



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CONGELACION CRIOGENICA PARA  
LA CONSERVACION DE ALIMENTOS

TRABAJO MONOGRAFICO  
DE ACTUALIZACION  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUIMICA DE ALIMENTOS  
PRESENTA:  
BEATRIZ EUGENIA ITUARTE GONZALEZ



MEXICO, D.F.

1996

FALLA DE ORIGEN

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

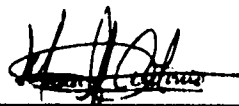
Jurado Asignado:

Presidente: Prof. Zoila Nieto Villalobos  
Vocal: Prof. María de los Angeles Valdivia López  
Secretario: Prof. Marco Antonio León Félix  
1er. suplente: Prof. María de Lourdes Gómez Ríos  
2do. suplente: Prof. Luis Joel López Bajonero

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Alimentos y Biotecnología  
Facultad de Química  
Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor:



---

Prof. Marco Antonio León Félix

Sustentante:



---

Beatriz Eugenia Ituarte González

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, que ilumina mi camino y me alienta a seguir adelante.

A mis papás por todo el amor, entrega y apoyo incondicional.

A mis hermanos Ali, Ceci y Julio por acompañarme en cada momento de mi vida.

A mi abuelita, tíos y primos.

Al Profr. Marco Antonio León Félix, Profra. Zoila Nieto, Q.F.B. Victoria Coutiño, M.C. Lucía Cornejo y a todos mis profesores por haber compartido sus conocimientos conmigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Química por haberme dado tanto.

A Olga, Gus, Roger, Ceci y Gaby, por todo lo que compartimos y soñamos.

A Carlos, Federico, Flor, Jose Luis, Vanessa, Víctor y Sabrina por ser mucho más que compañeros de generación.

A M. Martha, Sr. Trejo y familia por ser parte tan importante de mi vida.

Al grupo Génesis por su amistad y fortaleza en estos años.

## INDICE

1 INTRODUCCION.....	1
2 OBJETIVOS .....	3
3 ANTECEDENTES .....	4
3.1 Historia de la congelación.....	4
3.2 Importancia actual.....	6
3.3 Proceso de Congelación.....	12
A. Definición.....	12
B. Etapas Térmicas .....	12
C. Etapas estructurales.....	14
3.4 Velocidad de congelación.....	19
3.5 Otros conceptos importantes en la congelación .....	20
3.6 Métodos de congelación.....	22
4 CALIDAD DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS .....	27
4.1 Aspectos Sensoriales .....	27
4.2 Aspectos Nutricionales.....	28
4.3 Aspectos Microbiológicos .....	29
4.4 Precauciones para conservar la calidad de los alimentos congelados .....	32
A. Empaque y embalaje .....	32
B. Cadena del Frio .....	36
C. Descongelación .....	45
4.5 Normalización en México de los alimentos congelados .....	47
5 CONGELACION CRIOGENICA.....	49
5.1 Definición .....	49
5.2 Obtención de los flúidos criogénicos .....	51
5.3 Propiedades de los Flúidos Criogénicos .....	53
A Propiedades físicas y químicas.....	53
B) Manejo y almacenamiento .....	63
C) Riesgos para la salud.....	64
5.4 Sistemas de congelación criogénica.....	67
6 APLICACIONES DE LA CONGELACION CRIOGENICA .....	75
6.1 Carnes.....	75

6.2 Pescados y mariscos .....	81
6.3 Verduras .....	82
6.4 Frutas .....	83
6.5 Platos preparados .....	86
6.6 Otros .....	91
6.7 Ventajas y Desventajas .....	96
6.8 Ejemplo de una aplicación de la congelación criogénica .....	102
7 CONCLUSIONES .....	108
8 BIBLIOGRAFIA .....	115
APENDICE A .....	126
Simulación de un congelador criogénico de cámara .....	126
APENDICE B .....	134
Otras referencias bibliográficas .....	134

# LA CONGELACION CRIOGENICA PARA LA CONSERVACION DE ALIMENTOS

## 1 INTRODUCCION

Muchos alimentos en su estado natural se descomponen muy rápidamente. En la actualidad, a pesar del nivel de tecnificación, alrededor del 20-30% del volumen total de producción de alimentos perecederos se pierden y en algunos casos es mayor el porcentaje de pérdida (GRUDA y POSTOLOSKI 1987). Por esta razón, el hombre ha buscado la forma de conservar los alimentos desarrollando diferentes tecnologías que permitan mantener sus características nutritivas y sensoriales.

Una de estas tecnologías es la congelación, que hace posible mantener por largo tiempo sus características iniciales, superando en este sentido a otros métodos de conservación químicos y físicos, especialmente en lo que respecta al mantenimiento del valor nutritivo, sabor y aroma.

Los alimentos congelados ahorran tiempo y hacen posible disponer de reservas de alimentos fuera de temporada ó en regiones donde no es posible producirlos. También tienen gran importancia en establecimientos tales como hoteles, restaurantes, hospitales y escuelas, especialmente alimentos que son muy perecederos como la carne y el pescado.

En la congelación se aprovecha la acción del frío, aplicando temperaturas de  $-15^{\circ}\text{C}$  y menos, que detiene el crecimiento microbiano, mientras que los procesos químicos y enzimáticos se desarrollan mucho más lentamente.

Para que la congelación esté lo mejor posible al servicio del hombre es indispensable comprender la esencia misma del procedimiento y prestar atención a los numerosos factores que, en conjunto, influyen ampliamente en la calidad del producto ofrecido al consumidor, como por ejemplo, las características de la materia prima, los métodos y condiciones de congelación, el envasado y las condiciones de almacenamiento. Es por esto que en esta tesis se considerará uno de los métodos de congelación, su aplicación, ventajas y desventajas, para obtener alimentos congelados de mejor calidad.



## 2 OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

- Realizar una recopilación y síntesis de información obtenida a partir de una revisión bibliográfica sobre la utilización de la congelación criogénica para conservar a los alimentos.

### **Objetivos particulares:**

- Revisar el concepto de congelación de alimentos para entender posteriormente la congelación criogénica.

- Hacer un análisis de los factores que influyen en las características de los alimentos congelados.

- Revisar los diferentes métodos y aplicaciones de la congelación criogénica en la industria alimentaria.

- Analizar las ventajas y desventajas que se presentan.

- Revisar la normalización en nuestro país sobre alimentos congelados.

- Presentar un ejemplo práctico sobre el uso de la congelación con un fluido criogénico.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 Historia de la congelación:

Los alimentos se han conservado mediante el frío desde tiempo inmemorial en los lugares con temperaturas ambientales suficientemente reducidas (refrigeración y congelación climática) y ya desde la antigüedad se han consumido productos de heladería a base de hielo y nieve natural. El emperador romano Nerón, por ejemplo, acostumbraba hacer que sus esclavos le trajeran cajones de nieve desde los Alpes hasta Roma; sin embargo no se puede considerar a esto como una tecnología (FRIAS TEJERA, 1990).

Durante la segunda mitad del siglo XIX, se desarrollaron equipos frigoríficos mecánicos y se establecieron las bases de las actuales industrias de almacenamiento y transporte de productos refrigerados y congelados; en este momento ya comienza a desarrollarse la congelación como una tecnología para conservar los alimentos.

El primer barco frigorífico fue instalado por el ingeniero francés Carlos Tellier; en él se llevó por primera vez carne Argentina a Inglaterra en 1876. Así, la carne congelada comienza a adquirir importancia en el comercio internacional y se transporta desde Sudamérica y Australia, primero a Inglaterra y después al resto de Europa. De igual modo, en Estados Unidos gana consideración este producto desde comienzos del siglo XX y con él, comienza a congelarse las frutas y huevos (FRIAS TEJERA, 1990).

La congelación comercial de frutas se inició en Estados Unidos en 1904, pero la congelación de hortalizas no tuvo éxito hasta 1925, cuando se vió que el desarrollo de olores, sabores y cambios en la textura indeseables eran ocasionados por la actividad enzimática y que aplicando un tratamiento térmico (escaldado) previo a la congelación se lograba inactivar dichas enzimas. A partir de entonces, se ha trabajado para establecer el tiempo y temperatura adecuadas para detener estas reacciones sin que el tratamiento térmico cause daños al producto (HOLDSWORTH, 1988).

A partir de 1930, después de los trabajos de Birdseye entre otros, se estableció que la velocidad de congelación determinaba la calidad del producto una vez descongelado, especialmente en los vegetales, e introdujo el concepto de la "congelación rápida". Trabajos más recientes han indicado que, en lo referente a calidad de los alimentos, es necesario vigilar la velocidad de congelación para cada caso, ya que el enfriamiento demasiado rápido puede inducir tensiones tan fuertes en los alimentos que den lugar al resquebrajamiento (FRIAS TEJERA, 1990).

Desde 1950, se comenzó a congelar combinaciones de frutas, vegetales para ensaladas, coctails, postres, y ahora incluso se congelan platos preparados listos para consumirse, lo que incluye panes, pasteles, hamburguesas, carnes, pescados y mariscos, pollo, y todas las combinaciones deseadas (WOODROOF, 1990).

Actualmente se trabaja en muchos países para desarrollar y optimizar nuevas técnicas de congelación que proporcionen más ventajas con respecto a la calidad del alimento y su costo sea menor.

### **3.2 Importancia actual:**

La producción y consumo de alimentos congelados ha ido en considerable aumento en los últimos años prácticamente en todo el mundo. Esto se debe a fenómenos sociales y al desarrollo de la congelación como técnica de conservación que ofrece ventajas sobre otras técnicas.

Entre los factores que influyen en el aumento del consumo de productos congelados podemos mencionar:

- \* Cada vez es mayor la proporción de mujeres que trabajan y que necesitan alimentos de fácil preparación.

- \* Aumenta la conciencia de los consumidores sobre la calidad, frescura y seguridad de sus alimentos (DOUGHERTY, 1990).

- \* Se congelan alimentos con diferente grado de preparación que pueden ser materias primas sin tratar o tras un sencillo proceso, semiproductos parcialmente tratados que están listos al ser cocinados y postres congelados dispuestos para su consumo, lo que constituye una gran variedad de productos para responder a diversas necesidades.

- \* El mayor consumo de productos congelados por parte de comedores industriales, cafeterías, restaurantes, hospitales, sanatorios, escuelas, barcos, aviones, etc, ya que disminuye la mano de obra y ahorra energía, existe disponibilidad continua de los alimentos, hay posibilidad de una buena adaptación del número de raciones y del tipo de artículo en cada caso y es posible proporcionar comidas sanas y sabrosas al público (NIELSON, 1993; GRUDA y POSTOLOSKI 1987).

La tasa media de crecimiento en el consumo de productos congelados es de un 12% anual en los países desarrollados. La industria frigorífica se considera en general como una rama con particular dinámica de desarrollo y perspectivas de futuro (GRUDA y POSTOLOSKI 1987).

En Estados Unidos aumento la producción de alimentos congelados de menos de mil millones de libras en 1942 a cerca de 30 mil millones de libras en 1990 (MALLET, 1993).

En Alemania, pesar de que la expansión económica en algunos sectores ha bajado debido a la recesión que afecta al país, esto no sucede con la industria de alimentos congelados. La expansión total en 1992 fue del 1.5% después del 3.7% en 1991. Sin embargo, las ventas de alimentos congelados en 1992 fueron 8% mayores que en 1991. Dentro de estos productos los que más aumentaron fueron los alimentos listos para consumirse que incrementaron sus ventas en un 50% al introducir en el mercado nuevos productos, presentaciones y tamaños (ANON. QUICK FROZEN FOODS INT., 1993).

**Tabla 3.1.- Consumo de alimentos congelados en 1993**

PAIS	CONSUMO DE ALIMENTOS CONGELADOS (tons)
Reino Unido	2,190,000
Austria	149,300
Bélgica	182,450
Dinamarca	247,035
Finlandia	62,894
Francia	1,835,500
Alemania	1,899,289
Italia	478,240
Estados Unidos	13,172,000
Japón	1,263,201
Taiwan	224,840

(ANON. QUICK FROZEN FOODS INT . 1994)

En Latinoamérica también ha ido creciendo el mercado de alimentos congelados. Por ejemplo, en Chile una empresa que elabora pan congelado ha tenido una expansión importante al iniciar una cadena de tiendas en todo el país en los últimos 12 años; otra empresa informa que en el rubro de vegetales congelados

ya alcanza una producción anual de 20,000 toneladas (30 % del mercado chileno) y sigue creciendo. Uruguay y Costa Rica han incrementado sus exportaciones a Japón, Hong Kong, Italia, Alemania, Checoslovaquia, Francia, España, Estados Unidos, México, Brasil, Argentina, España, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Inglaterra, Taiwan, Israel y Arabia Saudita. Brasil ha logrado colocar productos de pollo en más de 30 países desde la década de los 70's, por parte de una sola compañía (HELGUERA, 1994).

Las exportaciones de los países latinoamericanos han aumentado al entrar en mercados europeos y asiáticos, y poner a su disposición productos frescos que no son disponibles en esos países o están fuera de estación. Por ejemplo, Japón ha incrementado las importaciones de vegetales congelados de 242,000 tons en 1982 a 480,000 tons en 1991, lo que corresponde a un aumento del 80%. El aumento en la demanda viene, principalmente, del sector institucional (85% del consumo total) como restaurantes, establecimientos de comida rápida, comedores de industrias, hospitales, escuelas, etc. Las papas representan el 37% de las importaciones en 1992 y 1993. Otros vegetales son maíz 9%, soya 11%, frijoles 15% y otros vegetales 27% (NIELSON, LU, 1993).

México también ha tenido un aumento en la producción de alimentos congelados. En 1992 en Estados Unidos aproximadamente un sexto de las importaciones de frutas y verduras congeladas fueron importadas de México. Con la firma del Tratado de Libre Comercio México-Estados Unidos-Canadá se ha propiciado el interés de compañías extranjeras de alimentos congelados en nuestro país así como la posibilidad de exportar productos mexicanos a ellos (SAULNIER, 1993).

El consumo de productos congelados norteamericanos y canadienses como pastelería, helados, pizzas y comida rápida ha aumentado en nuestro país, mientras que las exportaciones mexicanas de alimentos congelados son verduras, jugos, frutas y comida típica como guacamole, chilaquiles, tamales, tacos y otros (ANON.QFFI, 1992).

**Tabla 3.2.-Importaciones y exportaciones en México en 1993**

PRODUCTO	EXPORTACIONES (tons)	IMPORTACIONES (tons)
Carnes	727	263,325
Pescados y Mariscos	32,100	4,739
Verduras	109,363	22,607
Frutas y Jugos	57,050	455
Helados	592	12,949

(INEGI, 1993)

Entre los productos congelados de exportación de mayor importancia se encuentran el atún, camarón, hortalizas, fresas y jugo de naranja.



En las carnes existe un volumen muy grande de importaciones ya que en nuestro país prácticamente todas las vísceras como hígado, lengua, riñones y sesos que se consumen se importan congeladas de los Estados Unidos.

Respecto al comercio de platillos preparados congelados no se especifica porque no existe una fracción específica para ellos en la Tarifa Arancelaria en base a la cual se hacen los pedimentos aduanales. Aunque en México el comercio de alimentos tiende al consumo de productos frescos las cosas están cambiando. Como sucede en otros países las necesidades del sector institucional y turismo son cubiertas por los alimentos congelados. Además, debido al impulso que han dado las grandes cadenas de supermercados a los productos congelados, las costumbres en algunos sectores de la población están cambiando, cambio originado por las diferentes actividades de la población al requerir alimentos de más fácil preparación. Sin embargo, es necesario mejorar los sistemas de distribución, aumentar la capacidad de almacenamiento en congelación y brindar información sobre los alimentos congelados, ya que existe desconocimiento y falsas creencias (ANON. QFFI 1992; SAULNIER, 1993).

En un mercado tan competido siempre es positiva la diferenciación lanzando nuevos productos, presentando nuevos empaques y ofreciendo mejor servicio y calidad.

### **3.3 Proceso de Congelación:**

#### **A. Definición**

La congelación es el cambio de estado físico de una sustancia de líquido a sólido, el cual ocurre cuando se extrae energía en forma de calor de dicha sustancia ocasionando que sus moléculas disminuyan su energía cinética, es decir, su movimiento al azar y se organicen en un patrón más ordenado (BROWN, 1976).

Se consideran alimentos congelados los que han sido sometidos a la acción de bajas temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  en adelante (INST. INT. DEL FRIO, 1990). Algunos autores hacen la distinción entre congelación y ultracongelación dependiendo de la temperatura que se alcance (HERRMAN, 1977).

Los alimentos aptos para su congelación contienen generalmente un alto porcentaje de agua, que aparece en el conjunto celular ya sea como *agua libre* ó como *agua ligada* a las células (en parte, como componente del protoplasma). El agua interviene en todos los procesos vitales como solvente de cationes y aniones inorgánicos disueltos, de múltiples sustancias orgánicas solubles y finalmente como medio de dispersión de coloides (HERRMAN, 1977).

#### **B. Etapas Térmicas**

En el proceso de congelación intervienen tres etapas térmicas (HERRMAN, 1977; INST. INT. DEL FRIO, 1990):

a) **Enfriamiento:** Descenso de temperatura del producto desde la temperatura de ingreso en el congelador hasta el punto de congelación.

b) **Congelación:** Extracción del calor latente para que se lleve a cabo la solidificación del agua. La temperatura se mantiene casi constante.

c) **Reducción de temperatura** hasta la temperatura final, que generalmente es la de almacenamiento o muy cercana a ella.

En las tres etapas se lleva a cabo un intercambio de energía de un cuerpo a otro en forma de calor, ya sea calor sensible cuando hay variación de temperatura o calor latente en el cambio de fase. La cantidad de calor que debe ser removida depende de la masa de producto a congelar, de la diferencia de temperaturas así como de la capacidad calorífica específica del producto.

Existe por lo tanto una diferencia de entalpía que será retirada.

$$\Delta H = H_1 - H_2 = m \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1 + m \cdot \lambda + m \cdot C_{p2} \cdot \Delta T_2 \quad \text{kJ/h}$$

donde:

$$\Delta T_1 = T \text{ inicial} - T \text{ cristalización}$$

$$\Delta T_2 = T \text{ cristalización} - T \text{ final}$$

$m$  = masa

$C_p$  = Capacidad calorífica específica a presión constante

$\lambda$  = Calor latente de solidificación

### C. Etapas estructurales

Debido a los cambios en la temperatura se llevan a cabo cambios estructurales. Para obtener un producto congelado, es necesario que se lleven a cabo los siguientes procesos (REID, 1983; FRIAS TEJERA, 1990):

**a) Nucleación:** Para que cualquier cristal crezca es necesario tener una "semilla" estable para actuar como origen de crecimiento. La nucleación puede ser homogénea si se generan los núcleos de la misma solución ó sustancia pura, ó heterogénea si la cristalización se ve favorecida por la presencia de cristales de diversas sales insolubles, de partículas de polvo, etc.

Se ha observado que para que se lleve a cabo una nucleación homogénea en ocasiones se llega hasta una temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  para que se inicie dicho fenómeno. En cambio la nucleación heterogénea se lleva a cabo a temperaturas superiores. En los alimentos siempre se llega a un tipo de nucleación heterogénea. La nucleación aumenta conforme aumenta el sobreenfriamiento.

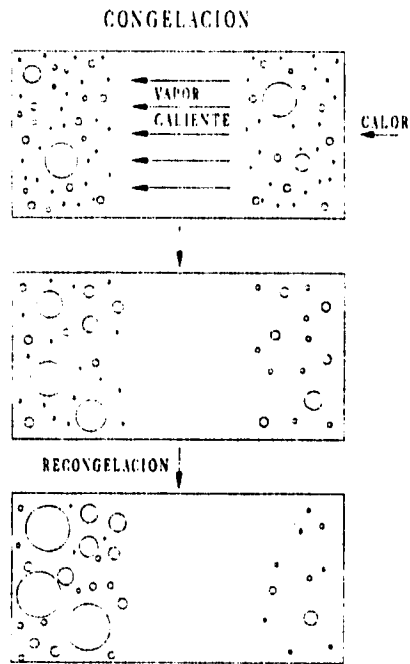
**b) Crecimiento de cristales:** El crecimiento de los cristales se lleva a cabo una vez que la nucleación ha sucedido debido a que las moléculas de agua emigran hacia el medio y terminan agregándose a un núcleo ya existente. Mientras la nucleación requiere varios grados de sobreenfriamiento, el crecimiento de los cristales es posible con un mínimo de sobreenfriamiento ( $0.01^{\circ}\text{K}$ ). El grado de crecimiento es controlado en parte por la cantidad de calor que se retira del

sistema, así la morfología del sistema congelado depende de la cantidad de calor eliminado así como de la dirección de transferencia del calor

En los alimentos, la velocidad de crecimiento de los cristales depende de la diferencia de temperaturas entre el cristal y el medio que le rodea.

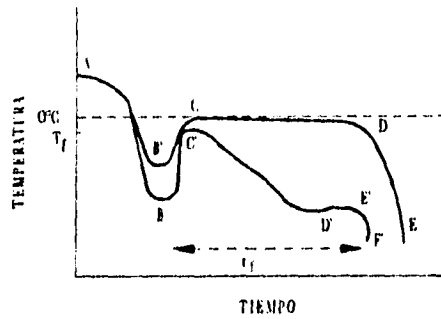
**c) Recristalización ó maduración:** Durante el almacenamiento, aún a temperatura constante, ocurren cambios de número, tamaño y forma en los cristales, ya que son relativamente inestables. Se lleva a cabo un proceso en el cual los cristales pequeños disminuyen su tamaño, mientras que los grandes lo aumentan a expensas de los pequeños debido a que entre ellos existen un gradiente de tensión de vapor. Este fenómeno puede afectar la estabilidad durante el almacenamiento prolongado del producto congelado. Se considera uno de los aspectos más importantes a considerar para preservar la calidad de los alimentos congelados (HERRMAN, 1977, GOFF 1992).

**Figura 3.1.- Recristalización Migratoria**



Una vez comprendiendo las diferentes etapas técnicas y estructurales, en la **figura 2** se muestra la relación tiempo-temperatura en la congelación de agua pura (ABCDE) y para soluciones acuosas (A'B'C'D'E'F'), y así entender mejor la congelación de los alimentos, de acuerdo a lo que se discutió anteriormente (GOFF, 1992; HERRMAN, 1977; REID, 1983):

**Figura 3.2.-** Relación tiempo-temperatura durante la congelación de agua y una solución acuosa.



De A a B ó B' se presenta un sobreenfriamiento debajo del punto de congelación antes de la inducción de la cristalización. Es un estado de equilibrio meta-estable el cual es análogo a la energía de activación necesaria para el proceso de nucleación. El agua pura puede ser sobreenfriada varios grados antes de que el fenómeno de nucleación comience.

En el punto B o B' se lleva a cabo la nucleación liberando el calor latente más rápido que lo que puede ser removida del sistema. En soluciones acuosas B' no es tan baja como B ya que los solutos adicionados promueven una nucleación heterogénea, por lo tanto aceleran el proceso. En soluciones muy concentradas es difícil que se presente el sobreenfriamiento.

La temperatura aumenta inmediatamente al punto inicial de congelación Tf al punto C o C'. La presencia de solutos provoca una depresión del punto de congelación de acuerdo a la ley de Raoult. Por esta razón C' no es tan alto como C. La fracción fluida de los alimentos comienza a congelar a temperaturas comprendidas entre -0.5 y -2.0°C

En el agua pura, la línea de C a D refleja el tiempo durante el cual se lleva a cabo el crecimiento de los cristales. Se lleva a cabo a una temperatura casi constante ya que no hay enfriamiento de la mezcla parcialmente congelada hasta que toda el agua "congelable" ha sido cristalizada.

El tiempo de congelación,  $t_f$ , se define como el tiempo desde el comienzo de la nucleación hasta la completa remoción del calor latente, **D**.

Después de que la cristalización se completa, desciende la temperatura al liberarse calor sensible.

Durante la congelación de soluciones acuosas el agua se congela formando hielo puro, por lo que se presenta una concentración de la solución sin congelar y por consiguiente su punto de congelación baja además que al aumentar la concentración aumenta también la viscosidad por lo que la difusión disminuye y la cristalización se dificulta. Debido a esto la línea **C'D'** no se presenta a una temperatura constante. En los alimentos es necesario disminuir la temperatura para alcanzar a cristalizar toda la fracción de agua congelable.

En el punto **D'** alguno de los solutos puede llegar a sobresaturarse y liberar su calor latente de cristalización causando un ligero salto en la temperatura desde **D'** a **E'**. Estos puntos son conocidos como *puntos eutécticos*.

De **E'** a **F'** continúa la cristalización del solvente y puede llegar a congelarse algo de soluto hasta que el sistema esté completamente cristalizado ó a muy bajas temperaturas.



Para obtener el efecto conservador deseado, una proporción importante del agua congelable del producto debe ser transformada en hielo (en general más del 80% del agua libre) y mantenerla así durante el almacenamiento, de manera que se reduzcan lo más posible las modificaciones físicas, químicas y microbiológicas que deteriorarían el producto (INST. INT DEL FRIO, 1990).

### **3.4 Velocidad de congelación:**

Se entiende por velocidad de congelación la velocidad lineal de avance del frente de hielo por el interior del producto a congelar durante el proceso de congelación.

La transmisión del calor varía mucho de unas capas a otras del alimento, generalmente es elevada en las capas externas y baja en las capas próximas al núcleo central, haciéndose mayor la diferencia al aumentar el grosor de las piezas. De ahí que sólo sea posible indicar una velocidad media de congelación (HERRMAN, 1977).

Cabe considerar la velocidad de congelación, dependiente principalmente, de la diferencia de temperatura entre el producto a congelar y el medio refrigerante siendo:

- Congelación muy lenta: Velocidad < 0.1 cm/h
  - Congelación lenta: 0.1 - 0.5 cm/h
  - Congelación rápida: 0.5 - 5 cm/h
  - Congelación muy rápida: 5 - 10 cm/h
  - Congelación ultrarrápida: 300 a 600 cm/h
- (HERRMAN, 1977; FRIAS TEJERA, 1990)

En la congelación lenta los núcleos de hielo se forman en los espacios existentes entre las células, por tener una concentración de sales menor que en el interior de la célula. Los cristales crecen a expensas del agua que difunde a través de la membrana ó pared celular. En estas condiciones, las células se distorsionan debido a la deshidratación y a la presión ejercida por los grandes cristales de hielo exterior.

Si el enfriamiento es más rápido, la velocidad de nucleación es mayor y los núcleos se forman en el interior de las células.

La congelación rápida tiende a formar gran cantidad de cristales pequeños, mientras que la congelación lenta tiende a producir grandes cristales de hielo, en mucho menor número a partir de la misma cantidad de agua. La congelación rápida reduce los procesos de alteración en la miscibilidad de los componentes tisulares y los de difusión se reducen, habiendo menos pérdidas por exudación durante la descongelación (HERRMAN, 1977; FRIAS TEJERA, 1990; POTTER, 1978).

### **3.5 Otros conceptos importantes en la congelación:**

#### **Aumento de volumen:**

Cuando el agua se congela dilata entre 8 y 10%; ésto es menor para los alimentos (alrededor del 6%), porque únicamente se congela una parte del agua y también porque ciertos alimentos contienen aire. En caso de congelación muy rápida (por ejemplo, inmersión de grandes piezas en nitrógeno líquido), el fenómeno puede ser responsable de presiones internas excesivas que conducen a la

ruptura y estallido del producto (INST. INT. DEL FRIO, 1990; HERRMAN, 1977).

**Tiempo de congelación:**

El Instituto Internacional del Frío lo define como el tiempo que transcurre entre el momento en que la superficie del producto alcanza 0°C y el instante en que el centro térmico (punto del alimento que se enfría más lentamente) se encuentra a una temperatura de 10°C por debajo de la formación inicial de hielo en dicho punto.

El "tiempo efectivo de congelación" se define como el necesario para reducir la temperatura inicial del producto hasta un valor dado en el centro térmico, cuya temperatura final será la que se desee para extraer el alimento del equipo de congelación (FRIAS TEJERA, 1990).

La duración real del proceso de congelación depende de diversos factores, unos relativos al producto a congelar y otros al equipo utilizado, de los más importantes son:

- a) Dimensiones y forma del producto, particularmente espesor.
- b) Temperatura inicial y final.
- c) Temperatura del refrigerante.
- d) Coeficiente de transferencia de calor superficial del producto.
- e) Variación de entalpía.
- f) Conductividad térmica del producto.

(INST. INT. DEL FRIO, 1990)

Además hay que considerar que propiedades del producto a congelar como su entalpía, conductividad térmica, calor específico, etc., no permanecen constantes durante el proceso de congelación (HELDMAN, 1982).

### **Q<sub>10</sub>**

Es el coeficiente de temperatura que expresa la relación existente entre la velocidad de reacción a una temperatura T y a una temperatura 10 K superior. Su valor es generalmente de 2 a 3 para la mayoría de las reacciones responsables de las alteraciones de los alimentos, y significa una relación exponencial de dichas alteraciones con la temperatura de almacenamiento. Esto quiere decir que la intensidad de reacciones que ocurren en el producto disminuye de 2 a 3 veces al disminuir la temperatura 10 K; la capacidad de almacenamiento del producto aumenta en la misma proporción (LAFUENTE, 1982; GRUDA y POSTOLOSKY 1987).

A mayor valor de Q<sub>10</sub> mayor susceptibilidad del alimento al cambio de temperatura.

### **3.6 Métodos de congelación:**

Los procedimientos empleados para realizar la congelación son muy variados, así como los equipos que se utilizan para ello. Existen dos métodos básicos de congelación (HOLDSWORTH, 1988; INST. INT DEL FRIO, 1990; LAFUENTE, 1982; POTTER, 1978):

- a) Congelación por contacto indirecto
- b) Congelación por contacto directo

a) **Congelación por contacto indirecto:** En estos sistemas el refrigerante no entra en contacto con el alimento. Comprenden:

\* **Congeladores por aire forzado.-** Cuando el aire es enfriado y circula a velocidades de 600 m/min sobre, a través, ó alrededor de las piezas de alimento ó productos envasados. La operación puede ser un proceso discontinuo ó, más frecuentemente un proceso continuo.

\* **Lecho fluidizado.-** Este sistema es utilizado para productos constituidos por partículas relativamente pequeñas. Basta pasar aire frío, de abajo hacia arriba a una velocidad lineal superior a 6 km/h, que se ajusta para cada producto, para que se eleve a una altura de 15 a 20 cm. Al flotar en el aire se evita que se peguen unas con otras.

\* **Congelador de placas.-** Estas placas se montan en paralelo, horizontal ó vertical, abriéndose para cargarlas con el alimento y cerrándose para llevar a cabo la congelación. En el interior de las placas circula el refrigerante. Se utiliza para bloques de materiales deformables sin envasar como pescados, carnes, etc.

Una variación de este sistema, se podría considerar el congelador de "superficie raspada" que se utiliza para congelar fluidos, haciéndolos pasar por un ducto enfriado por el refrigerante.

Estos métodos de congelación utilizan un sistema mecánico para la producción de frío cuyo fundamento se explicará a continuación para comprender mejor las diferencias con la congelación criogénica:

Es un ciclo completamente cerrado para que no se pierda refrigerante, con una sección de baja presión y otra de alta presión (Ver figura 3.3), que consta de los siguientes puntos:

**1)** Vapor del refrigerante a baja presión para que el punto de evaporación también sea bajo.

**A)** Compresor para aumentar la presión y la temperatura. Compresión isoentrópica

**2)** Gas a alta presión y alta temperatura.

**B)** Condensador, cambia de gas a líquido a alta presión y alta temperatura. Al cambiar de fase cede calor al aire de afuera.

Condensación isobárica

**3)** Líquido a alta presión y alta temperatura.

**C)** Válvula de expansión. Separa la sección de alta y baja presión. Regula el flujo y la presión.

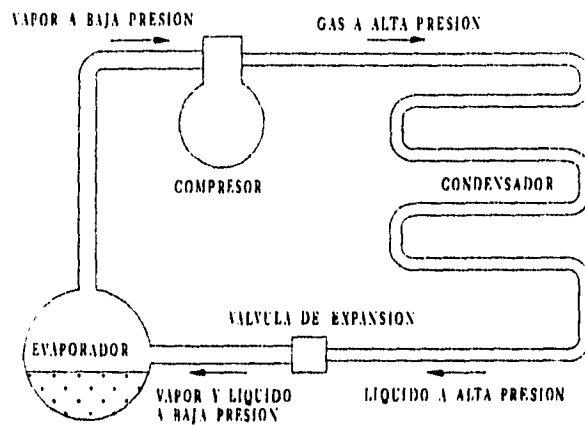
Expansión isoentálpica.

**4)** Líquido a baja presión y baja temperatura.

**D)** Evaporador, cambia de fase líquido a vapor. El calor absorbido para el cambio es el que absorbe de los alimentos. **He aquí el efecto de enfriamiento.**

Evaporación isobárica.

**Figura 3.3.- Sistema básico evaporación/condensación para una planta de refrigeración mecánica.**



**b) Congelación por contacto directo:** El fluido refrigerante entra en contacto con el alimento, lo cual determina las propiedades del fluido para poder ser utilizado como su toxicidad, baja penetración en el alimento y ausencia de reactividad. Se pueden citar los siguientes métodos:

- \* **Disoluciones de bajo punto de congelación.-** El líquido frío es una solución acuosa de sal, azúcar, alcohol u otras sustancias no tóxicas. Este método ya no es muy utilizado excepto para congelar sardinas o atún a bordo de los barcos.
- \* **Líquidos criogénicos ó congelación criogénica.-** Comúnmente se utilizan tres criógenos: nitrógeno líquido, dióxido de carbono sólido ó líquido e

hidrocarburos halogenados como el Freón 12, aunque estos últimos están siendo restringidos por los daños que causan a la atmósfera. Por sus bajos puntos de ebullición, la congelación se lleva a cabo muy rápidamente. Este método es el objeto de estudio de esta tesis, por lo que será tratado con profundidad en los capítulos 5 y 6.



## 4 CALIDAD DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS

### 4.1 Aspectos Sensoriales:

La formación de cristales de hielo puede alterar la concentración de solutos y la miscibilidad de los componentes tisulares como las lipoproteínas de las membranas celulares. Por esta razón se puede afectar la capacidad de imbibición, solubilidad y retención de agua tras la descongelación. Esto ocasiona daños en la textura pues el alimento pierde turgencia y da un aspecto flácido. Depende del proceso de congelación el grado de daño en el alimento.

Algunas de las reacciones de deterioro que tienen lugar durante el almacenamiento de los alimentos congelados están catalizadas por enzimas que pueden permanecer activas hasta temperaturas de  $-18^{\circ}\text{C}$ , aunque disminuye notablemente su actividad catalítica. El escaldado que se aplica a la mayoría de los productos vegetales inactiva las enzimas para evitar que produzcan alteraciones durante el almacenamiento.

Algunos ejemplos de enzimas responsables de cambios en los productos congelados son: la antocianasa y la fenolasa que pueden degradar los pigmentos de las frutas rojas. La polifenoloxidasa es responsable del pardeamiento de frutas y hortalizas y la clorofilasa produce también cambios de color. Las enzimas lipolíticas como lipasas y lipoxidasas determinan la formación de productos de desdoblamiento (aldehídos, cetonas, ácidos, peróxidos) y de la ruptura de fosfátidos (aparece trimetilamina a partir de la colina de la lecitina), que producen

sabores indeseables. La pectinmetilesterasa causa daños en la textura de vegetales (INST. INT. DEL FRIO, 1990; FELLOWS, 1990; HERRMAN, 1977).

Existen también reacciones de alteración no enzimáticas; pueden citarse la oxidación de los lípidos, de la vitamina C, de pigmentos y desnaturalización de proteínas (FRIAS TEJERA, 1990). Esto se debe a que por la concentración que existe de la fase líquida cambian sus propiedades como pH, acidez titulable, fuerza iónica, viscosidad, punto de congelación, tensión superficial y el potencial óxido-reducción (GOFF, 1992).

#### **4.2 Aspectos Nutricionales:**

En general, el valor nutricional de los alimentos conservados por congelación está bien preservado. Se ha observado que este método de conservación degrada menos que cuando se aplica calor como enlatado, desecación, etc., incluso nutrientes fácilmente alterables como las vitaminas hidrosolubles (ácido ascórbico, por ejemplo) se conservan mejor por congelación, siempre y cuando se aplique correctamente (HERRMAN, 1977; INST. INT DEL FRIO, 1990).

En general, las pérdidas de nutrientes se deben al proceso por trabajar a temperaturas inadecuadas ó congelación muy lenta así como al uso de envases inapropiados (permeables al aire) y un almacenamiento mal controlado, ya que esto favorece las reacciones químicas de degradación y oxidación, así como la acción de enzimas como la ácido ascórbico oxidasa y la tiaminasa (I F T, 1986; GOFF, 1992).

Además, se han realizado estudios donde se ha visto que al comparar el alimento tradicional con el congelado, éste último resulta tener una mayor aprovechabilidad de proteínas, hierro y vitaminas y mejor digestibilidad (HERRMAN, 1977).

Sin embargo, para tener un producto congelado de buena calidad nutricional es necesario que las materias primas así lo sean también. El contenido nutricional de un alimento se mantiene pero no se puede aumentar con el proceso de congelación. También hay que considerar que el contenido de nutrientes en las materias primas puede cambiar mucho de una variedad a otra del mismo alimento, por lo tanto hay que considerar cuál variedad es la óptima para ser congelada (REID, 1990).

#### **4.3 Aspectos Microbiológicos:**

Al considerar la calidad de los alimentos congelados, un aspecto de gran relevancia es su estado de calidad microbiológica, ya que estos productos, en muchos casos, no han sido tratados térmicamente.

La calidad microbiológica de los alimentos congelados depende directamente de la calidad de las materias primas, así como del cuidado e higiene durante su elaboración, transporte y almacenamiento (MALLET, 1993).

Los microorganismos de mayor importancia en los alimentos son:

- Causantes de alteraciones sensoriales. (Olor, sabor, textura, aspecto)
- Causantes de intoxicaciones y toxiinfecciones. (Patógenos)

La congelación y el almacenamiento que sigue acaban con ciertos microorganismos presentes antes de la congelación; pero éste es un proceso muy lento que depende de la naturaleza del alimento y del microorganismo por lo que no se puede contar con la congelación para reducir significativamente la contaminación microbiana.

Los microorganismos psicotróficos toleran el frío y se pueden reproducir, aunque algunos muy lentamente porque no es su temperatura óptima de crecimiento, a bajas temperaturas que van hasta los  $-7^{\circ}\text{C}$  (BROCK, SMITH, 1987).

Entre los microorganismos que pueden causar alteraciones sensoriales se encuentran los siguientes:

Dentro de las bacterias las más importantes son: *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Aeromonas*, y otros más; son gramnegativos y no esporulan.

Las levaduras pertenecientes a los géneros *Rhodotorula*, *Cryptococcus*, *Candida*, *Debaryomyces* y *Torula*, siguen multiplicándose por espacio de varios meses sobre frutas y hortalizas desde  $-2.5$  a  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Los hongos pueden crecer a temperaturas aún más bajas. *Geotrichum*, *Botrytis*, y *Penicillium* son los más importantes.

Los microorganismos patógenos no pueden seguir multiplicándose por debajo de los  $2^{\circ}\text{C}$ , aunque ni las bacterias, ni las toxinas, ni las esporas se

destruyen por las bajas temperaturas. Si antes de la congelación hubo condiciones favorables para su desarrollo hay peligro de intoxicación, así como al ser descongelada pueden desarrollarse los microorganismos presentes.

**Tabla 4.1.-** Temperaturas más bajas a las cuales los microorganismos conservan su capacidad de multiplicación y formación de toxinas

Microorganismo	Límite de	Temperatura
<i>Staphylococcus</i>	Formación de toxina	10°C
<i>Clostridium botulinum</i> A y B	Formación de toxina	10°C
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Crecimiento vegetativo	8.0°C
<i>Staphylococcus</i>	Crecimiento vegetativo	6.7°C
<i>Clostridium perfringens</i>	Crecimiento vegetativo	6.5°C
<i>Salmonella</i>	Crecimiento vegetativo	5.0°C
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Crecimiento vegetativo	3.3°C
<i>Clostridium botulinum E</i>	Formación de toxina	3.3°C
<i>Listeria monocytogenes</i>	Crecimiento vegetativo	2.0°C
Bacterias patógenas	Fin de riesgo	2.0°C
Bacterias	Crecimiento vegetativo	-10°C
Hongos y levaduras	Crecimiento vegetativo	-18°C*

(INST. INT DEL FRIO, 1990; MALLET, 1993; LAFUENTE, 1982).

\* La mayoría de los hongos dejan de multiplicarse a  $-12^{\circ}\text{C}$  ; sin embargo se han encontrado que hasta los  $-18^{\circ}\text{C}$  se observa el cese total de su multiplicación.

La mayoría de las levaduras dejan de multiplicarse a  $-12^{\circ}\text{C}$  ó  $-15^{\circ}\text{C}$ , pero algunas se desarrollan todavía a  $-17.8^{\circ}\text{C}$ , especialmente las levaduras productoras de pigmento rosa

#### **4.4 Precauciones para conservar la calidad de los alimentos congelados:**

##### **A. Empaque y embalaje:**

La razón por la cual es necesario envasar los alimentos congelados es preservar su calidad durante el recorrido desde la producción hasta el momento de ser consumido. Puede existir contaminación de fuentes humana, animal como de roedores, aves e insectos ó atmosféricas. Puede haber daños durante la congelación, carga y descarga, en el transporte y en la exhibición al público. Además proporciona características funcionales para que el producto sea más práctico para el consumidor. Por todo esto debe ponerse mucho cuidado en el diseño y selección del empaque.

Las características requeridas para el empaque son (GRUDA y POSTOLOSKI 1987; MALLETT 1993):

- a) No contener sustancias tóxicas que puedan pasar al alimento.

- b) Ser químicamente inerte y estable. El material debe soportar  $-40^{\circ}\text{C}$  y además tolerar temperaturas elevadas porque con frecuencia se calientan ó preparan los alimentos dentro de su empaque.
- c) No comunicar malos sabores u olores.
- d) Bajo grado de permeabilidad al vapor de agua y oxígeno.
- e) Resistencia al agua, ácidos débiles y grasas.
- f) Proteger contra la contaminación bacteriana y de la suciedad.
- g) Permitir la congelación rápida del contenido de los paquetes cuando así se requiera.
- h) Que se separe fácilmente del producto al desempacarlo.
- i) Conservación de sus propiedades básicas tales como solidez, elasticidad durante el almacenamiento y transporte.
- j) Ser utilizable por máquinas automáticas de envasado.
- k) Facilidad de impresión ó etiquetado.
- l) Ofrecer dimensiones y formas convenientes para la presentación en los expositores de venta.
- m) Facilidad de apertura y cierre.
- n) Permitir una buena penetración de las microondas para los casos que el recalentamiento se lleve a cabo en dicho horno.

También es necesario contemplar el impacto ambiental que pueda tener el uso del empaque. Actualmente la legislación ya está regulando este aspecto.

**Materiales utilizados en el empaque:**

**a) Papeles y cartones:**

Como existen de características muy diversas, admiten gran variedad de formas, son de fácil acoplamiento a máquinas dosificadoras y envasadoras. Como son muy permeables al oxígeno y vapor de agua y muy sensibles a la humedad se les utiliza en laminados ó recubiertos de otras películas. Los cartones gruesos se usan para hacer cajas de embalaje.

**b) Materiales a base de polímeros sintéticos:**

Se clasifican en dos grandes grupos (GRUDA y POSTOLOSKI 1987):

I) No encogibles.- Tienen la tendencia de formar escarcha bajo la hoja debido a la sublimación del hielo a partir de la superficie del producto congelado. A este grupo pertenecen el polietileno y polipropileno.

II) Encogibles ó retráctiles: Tienen la propiedad de retraerse en determinadas condiciones y adherirse a la superficie del producto envasado, independientemente de su forma. Pueden ser termoencogibles, cuya retracción se produce con altas temperaturas como co-polímeros de cloruro de vinilideno y vinilo, poliéster y hojas de polietileno orientado; también hay hojas extensibles que se dilatan durante el proceso de envasado, para luego recuperar sus dimensiones primitivas. A este subgrupo pertenecen las hojas de clorhidrato de chachut y hojas de cloruro de polivinilo plastificado.

Características de los polímeros sintéticos (GRUDA, POSTOLOSKI 1987; INST. INT. DEL FRIO, 1990; MALLET, 1993):



**Poliétileno:** Puede ser de alta ó baja densidad. El de baja densidad tiene menor precio pero también menor resistencia a altas temperaturas (hasta 88°C). Aunque si tolera el frío es bastante permeable al vapor de agua y oxígeno, incluso a microorganismos y pierde sus propiedades mecánicas al contacto con las grasas. El material de alta densidad puede resistir la temperatura de ebullición del agua y representa una barrera más eficiente para el oxígeno y el vapor de agua. El polietileno es el material sintético más ligero. Se utiliza para envolver hortalizas.

**Polipropileno:** Ha reemplazado al polietileno por ser más impermeable y fácilmente imprimible. Es algo más rígida y menos resistente a las bajas temperaturas pero si soporta temperaturas más altas (reblandece a 150°C y funde a 160°C) por lo que se utiliza para productos que se cocinan en el empaque. No reacciona con los lípidos. Un inconveniente es su escasa resistencia a la luz y al oxígeno atmosférico.

**Poliestirolo:** Se emplea principalmente para envasados en vacío. Tiene una gran resistencia al envejecimiento, no absorbe humedad, fácilmente reviste papel u otros materiales y puede comprimirse y metalizarse. Un inconveniente de esta hoja es su gran permeabilidad a los gases y vapor de agua

**Poliéster:** Se caracteriza por su gran resistencia, escasa permeabilidad al vapor, baja permeabilidad a los gases, y resistencia ante oscilaciones térmicas. Es resistente también a las grasas. Se utiliza como recubrimiento para los moldes que se llevan al horno (240°C).

**Poliestireno:** Es el plástico preferido para los envases rápidos; es costoso, pero es inerte y no se rompe a bajas temperaturas.

**Poliamida:** Es resistente a las altas temperaturas, impide la oxidación, como son fácilmente moldeables se utiliza para la fabricación de laminados ( por ejemplo bolsas que se sumerjan en agua hirviendo).

**Policloruro de vinilo (PVC):** No soporta muy bajas temperaturas y por lo tanto no soporta el almacenamiento y transporte satisfactoriamente por lo que no es muy utilizado en alimentos congelados.

**Hojas de aluminio:** En la industria se utilizan en laminados. Es completamente impermeable a los gases y al vapor de agua, resistente a la corrosión. Es muy reflectivo y forma una barrera a las microondas.

**Materiales laminados y coextrudidos:** Formando una película compuesta a partir de sustancias de propiedades diferentes, es posible obtener la característica global óptima. Aunque relativamente costosas, las películas laminadas y coextrudidas son cada vez más utilizadas por la industria de los alimentos congelados en razón de sus cualidades; son mecánicamente resistentes, se prestan bien a la impresión y al trabajo en las máquinas.

#### **B. Cadena del Frío:**

Una vez congelado y envasado el producto es necesario observar una serie de precauciones para asegurar que llegue al consumidor manteniendo su calidad.

Actualmente se considera como temperatura máxima adecuada para la conservación de alimentos congelados la de  $-18^{\circ}\text{C}$ , aunque por la experiencia se recomienda una temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $-30^{\circ}\text{C}$ . Si la temperatura se mantiene así desde la congelación hasta su utilización final, no habría cambios destacables en la mayoría de los alimentos congelados durante períodos del orden de 6 a 12 meses.

Es importante señalar que las exposiciones sucesivas a diferentes temperaturas tienen un efecto aditivo sobre las alteraciones producidas en un alimento. No obstante, si las fluctuaciones inevitables en la temperatura de almacenamiento son pequeñas, no se observan repercusiones importantes en un producto congelado, cuando está debidamente envasado. Pero si las fluctuaciones son mayores, la vida de almacenamiento puede resultar seriamente afectada. Aparte de las consecuencias directas de la dependencia de la temperatura sobre las reacciones químicas, microbiológicas y enzimáticas en el alimento, se presentan problemas derivados de la migración de agua por efecto de los gradientes térmicos. Una manifestación directa de esto es la recrystalización y la formación irreversible de hielo, por repetidos ciclos de sublimación-condensación, entre el producto y el envase acompañado de una deshidratación superficial del producto que lo hace más vulnerable a las alteraciones de tipo oxidativo (LAFUENTE, 1982).

**a) Almacenamiento:**

El clima existente en el local de almacenamiento es uno de los factores que más influencia tienen sobre la calidad de los alimentos congelados. Dicho clima está constituido por variables como la temperatura, humedad absoluta y relativa del aire y renovación y circulación de éste.

Como ya se mencionó, la capacidad de conservación de los productos está en clara dependencia de la temperatura de almacenamiento. A menor temperatura mayor tiempo de almacenamiento, mayor conservación del producto.

Como requisito para el empleo de bajas temperaturas de almacenamiento es el de separar exactamente el proceso de congelación y el almacenamiento. El hecho de introducir materiales que no estén congelados en un local de almacenamiento con temperatura de congelación acentúa la sublimación de la humedad de los otros productos allí depositados. Además eleva la carga para el equipo frigorífico y esto resulta tecnológicamente inconveniente (GRUDA, POSTOLOSKI 1987).

La humedad relativa debiera ser lo más elevada posible, especialmente para los productos a granel, ya que al contar con envases cada vez mejores va perdiendo importancia.

Los alimentos deben ser almacenados en cámaras limpias, con suficientes espacios de separación para que no estén en contacto unos con otros, ni con las paredes ni el suelo, de tal manera que quede garantizada una adecuada circulación del aire, para mantener en el local una temperatura homogénea.

Es muy importante que los productos almacenados se saquen de las cámaras de conservación siguiendo el orden en que se introdujeron (PEPS, Primeras Entradas, Primeras Salidas). Esto es causa de muchas dificultades y considerables gastos, pero sólo así es posible suministrar al consumidor productos de calidad homogénea (HERRMAN, 1977).

## **b) Transporte:**

El transporte de alimentos congelados desde el almacén hasta los centros distribuidores ó establecimientos de venta a menudeo, puede hacerse por carretera, vía férrea, por mar ó por aire, utilizando vehículos o contenedores aislados térmicamente y normalmente provistos de equipamiento frigorífico. De forma ideal, el transporte de alimentos congelados debe efectuarse a una temperatura que no pase de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Ha de procurarse también, cargar y descargar con toda rapidez para mantener la temperatura deseada.

No existe un método único de enfriamiento durante el transporte y para impedir las entradas de calor a través de las paredes y al abrir las puertas durante la carga y descarga. Los métodos más empleados son los siguientes:

a) Vehículos frigoríficos enfriados mecánicamente, provistos de una máquina frigorífica que funciona mientras el vehículo está en marcha, con un ventilador que insufla aire frío alrededor de los productos.

b) Vehículos refrigerantes, enfriados ya sea por un medio consumible (principalmente dióxido de carbono o nitrógeno líquido), o por un equipo eutéctico: la mezcla eutéctica contenida (no tóxica) se enfría previamente con ayuda de una máquina frigorífica, frecuentemente llevada por el vehículo, pero que no funciona cuando éste está en marcha. Este enfriamiento se efectúa suficientemente antes de que el vehículo sea cargado (INST. INT. DEL FRIO, 1990).

Actualmente existen normas en algunos países y por acuerdos internacionales, debido al creciente comercio entre las naciones, en donde se especifican la transmisión de calor máxima a través de la carrocería aislada, la circulación de aire y la temperatura del aire a mantener en el interior; también regulan los métodos para evaluar las características mencionadas, y la clasificación de los vehículos.

Las normalizaciones internacionales han sido editadas por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEE), la Organización Internacional de Normalización (ISO), y la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC). Estas regulaciones han sido adoptadas por muchos países.

El transporte frigorífico en general requiere un consumo considerable de energía. Los desarrollos más importantes que se preveen estarán influenciados fuertemente por el ahorro de energía y el denominado "intermodalismo" (Movimiento integrado de contenedores de carga por dos o más medios de transporte, por carretera, ferrocarril o marítimo) (ASHBY, 1981).

**c) Exposición y venta al menudeo:**

En una tienda al menudeo o en un supermercado, los alimentos pueden ser presentados en cuatro tipos de muebles: cofres abiertos por arriba, anaqueles abiertos, armarios verticales con puertas de cristal y cofres con tapa. Estos muebles pueden ser enfriados por un grupo frigorífico autónomo (comodidad de instalación y flexibilidad de empleo) ó si se trata de muebles grandes pueden estar conectados a una central de frío, en una sala de máquinas.

En la medida de lo posible, la temperatura media de los productos en la exposición de venta no excede los  $-18^{\circ}\text{C}$ ; aunque frecuentemente se da una tolerancia de  $-15^{\circ}\text{C}$  ó  $-12^{\circ}\text{C}$ .

Es importante respetar la capacidad del mueble, además de que ha sido calculado para mantener la temperatura y no para enfriar el producto.

Al concientizar a comerciantes y consumidores de la importancia en el manejo de los productos congelados para conservar su calidad, podemos obtener mejores resultados.

Desde que se realizaron los estudios Tiempo-Temperatura-Tolerancia (T-T-T), se ha observado una creciente inquietud por desarrollar sencillos dispositivos que reflejen la relación tiempo-temperatura experimentada por un producto congelado a lo largo de los canales de comercialización. Con tal fin han propuesto más de 50 dispositivos diferentes, aunque ninguno de ellos ha resultado plenamente satisfactorio. Básicamente pueden agruparse en tres tipos:

-Indicadores de descongelación.- Se produce un cambio de color cuando se alcanza una temperatura pre-establecida.

-Indicadores tiempo-temperatura.- Reaccionan por el efecto combinado del tiempo y de la temperatura, experimentando un cambio gradual de color. El punto final o cambio total de color se alcanza cuando la calidad del producto ha descendido por debajo de un nivel admisible comercialmente.

-Integradores-indicadores tiempo-temperatura.- Tienen el aspecto de un termómetro. Una línea coloreada avanza, a lo largo de una escala graduada a una velocidad proporcional a la temperatura de almacenamiento (LAFUENTE, 1982).

### **Teoría del estado vítreo y estabilidad de los alimentos congelados.**

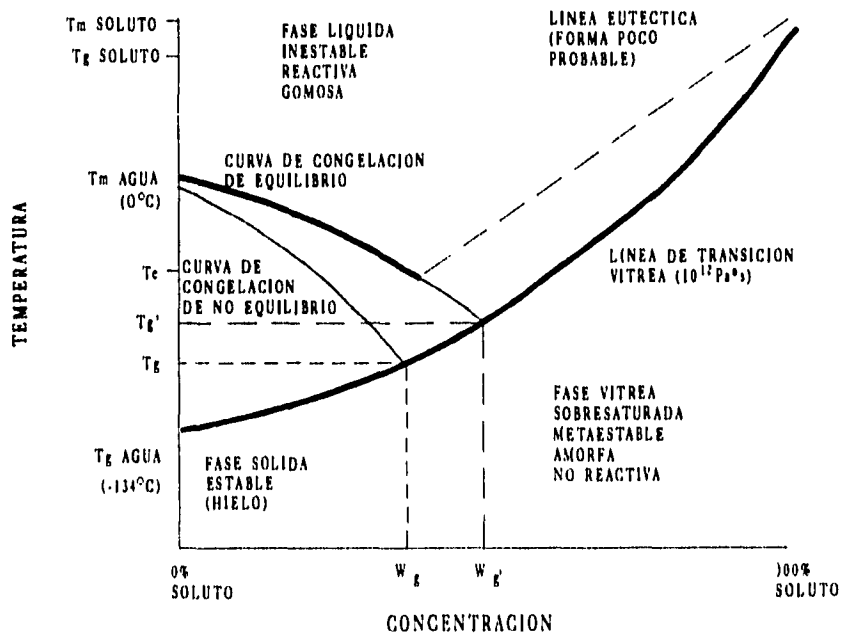
Actualmente se han desarrollado teorías para lograr aumentar la vida de anaquel de los productos congelados, que como ya se ha discutido aunque se prolonga considerablemente tiene un límite.

Las reacciones de degradación en los alimentos se llevan a cabo en la fracción no congelada que existe, aún a muy bajas temperaturas. Debido a la concentración que se da en esta fracción se encuentran los solutos que favorecen las reacciones. La hipótesis planteada recientemente por Goff, propone que si se logra "inmovilizar" el agua no congelada así decrecerá las tasas de difusión molecular y no podrá ayudar o participar en las reacciones químicas o enzimáticas ni tampoco favorecer la recristalización (GOFF, 1992; 1994).

El estado vítreo o cristalino ("glassy state") es un arreglo metaestable amorfo o no cristalino de los sólidos. Un vidrio se puede caracterizar como un líquido con viscosidad extremadamente alta ( $10^{12}$ - $10^{14}$  Pas). La transición de la fase líquida no congelada al estado vítreo es un fenómeno cinético que depende del tipo y concentración de solutos y de la temperatura.



**Figura 4.1.- Diagrama de fases concentración-temperatura para una solución acuosa de carbohidratos.**



En la gráfica se muestra la línea de transición vítrea en función de la temperatura y la concentración. Se ve arriba y a la izquierda de la línea de transición vítrea, las soluciones o sistemas complejos como los alimentos, que están en la fase líquida o de "goma", donde son inestables y reactivos. Debajo y a la derecha de la línea, el sistema se transforma al estado vítreo como resultado de su alta viscosidad y así existe como un sólido amorfo e inerte.

En donde:

$T_m$  = Temperatura de solidificación del agua.

$T_g'$  = Temperatura de transición vítrea a la máxima concentración por congelación.

$W_g'$  = Cantidad de agua no congelada que queda atrapada en el estado vítreo, a la  $T_g'$ .

Si los alimentos son congelados a una velocidad mayor que una "congelación de equilibrio", se formarán diferentes estados vítreos no en equilibrio lo que resulta en una temperatura de transición vítrea menor que si fuera al equilibrio y una cantidad de agua atrapada mayor, así  $W_g < W_g'$ .

La estabilidad de los alimentos congelados es dependiente de la capacidad de almacenarlos a una temperatura menor que su temperatura de transición vítrea, que puede ser muy baja, o bien modificar las formulaciones de los alimentos para elevar su  $T_g$  a una temperatura de almacenamiento normal. Dentro de los aditivos para aumentar la viscosidad se están estudiando sacarosa, maltodextrinas, carboximetil celulosa, goma guar, carragenina y alginatos. Otra forma de mejorar la calidad de los alimentos con relación a lo discutido, es por ejemplo, la concentración osmótica de las frutas como tratamiento previo a la congelación ya que aumentan la turgencia de las células. Así se ve que no se limita únicamente a los alimentos formulados.

### C. Descongelación:

Frecuentemente se subestima la importancia de un descongelamiento correcto. Si no se realiza apropiadamente la calidad y el rendimiento se ven afectados.

El descongelamiento es considerado como completo cuando la temperatura en el centro alcanza 0°C y no queda nada de hielo en el producto. Cuando los productos están destinados a ser cortados mecánicamente se admiten más bajas temperaturas (por ejemplo -5°C); pero entonces se trata de un **atemperado**, considerado como la primera etapa de la descongelación completa (INST. INT. DEL FRIO, 1990).

Como se comentó anteriormente, la transmisión del calor es mucho mayor en el hielo que en el agua, por lo que, al aumentar de grosor la capa descongelada en un alimento disminuye la transmisión del calor. Por esta razón, la descongelación es una operación sustancialmente más larga que la congelación cuando las diferencias de temperatura en una y otra son similares (FELLOWS, 1990).

Los métodos de descongelación están fundados sobre las propiedades térmicas del producto (transferencia de calor por conducción de la superficie hacia el centro), o bien sobre sus características dieléctricas o su resistividad. En la congelación industrial, la elección del método depende sobre todo de la duración de la operación y el costo económico. La concepción de un sistema de descongelamiento implica conocer bien el proceso a seguir para obtener la

duración de descongelación deseada, así como sus efectos sobre el exudado, las pérdidas por evaporación del agua, el aspecto y la calidad microbiológica (INST. INT. DEL FRIO, 1990).

Los métodos de descongelación son los siguientes:

- a) Por calentamiento exterior
- b) Por aire
- c) Por agua
- d) Al vacío
- e) Por métodos eléctricos
- f) Por resistencia eléctrica
- g) Descongelación dieléctrica
- f) Por micro-ondas

En el hogar es ventajoso cocer la mayor parte de los alimentos congelados cuando aún están congelados o sólo parcialmente descongelados; así conservan al máximo su aroma, textura y su color.

Ciertos productos son simplemente descongelados antes del consumo como frutas, productos de panadería, postres, entre otros.

Los trozos de carne y pescado se cuecen mejor si han sido descongelados. La descongelación se efectúa dentro del refrigerador o, si dura poco, a la temperatura ambiente. Una vez descongelados, los alimentos deberán ser cocinados o consumidos inmediatamente (INST. INT. DEL FRIO, 1990).

No es posible congelar un alimento una vez que ha sido descongelado, tanto en la industria como en el hogar. La calidad se vería seriamente afectada.

#### **4.5 Normalización en México de los alimentos congelados**

En nuestro país existen algunas normas para alimentos congelados:

NOM-027-SSA1. Bienes y Servicios

Productos de la Pesca. Pescados frescos, refrigerados y congelados.  
Especificaciones sanitarias.

NOM-029-SSA1. Bienes y Servicios

Productos de la Pesca. Crustáceos frescos, refrigerados y congelados.  
Especificaciones sanitarias.

NOM-031-SSA1. Bienes y Servicios

Productos de la Pesca. Moluscos y bivalvos frescos, refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.

NOM-036-SSA1. Bienes y Servicios.

Helados ó nieves, sorbetes de crema de leche ó grasa vegetal y bases ó mezclas para helados ó nieves.

Fuera de éstas no hay nada más. Se recomienda el uso de normas de la FAO como por ejemplo: "Código Internacional de Prácticas Recomendado para la Elaboración y Manipulación de Alimentos Congelados Rápidamente" CAC/RCP8-1975 y "Procedimientos Normalizados Internacionales Recomendados para la Descongelación de Frutas y Hortalizas IQF" CAC/RM32/33 1970.

(SECRETARIA DE SALUD 1995; SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL, 1995)

## 5 CONGELACION CRIOGENICA

### 5.1 Definición

La congelación criogénica es aquella que utiliza fluidos de muy bajo punto de ebullición, (fluidos criogénicos), en contacto directo con el alimento a congelar, como medio de transferencia de calor. Por esta razón, se lleva a cabo a muy bajas temperaturas, por ejemplo, abajo de  $-60^{\circ}\text{C}$ , de ahí su nombre cryos: frío, genea: nacimiento.

Se consideran fluidos criogénicos a aquellos con un punto de ebullición bajo a 1 atm de presión. Para establecer qué tan bajo es dicho punto se toman como referencia diferentes temperaturas; en la práctica esta temperatura es arbitraria y depende de la aplicación de interés, por ejemplo algunos autores consideran  $-150^{\circ}\text{C}$  (123 K), mientras otros toman  $-100^{\circ}\text{F}$  ( $-73.3^{\circ}\text{C}$ , 200 K). En otras ocasiones se consideran aquellos cuya temperatura crítica está debajo de la temperatura ambiente ( $27^{\circ}\text{C}$ , 300 K), etc, como se ve, existe mucha controversia al respecto. Estos fluidos incluyen los gases atmosféricos más abundantes como nitrógeno y oxígeno, así como los gases nobles como argón, helio, neón, kriptón, y xenon. Estos últimos, por encontrarse en mucho menor proporción en el aire resultan muy caros por lo tanto se utilizan en aplicaciones altamente especializadas (SACKS B., 1985; ZABETAKIS, 1967).

Los fluidos más utilizados en la congelación de alimentos son nitrógeno y dióxido de carbono.

El dióxido de carbono, aunque no se define estrictamente hablando, como un fluido criogénico pero para el propósito de la congelación de alimentos se considera como tal por su punto de ebullición de  $-78.9^{\circ}\text{C}$  y su potencial como refrigerante.

Los hidrocarburos halogenados están siendo restringidos por los daños que causan a la capa de ozono de la atmósfera. El Protocolo de Montreal de 1987 (revisado en 1990), el cual suscribió México, eliminó la producción de compuestos clorofluorocarbonados a nivel internacional para el año 2000. En nuestro país el Instituto Nacional de Ecología es el encargado de coordinar y vigilar las actividades para cumplir con dicho acuerdo.

Una propiedad de los fluidos criogénicos es su alto calor de vaporización que se aprovecha en la congelación. Al ser puestos en contacto con el alimento extraen calor de éste, para cambiar de fase de líquido a vapor, mientras que al perder calor el agua de los alimentos puede pasar de líquido a sólido y bajar su temperatura. Por esta razón, un sistema de congelación criogénica no necesita estar conectado a un sistema mecánico para generar frío.

**Tabla 5.1.-** Calor latente de los fluidos criogénicos.

FLUIDO	CALOR LATENTE	
Nitrógeno	De vaporización	198.9 kJ/kg
Dióxido de carbono	De sublimación	151.5 kJ/kg

(ZABETAKIS, 1967)



## 5.2 Obtención de los fluidos criogénicos

Para entender el proceso de obtención hay que recordar algunos principios: Cuando un gas es comprimido se calienta. Cuando se expande baja su temperatura. Cuando la presión de un gas se aumenta, la temperatura a la cual licúa aumenta. Cuando la presión se reduce la temperatura de licuefacción también desciende. La temperatura de licuefacción es una propiedad de cada gas.

Para licuar los gases como el nitrógeno, oxígeno, helio, hidrógeno y aire, llamados "gases permanentes", aplicar presión únicamente no es suficiente; es necesario llevar a cabo un enfriamiento intenso además de una compresión considerable. El enfriamiento debe ser hasta alcanzar una temperatura por debajo de su temperatura crítica.

Los métodos utilizados para la licuefacción del aire son el de Linde y el de Claude (MARON, PRUTTON; 1978).

El principio básico del método de Linde es la expansión adiabática (Principio de Joule Thompson) y el consecuente enfriamiento del gas.

Los pasos del proceso se ejemplifican en la figura 5.1 y son:

A) El aire es comprimido a aproximadamente 100 atm así se logra la condensación y eliminación de la mayor parte de la humedad.

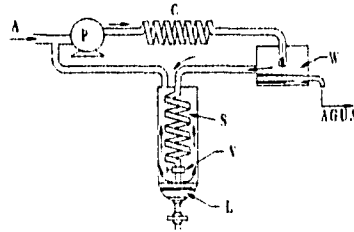
B) El calor generado durante la compresión se elimina al pasar a través de un serpentín C refrigerado por agua o amoníaco.

C) Entonces el gas seco pasa a través de un espiral de cobre **S**, desde el cual se expande casi hasta presión atmosférica a mediante una válvula **V** para controlar el volumen.

D) El gas así enfriado por el efecto Joule-Thompson, pasa alrededor del serpentín de cobre ayudando a enfriar al gas comprimido que viene entrando.

E) Al repetir el proceso varias veces la temperatura del gas se abate de tal forma que parte del aire se condensa y se recoge en el fondo de la cámara **L**. El aire sin condensar se recircula.

**Figura 5.1.-** Proceso de Linde para la licuefacción del aire.



En el proceso de Claude, en lugar de permitir al gas expandirse libremente, es forzado a realizar un trabajo en contra de un pistón. Como el gas está aislado adiabáticamente, dicho trabajo se realiza a expensas de la energía interna del gas y en consecuencia se enfría. El trabajo logrado se puede utilizar para operar los compresores.

Una vez que se tiene el aire licuado se lleva a cabo una destilación fraccionada para separar los diferentes componentes.

## 5.3 Propiedades de los Fluidos Criogénicos

### A Propiedades físicas y químicas

#### a) AIRE

El aire no se emplea en la congelación de alimentos directamente sino como materia prima en la producción de nitrógeno ya que además se obtiene oxígeno y gases inertes que se utilizan en otros campos (AGA FRIGOSCANDIA, 1994).

Es un gas, incoloro, inodoro, no tóxico, no inflamable que es necesario para muchas formas de vida.

**Tabla 5.2.-** Composición del aire seco al nivel del mar

Compuesto	Por ciento en volumen
Nitrógeno	78.084
Oxígeno	20.947
Argón	0.934
Neón	0.001818
Helio	0.000524
Kriptón	0.000114
Dióxido de carbono	0.325 - 0.1 (max. en ciudades)

Compuesto	Por ciento en volumen
Metano	0.0002
Hidrógeno	0.00005
Oxido nitroso	0.00002 - 0.00004
Monóxido de carbono	0.000008 - 0.0001
Ozono	0.000001 - 0.00005
Oxido nítrico	0.000001 - 0.0001
Dióxido de nitrógeno	0.000001 - 0.0001
Dióxido de azufre	0.0000007 - > 0.0001
Radón	$6 \times 10^{-18}$

(COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980; KEMIDATA, 1980, IUPAC, 1979, BUTCHER, SS, 1972)

El aire condensa a un líquido con un ligero tono azulado. Como el oxígeno tiene un punto de ebullición más alto que el nitrógeno, las primeras gotas de aire condensado contienen arriba del 40% de oxígeno. Las últimas gotas contienen únicamente un 7% de oxígeno. El color del aire varía de acuerdo al contenido de oxígeno, entre mayor proporción de oxígeno más azulado es (COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980).

## **b) NITROGENO**

**Descripción general y propiedades físicas:**

**Nombre: Nitrógeno**

**Fórmula: N<sub>2</sub>**

**Es un gas, incoloro, inodoro e insípido. El aire atmosférico contiene 78.09% (en volumen) de nitrógeno. El gas es ligeramente más brillante que el aire y también un poco más soluble en agua. Condensa a -195.8°C a un líquido incoloro e inodoro, más brillante que el agua (COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980; KEMIDATA 1980; IUPAC, 1979).**

**Tabla 5.3.-** Propiedades físicas del nitrógeno.

PROPIEDADES FISICAS	UNIDADES METRICAS
Peso molecular	28.0134
Punto de ebullición a 101.3 kPa (1 atm)	-195.8°C
Punto de fusión a 101.3 kPa	-209.8°C
Punto triple a 12.5 kPa abs. (1.82 psia)	-210.0°C
Calor latente de fusión al punto triple	25.6 kJ/kg
Calor latente de vaporización al punto de ebullición y 101.3 kPa	198.9 kJ/kg
Capacidad calórica específica del gas a 21.1°C y 101.3 kPa	
$C_p$	1.04 kJ/(kg°C)
$C_v$	0.742 kJ/(kg°C)
Densidad relativa del gas a 20°C y 101.3kPa (aire = 1)	0.9670
Solubilidad en agua, vol./vol., a 0°C y 101.3 kPa	0.023
Temperatura crítica	-146.85°C

Densidad crítica	314 kg/m <sup>3</sup>
Presion crítica	3400 kPa abs.
Volumen crítico	0.0891 m <sup>3</sup> /kmol

(COMPRESSED GASSES ASSOCIATION,INC, 1980; KEMIDATA 1980; IUPAC,1979)

El 48% de la capacidad congeladora del nitrógeno, corresponde al calor latente de congelación que roba del alimento para pasar a estado gaseoso. El 52% restante queda en el gas enfriado y es por ello que el nitrógeno en forma gaseosa se recircula para aprovechar toda su capacidad de congelación.

#### Propiedades químicas:

Es un gas inerte excepto a altas temperaturas, donde se combina con metales activos como litio, magnesio y titanio formando nitruros.

Con el oxígeno forma óxido nítrico y dióxido de nitrógeno. Con el hidrógeno forma amoniaco, NH<sub>3</sub>, y sulfuro de nitrógeno con el azufre. En combinación con halógenos, el nitrógeno puede formar compuestos altamente explosivos.

Es fisiológicamente necesario para toda la vida animal y vegetal (COMPRESSED GASSES ASSOCIATION,INC, 1980; KEMIDATA 1980; IUPAC,1979).

### c) DIOXIDO DE CARBONO

Descripción general y propiedades físicas:

Nombre: Dióxido de carbono

Fórmula: CO<sub>2</sub>

Sinónimos: Acido carbónico, hielo seco

El dióxido de carbono es un gas, incoloro, inodoro, con sabor ligeramente picante y ácido. Como gas es 1.4 veces tan pesado como el aire. Sublima a presión atmosférica a -78°C. Un kilogramo de dióxido de carbono en forma sólida (hielo seco) tiene la capacidad enfriante de 2 kg de hielo ordinario.

El dióxido de carbono se forma naturalmente por descomposición de material orgánico a través de la combustión, fermentación y digestión.

La concentración atmosférica de dióxido de carbono es 0.04% en volumen. En los océanos se encuentra en un 0.01% en peso. La fotosíntesis consume  $5 \times 10^{14}$  kg anualmente, mientras la combustión de combustibles fósiles adiciona  $0.07 \times 10^{14}$  kg a la atmósfera anualmente. El contenido de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado en 40 ppm más los últimos 50 años.

El aire de exhalación contiene 4% de CO<sub>2</sub>, el nivel de dióxido de carbono que puede representar una amenaza para la vida, superior al 10%, se puede alcanzar en silos, cámaras de digestión, drenajes pozos y similares. Aire con más del 10% de dióxido de carbono extingue una flama abierta.

A nivel industrial, el dióxido de carbono gas, se obtiene de productos de desecho de la combustión de compuestos de carbono en oxígeno, por ejemplo en



las plantas de producción de óxido de etileno se obtiene una mezcla de gases rica en CO<sub>2</sub>. También de la producción de amonio, etanol, procesamiento de gas natural, etc.

Para obtener dióxido de carbono sólido ó hielo seco se eliminan impurezas y materia extraña del gas, se licúa, y posteriormente se expande a presión atmosférica al pasar a través de una tobera. En producción comercial, el CO<sub>2</sub> líquido se expande a 0.7 MPa (7 bar, 101.5 psig) por debajo de -46°C. El gas liberado se recomprime y el hielo se prensa formando bloques ó píldoras en prensas hidráulicas (COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980; KEMIDATA 1980; IUPAC, 1979, ULLMAN, 1977).

**Tabla 5.4.-** Propiedades físicas del dióxido de carbono.

PROPIEDADES FISICAS	UNIDADES METRICAS
Peso molecular	44.01
Temperatura de sublimación a 98.07 kPa	-78.92°C
Punto triple a 416 kPa, manométrica	-56.6°C
Calor latente de sublimación	151.1 kJ/kg
Calor latente de fusión en punto triple	199 kJ/kg
Calor latente de vaporización	
a 0°C	234.5 kJ/kg
a -16.7°C	276.8 kJ/kg
a -28.9°C	301.4 kJ/kg
Capacidad calórica específica del gas 25°C 101.3 kPa	
$C_p$	0.850 kJ/(kg°C)
$C_v$	0.657 kJ/(kg°C)
Densidad del gas a 0°C y 101.3 kPa	1.077 kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa del gas a 0°C y 101.3 kPa (aire = 1)	1.5291
Solubilidad en agua, vol./vol, a 20°C y 101.3 kPa	0.90

Presión de vapor	
a -78.5°C	0 kPa, gauge
a 0°C	3385 kPa, gauge
a 21.1°C	5778 kPa, gauge
Temperatura crítica	31.0°C
Presión crítica	7380 kPa, abs
Densidad crítica	468 kg/m <sup>3</sup>
Volumen crítico	0.0940 m <sup>3</sup> /kmol
Factor de compresibilidad crítico	0.274

(COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980; KEMIDATA 1980, IUPAC, 1979)

El dióxido de carbono tiene un calor latente menor que el de el nitrógeno pero posee la ventaja de que, al ser su punto de ebullición superior, provoca un choque térmico menos severo. La mayor parte de su capacidad congelante (85%) se obtiene durante su sublimación. Al rociar el CO<sub>2</sub> sobre el alimento se forma una capa de nieve, ya que el vapor sublima casi inmediatamente.

#### Propiedades químicas

El dióxido de carbono no arde ni favorece la combustión.

Puede reaccionar violentamente con bases fuertes, especialmente a altas temperaturas. Cuando el dióxido de carbono reacciona con una solución diluida de amoníaco se forma hidrogen carbonato de amonio (bicarbonato de amonio). El carbonato de amonio se forma cuando el dióxido de carbono reacciona con amoníaco anhidro o en solución concentrada (COMPRESSED GASSES ASSOCIATION, INC, 1980; KEMIDATA 1980; IUPAC, 1979, ULLMAN, 1977).

## **B) Manejo y almacenamiento de los fluidos criogénicos**

El nitrógeno líquido normalmente se transporta y almacena en tanques aislados a una presión lo más baja posible, 200-400 KPa, porque presiones mayores durante el almacenamiento permitirían un punto de ebullición mayor en detrimento de la eficiencia de refrigeración del fluido.

Debido a su gran volumen de expansión durante la vaporización el nitrógeno líquido nunca debe almacenarse en ductos o contenedores que no cuenten con válvulas o dispositivos para aliviar el exceso de presión. Un litro de nitrógeno líquido vaporiza a aproximadamente 648 litros de nitrógeno gaseoso a 0°C y en 685 litros a 15°C.

En estado líquido, el dióxido de carbono se almacena en grandes cantidades en contenedores refrigerados y presurizados a una temperatura de -18°C y 2000 KPa (300 psig). Pequeñas cantidades se pueden almacenar en cilindros a temperatura ambiente y a 6000 KPa de presión. Generalmente se llenan a razón de 0.68 - 0.75 kg CO<sub>2</sub> por dm<sup>3</sup> de volumen. La relación de temperatura y presión varía de acuerdo al llenado del tanque.

Como se puede observar, debido a las diferentes características de los fluidos, existen diferencias también en el sistema de almacenamiento y tuberías para el suministro del fluido al congelador. En general, el nitrógeno líquido se conserva a presión cercana a la presión atmosférica y a muy baja temperatura (-196°C) mientras que el dióxido de carbono fluye a una temperatura de -18°C y altas presiones. Principalmente en el caso del nitrógeno líquido es de importancia el aislamiento del sistema para evitar intercambio de calor con el medio. Para esto se utilizan tuberías aisladas generalmente con espumas de poliuretano ó poliestireno de 100 a 150 mm de espesor. También en el caso del dióxido de carbono debe mantenerse aislado pero como la temperatura del fluido no es tan baja, la entrada de calor no representa un problema tan grave. En cambio si es de suma importancia asegurar que el fluido nunca pasará por el punto triple (510 KPa, 75 psig) en ningún punto del proceso, para evitar que se solidifique en la tubería, es decir, que se deben eliminar los puntos donde haya posible caída de presión (AGA FRIGOSCANDIA 1994; HURST, 1971; SACKS, 1985).

### **C) Riesgos para la salud**

#### **QUEMADURAS POR FRIO**

Los líquidos criogénicos pueden causar severas quemaduras por frío al entrar en contacto con la piel. Cuando un fluido criogénico entra en contacto con objetos a temperatura ambiente existe un riesgo de salpicaduras debido a la ebullición tan violenta. Gotas diminutas puede ser que no causen daños en la piel pero los ojos son especialmente sensibles y pueden sufrir graves daños.

Las quemaduras por frío también pueden ser causadas por contacto con objetos de metal que contengan líquidos criogénicos.

El aire comprimido a altas presiones se enfría a temperaturas peligrosas cuando se expande a presión atmosférica.

Las superficies de la piel que hayan sufrido quemaduras por frío deben ser enjuagadas con agua abundante a temperatura no mayor que la del cuerpo, y recibir atención médica lo antes posible.

Se recomienda utilizar guantes, lentes de seguridad y ropa protectora, especialmente cuando se trabaje con nitrógeno líquido (AGA FRIGOSCANDIA 1994; ZABETAKIS, 1967).

#### **RIESGOS POR INHALACION**

El nitrógeno no es tóxico pero puede actuar como asfixiante al reducir la concentración de oxígeno en el aire. Esta asfixia se manifiesta por sofocamiento, respiración rápida con una falta de coordinación muscular y disminución de la capacidad de reaccionar. Puede llegar incluso a la pérdida del conocimiento y la muerte. Los síntomas de la asfixia aparecen gradualmente por lo que la víctima generalmente no se da cuenta hasta que es demasiado tarde. Es necesario llevarla a un lugar abierto y proporcionarle respiración artificial u oxígeno. Debe recibir atención médica inmediatamente.

El dióxido de carbono se absorbe a la sangre vía los pulmones y en cierta proporción por la piel. A concentraciones moderadas estimula al sistema respiratorio. Los efectos del dióxido de carbono no son muy marcados hasta que el gas desplace suficiente oxígeno del aire para que ocasione asfixia. Los síntomas que se pueden presentar son aumento del ritmo respiratorio y dolor de cabeza a concentraciones del 2 al 5%. Del 8 al 10% causa mareo, zumbido en los oídos, aumento de la presión sanguínea, excitación y náusea.

A una concentración del 10 al 18% de CO<sub>2</sub> se pueden presentar ataques similares a los epilépticos, pérdida de la conciencia y shock.

Las víctimas deben ser llevadas a lugares con aire fresco rápidamente, aplicar respiración artificial si dejaron de respirar y recibir atención médica a la brevedad posible.

Se recomienda trabajar en lugares con ventilación adecuada (AGA FRIGOSCANDIA 1994; ZABETAKIS, 1967).

#### RIESGO DE FUEGO Y EXPLOSIONES

El nitrógeno es un gas no inflamable. Las explosiones pueden ocurrir si se almacena en tanques sin válvulas de escape de presión o que sean obstruidas por formación de hielo (AGA FRIGOSCANDIA 1994; ZABETAKIS, 1967).



#### **5.4 Sistemas de congelación criogénica**

Como ya se mencionó, los congeladores criogénicos difieren de todos los demás sistemas de congelación en que no están conectados a una planta de refrigeración mecánica. El gas en contacto directo con el alimento remueve el calor necesario para que éste sea congelado.

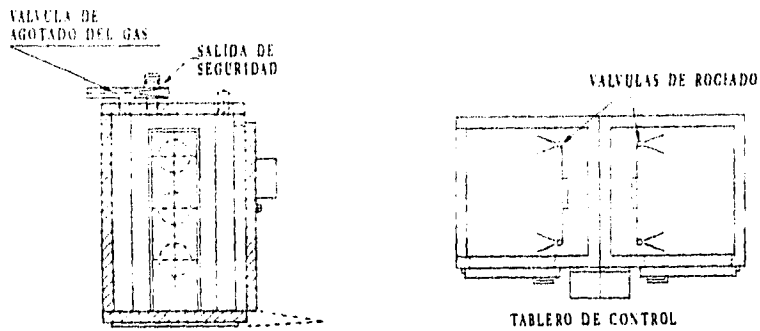
Las bajas temperaturas que se pueden alcanzar,  $-196^{\circ}\text{C}$  para el nitrógeno líquido y  $-78^{\circ}\text{C}$  para el dióxido de carbono proporcionan un proceso rápido que ayuda a conservar la calidad de los alimentos.

Los diferentes tipos de congeladores criogénicos más utilizados son mencionados a continuación. Dentro de éstos puede haber modificaciones y adaptaciones hechas por las compañías de acuerdo a las necesidades en cada caso, o de una compañía a otra.

##### **a) Cámaras:**

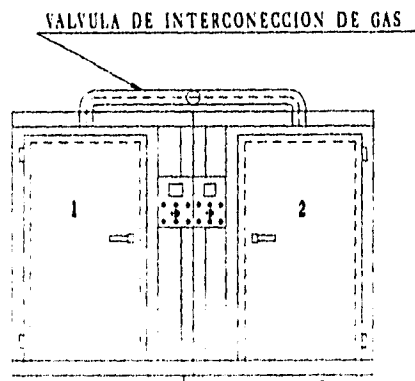
El congelador de cámara es un congelador por lote o discontinuo, que puede ser adaptado a nitrógeno o dióxido de carbono. El gas circula ayudado por un ventilador.

**Figura 5.2.-** Congelador de cámara  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  AGA SF



Para disminuir el consumo de gas se pueden conectar por medio de ductos dos cámaras. El gas frío que sale de la primera cámara es utilizado para el preenfriamiento en la segunda cámara.

**Figura 5.3.-** Cámara de  $\text{N}_2$  interconectadas AGA SF DUOFROST



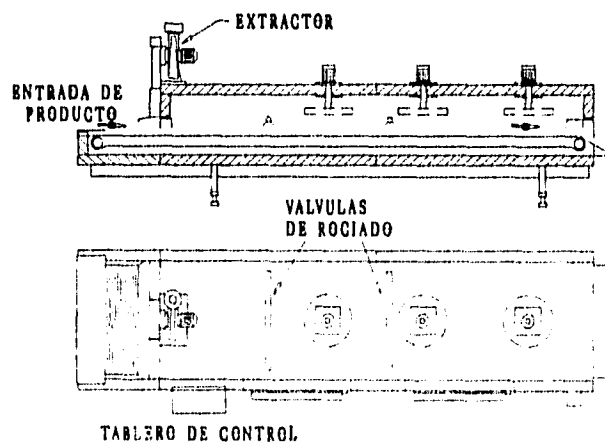
Existen modelos para diferentes capacidades que van desde 100 a 1000 kg/l. Sus tamaños pueden variar de 1.5m de largo, 1.5m de ancho y 2.35m de altura a 3.6m de largo, 1.5m de ancho y 3m de altura, pasando por los diferentes tamaños y proporciones.

## b) Túneles:

El túnel es el sistema de congelación criogénica más común.

El diseño fundamental de este equipo consta de una banda transportadora que lleva el alimento hasta la zona de rociado donde se esprea el líquido criogénico sobre el alimento. El túnel cuenta con ventiladores para favorecer la circulación del gas frío hacia la entrada, donde se extrae por un ventilador, promoviendo un pre-enfriamiento del producto en la sección anterior a la de rociado y asegurando un máximo de eficiencia en la transferencia de calor. La última sección del túnel es una zona de estabilización térmica para evitar el cambio excesivamente brusco al salir a temperatura ambiente.

**Figura 5.4.-Túnel de congelación AGA LF operado con CO<sub>2</sub>**



La temperatura de congelación del producto se regula modificando la alimentación de nitrógeno líquido. Esto permite congelar una amplia variedad de productos con un sencillo cambio en el proceso mediante el panel de control.

Puede haber túneles de nitrógeno líquido y de dióxido de carbono líquido. La principal diferencia entre ambos es la localización del sistema de inyección de los líquidos. Mientras que en el túnel de nitrógeno este se inyecta cerca de la salida, en el de dióxido de carbono el sistema de inyección se encuentra a la mitad del túnel, para dar tiempo que la nieve que se forma sublime. Esto permite dar el uso más eficiente de acuerdo a las características del gas que se utilice.

Para aumentar la capacidad en un espacio limitado, un túnel se puede equipar con tres bandas paralelas, una sobre otra, que permiten un aumento en el volumen de producción.

Este sistema se utiliza para enfriar o congelar la mayoría de los alimentos en piezas, con un tamaño mínimo de 6mm. Como ejemplos se pueden mencionar trozos de carne, pescado completo o en filetes, mariscos, frutas en trozos o completas como las moras, también pasteles, galletas, postres, etc.

Existen túneles de tamaños y capacidades diferentes que pueden ir desde 3 metros de largo y 150 kg/h de producción hasta 14 m y 1000 kg/h.

Normalmente es el sistema más económico para bajas o medianas capacidades.

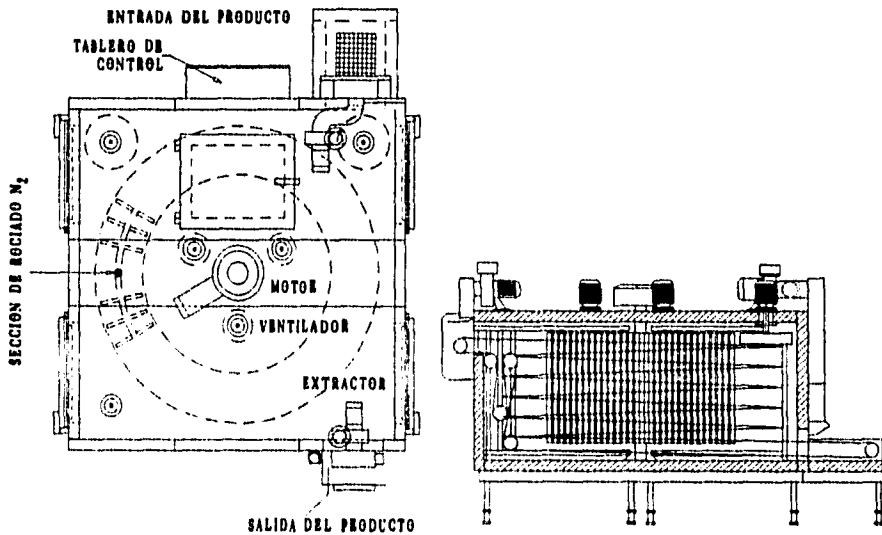
### c) Congeladores en espiral:

La capacidad se puede aumentar en gran proporción utilizando un congelador en espiral.

También puede utilizarse sistemas con nitrógeno líquido o con dióxido de carbono, donde la diferencia está en la localización del sistema de inyección.

Normalmente tienen una capacidad de 600 a 5000 kg/h.

**Figura 5.5.-Congelador en espiral AGA WF operado con N<sub>2</sub>.**



El congelador en espiral es muy útil cuando se tienen restricciones fuertes de espacio. Es posible regular la dirección de rotación del espiral, de acuerdo a los requerimientos de la producción.

**Figura 5.6.-**Posibilidades de rotación de un congelador en espiral



**d) Congelador de inmersión:**

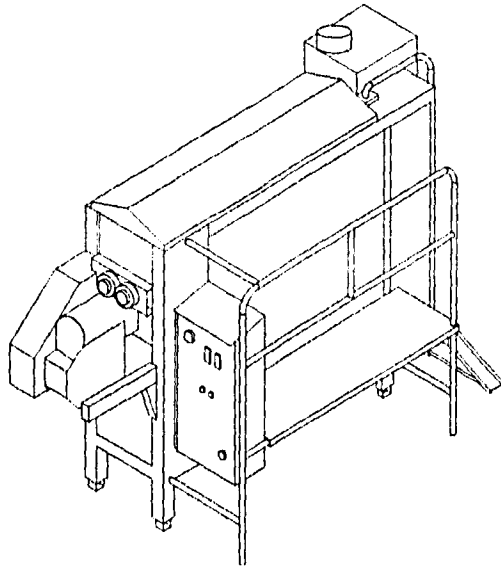
En un congelador de inmersión el producto a congelar se sumerge en el nitrógeno líquido.

Existe una aplicación específica de este tipo de congelador donde se utiliza como pre-congelador dando a cada partícula una delgada cubierta congelada. La congelación final es alcanzada en otro tipo de congelador como túneles ó espirales de aire.

**e) Congeladores para alimentos líquidos o semilíquidos:**

Se utiliza en la pre-congelación ó congelación de productos como purés, pastas, cremas, sopas, alimento infantil, etc. en piezas individuales ó "nuggets" de tamaños y formas convenientes. Generalmente manejan 500-1000 kg/h de producto.

**Figura 5.7.-Congelador para alimentos líquidos y semilíquidos  
AGA PELLOFREEZE**



Un sistema de congelación criogénica puede estar al 100% de eficiencia únicamente si: 1) la temperatura del nitrógeno al salir del congelador debe ser la misma que la de entrada del producto. 2) Todo el calor absorbido por el nitrógeno en el congelador proviene del alimento y solamente del alimento.

#### **f) Sistemas de transporte**

También se han desarrollado sistemas enfriados por líquidos criogénicos para transportar y conservar alimentos congelados. Como se mencionó en el capítulo 3, la finalidad de estos sistemas no es la de congelar sino mantener el alimento, previamente congelado, en condiciones óptimas.

Por ejemplo, un vagón de tren enfriado con CO<sub>2</sub> líquido aumentó en un 50% la capacidad de transportación comparado con uno enfriado con un sistema mecánico al reducir considerablemente los costos. En cuanto a costos de operación y mantenimiento se reducen porque el sistema de refrigeración no tiene partes móviles. El sistema funciona con dióxido de carbono líquido. Al entrar en el vagón aislado desciende la presión y se solidifica formando nieve y vapor frío. La nieve se evapora formando más vapor y así se mantiene la temperatura deseada para el alimento. Sistemas semejantes se han implementado en barcos y camiones (ANON. 1983; MORRIS CH. 1991).

En un estudio realizado por Ashby y colaboradores (ASHBY BH, et al 1983) compararon el efecto de la temperatura de almacenamiento, criogénica (-70°C) y no criogénica (-18°C), durante el transporte en tren simulando las vibraciones, impactos y manipulación durante el viaje. No se encontró un aumento significativo en el daño al producto ó al empaque entre las dos diferentes temperaturas.



## 6 APLICACIONES DE LA CONGELACION CRIOGENICA

A continuación se citan ejemplos de estudios realizados por diferentes investigadores y aplicaciones en la industria de los alimentos sobre la congelación con fluidos criogénicos en los diferentes tipos de alimentos.

### 6.1 Carnes

El uso de la congelación con nitrógeno o dióxido de carbono para carnes y productos derivados ha ido en aumento, especialmente en Europa.

Para carne roja y productos cárnicos como tocino, salchichas y jamón empacados al vacío, se ha visto que da excelentes resultados la congelación en túnel con nitrógeno líquido (ELLIOT T. 1987).

La carne de cerdo congelada por nitrógeno mejora de aspecto y consistencia (HERRMAN, 1977).

Se ha observado que la congelación de carnes rojas destruye a *Trichinella spiralis*. Manteniendo la carne de cerdo durante cierto período que depende de la temperatura y del tamaño de la pieza, por ejemplo, para piezas de 15 cm de espesor se recomienda 20 días a  $-15^{\circ}\text{C}$ , 10 días a  $-23^{\circ}\text{C}$  ó 6 días a  $-30^{\circ}\text{C}$ , se elimina totalmente la triquina. Rust y Zimmerman demostraron que utilizando nitrógeno líquido ó dióxido de carbono líquido para alcanzar  $-29^{\circ}\text{C}$  en el centro de la pieza, era destruida la triquina. Como esto se logra en unos cuantos minutos es posible ofrecer un producto libre de triquina sin los problemas que causa el almacenamiento prolongado (RUST R.E, ZIMMERMAN W.J.,1972).

La congelación criogénica para carnes se utiliza para piezas de tamaño mediano ó pequeño, no para canales o medias canales. De aquí que haya tomado especial importancia en los cortes de carne como filetes, trozos para brochetas, carne para hamburguesas. Este último producto ha aumentado considerablemente su mercado para cubrir las necesidades de grandes cadenas de restaurantes, hoteles y otras instituciones.

Por esta razón, Sebranek y colaboradores realizaron una serie de estudios sobre el efecto de la congelación criogénica en carne para hamburguesas. En uno de los trabajos (SEBRANEK, P.N, 1978) comparó la congelación de hamburguesas (formuladas con 20% de grasa) con nitrógeno líquido y con dióxido de carbono, ambos en un túnel a  $-74^{\circ}\text{C}$ , y en una cámara de congelación mecánica a  $-29^{\circ}\text{C}$ . Después de ser congeladas, las hamburguesas se empacaron y almacenaron a una temperatura de  $-29^{\circ}\text{C}$ . Se evaluaron después de 0, 30, 60, 90 y 120 días en cuanto a pérdida de peso o encogimiento durante la congelación, durante el almacenamiento y durante el cocimiento, contenido de agua, contenido de grasa, número de ácido tiobarbitúrico y evaluación sensorial con dos pánels diferentes.

De estas pruebas se pudo concluir lo siguiente: Existe diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) en el encogimiento, especialmente durante el cocimiento, entre las hamburguesas congeladas con criógenos y las congeladas mecánicamente, en éstas se encontró una pérdida de peso mucho mayor. Lo mismo sucedió con el número de ácido tiobarbitúrico, que indica rancidez.

( $P < 0.05$ ) Las congeladas mecánicamente tuvieron un valor más alto a los 90 y 120 días (0.55mg/kg contra 0.43mg/kg). En la evaluación sensorial participó un pánel de jueces experimentados y un pánel de consumidores. Los resultados obtenidos

no difieren de un pánel a otro. Entre las hamburguesas congeladas con nitrógeno líquido y dióxido de carbono, no se encontraron diferencias significativas, mientras que las congeladas vía mecánica fueron calificadas mucho más bajo. Estas diferencias pueden estar relacionadas con el encogimiento demostrado.

Como se puede observar, no se encontraron diferencias entre los dos criógenos utilizados, así que la selección de uno de ellos se puede basar únicamente en el aspecto económico. Ambos conservaron la calidad de las hamburguesas mejor que la congelación mecánica utilizada en este trabajo.

Otro estudio similar, (SEBRANEK, J.G. 1979) comparó cambios en las características químicas de hamburguesas con tres composiciones diferentes: 20% de grasa, 30% de grasa y 20% de grasa + 5% de proteína de soya texturizada congeladas por diferentes métodos: nitrógeno líquido, dióxido de carbono líquido y por aire forzado. Las hamburguesas de los 9 tratamientos diferentes (3 formulaciones x 3 métodos) se almacenaron a -29 C y se evaluaron a los 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días.

Se obtuvieron los valores de reflectancia, resultando más elevados en las hamburguesas congeladas criogénicamente que aquellas por congelación mecánica, es decir, que las primeras conservaron un color más brillante. Durante el almacenamiento, dicha reflectancia fue disminuyendo. Los valores más altos de ácido tiobarbitúrico se presentaron en las hamburguesas con 30% de grasa, en las que contienen proteína de soya. Aquellas congeladas por aire forzado tuvieron valores más altos que las hamburguesas del mismo tipo congeladas criogénicamente, esto significa que la congelación más lenta favoreció la rancidez oxidativa durante la congelación. También los valores de ácido tiobarbitúrico se

modificaron durante el almacenamiento, haciéndose mayores particularmente en las hamburguesas que recibieron la congelación con aire.

La capacidad de retención de agua fue menor en las hamburguesas congeladas mecánicamente que en las que se utilizó congelación criogénica. Únicamente en las que contienen proteína de soya no se observó diferencia entre los métodos de congelación utilizados.

También se realizaron pruebas de solubilidad de proteínas para ver si tenían relación con la jugosidad y textura de la carne, donde no se encontraron efectos del método de congelación en la solubilidad de proteínas sarcoplásmicas y miofibrilares, pero sí se observó un decremento de solubilidad durante el almacenamiento debido a la desnaturalización de las proteínas, asimismo aumentó la fracción de nitrógeno no proteico. No fue posible concluir algo más.

No se encontró diferencia significativa entre el criógeno utilizado, nitrógeno ó dióxido de carbono, lo que coincide con el estudio anterior.

Como complemento de los estudios anteriores se realizaron trabajos para observar el efecto de la composición y del método de congelación en la calidad microbiológica de las hamburguesas (KRAFT, REDDY, SEBRANEK, 1979). Como métodos de congelación se utilizaron nitrógeno líquido, dióxido de carbono y congelación mecánica

Se observó que cualquier método causa una prolongación de la fase lag de crecimiento bacteriano y la disminución de células viables. Especialmente la congelación criogénica causó una mayor pérdida de mesófilos aerobios.

La composición de las hamburguesas sí afecta la supervivencia de microorganismos. Aquellas con 30% de grasa tuvieron un mayor desarrollo microbiano que las que tenían 20% ó 20% grasa + 5% de proteína de soya.

Las poblaciones que sobrevivieron 5 meses de almacenamiento a -18°C fueron: *Moraxella-Acinetobacter* (42.3%), *Pseudomonas* (32.1%), *Staphylococcus* (10.3%), *Micrococcus* (10.3%) y *Streptococcus* (5.1%).

Los números de estafilococos coagulasa positiva permanecieron relativamente constantes durante el almacenamiento, pero sobrevivieron mejor en aquellas congeladas mecánicamente que por congelación criogénica.

El método de congelación no afectó la incidencia de *Clostridium perfringens*, que se recuperó en un 30-50% de las hamburguesas probadas.

Los coliformes se recuperaron durante el almacenamiento en una baja proporción. No se encontró *Salmonella* a pesar de que la cuenta inicial de la carne fresca fue alta.

Es posible decir que la congelación criogénica reduce la cuenta microbiológica y reduce el consumo de energía comparada con el método mecánico convencional. Pero como se mencionó en el capítulo 2 no se recomienda este método para reparar deficiencias de la materia prima ó manipulación.

También para carne de pollo ha sido estudiada la congelación criogénica. Así ha sido demostrado que se retiene, en general, de mejor manera la calidad del pollo cuando se utiliza algún criógeno.

En Dinamarca se estudiaron los efectos de la congelación en las propiedades reológicas y de gelación en masa de carne de pollo batida (BARBUT, S., MITTAL G.S., 1989). Se evaluaron tres velocidades de congelación (0.2, 5.5 y 9.6 grados C/min correspondientes a congelación lenta, lecho fluidizado y

criogénica). Se evaluó el módulo de rigidez (G) durante el cocimiento y se encontraron diferencias a partir de los 64 °C. El control (carne no congelada) dio el valor final de G más bajo seguido de la criogénica, por aire rápido y el más alto fue la de congelación lenta. Se discute que estas diferencias se pueden relacionar con el grado de daño al músculo debido a la congelación.

Sin embargo, en otros estudios (BARBUT, KAKUDA, CHAN, 1990) se vio que para pollo deshuesado mecánicamente no eran tan buenos los resultados, ya que al evaluar oxidación de lípidos midiendo malonaldehído, se observó que hasta los 5 meses de almacenamiento no había diferencia con los valores obtenidos en pollo congelado por aire forzado, pero después de los 5 meses sí hubo diferencia entre los dos métodos de congelación. Como el pollo deshuesado mecánicamente es difícil de conservar por su alta actividad enzimática al romperse los tejidos, estos investigadores recomiendan que se utilice el dióxido de carbono para la congelación por ser el método más económico y que proporciona un descenso rápido en la temperatura evitando el desarrollo microbiano y los riesgos a la salud que implican pero almacenando por periodos no mayores a tres meses.

Para carne de oveja o carnero se estudió la influencia del método de congelación en la cantidad de agua y proteínas que se pierden al descongelar el tejido (SACKS B., CASEY N.H., et al, 1992). Se compararon cuatro métodos diferentes: congelación criogénica con nitrógeno líquido a temperaturas de -65 y -90 °C, túnel de aire forzado a -21 °C, cámara de congelación a -20 °, y congelador doméstico a -23 °, donde el tiempo para congelar va desde 15 min hasta 2 horas. Se encontró que en aquellas muestras congeladas criogénicamente hubo menos goteo por descongelación y además que éste contenía una cantidad de proteínas

menor que en los otros casos. Sin embargo la ventaja de congelar criogénicamente se pierde al almacenarse por periodos largos a  $-20^{\circ}\text{C}$ .

## **6.2 Pescados y mariscos**

Las células del pescado se rompen con facilidad por los cristales de hielo de gran tamaño. La congelación rápida con dióxido de carbono ó nitrógeno líquido evita este problema.

Especialmente se utiliza para congelar pescados selectos como salmones y bacalao; mariscos como camarones, langostinos, anguilas; mariscos con concha como almejas, ostiones y veneras; y otros (LOEDHAL G. 1992; HERRMAN, 1977). En Australia se utiliza nitrógeno líquido para congelar mejillones de criadero y dióxido de carbono para las almejas (ANON. 1984).

También se utiliza en pescados que necesitan un procesamiento adicional se congelan superficialmente para mantener la forma, facilitar el cortado y prevenir el calentamiento cuando se pica (AGA Gas AB, 1994).

Marshall G.A. llevó a cabo un estudio comparando los efectos de cuatro diferentes métodos de congelación y dos empaques en la calidad de carne de langostino, inicial y durante el almacenamiento a  $-25^{\circ}\text{C}$ . El resultado fue que la congelación criogénica resultó el mejor para conservar la calidad del langostino, incluso después del almacenamiento (MARSHAL, G.A., 1989).

Otros estudios realizados por Aurell y colaboradores comparan diferentes métodos de congelación: criogénica, túnel de aire y congelado por placas en camarones y veneras. Encontraron que mediante la congelación se reduce considerablemente la pérdida de agua por goteo y por tanto la pérdida de peso, sin embargo esto no alcanza a repercutir en los resultados de las evaluaciones sensoriales donde no se encontró diferencia significativa entre los tres métodos de congelación (AURELL, UNIDO, et al 1976).

Por otro lado, en una industria de mariscos congelados de los Estados Unidos describen el cambio de sistema de congelación en su planta a un túnel de dióxido de carbono. Los factores que influyeron para tomar la decisión del cambio fueron: menor tiempo de congelación, aumento en el volumen de producción, ahorro de mano de obra y mejora en la calidad. La línea de productos congelados incluye lenguado sencillo, relleno, pescado empanizado y veneras. El tiempo de permanencia y temperatura de operación pueden ser ajustados de acuerdo a los requerimientos de congelación. El producto es congelado a  $-45.5^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 15 a 20 minutos. La velocidad de congelación minimiza la pérdida de peso por deshidratación, lo que conserva su sabor (COHEN, ELLIS, 1983).

### **6.3 Verduras**

La congelación criogénica se aplica con éxito en espárragos, frijoles, papas, pepinos, maíz y champiñones (HERRMAN, 1977), en coliflor, brócoli, apio y espinacas (FRIAS TEJERA, 1990), así como en zanahorias, chícharos, calabacitas, ejotes, chiles y cebollas.



Para zanahorias se estudió el efecto de la velocidad de congelación en la textura. Al realizar pruebas de resistencia al corte se encontró que existe un beneficio por el aumento de velocidad de congelación sobre la textura de la zanahoria, incluso después de la cocción (CANET, ESPINOZA, 1983).

En col rizada se analizaron las cuentas microbianas desde la cosecha hasta el momento en que llega al consumidor (SENER, BAILEY, COX, 1987). Las operaciones en que hay tiempos largos de espera así como manipulación constante incrementan la cuenta microbiana significativamente mientras que la congelación con nitrógeno líquido la reduce a niveles aceptables. Los microorganismos que se encontraron presentes son enterobacterias asociadas a la contaminación por suelo que no representan un riesgo para la salud pública, así como hongos y levaduras.

#### **6.4 Frutas**

Las frutas, en general tienen su pared celular más delgada que las verduras y se rompe con facilidad al ser sometida a procesos de conservación.

Las moras, como la fresa, frambuesa, zarzamora, etc, son especialmente delicadas. Si se congelan incorrectamente cuando se descongelan pierden su textura y apariencia apetitosa. La congelación con nitrógeno líquido ó dióxido de carbono mantiene sus características, dando buenos resultados (AGA Gas AB, 1994; HERRMAN, 1977). Jozon (JOZON, P 1981) reporta que el uso de dióxido de carbono para congelar fresas permitió aumentar la proporción de fresas comercializadas como "fruta fresca", y disminuir la venta de fruta para industrializar que tiene un precio menor.

En 1989 dos cooperativas de productores de moras azules disminuyeron costos en un 50% ya que disminuyó la mano de obra, la pérdida de peso por deshidratación de la fruta y aumentó la capacidad de producción al colocar un congelador por inmersión con nitrógeno líquido antes del congelador por lecho de aire fluidizado. El sistema de nitrógeno congela la superficie de las frutas en segundos lo que previene la formación de cristales de hielo internos que puedan reventar las células y dañar la textura antes de entrar al congelador mecánico (MORRIS C.E., 1991).

También se han observado buenos resultados en melones, ciruelas, cerezas y uvas (HERRMAN, 1977).

En Estados Unidos, en el valle de San Joaquín una empresa decidió lanzar al mercado una mezcla de frutas congeladas. El proceso incluye los siguientes puntos 1) Enfriamiento con una solución para llevar a la fruta a una temperatura de 2°C. 2) Túnel de congelación con dióxido de carbono, de tres etapas, donde se congela únicamente la superficie de la fruta. Ésta pasa tres veces por un rociado de CO<sub>2</sub> líquido, cada vez más lentamente que la anterior, permaneciendo en total, aproximadamente 6 min a una temperatura promedio de -73°C. 3) Después de esto la fruta circula lentamente por una banda transportadora durante 10 minutos para asegurar que se ha congelado hasta el centro. Al ser retirada para empacarse, la fruta tiene una temperatura de -20°C y está completamente congelada. La capacidad de producción es de 6000 kg/h de fruta congelada. La calidad de su producto ha tenido muy buenos resultados principalmente como proveedores en restaurantes, hospitales, incluso en industrias de repostería, pastelerías y otros alimentos procesados (ANON, 1975).

En otros casos, se puede utilizar la congelación criogénica para congelar únicamente la superficie de la fruta y así evitar las pérdidas de humedad y reducir la carga al sistema mecánico de congelación. Este es el caso descrito por Lucas (LUCAS ER, 1979), donde se congelan fresas utilizando un túnel de nitrógeno líquido y posteriormente un túnel de lecho fluidizado. El primer paso lleva aproximadamente 1 minuto, mientras que el segundo se lleva de 8 a 9 minutos. De esta forma se aprovechan las ventajas de ambos sistemas de congelación.

Como se ha mencionado, uno de los principales problemas es la pérdida de agua por goteo al descongelar y ésta depende, en gran medida, de la velocidad de congelación del alimento. Se realizaron pruebas con frutas y verduras congeladas por aire a 0°F (-17.7°C) y congeladas rápidamente con nieve de dióxido de carbono a -100°F (-73.33°C) y los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 6.1.-Pérdida de agua por congelación en frutas y verduras.**

Vegetal	% Agua perdida	
	Por aire	Por CO <sub>2</sub>
Chicharos	8.4%	4.5%
Espárragos	23.4%	19.2%
Ejotes	14.5%	8.2%
Fresas	37.1%	29.7%
Manzanas	1.3%	0%

(CRUESS, 1968)

Existen otras tecnologías que utilizan la congelación criogénica como paso intermedio dentro del proceso. Por ejemplo en la obtención de fruta en polvo (PAVLYUK, SOKOLOVA, 1989). Este procedimiento involucra la congelación con nitrógeno líquido de la pulpa de la fruta, y posteriormente se liofiliza en nitrógeno líquido. El polvo obtenido guarda todas las sustancias activas y valor nutritivo de la fruta original. El tamaño de partícula óptimo es de 50  $\mu$ m.

Para congelar cítricos en gajos se ha observado que no es muy conveniente el empleo de nitrógeno ó dióxido de carbono líquido ya que durante el pelado se remueven las ceras que mantienen unidas las membranas que recubren las células con el jugo. Al congelarse tan rápidamente aumentan de volumen los sacos de jugo no alcanzan a formarse los puentes que conectan un saco con otro, por lo que se rompe el tejido. Se han continuado las investigaciones para entender el comportamiento de la cubierta de cera en los sacos de jugo y mejorar los procedimientos de manejo y procesos ahorrando considerables pérdidas (SHOMER, BEN-GERA, FAHN, 1975).

### **6.5 Platos preparados**

Vanderstoep (VANDERSTOEP J, et al, 1975) al realizar estudios sobre la alimentación de colectividades en el que involucraron distribución de comidas congeladas concluyen que para comidas que sufrirán un almacenamiento mayor a los tres meses, la velocidad de congelación no ejerce influencia sensible sobre la calidad de los precocinados congelados. En base a estos resultados, los autores del

estudio indican que los criterios básicos en la elección de una instalación de congelación de precocinados deben ser la capacidad de producción, costo de la planta y costo del proceso por unidad de producto congelado. Sin embargo, dependiendo de las características de la planta y del alimento se obtienen ventajas que justifican la utilización de la congelación criogénica.

Rotanelli (ROTANELLI T., ELLIS R. 1982) describe como en una planta de producción de especialidades italianas como ravioles y manicotti entre otros, el uso de un túnel de congelación modular que opera con dióxido de carbono líquido ha resuelto problemas anteriores. La doscificación de CO<sub>2</sub> líquido permite congelar cada producto a la temperatura adecuada mediante un cambio sencillo en el panel de control. Por ejemplo, los ravioles deben ser procesados a -45°C o temperaturas mayores por su sensibilidad al frío extremo; empanadas rellenas, manicotti y otros productos son congelados a temperaturas de -70°C, con tiempos de residencia variables. A pesar de estas diferencias la operación de la planta es simple y permite controlar la temperatura perfectamente, aprovechando al máximo la energía refrigerante, lo que aumenta la capacidad de producción con el manejo apropiado a cada producto.

También se ha aplicado dióxido de carbono líquido en una planta de producción de platillos mexicanos en Estados Unidos (ZELAYETA L., ELLIS, R. 1981), pero en este caso se colocó un túnel para congelar únicamente la corteza de los productos como burritos, enchiladas, tacos y tamales. Esto permite cumplir con los requerimientos de la USDA de bajar la temperatura después del freído a 4 5°C en un tiempo máximo de 2 horas. La congelación con CO<sub>2</sub> permite alcanzar este objetivo. Por ejemplo, al salir de las freidoras los burritos tienen una temperatura

de 85°C en la superficie y 40°C en el centro. Posteriormente se transportan al túnel de congelación, en el cual permanecen aproximadamente 3 minutos a una temperatura de -60 a -65°C. Al salir, el producto ya alcanzó 4°C en el centro. Esto, además de reducir considerablemente el tiempo de enfriamiento, tiene otras ventajas como facilitar las operaciones de envasado y disminuir considerablemente la carga de los congeladores mecánicos que se utilizan para la congelación final. En conjunto este sistema de congelación permitió aumentar considerablemente la capacidad de producción.

Por otro lado, en una compañía productora de salsa para pizza, se cambió el medio refrigerante de dióxido de carbono por nitrógeno líquido, lo que aumentó su capacidad de producción de 1600 lb/h a 2700 lb/h, en promedio se calcula que aumentó en un 55%. La salsa para pizza ingresa al túnel a una temperatura de 70°C y se requieren aproximadamente 3 minutos para congelar el producto. Además cuentan con un sistema de inmersión para hacer frente al aumento en la demanda de un día a otro. En este equipo el producto pasa a través de un baño de nitrógeno líquido y se alcanza -20°C en unos cuantos segundos. Además de los beneficios en cuanto a la capacidad de producción, la congelación criogénica les ha servido para conservar la calidad de su producto. El sabor, color y textura de la salsa para pizza ha mejorado debido a la propiedad de ser inerte del nitrógeno, ayuda a mantener su naturaleza. La humedad se conserva mucho mejor. En cuanto a su manejo, la congelación tan rápida conserva su forma original evitando que se peguen unos con otros (AIRCO INDUSTRIAL GASES, 1988)

En el Reino Unido se utiliza dióxido de carbono líquido para congelar pizzas y lasagna (MILLS MH, 1979). Otra empresa en el Reino Unido distribuye

platos preparados que son congelados con CO<sub>2</sub> líquido, cuya variedad va desde platos tradicionales como pie de Cowheel, carnes, pudines, postres, hasta la línea gourmet como pato a la naranja (SLADE E., 1977).

En Canadá, una empresa de comida china congelaba sus productos como rollos de huevo, sopa won ton y diferentes bocaditos en un túnel de aire forzado. Al cambiar a un túnel de dióxido de carbono líquido dobló su capacidad de producción al mejorar la eficiencia de producción y calidad de producto (ANON. 1980).

También dentro de los platos rápidos se encuentran los Omelets de huevo entero. Sallie Willard y colaboradores (WILLARD S., BAKER R., et al, 1982) realizaron un estudio para ver la capacidad de retención de agua y aceptación en cuanto a textura en omelets de huevo entero, precocidos y congelados. Se compararon 1) métodos convencionales de congelación 2) métodos criogénicos (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, y Freón 12) y la influencia del uso de aditivos como carboximetil celulosa, almidones modificados, goma xantana y karaya, etc. para mejorar las propiedades del producto. Se encontró que con los métodos criogénicos se lograba una reducción sustancial en la pérdida de humedad y valores de resistencia al corte menores, lo que resulta en un producto más suave que el que se podría alcanzar con los métodos convencionales. Además al realizar la evaluación sensorial y compararla con las muestras en las que se utilizaron aditivos se vio que no hubo diferencias significativas lo que indica que el uso de aditivos puede no ser necesario. También se realizaron micrografías de barrido electrónico, para observar la ultraestructura de las diferentes muestras, combinando cada aditivo con un método de congelación. Se vio que la velocidad de congelación influye

dramáticamente en la estructura del omelet. La estructura de las muestras congeladas criogénicamente se aprecia más compacta y tomado los resultados de las otras pruebas se puede decir que a una ultraestructura más compacta corresponde una mayor capacidad de retención de agua y mayor aceptación por su textura.

En dulces que tienen varias capas de crema batida, mermeladas ó rellenos cremosos de chocolate, etc, tienden a atorar ó atascar la banda transportadora y ocasionan muchos problemas al embarrar toda la línea. El enfriamiento rápido con nitrógeno líquido ó dióxido de carbono resuelve este problema al enfriar una capa antes de agregar la siguiente (AGA Gas AB, 1994).

Se ha recomendado el procedimiento de la congelación criogénica para bollos y pasteles bajos en grasas, debido a que con él se pasa muy rápidamente la zona de temperaturas comprendida entre 30 y -7°C y se evita así muy bien el fenómeno de revenido que dentro de ese margen se produce (HERRMAN, 1977).

Para pastas y pasteles, Mills (MILLS MH, 1979) recomienda el uso de CO<sub>2</sub> líquido porque se evita el choque térmico tan severo que puede causar el nitrógeno líquido en estos productos.

Para postres especialmente delicados como flanes, mousses, pastelillos, etc, se recomienda la congelación con nitrógeno líquido ya que se dañan fácilmente al ser congelados por aire.



## 6.6 Otros

En clara de huevo cocida (HERRMAN, 1977). También en yema se obtienen buenos resultados utilizando  $N_2$  líquido (VICENTE, 1994).

En Francia se utiliza dióxido de carbono líquido para congelar caracoles (MILLS MH, 1979).

En los alimentos en que se utilizan almidones como aditivos para dar textura se ha observado que la congelación criogénica reduce considerablemente el daño al sistema almidón-agua que pueden ocasionar los cristales de hielo (LUALLEN, 1994).

Se desarrolló un proceso para obtener gotas de productos alimenticios líquidos congeladas individualmente. El proceso involucra el bombeo del producto líquido en un flujo de nitrógeno líquido, donde se congela la superficie en menos de 10 segundos. Después la separación del producto y el  $N_2$  pasando sobre una superficie perforada y después la congelación total en una corriente de nitrógeno gaseoso frío. Este proceso fue desarrollado inicialmente para crema. Pero actualmente se utiliza también para cultivos de levaduras para masa, huevo, chocolate para repostería, mantequilla, jugos de frutas, salsas, yoghurt entre otros (TAYLOR, R.I. 1984). Existen otros aparatos (ver 5.4) con los que también se congelan fluidos como los mencionados.

En Dinamarca se introdujo el "Huevo Eterno Alargado", en el cual en vez de tener su forma oval, se convirtió en un cilindro de 20 x 4.5 cm. Se vió que es más barato en el mercado este tipo de cilindros y rebanarlo en piezas iguales para uso

institucional que cargar el huevo hervido tradicional, más difícil de empaquetar y que resulta en rebanadas irregulares. Se trató de congelar en lecho de aire pero siempre se obtenía un goteo de la clara después de la descongelación. Al congelarlo por contacto directo con un líquido criogénico se obtuvo un producto de primera calidad en apariencia y sabor y una vida de anaquel después de la descongelación igual al producto fresco. El huevo sale del cocimiento a una temperatura de 60°C, es empaquetado con una película plástica encogible, y después se congela por contacto directo con nitrógeno líquido alcanzando una temperatura interna de -15°C en menos de 15 minutos (SLATER, 1977).

Como una alternativa para utilizar más eficientemente alimentos de alta demanda como el camarón, se ha ideado un sistema para utilizar la carne de desperdicio, darle forma, procesarlo y obtener un "nuevo camarón" empanizado. También se ha aplicado para aros de cebolla, tortas de pescados, etc. Se utilizan aditivos como alginatos, proteína de soya texturizada, calcio iónico, antioxidantes, etc. para mantener la forma durante el empanizado y freído. En el caso de las tortas de pescado se realiza una extrusión a baja temperatura. Posteriormente se congelan con nitrógeno líquido (SANDER, SOO, MINDHAM, 1976).

En la producción de cultivos iniciadores para quesos y otros productos lácteos como *Streptococcus lactis*, *S. cremoris*, *S. thermophilus*, *Lactobacillus bulgaricus*, algunas especies de *Leuconostoc*, etc, se ha utilizado, como paso final la congelación criogénica ("flash-freezing") con nitrógeno líquido para concentrar y conservar los cultivos, manteniendo el 95% de su potencia. Anteriormente se utilizaba la liofilización pero es menos eficiente porque reducía mucho más la potencia del cultivo (hasta un 70%). Para mantener el cultivo se deben conservar condiciones criogénicas durante el almacenamiento y transporte incluso en la planta de productos lácteos (ZIEMBA, 1970).

Por otro lado, en la industria de la panificación, específicamente en la producción de masa congelada, se ha buscado la forma de proteger la viabilidad de la levadura. Para este objeto, se llevó a cabo una investigación (NEYRENEUF, DELPUECH, 1993) donde se observó que la congelación lenta convencional es preferible que la congelación criogénica porque produce menor estrés en las células. Se observó que cuando la temperatura de congelación es menor a  $-60^{\circ}\text{C}$  se minimiza la acción leudante de la levadura. Sin embargo en este estudio se afirma que para aumentar la productividad sin afectar el comportamiento de la levadura se puede utilizar la congelación criogénica pero seleccionando y controlando cuidadosamente las condiciones de congelación.

Prueba de esto es que en estudios del comportamiento de la levadura en masa congelada se obtuvo que el mejor producto se obtuvo a partir de masa congelada criogénicamente a  $-20^{\circ}\text{C}$ , después la masa congelada con aire forzado a  $-20^{\circ}$  y por último la congelada criogénicamente a  $-40^{\circ}$ . Estos resultados se obtuvieron cuantificando células viables, producción de gas y tiempo de fermentación. En cuanto a las características del pan no se observó efecto significativo del método de congelación de la masa. Lo que sí se observó fue un decremento en la calidad a partir de las 5 semanas de almacenamiento a  $-18^{\circ}\text{C}$ , en todos los casos (ERTUGAY, KOCA, CELIK 1993).

En otro estudio se comparó el efecto de la congelación en a) túnel de nitrógeno líquido (5-20 min) dependiendo del producto b) túnel de aire forzado ( $-25$  a  $-30^{\circ}\text{C}$  durante 20-24h) en masa para diferentes tipos de pastas y pasteles. Se evaluaron antes, inmediatamente después de la congelación y después de un periodo de almacenamiento de 6 semanas, 3 y 6 meses respecto a humedad,

proteínas totales, nitrógeno protéico, grasa, rancidez y evaluación sensorial del producto terminado. Se concluyó que el método más ventajoso para la congelación de la masa fue el de nitrógeno líquido, incluso después de los 6 meses de almacenamiento no hubo cambios indeseables en las características de horneado y calidad organoléptica. La estructura del migajón, forma, volumen, sabor y aroma de los productos terminados justifican el uso de nitrógeno líquido para la masa (IWANSKA S, STRUSINSKA D, 1982).

También se emplea la congelación criogénica para congelar productos lácteos como leche concentrada, mantequilla y crema (MADRID, 1994).

Existen otros casos donde la conservación de los alimentos no es el objetivo primordial de la congelación criogénica, sin embargo constituye un paso de utilidad en todo el proceso para determinado alimento, por considerarse interesantes se mencionan algunos a continuación.

En la molienda de especias como canela, comino, nuez moscada, pimienta se ha encontrado que cuando se efectúa bajo condiciones criogénicas existen menos modificaciones de la composición natural que en la molienda a temperatura ambiente. En la molienda convencional la temperatura de las especias puede alcanzar los 90°C, mientras que en la molienda criogénica, la evaporación del nitrógeno líquido enfría rápidamente la especia y la máquina. Esto produce una temperatura durante la operación de -73°C. Esto trae varias ventajas: (1) se reduce la oxidación de los aceites de las especias y aumenta su estabilidad por el ambiente inerte creado por el nitrógeno; (2) molienda más fina porque las especias se vuelven más quebradizas a estas temperaturas, este aspecto repercute en otros: (a) permite una distribución del sabor más uniforme en el producto; (b) disminuye las

diferencias visuales; (c) facilita las preparaciones en líquido; (3) reduce la pérdida de volátiles y aumenta el poder saborizante; (4) la baja temperatura tiende a disminuir las cargas microbianas; (5) facilita la operación porque a bajas temperaturas las especias no se pegan en el molino; (6) los costos de la molienda criogénica resultan menores que la convencional cuando se considera la fuerza del sabor que puede llegar a aumentar en un 30% y la reducción de potencia necesaria para realizar la operación (RUSSO, 1976; PESEK, WILSON, HAMMOND, 1985).

El mismo principio se ha aplicado con éxito al moler ajo, ya que se obtiene tamaño de partícula más uniforme, sin pérdidas ni cambios de color. (KUZMIN MP, ORLOVSKY, et al, 1983)

También como auxiliar en la molienda, la congelación criogénica se aplica para fraccionar materiales que a temperatura ambiente sería muy difícil por ser pegajosos o cohesivos como por ejemplo goma de mascar, chocolates, dulces, entre otros (ANON. 1980).

En la sección de frutas se mencionó la obtención de frutas en polvo utilizando nitrógeno líquido.

## 6.7 Ventajas y Desventajas

### Ventajas

-El procedimiento de rociado tiene la ventaja de una rápida congelación acompañada de un desplazamiento del oxígeno atmosférico, con lo que puede conseguirse conserven muy bien las propiedades originales del producto ya que se evita la oxidación de las grasas y sustancias aromáticas (FELLOWS 1990; HERRMAN 1977).

- Mínimas lesiones celulares y por consiguiente menores pérdidas por goteo. Esto tiene mayor importancia en productos vegetales por que las células animales son más flexibles al no tener pared celular (HOLDSWORTH 1985).

-Pérdidas reducidas de humedad al congelarse rápidamente la superficie del alimento (FELLOWS 1990).

-Detiene el desarrollo microbiano inmediatamente, lo que reduce el riesgo para la salud (INST. INT.DEL FRIO 1990; SEBRANEK 1982).

-Facilidad de operación. Hay únicamente dos funciones que regular: Velocidad de la banda transportadora para definir el tiempo de permanencia en la unidad y cantidad de criógeno suministrado para alcanzar la temperatura deseada (SEBRANEK 1982).

-Alto grado de versatilidad en los productos a congelar. En un mismo congelador se pueden procesar diversos alimentos modificando las condiciones de

operación fácilmente en el panel de control. Esto permite tener en la línea de producción tres o más productos diferentes y darle a cada uno el tratamiento adecuado sin que esto represente un problema (HOLDSWORTH 1985).

-En el sistema de congelación criogénica es gobernado por la carga de calor dada por el producto y no por limitaciones de diseño como capacidad del compresor, la eficiencia del condensador o del evaporador. Además esto elimina una fuente de ruido y vibraciones (BOOTH 1980; HOLDSWORTH 1985).

-Facilidad de limpieza. Pueden ser lavados con agua caliente o vapor. Las unidades son abiertas y re-ensambladas con rapidez para su limpieza. El alimento sólo entra en contacto con la banda transportadora (SACKS 1985).

-El enfriamiento del sistema, a partir de temperatura ambiente, requiere aproximadamente 20 minutos (SACKS 1985).

-Escaso costo de mantenimiento (HOLDSWORTH 1985; SEBRANEK 1982).

En otros sistemas hay que considerar el sistema y tiempo de descongelación, como en los de aire forzado. En las unidades de congelación criogénica prácticamente no existe tiempo muerto por mantenimiento (FELLOWS 1990).

-Menor demanda de espacio en la planta. Se puede hablar de la tercera parte de espacio para la misma capacidad, entre un congelador criogénico y uno mecánico, aunque hay que considerar el espacio del tanque de almacenamiento del

fluido, que puede estar en el exterior, y el acceso de las pipas de suministro (HOLDSWORTH 1985; SACKS 1985).

-Flexibilidad para adaptarse a las necesidades de capacidad.

En caso necesario se puede aumentar por módulos el tamaño del congelador (SACKS 1985).

-Adaptabilidad a la línea de producción (SEBRANEK 1982; SLADE 1977).

-Capital de inversión bajo (SEBRANEK 1982).

### **Desventajas**

Como principal desventaja, en la literatura se menciona el alto costo de este tipo de congelación comparado con métodos mecánicos, debido al precio de los fluidos criogénicos. Sin embargo, esto no es terminante ni definitivo en todos los casos. En ocasiones al comparar diferencias en deshidratación, pérdidas por goteo, costo de operación y mantenimiento, versatilidad, calidad, etc. se encuentra como un sistema económico y deseable. También hay que recordar que las ventajas en la calidad organoléptica que proporciona la congelación criogénica en ocasiones se pierden con un almacenamiento muy prolongado (FELLOWS 1990; HERRMAN, 1977; SEBRANEK 1982).



Es necesario estudiar cada caso particular, naturaleza del producto a congelar, volumen de producción, condiciones de operación, necesidades, opciones, ventajas obtenidas, etc., para tomar una decisión (ANON. 1983; BOOTH 1980; FELLOWS 1990; .

Debido a los bajos costos de inversión, la congelación criogénica puede ser una alternativa para producción de pequeña o mediana capacidad. En las secciones 6.1 a 6.6 se mencionan beneficios económicos para producciones de 100 a 6000 kg/h.

También existe la posibilidad de rentar el equipo lo que puede ser atractivo cuando se trata de nuevos productos y se desea incursionar en el mercado, o para productos de estación (AGA Gas AB 1994).

También es interesante analizar la tendencia de precios en cada país. Por ejemplo, en el Reino Unido, en los años setentas el precio de los líquidos criogénicos se dobló mientras que el costo de la electricidad aumentó en proporción de 3/4 (ANON 1979).

Otro factor a considerar es la diferencia en precios y características de el nitrógeno líquido y el dióxido de carbono líquido.

Por ejemplo, en 1983 se publicó un análisis comparativo de costos entre el nitrógeno líquido y el dióxido de carbono líquido para la congelación de 3600

libras por hora de carne para hamburguesas en turnos diarios de 8 horas, en el estado de Nueva York E.U.A., obteniendo lo siguiente:

**Tabla 6.2.-Uso de CO<sub>2</sub> en la congelación de hamburguesas.**  
Consideraciones económicas.

USO DE CO <sub>2</sub> EN LA CONGELACION DE HAMBURGUESAS		
	Congelador en espiral con CO <sub>2</sub>	Túnel con N <sub>2</sub>
Capacidad congelante requerida (BTU/h)	450.000	450,000
Costo del congelador (dólares)	\$233,090	\$146,575
Criógeno (dólares/día)	\$1,218	\$1,582
Otros costos de operación (dólares/día)*	\$283	\$241
<b>COSTOS DE OPERACION TOTALES (dólares/día)</b>	<b>\$1,501</b>	<b>\$1,823</b>

\*Incluye depreciación, intereses, energía, mantenimiento, etc.

(ANON. 1983)

Depende también de la habilidad para adaptar los equipos disponibles y las ventajas que ofrece cada uno para obtener el mayor beneficio, como se vió en los casos de combinación en los sistemas criomecánicos presentados en las aplicaciones.

Una compañía estadounidense realizó en 1990 un análisis de costos de congelación considerando energía utilizada, fluido criogénico y pérdida de peso, (mano de obra, mantenimiento y amortización de equipos no se consideraron y pueden variar ampliamente). Se obtuvo lo siguiente:

**Tabla 6.3.-Comparación de costos de diferentes métodos de congelación**

PRODUCTO	VALOR*	MECANIC O	NITROGE NO LIQUIDO	CRIO MECANI CO
Fresas	66-70	7.9	7.2	3.5
Carne para hamburguesas	150	3.4	4.75	2.4
Camarón mediano	300	6.5	6.56	4.65

\*Reportado en centavos de dólar por libra (MORRIS, CH. 1991)

En algunos casos se ha visto que conviene colocar una planta de recuperación de dióxido de carbono, lo cual aumenta fuertemente la inversión pero un análisis profundo de las características del producto y condiciones de producción y mercado podrá mostrar si vale la pena o no.

Se ha visto que una planta de recuperación y licuefacción de CO<sub>2</sub> puede reaprovechar el 85% del fluido utilizado (DURON, HAVIGHORST, 1972).

Hay que considerar que la mayor velocidad de congelación no debe convertirse en una obsesión, como algo que nos lleve a un extremo innecesario para evitar un gasto extra que no nos proporciona un beneficio.

#### **6.8 Ejemplo de una aplicación de la congelación criogénica:**

##### **Frambuesas congeladas**

##### **La Frambuesa**

La frambuesa es una fruta que pertenece a la familia de las rosáceas, género *Rubus*, subgénero *Idaeobatus*, especie *idaeus* (ELLIS, M.A., ET AL, 1991). Es una mora silvestre que crece en las zonas montañosas de Europa. Actualmente se cultiva de manera formal en muchos países como Francia, la antigua Yugoslavia, Alemania, Suiza, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Chile.

En México la producción de frambuesa era muy escasa y de carácter más bien casero en huertos familiares. No existía el cultivo formal ya que se pensaba que no se adaptaría a las condiciones climáticas del país. Actualmente ha tomado mayor importancia y se cultiva en los estados de México, Puebla, Hidalgo y Michoacán, principalmente.

Aunque en México su mercado no es muy grande y se limita más bien a pastelerías, restaurantes y hoteles, tiene buenas perspectivas de exportación por ser su época de cosecha más temprana aquí que en la mayoría de los países productores (RODRIGUEZ, ASTITIA, 1981).

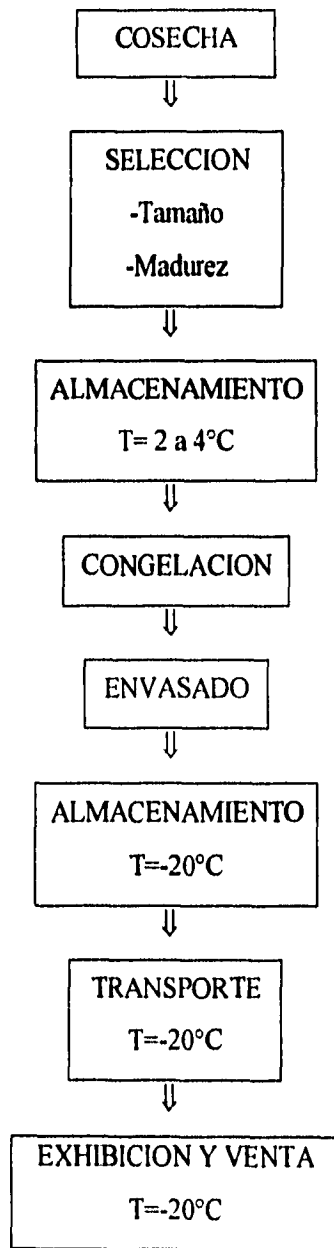
La frambuesa tiene una tasa de respiración muy elevada por lo que aún almacenada a bajas temperaturas y humedad controlada (0°C a 90-95% Humedad Relativa), tiene una vida de anaquel muy corta, de 3 a 5 días (ROBBINS, 1989). Esto hace muy atractiva la congelación como técnica de conservación ya que aumenta considerable su vida útil. A continuación se presentan datos al respecto:

**Tabla 6.4.-Vida de anaquel de frambuesas congeladas.**

TEMPERATURA ALMACENAMIENTO	VIDA DE ANAQUEL
- 12 °C	5 meses
- 18 °C	24 meses
- 24 °C	> 24 meses

(INST. INTERNACIONAL DEL FRIO, 1990)

## CONGELACION DE FRAMBUESAS



La frambuesa no se lava porque las delgadas fibras de conexión, al estar húmedas se rompen al entrar en contacto con el líquido criogénico y se separan las células provocando el rompimiento de los tejidos. La fruta sin lavar es mucho más fuerte y resistente a la ruptura, pero debe manejarse con mucho cuidado para asegurar su calidad sanitaria ( HANSON, L.P., 1976).

Para la congelación se recomienda la aplicación de nitrógeno líquido. En unas pruebas realizadas por Demeczky obtiene mejores resultados en cuanto a color y consistencia utilizando nitrógeno líquido como medio para congelarlas (DEMECZKY, 1977).

Como prueba demostrativa se congelaron 10 kg de frambuesa roja con grado de madurez comestible en un congelador AGA de Túnel Modelo 60-12 (AGA, 1982), obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 6.5.-**Condiciones de operación durante la prueba demostrativa para congelar frambuesas.

Largo del túnel	3.05 m
Velocidad de la banda	0.7625 m/min
Temperatura de entrada de las frambuesas	17°C
Tiempo de permanencia en el túnel	4 min
Tiempo para congelar 10 kg de frambuesas	20 min
Nitrógeno empleado:	3 m <sup>3</sup>
Presión del nitrógeno	4 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 6.6.-Observaciones durante la congelación de frambuesas**

Temperaturas	Observaciones
- 83°C	Congelación incompleta, textura deficiente
- 86°C	Congelación completa, textura adecuada
- 89°C	Excesivamente dura, quebradiza y frágil

Las temperaturas se fijaron en base a la velocidad de banda que se tenía y a la experiencia de los operadores del túnel (ULTRACOLD 1993).

Esta prueba se realizó únicamente como demostración y no fue posible utilizar diferentes velocidades de banda ni presiones de nitrógeno. Por esta razón los datos que aquí se exponen no son definitivos y probablemente tampoco los más eficientes, pero dan una idea clara de cómo funciona un túnel en la realidad.

No se evaluaron las frambuesas después de un periodo de almacenamiento, únicamente en el momento de la congelación. Al descongelarse después de unos minutos su apariencia, olor y sabor eran como las de las frambuesas sin congelar. No había diferencia aunque, como ya se mencionó, no se realizó análisis estadístico. Cabe mencionar que esta prueba se realizó como parte de otro proyecto de tesis que no se pudo concluir por dificultades técnicas.

En México el precio del nitrógeno líquido varía conforme aumenta su consumo:



**Tabla 6.7.-Precios del nitrógeno líquido con respecto al consumo.**

PRECIO (N\$)	CONSUMO
1.18 kg N <sub>2</sub>	Hasta 20 ton/mes
0.82 kg N <sub>2</sub>	De 21 a 40 ton/mes
0.65 kg N <sub>2</sub>	De 41 a 100 ton/mes

(CRYOINFRA S.A de C.V., enero 1995)

El consumo de nitrógeno líquido es de 1 a 1.5 kg N<sub>2</sub> por kilogramo de producto, dependiendo de la eficiencia de la instalación y del túnel (CRYOINFRA, AGA de México, 1995).

Para instalar el túnel y el tanque de congelación es necesario contar con corriente eléctrica de 220 ó 440 volts y una base de cemento para el tanque de almacenamiento.

Las frambuesas congeladas son apreciadas en el mercado estadounidense, lo cual es una de las razones por las que se optó por este método de congelación (INFOTEC 1993).

Así se ha presentado un ejemplo de lo que es la aplicación de la congelación a un producto determinado.

## 7 CONCLUSIONES

La importancia de la congelación criogénica está dada por la variedad de productos a los que se aplica y por los factores que nos conducen a seleccionar un método de congelación u otro.

Resumiendo estos puntos:

### Aplicaciones de la congelación criogénica

#### 1.-Carnes:

Se utiliza principalmente para congelar piezas de tamaño mediano o pequeño como filetes, brochetas, hamburguesas, no para canales ni medias canales. Ayuda a conservar el color rojo brillante de la carne por lo que se utiliza para carne de res, cerdo, oveja y camero. Se aplica con éxito también en productos cárnicos como salchichas, tocino, jamón.

Al congelar a  $-29^{\circ}\text{C}$  con nitrógeno líquido o dióxido de carbono se elimina *Trichinella spiralis* de la carne de cerdo.

No se ha encontrado diferencia significativa entre el uso de nitrógeno líquido y dióxido de carbono líquido en cuanto a propiedades organolépticas.

Para pollo se recomienda el uso de dióxido de carbono pero no almacenarlo por más de tres meses porque se llevan a cabo reacciones de oxidación, especialmente en pollo deshuesado.

## **2.- Pescados:**

Se utiliza la congelación criogénica para pescados selectos como salmones, lenguado y bacalao. Para mariscos como camarones, langostinos, anguilas y productos con concha como almejas, ostiones, veneras y mejillones.

En otros casos se congelan superficialmente los pescados que necesitan tratamiento adicional para mantener la forma, facilitar el cortado y prevenir el calentamiento cuando se pica.

## **3.- Verduras:**

Se aplica con éxito en papas, frijoles, espárragos, pepinos, maíz, champiñones. También en brócoli, coliflor, col rizada, espinacas y apio. En hortalizas como zanahoria, chícharos, calabacitas, chiles, cebollas.

## **4.-Frutas:**

Son más delicadas que las verduras por tener su pared celular más delgada. Se aplica principalmente en moras como fresas, frambuesas, zarzainoras, moras azules. También en melones, ciruelas, cerezas, uvas, duraznos y manzanas.

No se recomienda para congelar cítricos en gajos ya que el tejido se rompe al congelarse tan rápidamente.

También se utiliza como paso intermedio en la obtención de fruta en polvo que guarda las sustancias activas y valor nutritivo de la fruta original.

### **5.- Platos preparados:**

Se utiliza dióxido de carbono líquido en platos como raviolos, manicotti, empanadas rellenas, pizzas, lasagna, rollos de huevo, sopas chinas. Incluso se emplea en platos de la línea gourmet como pato a la naranja.

La congelación criogénica puede evitar el uso de aditivos para conservar la textura en omelets de huevo entero.

Para disminuir la temperatura en pocos minutos después del freído de tacos, burritos, enchiladas, se congela únicamente la corteza y así facilita su manejo en los siguientes pasos del proceso.

En productos de pastelería, dulces con capas de mermeladas, rellenos cremosos, chocolate y postres delicados como flanes y mousses.

### **6.- Otros:**

Para congelar yema y clara cocidas por separado. También para el huevo entero moldeado se utiliza nitrógeno líquido con muy buenos resultados.

En Francia se utiliza CO<sub>2</sub> líquido para congelar caracoles.

En la obtención de gotas de productos líquidos y semilíquidos como cremas, salsas, sopas, aderezos, alimento infantil, mantequilla, yoghurt, jugos de frutas, chocolate para repostería y otros.

En la conservación de cultivos iniciadores para productos lácteos (No es liofilización).

Para aprovechar trozos de productos como camarón, pescados, cebolla se moldean por extrusión y después se congela con nitrógeno líquido.

En la conservación de masa se recomienda congelar con nitrógeno líquido controlando la temperatura entre  $-20$  y  $-30^{\circ}\text{C}$  para mantener la viabilidad de la levadura.

La congelación criogénica también se emplea como paso intermedio para facilitar algún proceso, por ejemplo, la molienda de especias como canela, comino, nuez moscada, pimienta, así como para triturar ajo y fraccionar materiales pegajosos como goma de mascar, chocolates y dulces.

### **Ventajas y Desventajas**

-Por la velocidad en el descenso de la temperatura y atmósfera inerte se detienen en pocos minutos las reacciones químicas, enzimáticas y desarrollo microbiano.

-Disminuye las pérdidas de humedad.

-Mínimas lesiones celulares y por lo tanto menor pérdida de agua por goteo.

-En ocasiones, estas ventajas de la congelación criogénica se pierden con el almacenamiento prolongado.

-El funcionamiento del congelador depende de la carga de calor dada por el producto, y no por limitaciones de diseño de las plantas mecánicas generadoras de frío. Esto nos resulta en una mayor adaptabilidad a la línea de producción y a las diferentes necesidades de capacidad que se puedan presentar.

-Facilidad de instalación, limpieza y operación.

-Bajo capital de inversión y costo de mantenimiento.

-Alto costo de operación dado por el precio del criógeno.

-Se recomienda para volúmenes de producción pequeños ó medianos.

-Menor demanda de espacio en la planta.

En base al desarrollo de este trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

● La congelación es una técnica de conservación de los alimentos cuya aplicación está creciendo considerablemente, debido a factores tecnológicos y sociales.

● Se puede concluir que la congelación criogénica es un método útil para preservar la calidad de los alimentos, que por su velocidad detiene casi inmediatamente las reacciones enzimáticas y microbiológicas, disminuye el daño en los tejidos por la formación de cristales, la atmósfera inerte que se forma ayuda a evitar reacciones de oxidación. Resulta conveniente especialmente para productos delicados y de alto valor agregado.

● Es importante aclarar que, aunque la velocidad de congelación influye en gran medida, en las alteraciones estructurales que pueda sufrir el alimento, no debe

convertirse en una obsesión que nos lleve a un extremo innecesario para evitar un gasto que no nos proporciona un beneficio.

- Ya que el factor económico es determinante en la elección de un sistema de congelación, es necesario hacer un análisis profundo, para cada caso, de acuerdo a las características del producto, del mercado, volumen de producción, tiempo de proceso, requerimientos de espacio y energía en planta, gastos de limpieza y mantenimiento, costos de operación y tendencias en los precios de los criógenos, antes de tomar una decisión pues no se puede generalizar.

- Es posible combinar las ventajas de la congelación criogénica y mecánica, obteniendo mayores beneficios.

- Aunque el método de congelación que se elija sea el mejor para cierto tipo de producto, si no se cuida la calidad de la materia prima, el envase y las condiciones de almacenamiento y transporte, el resultado final no cubrirá las expectativas y se habrán desperdiciado recursos. Cada paso de la cadena productiva, desde la selección de la materia prima hasta el consumidor es importante.

- En nuestro país existen algunas normas, en cuanto a especificaciones sanitarias, para productos congelados como pescados frescos, crustáceos y moluscos. (NOM-027-SSA1, NOM-029-SSA1 y NOM-031-SSA1, respectivamente). También existe una norma para helados y nieves (NOM-036-SSA1), pero fuera de éstas no hay más especificaciones para alimentos congelados, lo que nos hace ver que hay mucho trabajo por realizar.

● En cuanto a la información que se recopiló, en su mayoría es de Estados Unidos, Canadá y Europa. También existen publicaciones de trabajos en países como Alemania, Dinamarca, Rusia, Holanda y ex-Yugoeslavia, a los que desgraciadamente no hay fácil acceso. En el apéndice B se enlistan referencias que puede resultar de utilidad consultar en un futuro.

● Al analizar la información bibliográfica obtenida, resulta difícil hacer comparaciones de referencias ya que en algunos casos no se especifican las condiciones del experimento, por ejemplo se habla de congelación mecánica, pero no qué sistema de congelación mecánica, cámara de aire forzado, túnel espiral, lecho fluidizado, entre los cuales existen grandes diferencias en funcionamiento y resultados

● Por todo lo anterior, se propone como un futuro trabajo, el análisis económico de los diferentes sistemas de congelación más utilizados, desarrollado de acuerdo a las condiciones económicas que existen en nuestro país.



## 8 BIBLIOGRAFIA

A G A. (1982) "A G A Freeze Description and Technical Data" 0115-0-001-A

AGA Gas AB (1994) "Quality and Cold Cash" Helsingborg, Sweden.

AGA FRIGOSCANDIA (1994) "AGA Gas Handbook" Helsingborg, Sweden.

AIRCO INDUSTRIAL GASES (1988) "Switch to nitrogen freezing allows processor to double production" *Food Engineering* 69(5), 169-172

ANDREWS C. (1976) "Refrigeration in the baking industries. Cryogenic freezing for speed and quality control" *Baking Industries Journal* 7(1), 40 y 43

ANDREWS C. (1979) "Future Freezing..." *Frozen Foods* 32(3), 25-26

ANON. (1975) "Creative Fruit Freezing, Packaging Make Big Valley Even Bigger" *Food Engineering* 47(6), 56

ANON. (1977) "Flexibility in freezing plant" *Food Processing Industry* 46(542), 22,25,26,28,30

ANON. (1980) "Cryogenic food technology preserves taste, texture" *Food Industries of South-Africa* 33(5), 40-41

ANON. (1980) "Chinesse FF firm says cryogenic unit enhances production efficiency" *Quick Frozen Foods* 43(5), 33

ANON. (1983) "CO<sub>2</sub> less expensive than N<sub>2</sub>" *Food Engineering* 55(10), 164

ANON. (1983) "Cryogenic railcar passes test on first cross-country run" *Food Engineering* 55(6), 146

ANON. (1984) "Mussels processed in freezer tunnel" *Australian Fisheries* 43(1) p.p. 56 *Abstract*

- ANON (1992) "Better Distribution, More Freezer Capacity Needed for Frozen Food Growth in Mexico" *Quick Frozen Foods International* 34(1), 82
- ANON. (1993) "German Economy Slips After Long Run, But Frozen Food Industry Races Ahead" *Quick Frozen Foods International* 34(4), 44-46
- ANON. (1994) "The Frozen Foods Almanac 1993" *Quick Frozen Foods International* 36(2), A1-A24
- ARANA R., (1972) "Métodos Modernos de Congelación de Alimentos" *Tecnología de Alimentos* 7(5), 226-234
- ASHBY, B.H., TURCZYN, M.T., SCHLIMME D., FOWKE M., VO Q (1983) "Effects of cryogenic temperatures on food products and packaging during rail transport" *XVIIth International Congress of Refrigeration, Paris Vol.4 Abstract FSTA 1986 18 G4E12*
- ASTRÖM, ST. (1977) "How Quick Should Quick-freezing be?" *Frozen and Quick Frozen Food. New Agricultural Production and Marketing Aspects. O.N.U. Pergamon Press, 120 y 121*
- AURELL T., DAGBJARTSSON B., SALOMONSDOTTIR E., (1976) "A Comparative Study Of Freezing Qualities of Seafoods Obtained by Using Different Freezing Methods" *Journal of Food Science* 44, 1165-1167
- AWONORIN S.O. (1989) "A model for heat transfer in cryogenic food freezing" *International Journal of Food Science & Technology* 24(3), 243-259
- BARBUT, S., MITTAL, G.S. (1989) "Effect of freezing rate on the gelation and rheological properties of poultry meat batters" *Proceedings, International Congress of Meat Science and Technology, No. 35 Vol III, 768-770*
- BARBUT, S., KAKUDA Y., CHAN D., (1990) "Effects of carbon dioxide, freezing and vacuum packaging on the oxidative stability of mechanically deboned poultry meat" *Poultry Science* 69(10), 1813-1815

- BROCK, T., SMITH, D., MADIGAN, M. (1987) "Microbiologia" 4a. ed.  
Ed. Prentice Hall, México. 259-293.
- BROWN, M.S. (1976) "Effects of Freezing on Fruit and Vegetable Structure"  
Food Technology 30(5), 107, 109 y 114
- BOOTH K.M. (1980) "Technology of the Ice Age" Food Manufacture 55(10), 20-  
29 y 60
- BUCHMULLER, J. (1985) "Chilling and freezing meat products with cryogenic  
liquids" Fleischwirtschaft 65(3), 330-332
- BUTCHER, S S (1972) "Introduction to Air Chemistry". Academic  
Press, U S A
- CANET, W. ESPINOSA, J., (1983) "Influencia del proceso de conge-lación sobre  
la textura de vegetales. Efecto del escaldado y la velocidad de congelación  
sobre la textura de zanahoria (*Daucus carota* L.) Revista Agroquímica y  
Tecnología de Alimentos 23(4), 531-540
- COHEN N., ELLIS R.F., (1983) "Cryogenic Freezing of Seafood Cuts Processing  
Time in Half" Food Processing 44(13), 66
- COMPRESSED GAS ASSOCIATION INC. (1980) " Handbook of Compressed  
Gasses" 2nd edition. Van Nostrand Reinhold Co. USA
- CRUESS (1968) "Commercial Fruit and Vegetable Products" 3a. ed.  
Mc Graw Hill, USA, 762-795
- DEMECZKY M. (1977) "Preserving the quality of foods by cryogenic techniques  
on site or directly after production" *Abstract FSTA* (1979) 11 6G440
- DOUGHERTY, R.H. (1990) " Future Prospects for Processed Fruit and  
Vegetable Products" Journal of Food Technology 44(5), 124-126
- DRENNAN, B. (1987) " Refrigeration & Freezing Gain New Emphasis"  
Food Engineering, 59(3), 85-91

- DURON P.P., HAVIGHORST C.R. (1972) "Reliquefies CO<sub>2</sub> for Cryogenic Freezing" *Food Engineering* 44(4), 72-74
- ELLIOT, T. (1987) "The case for liquid nitrogen in the food industry" *Food Review* 14(3), 46,48
- ELLIS M.A., CONVERSE R.H., (1991) "Compendium of Raspberry and Blackberry diseases and Insects" American Phytopathological Society. U.S.A, 1-2
- ERTUGAY, Z., KOCA A.F., CELIK,I. (1993) "Yeast performance and bread properties of white pan bread produced by the frozen dough process" *Doga Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 17(1), 226-238 *Abstract*
- FARKAS,D.F. (1981) "New Concepts For Expanding and Improving Frozen Preservation Techniques" *Journal of Food Technology* 35(3), 63-65
- FELLOWS, P. (1990) "Food Processing Technology. Principles and Practice" Ed. Ellis Horwood Limited, 386-400
- FRIAS TEJERA, BRITO, M. y col. (1990) "Procedimientos de Conservación de los Alimentos. El Frío" *Alimentaria* 216, 27-32
- GOFF, H.D. (1992) "Low Temperature Stability and the Glassy State in Frozen Foods". *Food Research International* 25, 317-325
- GOFF H.D. (1994) "The Use of Thermal Analysis in the Development of a Better Understanding of Frozen Food Stability" *Pure and Applied Chemistry*. En prensa. Comunicación personal con el autor.
- GRUDA, Z., POSTOLOSKI, J.,(1987) "Tecnología de la Congelación de los Alimentos" Ed. Acribia, España., 1-631
- HANSON, L.P. (1976) "Commercial Processing of Fruits". *Food Technology Review* #30, USA.,
- HELDMAN, D.R.. (1982) "Food Properties During Freezing" *Journal of Food Technology* 36(2), 92-96

- HELDMAN, D.R., (1983) "Factors Influencing Food Freezing Rates"  
Journal of Food Technology 37(4), 103-108
- HELGUERA, L.I.; (1994) "Un Mercado en Crecimiento: Alimentos Congelados"  
Alimentos procesados, junio 1994, 34-37.
- HERRMAN. (1977) "Alimentos Congelados. Tecnología y Comercialización". Ed. Acribia, España. 18-67
- HOLDSWORTH, S.D., (1988) "Conservación de Frutas y Hortalizas"  
Ed. Acribia, España. 77-90
- HULME, A.C. (1970) "The Biochemistry of Fruits and Their Products" Food Science and Tech. Series of Monographs. Academic Press, U.S.A, 375-411, 653-686.
- HUNT ASHBY, B. (1981) "Developments in Frozen Food Transport"  
Journal of Food Technology 35(3), 67-70
- HURST S.C. (1971) "Thermal Insulation of Cryogenic plant" Chemical and Process Engineering 52(2), 43 y 46
- I F T, PANEL ON FOOD SAFETY & NUTRITION. (1986) "Effects of Food Processing on Nutritive Values" Journal of Food Technology 40(12), 109-116
- IINVUFLEC (1976) "Le Framboisier". Institute National de Vulgarisation pour les Fruits, Legumes et Champignons. Paris, France
- INSTITUTO INTERNACIONAL DEL FRIO. (1990) "Alimentos Congelados. Procesado y Distribución" Ed. Acribia, S.A., España. 1-183
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA (1993) Anuario Estadístico del Comercio Exterior de los Estados Unidos Mexicanos. Exportaciones e Importaciones
- IUPAC. (1979) "Nitrogen, International Thermodynamic Tables of the Fluid State" Pergamon Press, England.

- IWANSKA S., STRUSINSKA D. (1982) "Application of cryogenic temperatures in storage in confectionery. IV. Storage on physicochemical and organoleptic changes in raw doughs" *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczo Technicznej w Olsztynie Technologia Zywnosci* No.17, 247-256 *Abstract*
- JOZON, P. (1981) "Cryogenic freezing of fruits and fruit juices" *Surgelation* No. 196, 26-27
- JUL, MORGENS (1985) "The Quality of Frozen Foods" Whitstable Litho Limited, Academic Press, United Kingdom. 1-4, 14, 15, 40, 262.
- KRAFT A.A., REDDY K.V. SEBRANEK J.G., RUST R.E., HOTCHKISS D.K. (1979) "Effect of composition and method of freezing on microbial flora of ground beef patties" *Journal of Food Science* 44(2), 350-354
- KEMIDATA. (1980) "Chemical & Physical Property Data Bank" Täby, Sweden
- KERR, W.L., JU JIE, REID, D.S. (1993) "Enthalpy of Frozen Foods Determined by Differential Compensated Calorimetry" *Journal of Food Science* 58 (3), 675-679
- KUZMIN M.P., ORLOVSKY V.M., KHOROSHKOVA I.D., MOISEYEVA E.L. (1983) "Influence of freezing and crushing on garlic quality" XVth International Congress of Refrigeration. Paris. *Abstract FSTA 1986* 18 G4E11
- LAFUENTE, B., (1982) "La calidad de los alimentos congelados" *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 22 (1), 39- 50.
- LAFUENTE, B. (1985) "Nuevas Orientaciones en la Congelación de Productos Hortofrutícolas". *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 25 (1), 25-41
- LUALLEN, TH. (1994) "The Use of Starches in Frozen Food Formulation". *Food Technology*, 48(5), 39
- LÖENDAHL, G. (1992) "Freezing of crustaceans and molluscs" *Alimentación, Equipos y Tecnología* 11(1), 99-103

- LUCAS, E.R. (1979) "Cryogenic pre-cooling/air-cushion freezing reduce damage, moisture loss to nil" *Quick Frozen Foods* 42(5), 26,30,32,33.
- LUH, B.S., FEINBERG, J.I., y cols. (1988) "Freezing Fruits"  
Commercial Fruit Processing, 2nd edition. The Avi Publishing Co. p.p. 263-273
- MAKALARIOS-LAHAM, I., LEE TUNG-CHING. (1993) "Protein Hydrolysis and Quality Deterioration of Refrigerated and Frozen Seafood Due to Obligately Psychrophilic Bacteria" *Journal of Food Science* 58(2), 310-313
- MALLET, C.P. Editor. (1993) "Frozen Food Technology" Blackie Academic Press, United Kingdom. 1-333
- MANS, J. (1982) "State of the art freezing systems. A good way to ice product quality" *Processed&Prepared Food* 151(5), 59-62
- MARON S., PRUTTON C., (1978) "Fundamentos de Fisicoquímica" Ed. Limusa, México D.F., 52-66
- MARSHALL, G.A. (1989) "Processing and freezing methods influencing the consistency and quality of fresh and frozen peeled crawfish (*Procambarus sp.*) meat. Dissertation Abstracts International B-49 (8) 2946-2947 Order no. DA881961 173p. *Abstract of thesis*
- MILLS M.H. (1979) "Time to re-examine liquid CO<sub>2</sub>" *Frozen Foods* 32(3), 25-26
- MORAL RAMA A., BELTRAN, A., (1989) "Tecnologías Usadas en el Pescado y su Influencia sobre la Calidad" *Alimentaria* 208, 37 - 45
- MORRIS C.E., (1992) "Forging new links in the cold chain" *Food Engineering* 63(7), 61-63
- NEYRENEUF O., DELPUECH B.,(1993) "Freezing experiments on yeasted dough slabs. Effects of cryogenic temperatures on the baking performance" *Cereal Chemistry* 70(1) 109-111

- NIELSON, N., LU YAO-CHI (1993) "Japan-s Taste for Frozen Vegetables Keeps Door Wide Open for Imports" *Quick Frozen Foods International* 34(4), 82 - 85
- O'BRIEN S.W., BAKER R.C., HOOD L.F., LIBOFF M., (1982) "Water-holding capacity and textural acceptability of precooked, frozen, whole egg omelets" *Journal of Food Science* 47(2), 412-417
- PAVLYUK, RYU., SOKOLOVA, L.M., POPOVA, Y. (1989) "Instant Fruit Powder Made Using Waste-Free Cryogenic Technology" *Pischevaya Promyshlennost, USSR, No. 4, p.p. 31-32. Abstract FSTA: 90-12-J0003*
- PESEK C.A., WILSON L.A, HAMMONG E.G. (1985) "Spice quality: effect of cryogenic and ambient grinding on volatiles" *Journal of Food Science* 50(3), 599-601
- POTTER, N. (1978) "La Ciencia de los Alimentos". Ed. Edutex, México. 221-259
- PRIOR, A., (1993) "Change is underway in the vegetable field" *Food Manufacture* 68(5), 29 y 30.
- REID, D.S. (1983) "Fundamental Physicochemical Aspects of Freezing" *Journal of Food Technology*. 37(4), 110-115
- REID, D.S. (1990) "Optimizing the Quality of Frozen Foods" *Journal of Food Technology* 44(7), 78
- REYNOSO R.O., MICHELIS A.(1988) "Simulation of cryogenic batch freezers" *International Journal of Refrigeration* 11(1) 6-10
- ROBBINS, J.A., MOORE, P.; (1990) "Color Change in Fresh Red Raspberry Stored at 0, 4.5 or 20°C" *Hort Science* 25(12), 1623-1624
- ROBBINS, J.A., SJULIN, T.M., (1989) "Postharvest Storage Characteristics and Respiration Rates in Five Cultivars of Red Raspberry" *Hort Science* 24(6), 980-982
- RODRIGUEZ, J., AVITIA, E. (1981) "El Cultivo de la Frambuesa Roja" Centro de Fruticultura del Colegio de Postgraduados. 1a. edicion, Mexico



- ROTANELLI, T., ELLIS, R.F., (1982) "Cryogenic vapor-snow mixture freezes pasta products evenly" *Food Processing* 43(13), 84-85.
- RUSSO J.R. (1976) "Advanced techniques in new spice plant: cryogenic grinding; carousel materials handling" *Food Engineering International* 1(8), 33-35
- RUST, R.E., ZIMMERMAN, W.J., (1972) "Low Temperature destruction of *Trichinella spiralis* using liquid nitrogen and liquid carbon dioxide" *Journal of Food Science* 37, 706
- SACKS B., (1985) "An Introduction to Cryogenic Freezing" *Food Industries of South Africa* 38(8), 23-27
- SACKS B., CASEY N.H., BOSHOF E., ZYL H VAN. (1993) "Influence of freezing method on thaw drip and protein loss of low-voltage electrically stimulated and non stimulated sheep's muscle." *Meat Science* 34(2), 235-243
- SAHAGIAN M.E., GOFF H.D. (1994) "Effect of Freezing Rate on The Thermal, Mechanical and Physical Aging Properties of the Glassy State in Frozen Sucrose Solutions" *Thermochimica Acta*. Aceptado. Comunicación personal con el autor.
- SANCHEZ, P., FUSTER, C., (1986) "Cambios Estructurales Producidos en El Guisante por los Procesos de Escaldado y Congelación" *Alimentaria* 173, 65 - 72
- SANDER EH, SOO HM, MINDHAM DR, (1976) "The Shape of the Things" *Food Engineering International* 1(7), 11-12
- SAULNIER, J.M. (1993) "Mexico's Revving Frozen Food Scene: A Two-Way Street Paved with Potential" *Quick Frozen Foods International* 35(2), 173-181
- SEBRANEK J.G., SANG P.N., RUST R.E., TOPEL D.G.,; (1978) "Influence of liquid nitrogen, liquid carbon dioxide and mechanical freezing on sensory properties of ground beef patties" *Journal of Food Science* 43(3), 842-844, 848

- SEBRANEK J.G., SANG P.N., TOPEL D.G., RUST R.E.; (1979) "Effects of freezing methods and frozen storage on chemical characteristics of ground beef patties" *Journal of Animal Science* 48(5), 1101-1108
- SEBRANEK J.G. (1982) "Use of Cryogenics for muscle foods" *Food Technology* 36(4), 120-127
- SENDER S.D., BAILEY J.S., COX N.A., (1987) "Aerobic Microflora of commercially harvested, transported and cryogenically processed collards (*Brassica oleracea*)" *Journal of Food Science* 52(4), 1020-1021
- SLATER L.E., (1977) "Immersion freezing inside plastic hatches the eternal elongated egg" *Food Engineering International* 2(3), 22-23
- SLADE E. (1977) "Freezing prepared meals" *Food Processing Industry* 46(542), 21-22
- SHOMER, I., BEN-GERA I., FAHN A. (1975) "Epicuticular wax on the juice sacs of citrus fruits: a possible adhesive in the fruit segments" *Journal of Food Science* 40(5), 925-930
- TALMON, Y., DAVIS, H.T., (1981) "Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts" *Journal of Food Science* 46, 1478-1483
- TAYLOR, R.I. (1984) "A New Cryogenic Process for the food industry" *Institution of Chemical Engineers Symposium Series No. 84*, 231-240
- TRESSLER, D. (1957) "The Freezing Preservation of Foods" Vol I  
The Avi Publishing, Co. USA, p.p. 495-516
- ULLMAN; (1977) "Encyklopädie der Technischen Chemie" Vol 14  
4th ed. Verlag Chemie, Weinheim.
- VANDERSTOEP J., PALMER M.J., KITSON J.A. (1975) "Hospital food quality as affected by freezing rate" *Canadian Institute of Food Science & Technology Journal* 8(3), 126

MADRID A., GOMEZ-PASTRANA J.M., SANTIAGO F. (1994) "Los Gases en la Alimentación" Ed. A. Madrid Vicente, España

WOODROOF, J.G., (1990) "50 Years of Fruit and Vegetable Processing" Journal of Food Technology 44(2), 92-101

ZABETAKIS, M.G., (1967) "Safety with Cryogenic Fluides" Plenum Press, New York, USA. 1-139

ZELAYETA L., ELLIS R.F, (1981) "Blizzard of Cryogenic "snow" lowers product temperature rapidly" Food Processing 42(13), 86-87

ZIEMBA J.V. (1970) "Top-Quality cultures made in unique plant" Food Engineering 42(1), 68-71.

## APENDICE A

### Simulación de un congelador criogénico de cámara

(REYNOSO R.O., DE MICHELIS A., 1988)

Como se ha planteado en este trabajo, el uso de congeladores criogénicos discontinuos es una alternativa interesante para productos con alto valor agregado. La inversión inicial no es muy alta pero el costo de operación es el que hay que considerar.

En el diseño de proceso de congelación en cámaras se requiere calcular el tiempo de congelación en función a la temperatura del refrigerante en la cámara, la tasa de inyección y el tamaño del producto. De igual manera es necesario calcular el costo del criógeno consumido ya que es uno de los componentes más importantes en el costo de la congelación.

Existen diversos modelos para calcular el tiempo de congelación de alimentos. Todos los que se basan en la ecuación de Planck son útiles para sistemas en donde la temperatura del refrigerante es constante o cambia en función del tiempo de forma conocida y simple.

En las cámaras de congelación criogénica no prevalecen estas condiciones simplificadas ya que la temperatura del medio enfriante oscila con el número y duración de los períodos de inyección. Estos períodos no son constantes ya que dependen de la tasa de intercambio calórico entre el criógeno y el producto y este

intercambio varía durante la congelación. Además, ninguno de los modelos mencionados considera las pérdidas de energía en el sistema (por ejemplo, por penetración de calor a través de las paredes y el calor generado por los motores de los ventiladores) las cuales afectan el tiempo de congelación así como el consumo de criógeno.

En el trabajo de Reynoso y De Michelis, el tiempo de congelación y el consumo de refrigerante en congeladores criogénicos discontinuos son estimados por un balance diferencial macroscópico de energía resuelto por métodos numéricos en una computadora. Los resultados se compararon con determinaciones experimentales en un congelador comercial. Además se analiza la influencia de las variables en el tiempo de congelador y el consumo de refrigerante.

### **Teoría**

Balance macroscópico de energía:

$$Q = Q_c + Q_A + Q_a + Q_r + Q_M + Q_P$$

(1)

donde: Q = Cantidad de calor por unidad de tiempo y

c = salida de criógeno gas

A = alimentación de criógeno

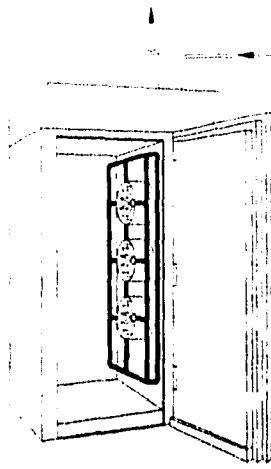
a = alimento

r = estante

M = motores de los ventiladores

P = paredes de la cámara

Figura A1.-Congelador de cámara utilizado en la simulación.



Asumiendo una distribución perfecta del criógeno en el congelador y que no existen gradientes de temperatura significativos en el alimento:

$$m_c C_p \frac{dT_{g_i}}{dt} = F[m_c C_p (T_{g_i} - T_{g_e}) + X_c L_c] + h_a A_a (T_{g_i} - T_{g_e}) + h_r A_r (T_r - T_{g_i}) + Q_M + h_p A_p (T_c - T_{g_i})$$

(2)

donde:

$m_c$  = masa de criógeno en la cámara

$C_{p,c}$  = calor específico del criógeno gas

$X_c$  = fracción de criógeno que absorbe calor para

cambiar de fase en la corriente de alimentación

$L_c$  = Calor latente por unidad de masa de criógeno de la corriente de alimentación.

$F$  = Tasa de alimentación de criógeno.

$T_{g1}$  = Temperatura del criógeno en la alimentación

$T_{g2}$  = Temperatura del criógeno en la cabina

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor

$A$  = Area de intercambio

$T$  = Temperatura

$T_e$  = Temperatura del entorno de la cámara

**En el alimento:**

No se consideran gradientes internos de temperatura, en vista de los bajos valores del coeficiente de transferencia de calor  $h_a$  que se encontraron en los congeladores discontinuos. Bajo estas circunstancias, la superficie de transferencia de calor es la que controla este mecanismo, por lo tanto el siguiente balance es válido:

$$-m_a C_{pf} \frac{dT_a}{dt} = h_a A_a (T_a - T_e)$$

(3)

donde  $m_a$  y  $C_{pf}$  corresponden a la masa y al calor específico del alimento (incluyendo el cambio de fase), respectivamente.

**Estante**

Para evaluar el calor absorbido por el estante,  $Q_r$ , necesitamos otra ecuación diferencial:

$$-m_r C_{pr} \frac{dT_r}{dt} = h_r A_r (T_r - T_{s,r})$$

(4)

donde  $m_r$  y  $C_{pr}$  son la masa y el calor específico de la estructura del estante.

Las ecuaciones (2), (3), y (4) deben ser resueltas simultáneamente utilizando métodos numéricos ya que no pueden ser integradas analíticamente. Se utilizó un método de diferencias finitas y fue resuelto por computadora.

Para ajustar el intervalo de tiempo durante el proceso de cálculo, todos los calores fueron acumulados individualmente y calculados en cada paso, y al final se resolvía el balance de energía. Si este balance no resultaba satisfactorio, el programa ajustaba automáticamente el intervalo de tiempo.

Para resolver la ecuación (4),  $h_r$  y  $A_r$  deben ser conocidas o determinadas experimentalmente en cada caso. Para simplificar, se consideró que el estante transfiere todo su calor en  $n$  intervalos de tiempo ( $t$ ) en el cual el cálculo se divide de acuerdo a:

$$Q_r = \frac{m_r C_{pr} (T_{s,r} - T_{s,i})}{n \Delta t}$$

(5)



$$-m_r C_{pr} \frac{dT_r}{dt} = h_r A_r (T_r - T_{s_2})$$

(4)

donde  $m_r$  y  $C_{pr}$  son la masa y el calor específico de la estructura del estante.

Las ecuaciones (2), (3), y (4) deben ser resueltas simultáneamente utilizando métodos numéricos ya que no pueden ser integradas analíticamente. Se utilizó un método de diferencias finitas y fue resuelto por computadora.

Para ajustar el intervalo de tiempo durante el proceso de cálculo, todos los calores fueron acumulados individualmente y calculados en cada paso, y al final se resolvía el balance de energía. Si este balance no resultaba satisfactorio, el programa ajustaba automáticamente el intervalo de tiempo.

Para resolver la ecuación (4),  $h_r$  y  $A_r$  deben ser conocidas o determinadas experimentalmente en cada caso. Para simplificar, se consideró que el estante transfiere todo su calor en  $n$  intervalos de tiempo ( $t$ ) en el cual el cálculo se divide de acuerdo a:

$$Q_r = \frac{m_r C_{pr} (T_r - T_{s_2})}{n \Delta t}$$

(5)

## **Experimentos**

Se llevaron a cabo determinaciones experimentales utilizando un congelador comercial Victory modelo NFIS-ID-S3 equipado con un estante para 20 charolas, alimentación por inyección automática de dióxido de carbono, inyección controlada por la temperatura interna, y tres ventiladores internos para esparcir el criógeno. Se midió la temperatura del gas y del producto utilizando termopares colocados en el centro térmico y a un centímetro encima y debajo de las superficies del alimento. Se conectó a un sistema de recepción de datos de 30 canales. Las mediciones se hicieron en diferentes puntos de la cámara para obtener valores promedio que comparar con el valor teórico.

El coeficiente de transferencia de calor del alimento fue obtenido experimentalmente.

## **Discusión**

Las variables necesarias para la simulación matemática se tomaron de las referencias reportadas al final.

Al comparar los resultados teóricos con los experimentales se vió que el modelo simulaba satisfactoriamente la congelación en el sistema. Las desviaciones son menores al 10%.

Así se puede analizar la influencia de las variables de operación en el tiempo de congelación y consumo de refrigerante.

Como se esperaba cuando la temperatura inicial del alimento aumenta, también aumenta el consumo de criógeno y el tiempo de congelación. Por lo tanto cuando el equipo es operado a menor temperatura interna, el tiempo de congelación disminuye. Sin embargo el ahorro en el consumo de criógeno no es muy significativo, ya que la relación entre el calor sensible y latente del criógeno es baja.

Al estudiar la influencia del intervalo de inyección se vió que cuando el periodo de inyección aumenta, el tiempo de congelación disminuye, pero se puede llegar muy abajo del valor deseado y esto afecta el consumo de criógeno. A menor tiempo de congelación se puede desperdiciar mayor cantidad de gas. Esto se ve aumentado si tomamos en cuenta que, el registro de la temperatura en el pánel de control puede no ser muy rápido, por sensibilidad del sensor   velocidad de transmisión de la señal.

Hay que recordar que para hacer comparaciones se consideró un tamaño y distribución uniforme del producto en el congelador.

Así se presenta cómo, mediante un modelo matemático simplificado se puede evaluar el funcionamiento de un congelador criogénico discontinuo. Al implementarse en una computadora, se pueden obtener curvas de congelación para agua, alimentos envasados   sin envasar así como la variación de tiempo de congelación y temperatura del gas durante el proceso. Esto nos permite analizar la influencia de variables de operación y obtener tiempos de operación óptimos para cada producto.

**Referencia:**

REYNOSO, R.O., DE MICHELIS, A. (1988) "Simulation of Cryogenic Batch Freezers" *Revue International du Froid* Vol. 11 enero, 6-10

## APENDICE B

### Otras referencias bibliográficas

A continuación se presentan referencias bibliográficas que no se pudieron consultar en el presente trabajo, principalmente porque no se encuentran en México, pero que pueden ser de utilidad en un futuro:

ALI-HASSAN M., MAT HASHIM D., ABDUL RAHMAN R., (1985) [Heat transfer to liquid nitrogen droplets during cryogenic freezing of foods] *Pertanika* 8(1), 79-88

ANON. (1984) [Cryogenic techniques and food quality] *Revue des Industries de la Biscuiterie, Biscotterie, Boulangerie, Chocolaterie, Confiserie* No. 79, 19-20

ANON. (1987) [Use of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>: natural protection with long-term freshness] "Zur Verwendung von Kohlensäure und Stickstoff: natürlicher Schutz mit Langzeitfrische" *Fleischerei* 38(6), 489-493

ANON. (1990) [Industrial gases and their use: natural cooling, freezing and packaging] "Technische Gase und ihre Anwendung: Natürlich kühlen, frosten und verpacken." *Fleischerei* 41(7), 493-494

ANON. (1992) [Rapid freezing, cutting and tumbling: industrial gases for better quality.] "Schockfroste, Kuttern und Tumbeln: Technische Gase fuer bessere Qualitaet" *Fleischerei* 43(11), 1026, 1029.

BUCHMUELLER, J. (1987) [New CO<sub>2</sub>-rotary tunnel for cryogenic freezing of particulate food products.] "Neuer Kohlensäure Drehrohr tunnel fuer die lose rollende Frostung stueckiger Lebensmittel" *Lebensmitteltechnik* 19(3), 100-102

BUCHMUELLER, J. (1988) [Cryogen Rapid Freezers for the meat processing industry] *Fleischwirtschaft* 68(8), 1004-1006

- BUCHMUELLER, J. (1991) "The use of gas in food Technology"  
Fleischwirtschaft 71(7), 784-786
- BUCHMUELLER, J. WEYERMANN, G. (1989) [Cryopel. Pelleting and  
freezing of bacterial starters. "Cryopel. Pelletieren und Frosten von  
Bakterien-Starterkulturen" Fleischwirtschaft 69(7), 1079-1080, 1082, 1114
- CHAKRABORTY, P. (1992) "Present status of prawn processing in India" Indian  
Food Industry 11(3), 39-41
- DINGLINGER, G. (1986) "Which freezer for which foods?" Food Review 13(2),  
28
- DOWNEY, J. (1988) "Comparison of offal chilling and freezing methods"  
Publications, Meat Industry Research Institute of New Zealand No. 853 32
- DUMINIL, M., VRINAT, G. (1988) [Freezing foods. Comparative study on  
mechanical and cryogenic techniques.I. Freezing methods.] Viandes et  
Produits Carnes 9(1), 31-36
- DUMINIL, M., VRINAT, G. (1988) [Freezing of foods. Comparison of  
mechanical and cryogenic freezing. Comparison of the 2 processes]  
Viandes et Produits Carnes 9(3), 115-123
- DUMINIL, M., VRINAT, G. (1988) [Freezing of foods. Comparison of  
mechanical and cryogenic freezing. IV. Comparison of the 2 processes:  
quality of the products.] Viandes et Produits Carnes 9(6), 323-327
- FAUGERAS, T. (1986) "Gas Technology in the Dairy Industry" Food Technology  
in New Zealand 21(8), 11-13
- HALL, W. (1985) "Liquid Nitrogen in food freezing" Food Review 12(2), 15
- HEINER, H., (1989) [Gases and refrigeration in the food industry] "Gase und  
Kaelte in der Lebensmitteltechnik" Fleischrei 40(4), 324-325

- HOFFMANN, W., BUCHMUELLER, J. (1993) [Freezing and cooling with cryogenic gases] "Kuehlen und Frosten mit kryogenen Gasen" Fleischwirtschaft, 73(7), 714-715, 754
- JARCZYK, A., BARYLKO PIKIELNA N., DOBRZYCKI J., CHUSTECKI P. (1984) [Properties of CO<sub>2</sub> as cryogenic agent for freezing foods] Chlodnictwo 19(4), 20-22
- JEANNE, P. (1981) [Evolution of methods for freezing of vegetables] Surgelation No. 198, 45-53
- KOSCHER, J. BART, A., DEZAVELLE, J.P., ROSSET, R., LEBERT, F., LIGER P., LECRIVAIN E., (1981) [Experimental preparation of frozen cooked meals for institutional catering] Freddo 35(4), 251-255
- MARTIN, L. (1985) [Frozen reformed comminuted meat products: cryogenic or mechanical freezing] Surgelation No. 237, 33-35
- MARTIN, L. (1985) [Cryogenic or mechanical refrigeration: two developing technologies] Surgelation No. 239, 19-24
- MARTIN, L. (1990) [Freezers. Modern Equipment] Surgelation No. 287, 42-43, 45-47
- MARTIN, M. (1990) [Freezing methods] Surgelation No. 280, 30-33
- MAUFRAIS, B. (1990) [A succesful cohabitation] Surgelation No. 290, 37-39
- PAYNE, M. (1986) "Technology aids food-beverage processing" Process & Control Engineering 39(6), 50,53
- RONSIVALLI, L.J., BAKER, D.W. II (1981) "Low Temperature preservation of seafoods: a review" Marine Fisheries Review, National Oceanic and Atmospheric Administration, 43(4), 1-15
- SUMMERS, J.V., (1984) "Cryogenic food freezing in today's market and its costs related to conventional mechanical systems" Institution of Chemical Engineers Symposium Series No. 84, 241-249

- THUMEL, H., GAMM, D. (1993) [Free-flow freezing of foods] "Lose rollendes Frosten" Fleischwirtschaft 73(5), 502-503
- TYREE L. Jr (1981) "Unique food processing advantages are feature of today's mature cryogenic units" Quick Frozen Foods 43(9), 71-73
- VERANNEMAN, G. (1992) [Industrial gases and foods make a good match: multiple applications from rapid freezing to packaging] "Technische Gase und Lebensmittel passen gut zueinander: Vielfaltiger Einsatz vom Schockgefrieren bis zum Verpacken" Fleischrei 43(11), 1030-1031
- VRINAT, G. (1985) [Combination of mechanical and cryogenic cold treatments] Revue Generale du Froid 75(1) 51-62
- WILLHOFT, T. (1987) "Advances in cryogenic chilling and freezing of foods" Food Science & Technology Today 1(2), 79-83