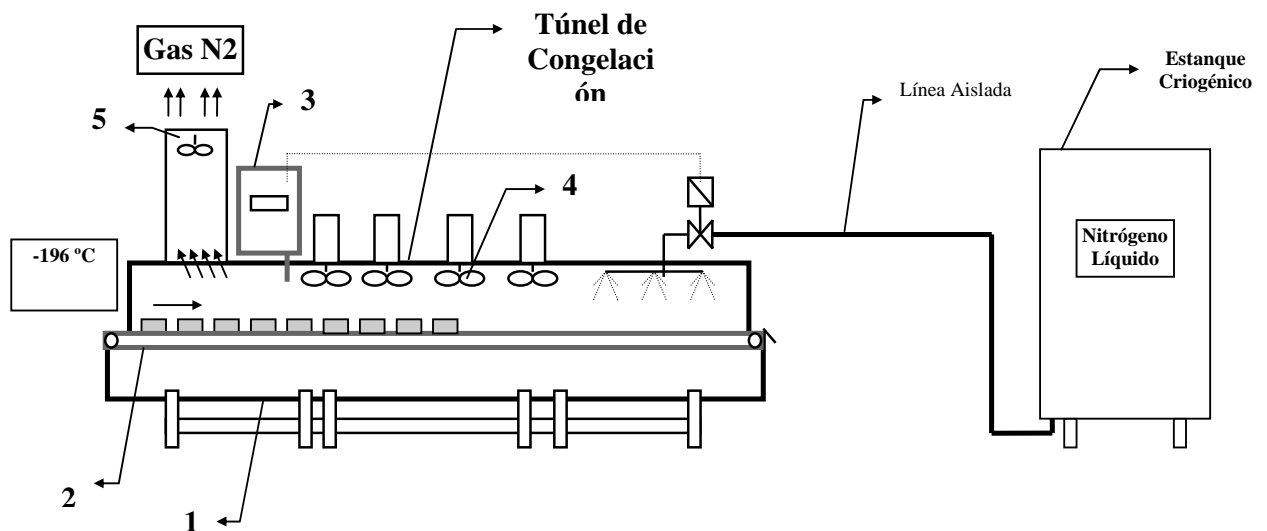
El extractor saca el gas utilizado desde el interior del túnel y lo descarga a atmósfera.

##### **IV. Cinta Transportadora**

La banda transportadora es ajustada por la unidad de control de acuerdo con la velocidad fijada en el gabinete de control, alimentando una señal de control al servomotor que fija la velocidad de la unidad de impulsión hidráulica. Si el circuito de parada de emergencia es activado por un botón de paro de emergencia, una señal es enviada al circuito de control de la unidad de impulsión de la cinta transportadora para detener la cinta. Cuando las secciones del fondo del congelador se abren, según lo detectado por el sensor de proximidad, una señal se envía a la unidad de control de la impulsión de la banda transportadora para reducir la velocidad del transportador al valor actual.

## V. Gabinete de Control

El sistema de control está alojado en un gabinete de tres cuerpos de acero inoxidable. El regulador de presión para el sistema neumático está montado en el primer cuerpo del gabinete. El segundo cuerpo contiene los otros sistemas de control. Una fuente eléctrica entrante de 380/440 Volts está conectada a los motores de los ventiladores a través de fusibles, contactores, contactos y dispositivos térmicos de sobrecarga. Una fuente de 220V AC para el motor impulsor de la cinta transportadora, el sistema de control y un rectificador/estabilizador el cual provee el suministro de 24V DC para los circuitos de proximidad y el PLC.



**Figura Nº 14:** Esquema de túnel criogénico

De acuerdo a la figura 14, se enumeran los principales componentes:

- 1.- Estructura soportante del túnel (acero inoxidable).
- 2.- Cinta transportadora de los productos alimenticios.
- 3.- Display y teclado de control del túnel.
- 4.- Ventiladores y turbina.
- 5.- Extractor de gases.
- 6.- Aspersores de inyección de nitrógeno.

<b>Modelo</b>	<b>90x12</b>
<b>Capacidad media (kg/h)</b>	750 a 1200
<b>Túnel en posición de trabajo (m)</b>	
Longitud (m)	10.00
Anchura (m)	1.30
Altura (m)	0.9
<b>Túnel en posición de limpieza (m)</b>	
Longitud (m)	10.80
Altura (m)	1.40
<b>Cámara de congelación</b>	
Longitud (m)	9.00
Anchura útil (m)	1.20
Altura útil (m)	0.28
Superficie de transferencia (m <sup>2</sup> )	10.80
<b>Tiempo de residencia min-max (min)</b>	2 a 25
<b>Peso túnel (kg)</b>	3000
<b>Potencia eléctrica</b>	6 Kw
<b>Alimentación eléctrica</b>	Tri 380 o 220

**Tabla Nº 10:** Dimensiones del equipo utilizado para la congelación de la uva en Casa La Postolle.

La tabla 10 muestra las dimensiones del equipo utilizado en la congelación de la uva en Casa La Postolle.



## Capítulo 5: Diseño del Proceso de Congelación

### 5.1.- Parámetros Generales del Proceso

Para la congelación de un alimento es necesario identificar las variables que se requieren para controlar el proceso.

<b>Variables del producto</b>	<b>Descripción</b>
1.- Tipo de producto	Para estimar las propiedades.
2.- Masa procesada de producto (kg)	Para estimar requerimientos energéticos
3.- Temperatura entrada producto (°C)	Registro de la temperatura del producto
4.- Temperatura salida producto (°C)	Registro de la temperatura
5.- Consumo LIN	Registro de consumo de LIN al término del proceso.
<b>Variables del equipo (túnel criogénico)</b>	<b>Descripción</b>
6.- Temperatura de operación (°C)	Para estimar datos energéticos y de velocidad.
7.- Tiempo de residencia producto (min)	Para la estimación de tiempos de residencia del producto.
8.- Velocidad de extractor / Temperatura extractor (% , °C)	% Siempre menor que la turbina (datos empíricos) / Registro de la temperatura durante el proceso.
9.- Velocidad de turbina / Temperatura turbina (% , °C)	% Siempre mayor que el extractor de (datos empíricos) / Registro de la temperatura.

**Tabla N° 11:** Variables generales para el proceso de congelación, con un túnel continuo.

Luego de tener claro las variables del proceso, es necesario calcular algunas de ellas, para tener una estimación de las características de la congelación, para realizarlo se necesita el balance de energía.

## 5.2.- Balance de Energía del Proceso

El balance de energía para el proceso de congelación, ya sea el equipo Batch, o el túnel criogénico se calcula de forma general para ambos casos. Es de suma importancia para saber la cantidad de nitrógeno líquido necesario en el proceso de congelación, para luego en el capítulo de la evaluación económica, saber cuanto es el gasto en nitrógeno líquido, y ver si el proceso es rentable.

### Balance para el producto alimenticio

$$Q_p = H_1 + L + H_2 \quad (5)$$

$$H_1 = Cp_1 * \Delta T_1 \quad (6)$$

$$H_2 = Cp_2 * \Delta T_2 \quad (7)$$

Reemplazando en la ecuación (5)

$$Q_p = Cp_1 * \Delta T_1 + L + Cp_2 * \Delta T_2 \quad (8)$$

### Balance para el aire

$$Q_a = m_a \cdot (Cp_a * \Delta T_a) \quad (9)$$

Donde:

$Q_p$  : Cantidad de calor producto alimenticio (kcal/kg)

$Cp_1$  : Calor específico del producto antes de solidificarse (congelarse) (kcal/kg°C)

$Cp_2$  : Calor específico del producto congelado (kcal/kg°C)

$\Delta T_1$  : Diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura de congelación (°C).

$\Delta T_2$  : Diferencia entre la temperatura de congelación y la temperatura final (°C).

$L$  : Calor latente de solidificación (kcal/kg)

$Q_a$  : Cantidad de calor aire (kcal/kg)

$Cp_a$  : Calor específico del aire (kcal/kg)

$\Delta T_a$  : Diferencia de temperatura inicial y que abandona el aire al proceso (°C)

Por tanto utilizando las relaciones (2), (3), (4), del capítulo 2, y agregando la masa del producto ( $m_p$ ) a la ecuación, y reemplazando en (8) la ecuación general queda:

$$Q_p = m_p [(0.8 * (\% \text{ Agua}) + 0.2) * \Delta T_1 + (80 * (\% \text{ Agua})) + (0.3 * (\% \text{ Agua}) + 0.2) * \Delta T_2]$$

(10)

Donde (10) es la ecuación general de balance de energía para el producto alimenticio a congelar. Esta entrega la cantidad de energía necesaria para congelar una cantidad  $m_p$  de producto alimenticio hasta una temperatura final deseada.

Ahora para calcular la cantidad necesaria de LIN, para congelar una cantidad  $m_p$  de producto se debe hacer un balance al Nitrógeno y considerar la cantidad de aire al inicio del proceso.

### Balance a LIN

$$Q_p = m_N * (L + Cp_3 * \Delta T_3) \quad \rightarrow \quad m_N = \frac{Q_p}{(L + Cp_3 * \Delta T_3)} \quad (11)$$

$$Q_a = m_N * (L + Cp_3 * \Delta T_3) \quad \rightarrow \quad m_N = \frac{Q_a}{(L + Cp_3 * \Delta T_3)} \quad (12)$$

Donde:

$m_N$ : Masa de nitrógeno, necesario para la congelación (kg).

L: Calor latente de ebullición del Nitrógeno a  $-196^\circ\text{C}$  (kcal/kg)

$C_{p3}$ : Calor específico del Nitrógeno gas (kcal/ $^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$ )

$\Delta T_3$ : Diferencia de temperatura entre la temperatura de ebullición del Nitrógeno ( $-196^\circ\text{C}$ ) y la temperatura que abandona el nitrógeno el proceso (aproximadamente  $-10^\circ\text{C}$ ), ( $^\circ\text{C}$ ).

Obteniendo la expresión del balance de energía para el producto, para el aire y la expresión de la cantidad de LIN necesario, y las propiedades de algunos alimentos (anexo 1), se puede calcular las variables de proceso que se requieran.

### 5.3.- Calculo de Variables de Diseño

El cálculo de las variables de diseño que se presenta a continuación, se basa en la experiencia realizada en Casa La postolle para la congelación de la uva, tomando este como ejemplo para otros productos alimenticios.

Problemática: Congelar  $1000\text{ kg/h}$  de uva por día (aproximadamente se trabajan 8 horas por día), la uva tiene una temperatura de entrada al proceso de aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ , la temperatura que se requiere a la salida de este es  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Con el porcentaje de agua  $84.7\%$  (tabla nº 10), y utilizando las expresiones (2), (3), (4), encontramos.

$$Cp_1 = 0.8 \cdot (0.847) + 0.2 = 0.878\text{kcal} / \text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$L = 80 \cdot (0.847) = 67.8\text{kcal} / \text{kg} \quad (3)$$

$$Cp_2 = 0.3 \cdot (0.847) + 0.2 = 0.454\text{kcal} / \text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Sabiendo que la temperatura a la entrada del proceso es  $20^{\circ}\text{C}$  ( $T_i$ ), la temperatura de congelación de la uva es  $-1.6^{\circ}\text{C}$  ( $T_e$ ), y que la temperatura requerida es  $-10^{\circ}\text{C}$ , reemplazando en (10), obtenemos:

$$Q_p = m_p \left( 0.878 \cdot (20 - (-1.6)) + 67.8 + 0.454 \cdot ((-1.6) - (-10)) \right) = m_p \cdot 90.578\text{kcal} / \text{kg} \quad (10)$$

Remplazando  $m_p$  por  $1000\text{ kg/h}$  obtenemos.

$$Q_p = 90578\text{kcal} / \text{h}$$

La cual es la cantidad energía necesaria para realizar el proceso de congelación de  $1000\text{ kg/h}$  de uva.

Para saber la cantidad de nitrógeno líquido necesario que se utilizará en el proceso de congelación del producto, se realiza el balance al nitrógeno (10), además hay que considerar el aire que se encuentra dentro del túnel de congelación al inicio del proceso que se calcula a continuación, Sabiendo que:

- Temperatura de ebullición del nitrógeno ( $T_b$ )  $-196^\circ\text{C}$
- Temperatura que abandona el nitrógeno el proceso ( $T_o$ )  $-10^\circ\text{C}$
- Calor latente de ebullición del nitrógeno (L)  $47.38 \text{ kcal/kg}$
- Calor específico del nitrógeno ( $C_{p3}$ )  $0.247 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$

$$m_N = \frac{90578}{(47.38 + 0.247 \cdot ((-10) - (-196)))} = 970.6 \text{ kg} / h$$

Ahora para calcular la cantidad de calor que hay que retirar al inicio del proceso, para llevarlo desde temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, se calcula de acuerdo a la ecuación (9) para el balance de energía al aire se tiene que:

Nota: El aire va desde temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ), hasta  $-60^\circ\text{C}$  que es la temperatura de operación, además el calor específico promedio del aire a estas condiciones se puede estimar en  $0.249 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ , por tanto remplazando en (9)

$$Q_a = 0.249 \cdot (25 - (-60))$$

$$Q_a = 21.165 \text{ kcal} / \text{kg}$$

Para estimar la cantidad de aire en el túnel criogénico suponemos que se comporta como gas ideal a estas condiciones ( $1 \text{ atm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ), por tanto utilizando la ley de los gases ideales y teniendo las dimensiones del túnel en posición de trabajo (longitud  $9 \text{ m}$ , ancho  $1.4 \text{ m}$  y alto  $0.9 \text{ m}$ ) calculamos la cantidad de aire al inicio de la operación

Datos:

$$PM_a = 28.95 \text{ g / mol}$$

$$R = 0.082 \text{ lt} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 298.15 \text{ K}$$

$$V = (9 \cdot 1.4 \cdot 0.9) \cdot 1000 = 11340 \text{ lt}$$

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{Ecuación de gases ideales (13)}$$

Sabiendo que  $n_a = m_a / PM_a$ , reemplazando en 13 y despejando para obtener la masa al inicio del proceso:

$$m_a = \frac{1 \cdot 11340 \cdot 28.95}{0.082 \cdot 298.15 \cdot 1000} = 13.42 \text{ kg}$$

Por lo tanto la masa en el inicio del proceso de aire ( $m_a$ ), es 47.24kg, ahora para estimar la cantidad calor necesario para llevar el aire a  $-60^\circ\text{C}$ , reemplazo en la ecuación de balance para el aire (9)

$$Q_a = 21.165 \text{ kcal / kg} \cdot 13.42 \text{ kg} = 284.03 \text{ kcal}$$

Ahora del balance de energía para el aire, se estima la cantidad de nitrógeno necesaria (ecuación 12).

$$m_N = \frac{Q_a}{(L + Cp_3 \cdot \Delta T_3)} \quad \text{Reemplazando,}$$

$$m_N = \frac{284.03}{(47.38 + 0.247 \cdot ((-10) - (-196)))} = 3.04 \text{ kg}$$

Para comenzar un día de operación se tiene que utilizar 3.04 kg de nitrógeno líquido. Considerando que el aire dentro del túnel alcanzará una

temperatura constante luego del inicio del proceso, por lo tanto la energía calculada sólo se requiere al inicio

Encontramos la cantidad de nitrógeno necesario para congelar 1000 kg/h de uva desde la temperatura de entrada (20°C) hasta la temperatura requerida (-10°C).

Generalizando el proceso para especies representativas se presenta la siguiente tabla:

Producto	% Agua	Cp <sub>1</sub> kcal/ kg·°C	L kcal/ kg	Cp <sub>2</sub> kcal/ kg·°C	T <sub>i</sub> °C	T <sub>e</sub> °C	T °C	Q <sub>r</sub> kcal/ kg	M <sub>p</sub> Kg	M <sub>na</sub> Kg	M <sub>LIN</sub> Kg
Uva	85	0.88	68	0.46	10	-1.6	-20	86.67	100	3.04	96
Espárragos	94	0.95	75.2	0.48	10	-1.2	-20	94.86	100	3.04	104
Vacuno limpio	72	0.78	57.6	0.42	10	-1.7	-20	74.41	100	3.04	83
Pollo	74	0.79	59.2	0.42	10	-2.8	-20	76.54	100	3.04	86
Pescado	73	0.78	58.4	0.42	10	-1.8	-20	75.25	100	3.04	84
Ostras	80	0.84	64	0.44	10	-2.8	-20	82.32	100	3.04	92

**Tabla Nº 12:** Cantidad de nitrógeno necesario para congelar 100 Kg de algunos alimentos a temperatura de la medio congelante de -60°C.



### 5.3.1- Calculo de Perdidas de Calor en Piping de Alimentación LIN

Para determinar estas pérdidas hay que indicar que el piping criogénico, básicamente posee un aislamiento de hojas de aluminio que separa capas de fibra de vidrio (10-12 capas) al vacío. Este tipo de material posee una conductividad térmica (k) de  $0.000138 \text{ kcal}/m \cdot h^{\circ}C$  [11 apéndice A.3]. Para calcular las pérdidas se utilizan las relaciones de resistencia térmica por conducción y convección en cilindros despreciando la resistencia por radiación.

$$R_{COND} = \frac{LN(r_2 / r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k} \quad \text{Resistencia por conducción en cilindros (14)}$$

$$R_{CONV} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot h} \quad \text{Resistencia por convección (15)}$$

$$R_{total} = R_{COND} + R_{CONV}$$

Entonces la ecuación de pérdida de calor para la tubería es:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{COND} + R_{CONV}} \quad (16)$$

Donde

$r_2$ : Radio mayor (radio del cilindro mas radio del aislante) (m)

$r_1$ : Radio menor (radio cilindro) (m)

l: Largo del cilindro (m)

k: Conductividad térmica ( $\text{kcal}/m \cdot h^{\circ}C$ )

h: Coeficiente superficial de transferencia de calor  $\text{kcal}/m^2 \cdot h^{\circ}C$

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura entre la superficie interna y externa ( $^{\circ}C$ )

Se estiman las pérdidas de calor por el piping, sabiendo que:

Diámetro interno (m)	Diámetro externo (m)	Espesor aislante (m)	Conductibilidad térmica del aislante (kcal/m·h·°C)	Coefficiente de convección del aire (kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)
0.08	0.2	0.12	0.000138	17.3

**Tabla N° 13:** Dimensiones del piping criogénico.

- h aire a condiciones normales :  $17.3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  [11 apéndice A.1]

$$q'' = \frac{(25 - (-196))}{\frac{LN(0.1/0.04)}{2 \cdot \pi \cdot 0.000138} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot 17.3}}$$

$$q'' = 0.209 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}$$

Donde  $0.209 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}$  es la cantidad de calor que se pierde por el piping con aislamiento por metro lineal de cañería. Ya que se conoce la longitud del piping utilizado es 15 m, obtenemos las pérdidas totales.

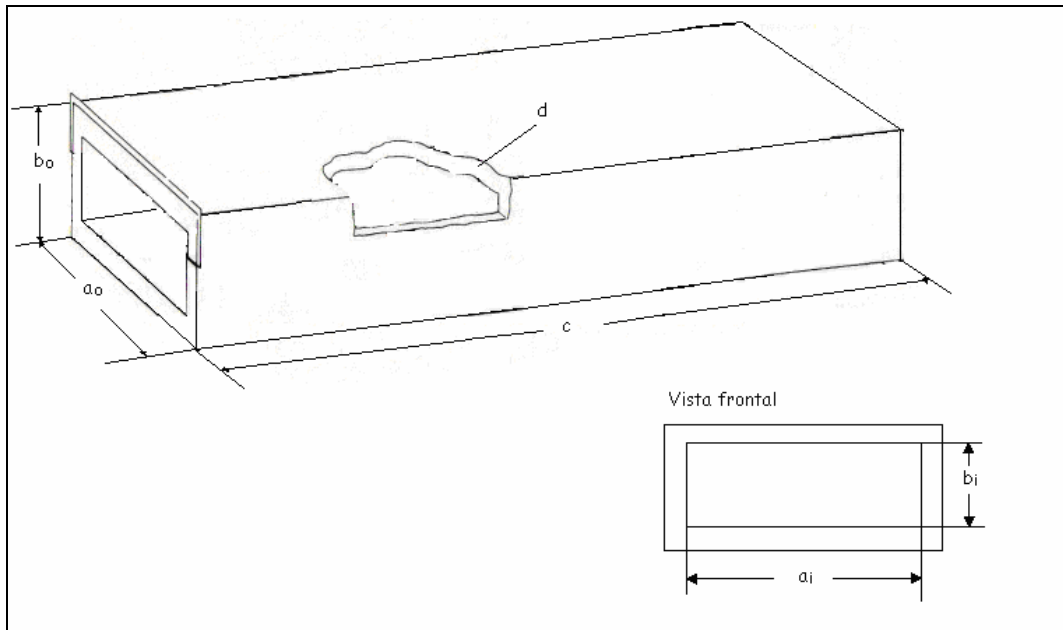
$$q'' = 0.209 \cdot 15 = 3.15 \text{ kcal/h}$$

Entonces las pérdidas totales por piping son  $3.15 \text{ kcal/h}$ . Por lo tanto esta cantidad de energía equivale al 0.003% de la cantidad total para congelar la uva (90578 kcal/h), por lo tanto se desprecia.

### 5.3.2.- Calor de Convección Dentro del Equipo

Se calculará el calor transferido por convección desde el aire circundante al túnel criogénico, considerando el área de transferencia como la superficie externa del túnel

Para esto necesitamos estimar el coeficiente de transferencia de calor dentro del equipo.



**Figura N° 15:** Dimensiones del túnel criogénico.

Donde:

(a <sub>o</sub> ) Ancho exterior del equipo (m)	(b <sub>o</sub> ) Altura exterior del equipo (m)	(c) Largo del equipo (m)	(d) Espesor del equipo (m)	(a <sub>i</sub> ) Ancho interno del equipo (m)	(b <sub>i</sub> ) Altura interna del equipo (m)
1.80	1.3	9	0.2	1.4	0.9

**Tabla N° 14:** Dimensiones del túnel criogénico.

Se estima el calor de convección en el equipo para luego compararlo con el calor de refrigeración, para esto es necesario saber:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_C}{P} \quad \text{Diámetro hidráulico (17)}$$

$$Re_D = \frac{F_m \cdot D_h}{A_C \mu} \quad \text{Número de Reynolds (18)}$$

$$Nu_D = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad \text{Número de Nusselt (19)}$$

Donde:

$A_t$  : Área de transferencia de calor ( $m^2$ )

$A_C$  : Área de la sección transversal ( $m^2$ )

$P$  : Perímetro mojado de la sección transversal (m)

$F_m$  : Flujo másico de nitrógeno ( $kg/m^3$ )

$\mu$  : Viscosidad del nitrógeno  $N \cdot s/m^2$

$h$  : Coeficiente de convección del nitrógeno ( $kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$ )

$k$  : Conductividad térmica del nitrógeno ( $kcal/h \cdot m \cdot ^\circ C$ )

Conocidas las dimensiones del equipo en posición de trabajo (ancho interior 1.4 m y altura interior 0.9)

$$A_C = 1.4 \cdot 0.9 = 1.26 m^2$$

$$P = 2 \cdot (1.4 + 0.9) = 4.6 m$$

$$\text{De 17 se obtiene } D_h = \frac{4 \cdot 1.26}{4.6} \rightarrow D_h = 1.09 m$$

Con  $D_h$  y (18) se estima  $Re_D$  sabiendo que:

- Temperatura medio congelante ( $T_m$ )  $-60^\circ C$
- Temperatura ambiente ( $T_a$ )  $25^\circ C$

Para  $N_2$

$$\mu(-60^\circ C, 1atm) = 136 \cdot 10^{-7} N \cdot s/m^2 \quad [11] \text{ apéndice A3}$$

$$k(-60^\circ C, 1atm) = 15.7 \cdot 10^{-3} kcal/h \cdot m \cdot ^\circ C \quad [11] \text{ apéndice A3}$$

$$Pr = 0.734 \quad [11] \text{ apéndice A3}$$

$Fm = 970.6 kg/h$  para nitrógeno (del balance al producto), de (18) se obtiene

$$Re_D = \frac{(970.6/3600) \cdot 1.09}{1.26 \cdot 136 \cdot 10^{-7}} \rightarrow Re_D = 17149.6 > 10000 \text{ Por lo tanto régimen}$$

turbulento

$$Nu = 0.023 \cdot (Re_D)^{0.8} \cdot (Pr)^{0.3} \quad \text{Para } 0.7 < Pr < 160 \text{ y } Re > 10000$$

(Referencia [11])

Reemplazando en las relaciones para obtener el número de Nusselt

$$Nu = 0.023 \cdot (17149.6)^{0.8} \cdot (0.734)^{0.3}$$

$$Nu = 51.19$$

Al obtener el número de Nusselt reemplazo en (19) y obtengo h

$$h = \frac{51.19 \cdot 15.7 \cdot 10^{-3}}{1.09}$$

$$h = 0.737 kcal / h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$$

Las paredes poseen un espesor de 0.2 m por lado, y que la aislamiento es el mismo utilizado en el piping criogénico con una conductividad térmica de  $0.000138 \text{ kcal}/m \cdot h^{\circ}C$  [11 apéndice A3], y de acuerdo a las dimensiones exteriores del túnel criogénico en posición de trabajo (figura 14)

$$A_o = 1.8 \cdot 1.3 = 2.34m^2$$

$$P = 2 \cdot (1.8 + 1.3) = 6.2m$$

$$D_o = \frac{4 \cdot 2.34}{6.2} = 1.51m$$

Conocido el diámetro hidráulico externo calculamos las pérdidas en el túnel criogénico, estimando que el coeficiente de convección para el aire es  $2.7 \text{ kcal}/m^2 \cdot h^{\circ}C$  [12]

$$q'' = \frac{(25 - (-60))}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.09 \cdot 0.737} + \frac{LN(1.51/1.09)}{2 \cdot \pi \cdot 0.000138} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1.51 \cdot 2.7}}$$

$$q'' = 0.226 \text{ kcal}/m \cdot h$$

Con 9 metros de largo del túnel las pérdidas por convección son

$$q'' = 0.226 \cdot 9 = 2.034 \text{ kcal}/h$$

Por lo tanto las pérdidas del túnel equivalen al 0.00224% de la cantidad de energía para congelar la uva (90578 kcal/h), por tanto se pueden despreciar

## 5.4- Criterio de Diseño Estanque de Almacenamiento

Para estimar que estanque de almacenamiento es necesario para la congelación de un producto alimenticio y especialmente la uva (caso particular para este cálculo), se debe conocer la masa total de producto a procesar, para saber la cantidad de LIN a utilizar en todo el proceso. Para esto se presenta la siguiente tabla con los datos de masa procesada:

Fecha de proceso	03/03	05/03	09/03	10/03	14/03	16/03	17/03	18/03	19/03	24/03
Hora inicio	8:40	7:55	8:30	8:20	8:15	8:15	8:13	8:00	8:00	8:20
Hora término	18:54	17:55	18:04	18:00	19:59	19:03	18:36	2:36	16:30	12:35
Cantidad procesada (Kg)	8237	7056	7436	7748	15229	14637	14924	15206	7644	7540

### Continuación

Fecha de proceso	27/03	28/03	03/04	07/04	14/04	15/04	16/04	17/04	18/04	20/04
Hora inicio	10:00	9:00	10:15	10:30	10:15	9:02	10:01	8:15	8:30	8:26
Hora término	20:50	13:30	18:05	21:18	15:30	18:06	14:06	18:56	18:46	13:46
Cantidad procesada (Kg)	15425	7440	8786	15066	7080	15913	7735	15096	15300	7752

### Continuación

Fecha de proceso	21/04	22/04	23/04
Hora inicio	8:30	8:15	8:00
Hora término	18:50	18:20	12:40
Cantidad procesada (Kg)	15700	15224	7956
Cantidad total procesada (Kg)	260130		

**Tabla N° 15:** Masa congelada de uva en la viña Casa La postolle vendimia 2009

Al término de la vendimia 2009 Casa La postolle procesó, 260.130 kg de uva, el cual es la masa total para estimar los requerimientos energéticos y por lo tanto, conocer cuanto LIN se va a utilizar en este proceso.

Utilizando el balance de energía a la uva expresión (19) y el balance al nitrógeno expresión (20) y el balance para el aire expresión (21), se estima la masa de nitrógeno necesario para congelar los 260.130 kg de uva en 23 días de operación, la cual da como resultado 236.304 kg de LIN. Con la densidad de LIN (709.74 kg/m<sup>3</sup>) a la presión de operación para el estanque de almacenamiento de LIN (6 bar)

- **Balance de energía a la uva**

$$Q_p = m_p [(0.8 * (\% \text{ Agua}) + 0.2) * \Delta T_1 + (80 * (\% \text{ Agua})) + (0.3 * (\% \text{ Agua}) + 0.2) * \Delta T_2] \quad (10)$$

M <sub>p</sub> (kg)	% agua	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	T (°C)	ΔT <sub>1</sub> (°C)	ΔT <sub>2</sub> (°C)	Q <sub>p</sub> (kcal)
260130	0.85	20	-1.6	-10	21.6	8.4	23627608

**Tabla N° 16:** Requerimiento energético para congelar 260130Kg de uva.

- **Balance de energía a LIN**

$$m_N = \frac{Q_p}{(L + Cp_3 * \Delta T_3)} \quad (11) \quad \text{y} \quad m_N = \frac{Q_a}{(L + Cp_3 * \Delta T_3)} \quad (12)$$

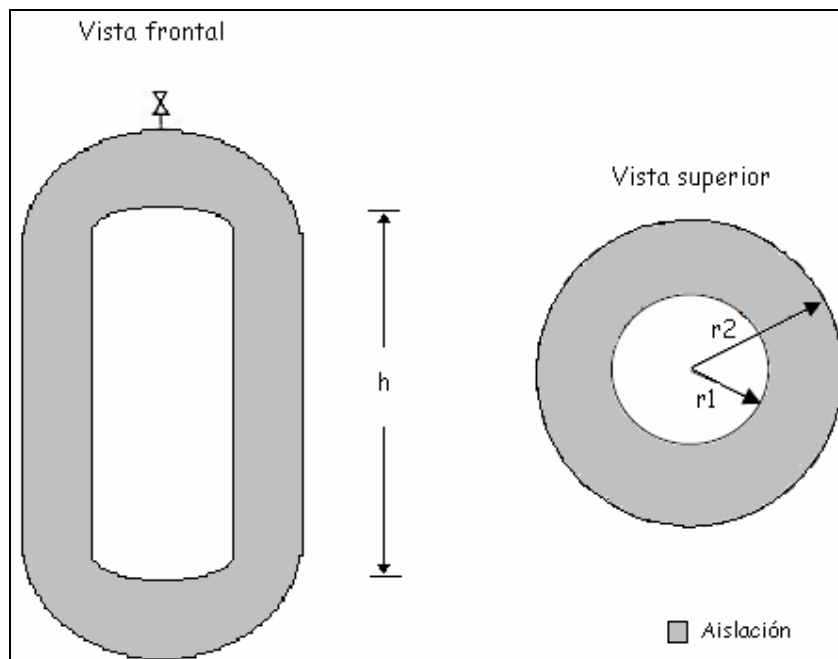
Q <sub>p</sub> (kcal)	L (kcal)	Cp <sub>3</sub> (kcal/kg·°C)	T <sub>b</sub> (°C)	T <sub>0</sub> (°C)	ΔT <sub>3</sub> (°C)	M <sub>N</sub> (Kg)	M <sub>N</sub> (Kg)	ρ <sub>N2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>N2</sub> (m <sup>3</sup> )
23627608	47.38	0.247	-196	-10	-186	236234	69.92	709.7	332.9

**Tabla N° 17:** Volumen de nitrógeno para congelar la uva.



### 5.4.1.- Calculo de Perdidas Estanque de Alimentación LIN

Para determinar las pérdidas del estanque de alimentación de LIN hay que indicar que es un estanque cilíndrico de pared delgada. El estanque que se encuentra en stock para el proyecto, posee un diámetro interno de 4m y una altura interna de 3.3m, este esta cubierto de un aislante reflector al vacío compuesto de polvo de dióxido de silicio. El aislante tiene un espesor de 0.25m, y la superficie externa se expone al aire del ambiente a 25°C aproximadamente.



**Figura N° 16:** Dimensiones del estanque de almacenamiento LIN.

Donde:

Altura (h) (m)	Radio Interno (r1) (m)	Espesor aislante (m)	Radio externo (r2) (m)	Coefficiente de convección del aire (kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)
3.3	2	0.25	2.25	17.3

**Tabla N° 18:** Dimensiones del estanque de alimentación de LIN.

- Conductibilidad térmica del aislante (k) = 0.0017 kcal/m·h·°C  
[11], Apéndice A3

Utilizando las expresiones (14), (15), (16) para las pérdidas por conducción y convección en cilindros se obtiene

$$q'' = \frac{(25 - (-196))}{\frac{LN(2.25/2)}{2 \cdot \pi \cdot 0.0017 \cdot 3.3} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2.25 \cdot 17.3 \cdot 3.3}}$$

$$q'' = 66.1 \text{ kcal/h}$$

Ahora para estimar la cantidad de nitrógeno que vaporiza se realiza un balance al LIN de acuerdo a:

$$q'' = L \cdot m_N \quad (20)$$

Donde:

L: Es el calor latente de vaporización (kcal/kg)

$m_N$ : Es la velocidad másica que vaporiza de LIN (kg/h)

Reemplazando

$$66.1 = 47.38 \cdot m_N$$

$$m_N = 1.4 \text{ kg/h}$$

Por lo tanto la pérdida diaria de LIN en el estanque de alimentación es

$$1.4 \cdot 24 = 33.6 \text{ kg}$$

Con la densidad del LIN  $808.62 \text{ kg/m}^3$  y el volumen del estanque de alimentación se estima el porcentaje diario que se vaporiza de LIN.

$$33.6 / 808.62 = 0.041 \text{ m}^3$$

El volumen del cilindro es

$$V_{CILINDRO} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (21)$$

Donde:

r: Radio del cilindro (m)

h: Altura del cilindro (m)

Conocida las dimensiones del cilindro se estima el volumen de este

$$V_{CILINDRO} = 3.14 \cdot 2^2 \cdot 3.3$$

$$V_{CILINDRO} = 41.45m^3$$

De acuerdo a los cálculos anteriores, se puede estimar el porcentaje diario que se vaporizará de LIN

$$\frac{0.041}{41.45} \cdot 100 = 0.0989\%$$

Por lo tanto, el porcentaje diario que se vaporiza de LIN, en el estanque de alimentación es 0.0989%

Al conocer el volumen que se utilizará de LIN se pueden estimar las recargas al estanque de almacenamiento de LIN.

El estanque que se tiene en stock y por requerimiento de volumen para procesos de 1000kg/h es uno de 11000gal

- Volumen del estanque 11000gal (41.5m<sup>3</sup>)
- Cantidad de recargas estimadas  $332.9/41.64 = 7.99 \sim 8$  recargas.

Conocido los estanques que se tienen en stock y de acuerdo a las cantidades que se quieran procesar de producto alimenticio se ordena la siguiente tabla.

Tipo de equipo	Capacidad másica de proceso (Kg/h)	Estanque de alimentación LIN (gal)
Batch	100-400	1500
Túnel continuo	500-2000	11000

*Tabla Nº 19: Requerimiento de diseño del equipo.*

## Capítulo 6: Evaluación Económica

El negocio del proyecto es dar soluciones de conservación a las empresas que quieran comercializar sus productos alimenticios, ya sea dentro o fuera del país, prestando servicios de las maquinarias a utilizar (instalaciones de ellas y parámetros de operación de estas) y los gases criogénicos necesarios para el proceso de conservación de los productos alimenticios que requiera el cliente, para que luego las empresas que trabajen con el servicio de congelación criogénica puedan comercializar sus productos a los mas altos estándares de calidad.

La evaluación económica del proyecto, se analizará de acuerdo a dos alternativas:

- La primera será pensada en que los equipos para realizar la congelación ya se poseen y se encuentran listos para operar, sólo el costo operacional será considerado.
- El segundo será pensado que no se cuentan con los equipos para realizar la congelación, por lo tanto, se considerarán la adquisición de los equipos y su costo operacional.

## **6.1.- Estudio de Mercado:**

El estudio de mercado debe servir para tener una noción clara de la cantidad de consumidores que habrán de adquirir el bien o servicio que se piensa vender, dentro de un espacio definido, durante un periodo de mediano plazo y a que precio están dispuestos a obtenerlo.

En Chile existen numerosas zonas donde se cosechan alimentos y por lo tanto plantas que explotan estos recursos, variando los productos que se dan en las distintas regiones como también los tiempos de cosecha de ellas, por tanto las empresas que se dedican al rubro se encontraran principalmente en estas zonas de cosecha que variarían por todo el largo de Chile.

Los datos obtenidos en este proyecto son básicamente de plantas que se visitaron, algunas de ellas ya contaban con antiguos sistemas de enfriamiento (Frío mecánico), en estos casos requería aumentar su producción, por tanto se requirió de la instalación del frío criogénico (Caso de Aliserv en la congelación de espárragos).

En este proyecto se estudio distintas empresas las cuales se encontraban en; la región metropolitana (empresas: aliserv, meet and food), región del Maule (empresas: Alifrut, Casa La Postolle) y la región del Bio bio (empresa: camanchaca). Cada una de estas se dedica a la congelación de distintos productos alimenticios que se dan a conocer en la siguiente tabla.

Empresa	Ciudad	Producto	Cantidad estimativa a procesar (Kg/Año)
Meet and food	Santiago	Carne	190.000
Aliserv	Santiago	Alimentos precocidos (pizzas, platos preparados)	200.000
Alifrut	Chillán	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Espárragos</li> <li>▪ Berries</li> <li>▪ Chirimoyas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 200.000</li> <li>▪ 50.000</li> <li>▪ 80.000</li> </ul>
Camanchaca	Tomé	Salmones	30.000.000
Casa La Postolle	Apalta, Santa Cruz	Uva	150.000

**Tabla Nº 20:** Empresas que requirieron el servicio de congelación Criogénica con LIN.

Para distintos productos los parámetros de congelación variarán según las propiedades de los alimentos, pues no es lo mismo congelar un trozo de carne cruda, que alimentos precocidos.

## 6.2.- Descripción de las Instalaciones

El transporte e instalación de las maquinarias necesarias para la conservación de los productos que se deseen someter a la conservación se dará a conocer a continuación.

En general las empresas que se dedican al rubro de los alimentos deben congelar sus productos para que estos se mantengan frescos por períodos de tiempo prolongado (manteniéndolos después de la congelación refrigerados a temperaturas inferiores de los  $-18^{\circ}\text{C}$ ), algunas de ellas cuentan con antiguas instalaciones de frío mecánico, y otras no cuentan con estas instalaciones, por lo que el diseño del proceso en planta se planteara en dos casos:

**Caso 1: Instalación de túneles criogénicos o equipos Batch, necesarios para empresas que no cuentan con instalaciones de frío mecánico.**

Para la Instalación del proceso de congelación criogénica con LIN, es necesaria la instalación de un estanque de nitrógeno líquido (LIN), el cual alimentará de nitrógeno líquido, al túnel criogénico o equipo Batch (ya sea el requerimiento necesario pedido por el cliente), generalmente este estanque de nitrógeno líquido queda instalado fuera de la bodega donde se realizará el proceso de congelación, por seguridad se instalará al aire libre, si es que existe alguna filtración de nitrógeno líquido desde el interior del estanque, el nitrógeno se escapara desde el estanque hacia exterior, así se liberará inmediatamente a la atmósfera, sin tener problemas de desplazamiento de oxígeno y posterior ahogo de los operarios que se encuentren allí en ese momento. A continuación se muestra el estanque de nitrógeno líquido utilizado en la congelación de uvas para Casa la Postolle.



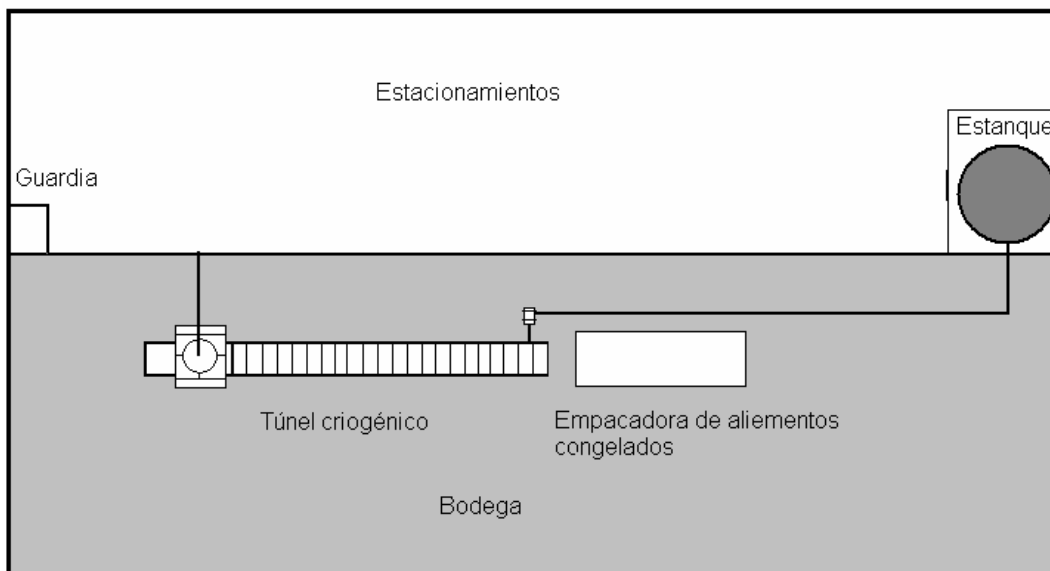
**Figura Nº 17:** Estanque de nitrógeno líquido utilizado en Casa la Postolle, vendimia 2009 (11000gal).



Al tener montado el estanque criogénico, es necesario instalar las redes de cañerías que llegaran desde el estanque criogénico, hasta la alimentación del túnel criogénico o equipo Batch, estas cañerías deben mantener la temperatura que se encuentra el nitrógeno líquido de  $-196.5^{\circ}\text{C}$ , por lo que deben ser revestidas por fuera para que las pérdidas de calor entre la cañería y el medio ambiente sea mínima.

Al ya tener conectado el estanque de LIN a través de de la red de cañerías a la alimentación del túnel criogénico o equipo Batch, se procede a la instalación de la turbina de extracción del túnel criogénico, desde el interior de la bodega donde se trabajará, hacia el exterior, donde el nitrógeno que ya ha sido utilizado escapará a la atmósfera. Un inconveniente del proceso es la falta de un método adecuado para la recuperación del nitrógeno líquido utilizado.

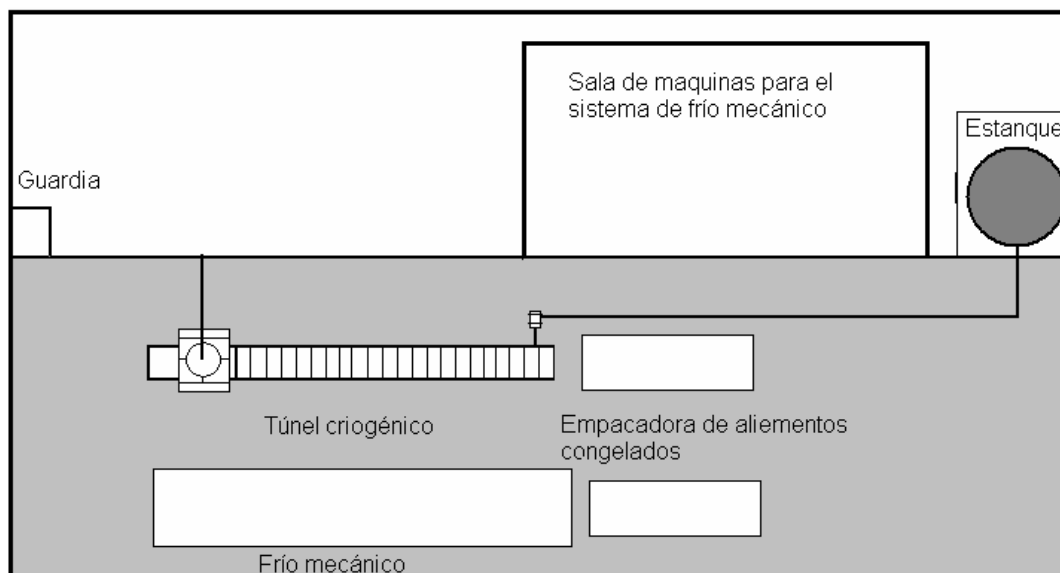
Al ya tener conectado todos las partes del proceso (estanques, equipos criogénicos, redes de cañerías y turbina de extracción) se chequean los controles del túnel criogénico, si los controladores y los parámetros del equipo funcionan bien ya se puede poner en marcha el proceso de congelación.



**Figura Nº 18:** Esquema de una planta de congelación criogénica sin instalaciones viejas (Frío mecánico), esquema de Casa La Postolle, refrigeración de la uva.

**Caso 2: Instalación de túneles criogénicos o equipos Batch, necesarios para empresas que cuentan con instalaciones de frío mecánico.**

El proceso es equivalente a las instalaciones que no cuentan con sistemas viejos de congelación (frío mecánico), sólo que el túnel criogénico se conecta paralelamente a los sistemas viejos de congelación. Estos sistemas son requeridos cuando las empresas pretenden aumentar su producción en sus productos y por tanto, requieren de mayor capacidad de congelación, fue el caso de la empresa Alifrut, donde se congeló espárragos a una mayor producción de lo acostumbrado (aproximadamente la producción aumento al doble respecto a la del años anteriores).



**Figura Nº 19:** Esquema de una planta de congelación criogénica con sistemas de frío mecánico, este diseño esta basado en la planta Alifrut de Chillan, para la congelación de espárragos y Berries.

En general la instalación de túneles criogénicos es relativamente sencilla y se necesita de un día laboral para que todos los componentes (túneles o equipos Batch, redes de cañerías y estanques criogénicos), queden bien instalados y listos para poner en marcha el proceso. Hay que pensar que la localización de los equipos tanto estanques criogénicos como túneles o equipos Batch, al momento de solicitar la instalación se encontraban en santiago, en camino Melipilla, Cerrillos Santiago, por lo que su traslado desde

Santiago hacia el lugar donde se requiera la instalación del proceso, debe tomarse en cuenta.

El funcionamiento del túnel y equipos Batch fueron comentados en el capítulo 4 por lo que su funcionamiento en esta parte no será vista.

### 6.3.- Costos de Alternativa 1: Equipos Existentes

Este proyecto se enfoca desde un punto de vista de prestar el servicio de la congelación, esto incluye las maquinarias, ya sean túneles criogénicos o equipos Batch, que se tienen en stock, al igual que los estanques criogénicos y el camión que rellena dichos estanques cuando los niveles de LIN se encuentran bajos para seguir operando, por tanto los costos serán básicamente de mantención de maquinarias, transportes de ellas, operarios y grúas, que se detallan a continuación.

Conocido estos datos (capítulo 5), podemos a evaluar los costos del proyecto en tres casos.

Teniendo en cuenta que el precio del dólar para julio 2010 observador \$501.63 (fuente banco central).

#### Caso 1: Antes de la puesta en marcha

Ítem	Detalle	Cantidad	Costo (US\$ / año)
Mantención equipos	Túnel continuo	1	1.780
	Estanque criogénico	1	1.300
Personal	Operario	3	3.600
<b>Sub total 1</b>			<b>6.680</b>

*Tabla Nº 21: Costos antes de la puesta en marcha.*

*Observación:* Los operarios trabajan mensualmente, y la puesta en marcha corresponde a trabajos que realizan los operarios en todas las áreas, es decir no quedan abocados a sólo un cliente sino que a la cantidad de clientes que en ese momento requieran de el servicio de congelación.

**Caso 2:** En la puesta en marcha

Ítem	Detalle	Cantidad	Costo (US\$ / año)
Transporte de equipos	Transporte desde Santiago a bodega del cliente	1	3.600
Personal	Operario	3	3.600
<b>Sub total</b>			<b>7.200</b>

*Tabla N° 22: Costos durante la puesta en marcha.*

**Caso 3:** Después de la puesta en marcha

Ítem	Detalle	Cantidad	Costo (US\$/ año)
Recarga N2 a estanque	Recargas	8	19.974
Personal	Operario	3	3.600
Transporte equipos	Transporte desde bodega cliente a santiago	1	3.600
<b>Sub total</b>			<b>27.174</b>

*Tabla N° 23: Costos después de la puesta en marcha*

**Nota:** Una vez estimado el volumen total de LIN a utilizar para congelar 260.130 Kg de uva y teniendo en cuenta que el nitrógeno líquido tiene un costo de 60US\$/m<sup>3</sup> se puede estimar su precio total.

### Resumen de los tres casos presentados

<b>Ítem</b>	<b>Costo (pesos chilenos / año)</b>
Sub total antes de la puesta en marcha	6.680
Sub total en la puesta en marcha	7.200
Sub total después de la puesta en marcha	27.174
<b>TOTAL</b>	<b>41.054</b>

*Tabla Nº 24: Resumen de costos.*

Por lo tanto es necesario de US\$ 41.054 para poner en marcha una planta de congelación para procesar 260.130 Kg. de producto alimenticio. Hay que indicar que estos valores y la cantidad de producto alimenticio procesado han sido obtenidas del negocio realizado en Casa La Postolle, Santa Cruz, VI Región, Chile, donde se trabajo como operario del túnel continuo.

## **6.4.- Rentabilidad Alternativa 1:**

Luego de calcular los costos asociados a prestar el servicio de la congelación se negociará con el cliente la forma de cobro, la cual se centrará en el producto congelado.

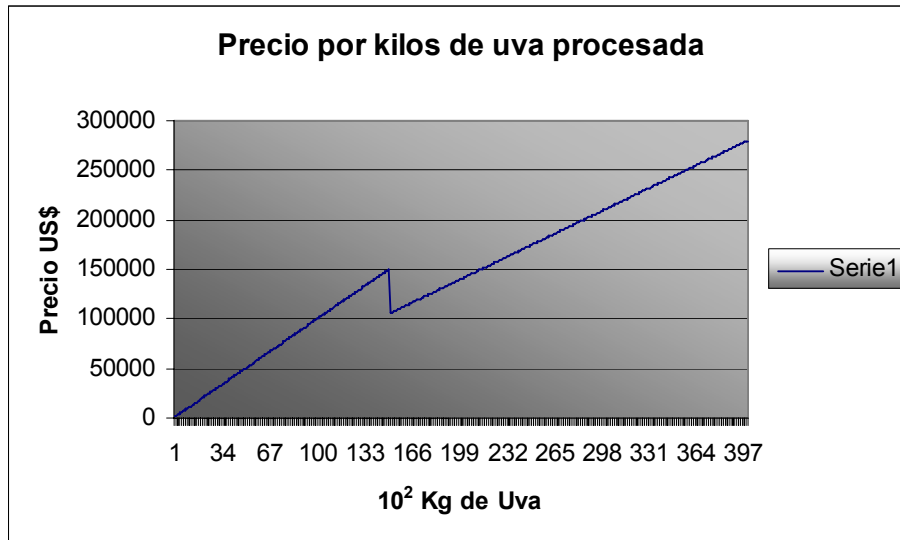
- Para el caso del proyecto, el cobro se basa en los kilogramos de producto que son sometidos al proceso

### **6.4.1.- Negocio para la Congelación de Uvas**

Así bien para el negocio de una planta de congelación de uva (se sacan los datos del negocio realizado con la viña Casa La Postolle), como se ha indicado, el cobro del servicio de congelación prestado se basa en la cantidad de uva procesada en los distintos días de jornada laboral, por tanto, luego de haber finalizado con toda la uva a procesar durante todas las jornadas laborales se llega a una masa de 260.130 Kg. de uva procesada total (tabla N° 15 del capítulo 5).

### **6.4.2.- Trato del Negocio**

Para la congelación de la uva, se transa a US\$ 1 por kg. de uva procesada, si dicha cantidad total es inferior a los 150.000 kg. de uva. Si es sobrepasada esta cantidad, la forma de cobro será de US\$ 0.8 por kg. de uva procesada.



**Figura Nº 20:** Precio por kilos de uva procesada en Casa La Postolle.

Por lo tanto como la cantidad de uva procesada fue 260.130 kg., el cobro se hace por la segunda opción, es decir, US\$ 0.8 por kg. de uva procesada, que se resume en la siguiente tabla, tomando como referencia que para esta fecha US\$ 1 = \$501.63 (fuente banco central dólar observador).

Cantidad de Uva procesada (Kg.)	Precio de la uva procesada (US\$/Kg. de uva procesada)	Costo para el cliente (US\$) (ganancia bruta para el proyecto)
260.130	0.8	208.104

**Tabla Nº 25:** Costo de Casa La Postolle para el negocio de congelación de la uva.

## 6.5.- Ganancia de Alternativa 1

Para calcular la rentabilidad del proyecto se toma el precio de costo con la ganancia bruta para el proyecto que se resume a continuación:

Costo proyecto (US\$)	Ganancia bruta para el proyecto (US\$)	Ganancia real del proyecto (US\$)
41.054	208.104	167.050

**Tabla N° 26:** Ganancia real del proyecto Casa la Postolle.

Por lo tanto, para la congelación de uva (negocio general para otros proyectos utilizando la misma tecnología de congelación, sólo que cambia el producto alimenticio a congelar), tiene una ganancia real de US\$ 167.050 para congelar 260.000kg de producto alimenticio, lo que conlleva a un negocio rentable, ya que las ganancias superan con creces a los costos de diseño de la planta de congelación, considerando que ya se poseen los equipos, para realizar el proceso.



## 6.6.- Alternativa 2

Si no se tienen los equipos para montar una planta de congelación, o simplemente, si se quisiera entrar al negocio, se tendría que invertir en la compra de equipos, piping y estanques.

Ítem	Costo (US\$)
Equipo Batch	30.000
Túnel continuo	100.000
Estanque 1.500 gal	35.000
Estanque 11.000 gal	150.000
Piping	3.500
<b>Total</b>	<b>318.500</b>

*Tabla Nº 27: Costo de la inversión para realizar el proceso de congelación (ver anexo 6 en adelante).*

Para realizar un proyecto de esta envergadura se tendría que invertir US\$ 318.500, para entrar al negocio de la congelación, este valor sólo estaría pensado en una planta de congelación. Si se quisiera estar trabajando en paralelo en más de una planta, el valor se incrementaría por cuantas plantas se hicieran en ese año.

### 6.6.1.-Costos Operacionales

Los costos operacionales para los equipos de congelación criogénica, son calculados cuando estos se encuentran instalados y funcionando en cualquier planta que requiera la congelación de sus productos alimenticios, por lo tanto, se estiman para ver el costo operacional.

Ítem	Detalle	Cantidad	Costo (US\$/ año)
Túnel criogénico	Mantenición	2	2.000
Equipo Batch	Mantenición	2	1.000
Estanque de alimentación (11000gal)	Mantenición	1	1.000
Estanque de alimentación (1500gal)	Mantenición	1	500
<b>Sub total</b>			<b>4.500</b>

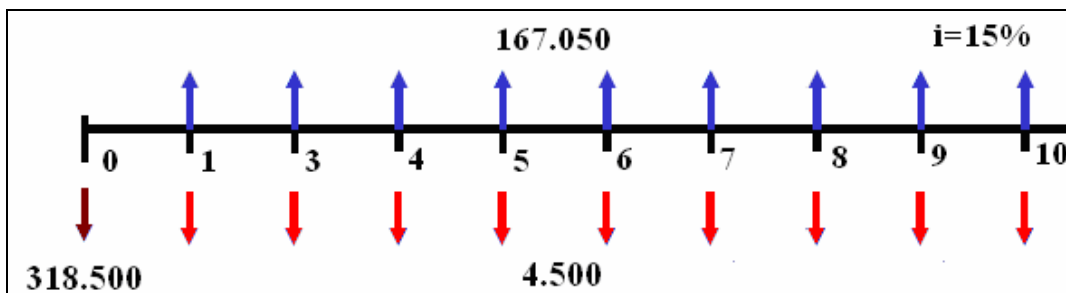
*Tabla Nº 28: Costo de operacional para realizar el proceso de congelación en un año.*

Entonces, los costos operacionales son US\$ 4.500 anuales, para la mantención de los equipos.

## 6.6.2.-Financiamiento alternativa 2

Seleccionando el ejemplo de la congelación de la uva en donde se obtiene una ganancia de US\$ 167.050 al año, se necesita para la alternativa 2, una inversión inicial de US\$ 318.500 para la compra de los equipos de congelación, la cual será financiada con un préstamo con un interés anual del 15% (Referencia Banco ITAU línea de financiamiento a largo plazo) a 10 años plazo. Siendo los costos operacionales US\$ 4.500 anuales.

Por lo tanto, al evaluar se obtiene el flujo de caja neto para el proyecto con el fin de tener el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) del proyecto a 10 años.



**Figura Nº 21:** Esquema de la evaluación económica de la alternativa2 sólo para el caso de la congelación de la uva.

### 6.6.3.-Depreciación

La depreciación utilizada en el proyecto se basa en el método de la suma de los dígitos anuales, y se calcula de la siguiente forma:

Para la estimación del proyecto a 10 años la suma de los dígitos es:

$$1\text{año} + 2\text{año} + 3\text{año} + 4\text{año} + 5\text{año} + 6\text{año} + 7\text{año} + 8\text{año} + 9\text{año} + 10\text{año} = 55$$

Año	Fracción	Suma a depreciar	Depreciación
1	10/55	318.500	57.909
2	9/55	318.500	52.118
3	8/55	318.500	46.327
4	7/55	318.500	40.536
5	6/55	318.500	34.745
6	5/55	318.500	28.954
7	4/55	318.500	23.164
8	3/55	318.500	17.373
9	2/55	318.500	11.582
10	1/55	318.500	5.791

**Tabla Nº 29:** Tabla de depreciación de los equipos criogénicos utilizando el método de suma de los dígitos anuales.

Al obtener la depreciación de los equipos en cada uno de los años se presenta a continuación el flujo de caja del proyecto, evaluado a 10 años.

#### 6.6.4.-Flujo de caja neto (FCN)

Ítem (US\$)	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos	0	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050	167.050
Costos	0	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500
<b>Utilidad Operacional</b>	<b>0</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>	<b>162.550</b>
Pago préstamo	0	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775	47.775
Depreciación Equipos	0	57.909	52.118	46.327	40.536	34.746	28.955	23.164	17.373	11.582	5.791
<b>Utilidad</b>	<b>0</b>	<b>56.866</b>	<b>62.657</b>	<b>68.448</b>	<b>74.239</b>	<b>80.030</b>	<b>85.820</b>	<b>91.611</b>	<b>97.402</b>	<b>103.193</b>	<b>108.984</b>
Impuesto (19%)	0	10.805	11.905	13.005	14.105	15.206	16.306	17.406	18.506	19.607	20.707
<b>Utilidad Neta</b>	<b>0</b>	<b>46.061</b>	<b>50.752</b>	<b>55.443</b>	<b>60.133</b>	<b>64.824</b>	<b>69.515</b>	<b>74.205</b>	<b>78.896</b>	<b>83.586</b>	<b>88.277</b>
Depreciación Equipos	0	57.909	52.118	46.327	40.536	34.746	28.955	23.164	17.373	11.582	5.791
Inversión inicial	- 318.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo de caja neto</b>	<b>- 318.500</b>	<b>103.970</b>	<b>102.870</b>	<b>101.770</b>	<b>100.670</b>	<b>99.569</b>	<b>98.469</b>	<b>97.368</b>	<b>96.268</b>	<b>95.168</b>	<b>94.068</b>

*Tabla Nº 30: Flujo de caja neto del proyecto de congelación..*

Se obtiene un VAN de US\$ 184.621 evaluado a una TMAR del 15%, lo que nos indica que es un proyecto rentable.

El TIR del proyecto es 29%, por lo tanto es mayor que el TMAR lo que reafirma la rentabilidad del proyecto de congelación.

## Conclusiones

Con relación al primer objetivo planteado, podemos concluir que la congelación representa para muchos alimentos el mejor medio de conservación de estos a largo plazo, este proceso se basa en la formación de cristales de hielo en su interior, es por eso, que la velocidad de la mayoría de las reacciones químicas quedan reducidas y las reacciones metabólicas celulares se paralizan completamente en los alimentos. Se sabe que todo alimento que ha sido congelado y luego descongelado para su consumo sufre algún tipo de deterioro manifestado en cambios no deseados como el sabor, olor, y textura. Es por eso que el mejor proceso es el de congelación criogénica utilizando nitrógeno líquido como fluido congelante, ya que entrega mejores resultados para la conservación de estos productos.

El método de congelación por aspersión de nitrógeno líquido, es el más adecuado a la hora de realizar la conservación de los productos alimenticios, puesto que este, presenta una mayor eficiencia en la aplicación del nitrógeno líquido. Además la entrada de los productos al proceso es más sencilla y permite un mejor aprovechamiento de la cantidad de calor entregada por el nitrógeno líquido al producto final.

El diseño de una planta de conservación de alimentos, variará según la cantidad de producto alimenticio a procesar. De acuerdo a esto, el diseño de la planta se basará en la cantidad de energía necesaria para congelar dicha cantidad de producto alimenticio, la cual se calculará según el balance de energía realizado.

Con respecto a la evaluación económica del proyecto, se basa particularmente en la congelación de la uva, realizada en Casa la Postolle, donde se plantean dos alternativas, la primera toma en cuenta que ya se poseen los equipos para realizar la congelación así que los costos se basan principalmente en el traslado y puesta en marcha de los equipos para realizar la congelación.

La segunda alternativa plantea el problema de no contar con los equipos necesarios para realizar la congelación (alternativa 2), por lo tanto se incluyen los costos de adquirir los equipos de congelación y su costo operacional y se calcula el VAN y TIR, dando como resultado un proyecto rentable.

## Bibliografía

- **[1]** Jean Claude cheftel, Henri Cheftel, “Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos”, volumen 1, Ascrabia S.A. Zaragoza España 1980.
- **[2]** Jean Claude cheftel, Henri Cheftel, “Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos”, volumen 2, Ascrabia S.A. Zaragoza España 1980.
- **[3]** A.Madrid Vicente, J.M. Gomez-Pastrana, F. Santiago, J.M. Madrid, J.M. Cenzano, “Refrigeración, Congelación y Envasado de los alimentos”, Mundi prensa libros S.A. 2003.
- **[4]** James O. Maloney, “Perry`s Chemical Engineers` Handbook”, 8ª Edición, McGraw-Hill 2008.
- **[5]** Amos A.J. y otros, “Manual de la Industria de Alimentos”, Ascrabia Zaragoza España 2005.
- **[6]** Ed Elsevier, “Enciclopedia de los gases”, Air liquid
- **[7]** Casp Vanaclocha Ana; Abril Requena José, “Procesos de conservación de alimentos”, A. Madrid Vicente, Madrid España 1999.
- **[8]** Ricardo Carranza de La Torre, “Apuntes de ingeniería de los Alimentos, Congelación de Alimentos” , Universidad Jorge Basadre Grohmann, Tacna Perú.
- **[9]** R.L. Earle, “Ingeniería de los alimentos”, 2ª edición Ascrabia S.A. Zaragoza España 1988.
- **[10]** Alberto Ibarz Ribas, Gustavo V. Barbosa-Cánovas, "Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos", Mundi Prensa 2005.
- **[11]** Frank P. Incropera, David P. DeWitt, “Fundamentos de Transferencia de calor”, cuarta edición, Prenticehall mexico 1999.
- **[12]** Dondald Q. Kern, “Procesos de transferencia de calor”, trigésima primera reimpresión, editorial Continental S.A, México 1999.
- **[13]** J. Blouin y G. Guimberteau, “Maduración Y Madurez de la uva”, Mundi Prensa.
- **[14]** Memoria, Zaneta Hurtado Juan Alberto, “Transferencia de calor en congelación de alimentos”; PUCV 5ª región Valparaíso Chile 1984.

- **[15]** H.engerth, Munich, W. Fisher y otros, “El empleo del frío en la industria de la alimentación”, Editorial Reverté S.A. Barcelona, Buenos aires, México 1963
- **[16]** Heldman DR, Lound DB, “Handbook of food engineering”, Marcel Deker Inc. , New York



# **ANEXOS**

**Anexo 1: Propiedades de algunos alimentos (según INDURA S.A.2008).**

Producto	% Agua	%Sólidos	Pto. Medio Congelación (°C)	Calor Específico (Kcal/Kg °C)		Calor Latente L(kcal/kg)
				Cp1	Cp2	
<b>Vegetales</b>						
Espárragos	94	6	-1,2	0,93	0,47	75
Porotos Verdes	89	11	-1,3	0,92	0,47	71
Brócoli	90	15	-0,6	0,88	0,46	68
Maíz Fresco	76	24	-1,7	0,80	0,43	60
Champiñones	91	9	-1,0	0,93	0,47	72
Pimentón	92	8	-1,1	,094	0,47	74
Papas	74	26	-1,7	0,80	0,42	58
Tomates	94	6	-0,9	0,93	0,49	75
Vegetales Mezcla	90	10	-1,1	0,90	0,45	72
Cebollas	80-89	20-11	-1,1	0,91	0,46	64-71
<b>Cárneos</b>						
Vacuno Limpio	72	28	-1,7	0,77	0,42	56
Vacuno c/grasa	51	49	-2,2	0,60	0,35	41
Cordero Limpio	67	33	-1,8	0,73	0,41	53
Cordero c/grasa	50	50	-2,3	0,60	0,35	40
Cerdo c/grasa	39-46	64-54	-2,4	0,51	0,32	31-37
Pollo	74	26	-2,8	0,7-0,76	0,40	59
<b>Mariscos/Pescados</b>						
Pescado fresco limpio	73	27	-1,8	0,82	0,43	61
Pescado fresco c/grasa	60	40	-2,2	0,68	0,38	50
Caviar	50-60	50-40	-2,7	0,70	0,31	40-50
Langosta/Jaiba	77	23	-2,9	0,81	0,43	62
Ostras/Ostiones	80	20	-2,8	0,83	0,44	63
<b>Frutas</b>						
Manzanas	83	17	-2,0	0,92	0,42	67
Paltas	90	10	-2,8	0,91	0,49	76
Duraznos	87	13	-1,4	0,92	0,41	70
Melón	92	8	-1,7	0,94	0,48	73
Frutilla	90	10	-1,2	0,92	0,47	72
Frambuesa	82	18	-1,1	0,85	0,45	68
Naranjas	84	16	-1,2	0,92	0,44	68
Guindas	82	18	-3,3	0,87	0,44	66
<b>Varios</b>						
Helados	60-65	40-35	-2,8	0,78	0,45	52
Queso	50	50	-1,1	0,60	0,30	37
Huevos	70	30	-1,2	0,76	0,40	56
Margarina	18	82	-1,4	0,70	0,35	30

## Anexo 2: Propiedades de alimentos congelados

Producto	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica [W/mK]	Temperatura [C] T*
Carne de res	1041	1,558	-4,4
Cordero	1057	1,385	-6,1
Aves	1025	1,298	-3,3
Pescado	1009	1,125	-2,8
Frijoles	801	0,917	-3,3
brócoli	961	0,381	-2,8
Arvejas	881	0,467	-3,3
Puré de papa	1089	1,091	-2,8
Arroz cocido	801	0,692	-6,7

**Fuente:** Heldman DR, Lound DB [16]

T\* = temperatura del producto cuando se ha congelado el 60 % del agua

### Anexo 3: Entalpía de alimentos congelados (KJ/Kg)

Temperatura [C]	Carne de res	Cordero	Aves	Pescado	Poroto	Brócoli	Arveja	Puré de papa	Arroz cocido
-28,9	14,7	19,3	11,2	9,1	4,4	4,2	11,2	9,1	18,1
-23,3	27,7	31,4	23,5	21,6	16,5	16,3	23,5	21,6	31,9
-17,8	42,6	45,4	37,7	35,6	29,3	28,8	37,7	35,6	47,7
-12,2	62,8	67,2	55,6	52,1	43,7	42,8	55,6	52,1	70,0
-9,4	77,7	84,2	68,1	63,9	52,1	51,2	68,1	63,9	87,5
-6,7	101,2	112,6	87,5	80,7	63,3	62,1	87,5	80,7	115,1
-5,6	115,8	130,9	99,1	91,2	69,8	67,9	99,1	91,2	133,0
-4,4	136,9	157,7	104,4	105,1	77,9	75,6	104,4	105,1	158,9
-3,9	151,6	176,8	126,8	115,1	83,0	80,7	126,8	115,1	176,9
-3,3	170,9	201,6	141,6	128,2	90,2	87,2	141,6	128,2	177,9
-2,8	197,2	228,2	142,3	145,1	99,1	95,6	142,3	145,1	233,5
-2,2	236,5	229,8	191,7	170,7	112,1	107,7	191,7	170,7	242,3
-1,7	278,2	231,2	240,9	212,1	132,8	126,9	240,9	212,1	243,9
-1,1	280,0	232,8	295,4	295,1	173,7	165,1	295,4	295,1	245,6
1,7	288,4	240,7	304,5	317,7	361,9	366,8	304,5	317,7	254,9
4,4	297,9	248,4	313,8	327,2	372,6	377,5	313,8	327,2	261,4
7,2	306,8	256,3	323,1	336,5	383,3	388,2	323,1	336,5	269,3
10,0	315,8	263,9	332,1	346,3	393,8	398,9	332,1	346,3	277,2
15,6	333,5	279,6	350,5	365,4	414,7	420,3	350,5	365,4	292,8

**Fuente:** Heldman DR, Lound DB [16]

## **Anexo 4: Propiedades generales del nitrógeno.**

### **Peso Molecular**

Peso Molecular : 28.0134 g/mol

### **Fase Sólida**

Punto de fusión : -210 °C

Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple) : 25.73 kJ/kg

### **Fase líquida**

Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) : 808.607 kg/m<sup>3</sup>

Equivalente Líquido/Gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 691 vol/vol

Punto de ebullición (1.013 bar) : -195.9 °C

Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición) : 198.38 kJ/kg

### **Punto Crítico**

Temperatura Crítica : -147 °C

Presión Crítica: 33.999 bar.

Densidad Crítica : 314.03 kg/m<sup>3</sup>

### **Punto triple**

Temperatura del punto triple : -210.1 °C

Presión del punto triple: 0.1253 bar.

### **Fase gaseosa**

Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición) : 4.614 kg/m<sup>3</sup>

Densidad del Gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 1.185 kg/m<sup>3</sup>

Factor de Compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.9997

Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.967

Volumen Específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.862 m<sup>3</sup>/kg

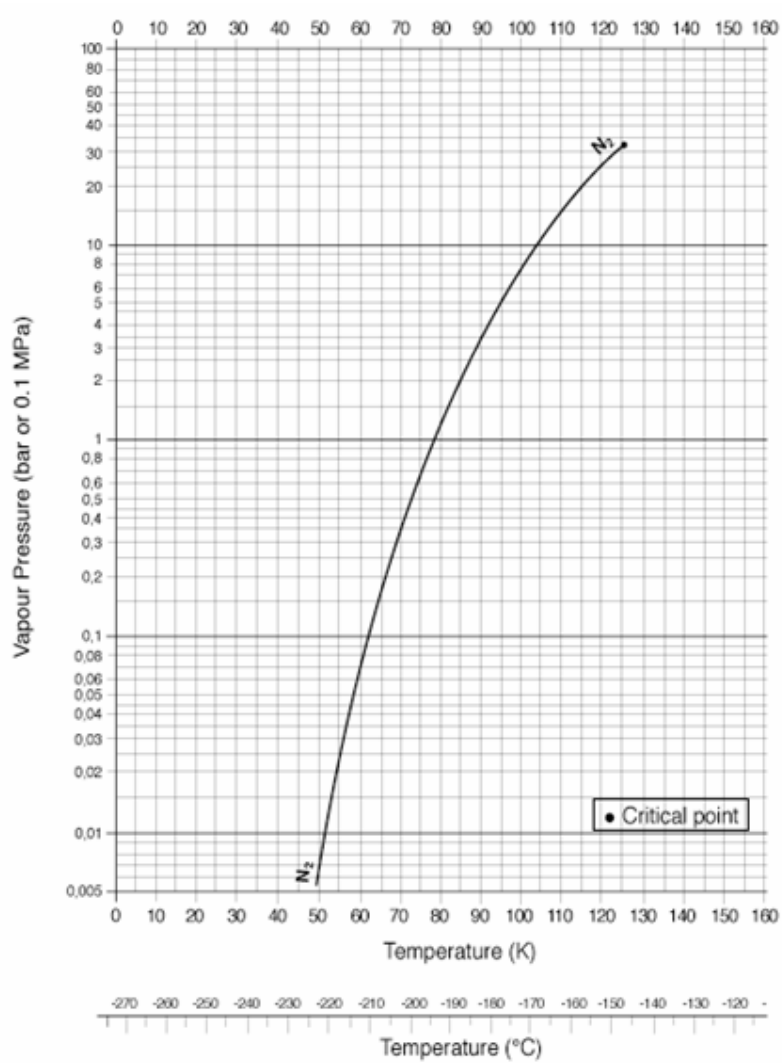
Capacidad calorífica a presión constante (Cp) (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.029 kJ/(mol\*K)

Capacidad calorífica a volumen constante (Cv) (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.02 kJ/(mol.K)

Razón de calores específicos (Gama: Cp/Cv) (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 1.403846

Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 0.0001657 Poise

**Anexo 5:** Curva de equilibrio Líquido-vapor de N<sub>2</sub>:



**Fuente:** Enciclopedia de los gases [6]

## **Anexo 6:** Cotización túnel de congelación continuo



### **Fullwood Packo SA de CV**

Calle Llama No. 115  
Parque Industrial Tenango Del Valle  
Estado de México  
Tel. +52 (717) 1444436  
<http://www.packo.com>

México 08 de Julio del 2009

**Su contacto:** Abraham Bucio Cordero – Correo:  
Abraham.BucioCordero@packo.com.mx

### **Cotización: 0811-09 Congelamiento**

**Acerca:** Túnel de congelación Lineal 10 x 1.2 m

Apreciable Sr. Valdés,  
Respondiendo a su solicitud, reciba usted la presente cotización de una congelador lineal de 9 x 1.2 m, muchas gracias por su solicitud!  
Si necesita mayor información no tema en contactarnos.

**Abraham Bucio Cordero**  
**Packo México.**

## 1.- PRESUPUESTO PACKO



### Dimensiones

- Largo 9m
- Diámetro interno 1.2m

### Material

- Camara de congelación y soportes elaborados en acero inoxidable AISI 304

### Banda transportadora

- Incluida; pero es opcional una extensión de la banda de alimentación
- Velocidad de la banda de alimentación es controlada por un inversor de frecuencia

### Sistema de extracción

- El ventilador del extractor tiene control de frecuencia
- El ventilador del extractor puede ser instalado en el techo: el cable tiene un largo de 20m (el tubo del extractor no se incluye)
- Control PLC

## 2.- PRECIO

Descripción	Precio unitario (US\$)
Túnel de congelación lineal 9 x 1.2m	98.750,00

## 4.- CONDICIONES GENERALES

### Precio

- No se incluye IVA o VAT
- Los precios están basados en los costos de salarios y materiales al día de hoy por lo que se puede hacer una revisión en cualquier momento para ajustarlos nuevamente

### Condiciones de pago

- 30% al ordenar en efectivo
- 20% al momento de aprobar los planos y diseños
- 50% antes de que el equipo abandone nuestras instalaciones



**Anexo 7: Cotización Equipo Batch (equipo estacionario).**



**Fullwood Packo SA de CV**

Calle Llama No. 115  
Parque Industrial Tenango Del Valle  
Estado de México  
Tel. +52 (717) 1444436  
<http://www.packo.com>

México 15 de Julio del 2009

**Su contacto:** Abraham Bucio Cordero – Correo:  
Abraham.BucioCordero@packo.com.mx

**Cotización: 0911-09 Congelamiento**

**Acerca:** Cámara estacionaria de congelación

Apreciable Sr. Valdés,  
Respondiendo a su solicitud, reciba usted la presente cotización de una cabina de congelamiento a N<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> 1900L  
Si necesita mayor información no tema en contactarnos.

**Abraham Bucio Cordero**  
**Packo México.**

## 1.- PRESUPUESTO PACKO



### Información general (características)

#### **Ventiladores radiales**

- Alta eficiencia para desplazamientos de gas y lograr bajas temperaturas dentro de la cabina
- No es necesario ajustes (contrario a ventiladores axiales)
- Larga vida útil y durabilidad

#### **Esquinas redondeadas**

- Facilidad de limpieza
- Flujo de gas eficiente

#### **Tiempo de vida y bajo mantenimiento**

- Totalmente soldado, se reduce el riesgo de que el agua pueda dañar el aislamiento, con sus posibles consecuencias de formación de escarcha al exterior, se evita la deformación de la cabina.

#### **Rampa extendida**

- Fácil manejo, facilita el movimiento dentro y fuera
- Se puede almacenar charolas mas pesadas

#### **CE-label**

- Integra medidas de seguridad, por ejemplo el cierre neumático cuando la energía se apaga.

## 2.- DATOS DE CONSTRUCCIÓN

### Volumen y dimensiones

- Interno: W x D x H = 680 x1300 x 2000mm
- Externo: W x D x H = 1572 x 1650 x 2125mm
- Abertura de puerta : W x H = 730 x 2000mm
- Max. Dimensión de carga : 670 x 1200mm

### 3.- PRECIO

Descripción	Precio unitario (US\$)
Cabina de congelamiento N <sub>2</sub> o CO <sub>2</sub> 1900L	27.750,00

### 4.- CONDICIONES GENERALES

#### Precio

- No se incluye IVA o VAT
- Los precios están basados en los costos de salarios y materiales al día de hoy por lo que se puede hacer una revisión en cualquier momento para ajustarlos nuevamente

#### Condiciones de pago

- 30% al ordenar en efectivo
- 20% al momento de aprobar los planos y diseños
- 50% antes de que el equipo abandone nuestras instalaciones

**Anexo 8:** Cotización Estanque de 11000 gal



**Fullwood Packo SA de CV**

Calle Llama No. 115  
Parque Industrial Tenango Del Valle  
Estado de México  
Tel. +52 (717) 1444436  
<http://www.packo.com>

México 15 de Julio del 2009

**Su contacto:** Abraham Bucio Cordero – Correo:  
Abraham.BucioCordero@packo.com.mx

**Cotización: 0407-09 Estanque**  
**Acerca:** Estanques de almacenamiento

Apreciable Sr. Valdés,  
Respondiendo a su solicitud, reciba usted la presente cotización de un Estanque de almacenamiento de N<sub>2</sub> de 11000gal  
Si necesita mayor información no tema en contactarnos.

**Abraham Bucio Cordero**  
**Packo México.**

## 1.-PRESUPUESTO PACKO

### Información General

#### **Aislamiento**

- Material reflectante al vacío de polvo de dióxido de silicio reforzado con perlita por dentro (Enchaquetado).
- Alto poder de aislamiento, minimiza pérdidas de Nitrógeno Líquido.

#### **Dimensiones:**

- 11000gal, altura y ancho ha pedido del cliente.

#### **Presión de Operación**

- Baja presión de almacenamiento, entre 1 a 6Kg/cm<sup>2</sup>.
- Mínimo riesgo de almacenamiento.

## 2.- PRECIO

Descripción	Precio unitario (US\$)
Estanque de almacenamiento de Nitrógeno Líquido 11000gal	146.000

## 4.- CONDICIONES GENERALES

### Precio

- No se incluye IVA o VAT
- Los precios están basados en los costos de salarios y materiales al día de hoy por lo que se puede hacer una revisión en cualquier momento para ajustarlos nuevamente

### Condiciones de pago

- 30% al ordenar en efectivo
- 20% al momento de aprobar los planos y diseños
- 50% antes de que el equipo abandone nuestras instalaciones

**Anexo 9:** Cotización Estanque de 1500 gal



**Fullwood Packo SA de CV**  
Calle Llama No. 115  
Parque Industrial Tenango Del Valle  
Estado de México  
Tel. +52 (717) 1444436  
<http://www.packo.com>

México 18 de Julio del 2009

**Su contacto:** Abraham Bucio Cordero – Correo:  
Abraham.BucioCordero@packo.com.mx

**Cotización: 0307-09 Estanque**  
**Acerca:** Estanques de almacenamiento

Apreciable Sr. Valdés,  
Respondiendo a su solicitud, reciba usted la presente cotización de un Estanque de almacenamiento de N<sub>2</sub> de 1500gal  
Si necesita mayor información no tema en contactarnos.

**Abraham Bucio Cordero**  
**Packo México.**

## 1.-PRESUPUESTO PACKO

### Información General

#### **Aislamiento**

- Material reflectante al vacío de polvo de dióxido de silicio reforzado con perlita por dentro (Enchaquetado).
- Alto poder de aislamiento, minimiza pérdidas de Nitrógeno Líquido.

#### **Dimensiones:**

- 1500gal, altura y ancho ha pedido del cliente.

#### **Presión de Operación**

- Baja presión de almacenamiento, entre 1 a 6Kg/cm<sup>2</sup>.
- Mínimo riesgo de almacenamiento.

## 2.- PRECIO

Descripción	Precio unitario (US\$)
Estanque de almacenamiento de Nitrógeno Líquido 1500gal	33.700

## 4.- CONDICIONES GENERALES

### Precio

- No se incluye IVA o VAT
- Los precios están basados en los costos de salarios y materiales al día de hoy por lo que se puede hacer una revisión en cualquier momento para ajustarlos nuevamente

### Condiciones de pago

- 30% al ordenar en efectivo
- 20% al momento de aprobar los planos y diseños
- 50% antes de que el equipo abandone nuestras instalaciones