

19  
24 308917



# UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA  
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

LA INGENIERIA CRIOGENICA APLICADA A LA  
CONSERVACION DE ALIMENTOS.  
ASPECTOS DE DISEÑO Y REACONDICIONAMIENTO  
DE UN TUNEL DE CONGELACION CRIOGENICO

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA: MECANICA ELECTRICA

P R E S E N T A :

MARIO A. VALLES VALDES

Revisor: Ing. Rodolfo Bravo de la Parra

México, D. F.

1991

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

**INDICE****INTRODUCCION****CAPITULO 1. LOS ALIMENTOS Y SU CONSERVACION**

- 1.1. INTRODUCCION
- 1.2. REFRIGERACION Y CONGELACION
- 1.3. REFRIGERACION Y ALMACENAMIENTO EN FRIO
- 1.4. CONGELACION Y ALMACENAMIENTO CONGELADO

**CAPITULO 2. CRIOGENIA**

- 2.1. ANTECEDENTES
- 2.2. OBTENCION DE LIQUIDOS CRIOGENICOS
- 2.3. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS CRIOGENICOS
- 2.4. SEGURIDAD
- 2.5. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL NITROGENO  
LIQUIDO
- 2.6. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A TEMPERATURAS  
CRIOGENICAS

**CAPITULO 3. CONGELACION CRIOGENICA**

- 3.1. ASPECTOS TERMODINAMICOS
- 3.2. EQUIPOS DE CONGELACION CONTINUA
- 3.3. EQUIPOS DE CONGELACION INTERMITENTE
- 3.4. VENTAJAS DE LA CONGELACION CRIOGENICA CON  
NITROGENO LIQUIDO RESPECTO A LA CONGELACION  
CON CO2 LIQUIDO

**CAPITULO 4. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE UN TUNEL DE  
CONGELACION CRIOGENICO**

- 4.1. DESCRIPCION DE UN TUNEL DE CONGELACION CRIO-  
GENICO POR ATOMIZADO DE NITROGENO LIQUIDO**
- 4.2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CUERPO DEL  
TUNEL**
- 4.3. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE  
AISLAMIENTO**
- 4.4. SELECCION DE REDUCTORES DE VELOCIDAD**
- 4.5. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE  
TRANSMISIONES POR CORREAS, CADENAS Y  
ENGRANAJES**
- 4.6. SELECCION DE COJINETES**
- 4.7. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CONTROL DE  
TEMPERATURA**
- 4.8. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CONTROL DE  
ALIMENTACION DE NITROGENO LIQUIDO**
- 4.9. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE  
ATOMIZADO O ASPERSION**
- 4.10. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
EXTRACCION**
- 4.11. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
TURBULENCIA**
- 4.12. METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION**
- 4.13. METODOS DE SOLDADURA**

- 4.14. SELECCION DE MOTORES EN CORRIENTE ALTERNA Y  
CORRIENTE DIRECTA
- 4.15. SELECCION DE LA BANDA TRANSPORTADORA
- 4.16. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE LA  
INSTALACION ELECTRICA
- 4.17. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL TABLERO DE  
CONTROL

**CAPITULO 5. ASPECTOS DE REACONDICIONAMIENTO DE UN TUNEL DE  
CONGELACION CRIOGENICO**

- 5.1. ESTRUCTURA
- 5.2. DE LA BANDA
- 5.3. DE LA TRANSMISION Y VARIADOR DE VELOCIDAD
- 5.4. DEL CONTROL DE TEMPERATURA
- 5.5. DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE NITROGENO  
LIQUIDO
- 5.6. DEL SISTEMA DE ATOMIZADO
- 5.7. DEL SISTEMA DE EXTRACCION
- 5.8. DEL SISTEMA DE TURBULENCIA
- 5.9. DE LOS VENTILADORES DE CIRCULACION PARALELA
- 5.10. DE LA INSTALACION ELECTRICA
- 5.11. DE LA SOLDADURA
- 5.12. DE LAS JUNTAS CRIOGENICAS
- 5.13. CONDICIONES DE PRUEBA
- 5.14. ARRANQUE, PUESTA EN MARCHA, Y PARO

**CAPITULO 6. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE UN TUNEL NUEVO Y UNO  
RECONSTRUIDO**

**6.1. ASPECTOS TECNOLOGICOS**

**6.2. ASPECTOS ECONOMICOS**

**6.3. OBSTACULOS Y MEJORAS EN EL  
REACONDICIONAMIENTO DEL TUNEL**

**CONCLUSIONES**

**BIBLIOGRAFIA**

**APENDICE**

## INTRODUCCION

A través del tiempo el hombre ha buscado evitar la descomposición de los alimentos a fin de poder consumirlos en épocas de escases de los mismos. Es por eso que se recurre a la congelación como método de preservación de los mismos. La congelación es un proceso que resuelve problemáticas de distribución de producto en buen estado a lugares ubicados demasiado lejos de los centros de consumo a fin de que lleguen en buen estado. Sin embargo en México se carece de una infraestructura de frío. Esto es, que la infraestructura encaminada al desarrollo de esta industria no ha crecido de la manera necesaria como en los países desarrollados.

Estos problemas estructurales que se presentan en México son: la falta de caminos adecuados para transportes especializados desde los centros de distribución; la falta de personal calificado para el proceso de congelación mecánica; el problema de la tenencia de la tierra afecta aunque de manera indirecta, pues los pequeños propietarios no cuentan con los recursos económicos necesarios para la adquisición de equipos de congelación; la falta de aceptación del consumidor por adquirir producto congelado respecto al fresco durante temporada.

Es a partir de este último punto que nos damos cuenta, de que los alimentos en temporada tienen un valor limitado ante la gran oferta de producto, cambiando la situación al encontrarse fuera de temporada, en donde de encontrarse producto en el mercado su valor será extremadamente alto. Es notoria entonces la poca cantidad de comerciantes que congelan su producto, además vemos que a corto plazo no hay inversiones a gran escala encaminadas a la congelación mecánica. La congelación mecánica cuenta con la competencia de la congelación criogénica, la cual utiliza Nitrógeno Líquido (LIN) como medio de congelación. La alternativa de congelación con LIN nos permite utilizar equipos más baratos en relación a los mecánicos ya que el LIN será nuestro energético. Este método de congelación no ha sido muy promovido en México, a diferencia de los Estados Unidos, país donde lleva un desarrollo de aproximadamente 25 años. Como promoción se busca como alternativa la reconstrucción de equipos usados con poca instrumentación de control pero eficientes como intercambiadores de calor. Se busca encontrar una solución de congelación económica aprovechando la infraestructura del país. Nos damos cuenta de que poco a poco la comida congelada empieza a aparecer en el mercado pero siendo en su mayoría de importación.

De tal manera se explican de manera enfática en el Capítulo 1 los conceptos de refrigeración, así como el de la congelación, en virtud de la interrelación cada vez mayor existente entre la Ingeniería Electromecánica con otras

disciplinas de la ingeniería, en este caso la de Alimentos, a efecto de proveer soluciones de calidad en materia de diseño mecánico y eléctrico adecuados a los usuarios de equipos y máquinas, mediante el conocimiento de sus procesos y necesidades. También se explican las ventajas de una buena congelación de los alimentos y las características y propiedades que se conservan en una buena congelación. La mejor congelación es la congelación criogénica dentro de los límites que en este trabajo se mencionan. Sin embargo la palabra "criogenia" es una rama nueva de la ingeniería, para lo cual en el Capítulo 2 se da una explicación de lo que la Ingeniería Criogénica es y qué es lo que abarca.

En el Capítulo 3 hacemos una interrelación entre la necesidad de tener una congelación rápida en los alimentos y las alternativas de congelación criogénica. Es ahí donde nos encaminamos a la selección de un túnel de congelación criogénico, para lo cual en el Capítulo 4 se da una descripción de los aspectos considerados en la fabricación de un túnel criogénico. Se abarca en lo más posible cada uno de los aspectos procurando no tener un trabajo completamente técnico.

Es en el Capítulo 5 donde de acuerdo a lo que el mercado puede ofrecer se describen las actividades, así como las necesidades que tenemos en la reconstrucción del túnel de congelación criogénica.

Finalmente, en el Capítulo 6 se dan los parámetros de costo que nos ayudan a optar por la reconstrucción de un

túnel sobre un túnel nuevo. Además se exponen las mejoras hechas sobre el equipo reconstruido a fin de optimizar de la manera más económica posible el proceso de congelación. También se exponen algunos obstáculos a la reconstrucción de dicho túnel.

Con lo anterior no se pretende exponer un tratado general de refrigeración y congelación, sino orientar al ingeniero involucrado en aportar diseños en esta interesante industria, a que conozca y analice, caso por caso, los parámetros técnicos a controlar en base, primero, a una familiarización conceptual de la congelación de alimentos; y segundo, al resultado de una labor conjunta entre el especialista en diseño de ingeniería, y el experto en fabricación y montaje.

Deberá entenderse entonces que no se busca tener un documento lleno de tecnicismos y fórmulas, sino que se ha buscado invitar al lector en general a tener un interés en la materia y a que encuentre soluciones en este interesante tema.

## CAPITULO I

### LOS ALIMENTOS Y SU CONSERVACION

#### 1.1 INTRODUCCION.

La congelación y el almacenamiento en frío se cuentan entre los métodos más antiguos de conservación de alimentos. Fue hasta 1875 que se inventó un sistema mecánico de refrigeración a base de amoníaco, el cual haría posible la explotación comercial de bodegas refrigeradas y el proceso de congelación. El uso de la refrigeración mecánica para congelar alimentos fue obstaculizado inmediatamente por la carencia de instalaciones de almacenamiento refrigerado, que es el primer requisito de cualquier industria de alimentos refrigerados o congelados. En el curso del cuarto de siglo siguiente, aumentó progresivamente el número de bodegas refrigeradas, pero casi no existían refrigeradores, y menos aún congeladores, en las tiendas y en los hogares. Hasta en la década de 1920-30 los alimentos entregados en estado congelado a los mercados generalmente se descongelaban antes de que llegaran al hogar, o bien se descongelaban en las neveras domésticas y su calidad fluctuaba entre mediocre y francamente mala.

Actualmente la importancia de la congelación como un medio de conservación de alimentos sigue aumentando

constantemente, como lo demuestran el volumen y el valor de los alimentos procesados de esta manera, y se espera que, en los Estados Unidos, la importancia de los productos congelados siga creciendo hasta acercarse a, o casi igualar a la de los productos enlatados.

Uno de los mejores indicios del desarrollo tecnológico de una sociedad, es la amplitud de sus instalaciones para el procesamiento, transporte, almacenamiento y venta de alimentos refrigerados y congelados. Las regiones subdesarrolladas se caracterizan por su carencia de medios de refrigeración, lo cual vuelve más difícil aún la tarea de mejorar su alimentación.

Hoy en día la refrigeración influye notablemente en las prácticas agrícolas y comerciales y determina la condición económica de la industria alimentaria.

La refrigeración y el almacenamiento en frío han hecho que los precios sean uniformes durante todo el año. Sin ellos los productos serían baratos en la época de la cosecha y mucho más caros después, y en algunas épocas no podrían obtenerse a ningún precio.

## 1.2 REFRIGERACION Y CONGELACION.

Al hablar de la conservación y procesamiento por medio del frío, es preciso establecer una distinción entre la refrigeración y el almacenamiento en frío por un lado, y la congelación y el almacenamiento congelado por el otro.

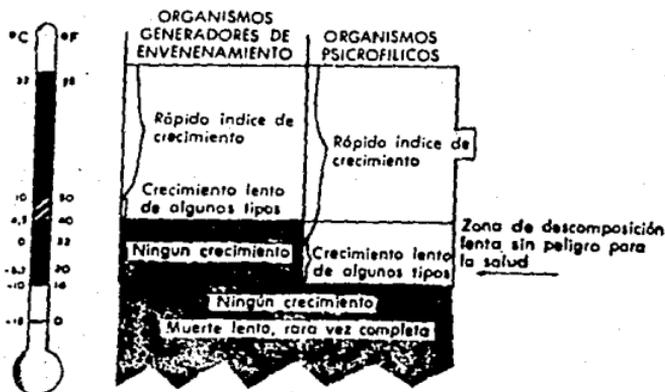
Por almacenamiento en frío queremos decir el almacenamiento con temperaturas superiores al punto de congelación, lo cual abarca una escala que va desde los 15.5°C hasta -2°C. Los refrigeradores comerciales y domésticos generalmente mantienen una temperatura entre 4.5° y 7°C. Aunque el agua pura se congela a 0°C, la mayoría de los alimentos no empiezan a congelarse hasta que la temperatura esté a -2°C o más abajo.

En cambio, el almacenamiento congelado, se refiere al almacenamiento en que el alimento se conserva en estado sólido y rígido. Para un almacenamiento congelado satisfactorio se requiere una temperatura de -18°C o aún más baja.

En el almacenamiento refrigerado, los alimentos perecederos se conservan generalmente durante días o semanas, según el caso. El almacenamiento congelado, los conserva durante meses y hasta años.

Existen otras distinciones entre las condiciones de refrigeración y las de congelación en lo referente a la actividad de los microorganismos (Fig. 1.1). La mayoría de los organismos generadores de la descomposición crecen rápidamente a temperaturas superiores a los 10°C. Algunos de los organismos que provocan intoxicaciones crecen hasta a una temperatura de 3°C. Los organismos psicrófilicos crecen lentamente entre 4° y -10°C, a condición de que el alimento en que se encuentran no esté congelado sólidamente. Estos organismos no producen intoxicación o enfermedad; pero aún a

una temperatura por abajo de  $-4^{\circ}\text{C}$ , pueden provocar la descomposición del alimento por envejecimiento. A una temperatura inferior a los  $-10^{\circ}\text{C}$ , no ocurre ningún crecimiento importante de los microorganismos en los alimentos, antes bien hay una disminución paulatina del número de los organismos vivos. Pero, como hemos señalado



*De McCoy (1963)*

FIGURA 1.1. ALGUNAS RELACIONES ENTRE LA TEMPERATURA Y EL CRECIMIENTO MICROBIANO EN LOS ALIMENTOS

ya, la destrucción de los microorganismos por el frío no es completa; es posible que, en cuanto se deshuela el alimento, estos proliferan rápidamente, provocando su descomposición.

Puesto que existen diferencias importantes entre la refrigeración y la congelación, conviene tratar estas dos formas de conservación y procesamiento por medio del frío en forma separada.

### 1.3 REFRIGERACION Y ALMACENAMIENTO EN FRIO.

La refrigeración y el almacenamiento en frío constituyen el método más usado de conservación de alimentos naturales o procesados sin agentes químicos que retarden su descomposición. En general, ejercen pocos efectos negativos en el sabor, la textura, el valor nutritivo y los cambios globales que ocurren en los alimentos, a condición de que se observen unas reglas tales como evitar cambios de temperatura, mezcla de productos con tiempos diferentes de envejecimiento y que los períodos de almacenamiento sean cortos, porque con este tipo de conservación el producto continúa, aunque lentamente, con su proceso natural de descomposición.

No obstante, los beneficios que la refrigeración y el almacenamiento en frío puedan proveer como método de conservación, en la mayoría de los casos el grado en que previene ese deterioro no se compara con el grado en que lo previenen el calor, la deshidratación, la irradiación, la fermentación, o la verdadera congelación. Esto queda demostrado por la Tabla 1.1 que indica los períodos usuales de vida útil de diversos tejidos animales y vegetales almacenados a diferentes temperaturas. La temperatura más baja que se da es de 0°C, que es inferior a la que se mantiene normalmente en la mayoría de los refrigeradores comerciales o domésticos. Sin embargo, los productos perecederos, como la carne animal, el pescado, las aves, y muchas frutas y hortalizas, aún a 0°C se conservan muchas

veces menos de dos semanas. A la temperatura de refrigeración más usual, que es de 6°C, se conservan muchas

Alimento	Promedio de duración de vida útil en almacenamiento (días) <sup>a</sup> :		
	0°C	22°C	38°C
Carne animal .....	6-10	1	menos de 1
Pescado .....	2-7	1	menos de 1
Aves .....	5-18	1	menos de 1
Carnes y pescados secos .....	1,000 o más	350 o más	100 o más
Frutas .....	2-180	1-20	1-7
Frutas secas .....	1,000 o más	350 o más	100 o más
Hortalizas de hojas comestibles .....	3-20	1-7	1-3
Rafes .....	90-300	7-50	2-20
Semillas secas .....	1,000 o más	350 o más	100 o más

<sup>a</sup> De Desrozier (1961)

TABLA 1.1. VIDA UTIL DE MANTENIMIENTO DE TEJIDOS ANIMALES Y VEGETALES A DIVERSAS TEMPERATURAS

veces menos de una semana. Por otra parte, estos mismos productos conservados a una temperatura de 22°C ó superior, pueden descomponerse en un día y hasta en unas horas.

### 1.3.1 NECESIDAD DE PROPORCIONAR UN FRIO INSTANTANEO E ININTERRUMPIDO.

En condiciones ideales, la refrigeración de los productos perecederos comienza en el momento de la cosecha y se mantiene durante el transporte, la conservación en bodegas, la venta y el almacenamiento anterior a su consumo. Esto no es motivado exclusivamente por el peligro de la descomposición bacteriana. Ocurre deterioro en el caso de ciertas frutas y hortalizas que son metabólicamente activas; las cuales no sólo pueden generar calor de respiración, sino

que pueden convertir los productos del metabolismo de una forma a otra.

El enfriamiento rápido no quiere decir simplemente y en todos los casos la colocación inmediata de alimentos a granel en carros de ferrocarril o bodegas refrigeradas sin calcular la carga de refrigeración necesaria para disminuir en forma efectiva la temperatura del producto. El enfriamiento es la disminución de la temperatura de un cuerpo como consecuencia de una transferencia de calor a un medio a menor temperatura, como comúnmente son las corrientes de aire frío. Si el cuerpo es grande, el tiempo requerido para extraer una cantidad suficiente de calor puede ser excesivo para impedir que un grado importante de descomposición tenga lugar en el alimento antes de que se pueda alcanzar la temperatura de conservación efectiva.

### 1.3.2 REQUISITOS PARA LA REFRIGERACION Y EL ALMACENAMIENTO REFRIGERADO.

De estos requisitos los principales son la temperatura baja regulada, la circulación del aire, el control de la humedad y la modificación de los gases atmosféricos.

a) Temperatura baja regulada.- Los refrigeradores y las cámaras y bodegas refrigeradas que han sido diseñadas correctamente proporcionan suficiente capacidad refrigeradora y aislamiento para mantener el lugar frío a

una temperatura que no fluctúa más de  $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$  respecto a la que ha sido seleccionada.

Pero para diseñar un espacio capaz de mantener esta temperatura, además del aislamiento requerido, es preciso analizar de antemano en un diagrama de flujo de proceso todos los factores que pueden generar calor o influir en la velocidad con que se elimina calor del espacio. Estos factores incluyen: el número de focos o motores generadores de calor que están funcionando allí; el número de personas que pueden estar trabajando en el área refrigerada, ya que ellos también generan calor; frecuencia de apertura y cierre de las puertas de acceso al espacio permitiendo la entrada de aire caliente; y las clases y cantidades de los alimentos que serán almacenados en el área refrigerada, así como el máximo volúmen de producto a almacenar, el cual no es el volúmen de la cámara, pues como veremos después, se requiere un volúmen de ésta para circulación de aire con direcciones de flujo conocidas de antemano.

Estos datos, además de los factores antes presentados, son necesarios a fin de calcular la carga de separación, o sea, la cantidad de calor que tiene que ser eliminada del producto y del área de almacenamiento a fin de bajar su temperatura inicial al valor seleccionado y luego mantenerla allí por un tiempo determinado. Los datos de la tabla 1.2 que corresponden a algunas frutas y hortalizas, demuestran la diferencia entre las cantidades de calor generadas por los diversos productos. La cantidad de calor generada varía

en cada producto y, como todas las actividades metabólicas, decrece en proporción con la temperatura de almacenamiento. Los productos que tienen elevada velocidad de respiración, como ejotes, brócoli, maíz, chícharos, espinacas y fresas, son especialmente difíciles de almacenar. Si los productos de esta clase son empacados apretadamente en una bodega, los que se encuentran en el centro pueden podrirse a pesar de que el aire que los rodea esté fresco.

Producto	Btu <sup>3</sup> por tonelada por 24 horas		
	0°C	5.4°C	15.5°C
Manzanas			
Jonathan o Winesap	300 a 800	590 a 840	2,270 a 3,470
Ejotes	5,500 a 6,160	9,160 a 11,390	32,090 a 44,130
Brócoli	7,450	11,000 a 17,600	33,870 a 50,000
Col	1,200	1,670	4,080
Zanahorias, sin hojas	2,130	3,470	8,080
Apio	1,620	2,420	8,220
Maíz	6,560	9,390	38,410
Cebollas	600 a 1,100	1,760 a 1,980 <sup>1</sup>	.....
Naranjas	420 a 1,030	1,300 a 1,560	3,650 a 5,170
Duraznos	850 a 1,370	1,440 a 2,030	7,260 a 9,310
Peras, Bartlett	660 a 880	.....	8,800 a 13,200
Chícharos	8,160	13,220	39,250
Papas	440 a 880	1,100 a 1,760	2,200 a 3,520
Espinacas	4,240 a 4,860	7,850 a 11,210	36,920 a 38,000
Fresas	2,730 a 3,800	3,660 a 6,750	15,460 a 20,280
Camotes	1,190 a 2,440	1,710 a 3,350	4,280 a 6,300
Tomates			
verde-maduros	580	1,070	6,230
maduros	1,020	1,250	5,640

<sup>1</sup> Del Manual 66 del U. S. Depr. Agr.  
<sup>2</sup> Índices de calor obtenidos al multiplicar la velocidad de respiración en mg de CO<sub>2</sub> por kilo por hora por 220.  
<sup>3</sup> A 10°C.

TABLA 1.2. CALOR DE RESPIRACION DE FRUTAS Y HORTALIZAS

b) Circulación de aire y humedad.- La correcta circulación del aire ayuda a alejar el calor de la proximidad de las superficies de los alimentos hacia los serpentines y placas de refrigeración. Pero el aire que circula dentro de la

bodega refrigerada no debe estar ni demasiado húmedo ni demasiado seco. El aire con un elevado contenido de humedad puede causar la condensación de humedad en la superficie de los alimentos fríos. Si esta condición se extrema, se desarrollarán mohos en estas superficies a la temperatura normal de refrigeración. Por otra parte, si el aire está demasiado seco provocará la pérdida excesiva de humedad en los alimentos. Generalmente esto está relacionado con el contenido de humedad de los alimentos y la facilidad con que se deshidratan debido a que continúan su proceso natural de maduración. Así, por ejemplo, el apio y otras hortalizas de textura dura requieren una humedad relativa de 90 ó 95%, en tanto que las nueces se conservan bien con un 70% solamente. Por otra parte, los productos secos y granulados, como la leche y los huevos en polvo, prefieren atmósferas muy secas, y una humedad relativa en exceso del 50% puede provocar en ellos la formación de terrones y costras, a menos que estén en envases impermeables.

Cuando los alimentos deben permanecer en almacenes refrigerados durante periodos prolongados, se emplean varias técnicas para mantener su calidad. Los alimentos que tienden a perder humedad pueden ser protegidos por varios métodos de envasado, por ejemplo hortalizas cubiertas con lonas húmedas sobre cajas ventiladas, de poca profundidad y con espacios entre sí que permitan flujo de aire.

### 1.3.3 MODIFICACION DE LOS GASES ATMOSFERICOS.

Las manzanas y otras frutas almacenadas en frío respiran, maduran, y luego maduran excesivamente. Su respiración depende de la cantidad de oxígeno disponible y produce dióxido de carbono. Tres modos de disminuir la velocidad de respiración y los cambios fisiológicos que la acompañan son: la reducción de la temperatura, la eliminación del oxígeno, y el aumento del nivel de dióxido de carbono. Las condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa, y composición por gases de la atmósfera difieren hasta cierto punto para diferentes frutas y hasta para diferentes variedades de la misma fruta.

En la práctica se prepara la bodega de almacenamiento en frío de manera que no puedan penetrar los gases ni hacia adentro ni hacia afuera, se alcanza la temperatura deseada, se introduce la fruta, y se sella la bodega.

Existen generadores de gas comercial, o bien equipos de control y suministro de gases puros como  $N_2$  y  $CO_2$  mezclados en proporciones calculadas para cada tipo de alimento, que reemplazan el aire de la atmósfera por el gas seleccionado, y también pueden introducir vapor de agua a fin de mantener la humedad relativa deseada. Generalmente se sella la bodega durante meses, hasta el momento en que se le ha de vaciar completamente. Si algún trabajador tiene que entrar para hacer reparaciones, deberá llevar una máscara de oxígeno.

El almacenamiento en una atmósfera artificialmente creada tiene varias aplicaciones adicionales en dondequiera que se envasan alimentos en recipientes al vacío, con nitrógeno, CO<sub>2</sub>, o cualquier otra atmósfera cuya composición difiere de la del aire. Por lo referente a sus aplicaciones en el transporte o almacenamiento refrigerado, otros ejemplos del almacenamiento con atmósfera artificialmente creada o modificada incluyen el uso de vapores difenilicos para inhibir el crecimiento de mohos en frutas cítricas, y el uso de gas etileno para acelerar la maduración y desarrollo del color en frutas cítricas y plátanos.

#### 1.3.4 CAMBIOS DE LOS ALIMENTOS DURANTE EL ALMACENAMIENTO REFRIGERADO.

Los cambios específicos que pueden tener lugar en los alimentos durante el almacenamiento en frío son muchos e influyen en ellos factores diversos como las condiciones de cultivo y las variedades de las plantas, la temperatura en frío, la combinación de clases de alimentos almacenados juntos, y otros factores variables.

En la mayoría de los alimentos perecederos, la ausencia total de enfriamiento daría resultados mucho peores que los que dan unas temperaturas de refrigeración un poco más bajas que las óptimas.

El almacenamiento refrigerado permite el intercambio de sabores entre muchas clases de alimentos si se les almacena juntos. En donde sea posible, los diferentes alimentos,

especialmente los que son colorados, deberían ser almacenados por separado. Empero, la economía no siempre permite esto. En muchos casos el intercambio de colores puede ser prevenido totalmente mediante un envasado efectivo.

Pero otros cambios que ocurren durante el almacenamiento refrigerado representan auténticas pérdidas de nutrientes como en el caso de la destrucción vitamínica, según la Tabla 1.3.

Producto	Condiciones de almacenamiento		Pérdidas, %
	Días	Temp., °C	
Espárragos	1	1.7	5
	7	0	50
Brócoli	1	7.8	20
	4	7.8	35
Ejotes	1	7.8	10
	4	7.8	20
Espinacas	2	0	5
	3	1.1	5

De Desrozier (1963).

TABLA 1.3. PERDIDAS DE VITAMINA C EN DETERMINADAS HORTALIZAS DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN FRIO

Según estos datos, los espárragos perdieron el 50% de su vitamina C en 7 días a 0°C, el brócoli perdió el 20% en 1 día solamente y el 35% en 4 días a 8°C. En el caso de los espárragos, esta pérdida tuvo lugar a pesar de que 0°C es la temperatura óptima para el almacenamiento refrigerado de esta hortaliza.

Otros cambios comunes en los alimentos durante su almacenamiento con refrigeración son: pérdida de firmeza y vigor en las frutas y hortalizas; cambios en el color de la

carne roja; oxidación de las grasas; reblandecimiento de los tejidos y escurrimiento del pescado; pérdida de frescura en el pan y los pasteles; formación de terrones y costras en los alimentos granulares; pérdidas de sabor; y un gran número de manifestaciones del deterioro microbiano. Hay alimentos que nunca deberían de ser refrigerados. El pan es un ejemplo. La velocidad con que el pan pierde su frescura a temperaturas de refrigeración es mayor que a la temperatura del ambiente, aunque esta pérdida puede ser detenida por la congelación.

#### 1.3.5 CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

En donde el enfriamiento se emplea para fines de conservación en la bodega, el supermercado y el refrigerador del hogar, en los cuales se tienen que alojar una multitud de productos, desafortunadamente no siempre resulta económico ni práctico separar los alimentos y dar a cada uno la temperatura y humedad óptima que requiere. Generalmente se opta por una solución intermedia y se mantiene el área refrigerada entre 2°C y 7°C, sin medidas especiales para regular la humedad. Aún en estas condiciones, la refrigeración resulta en mejoras importantes en la seguridad del consumo del alimento, su apariencia, sabor y valor nutritivo. También reduce las pérdidas debida a insectos, parásitos y roedores.

#### 1.4 CONGELACION Y ALMACENAMIENTO CONGELADO.

Como método de conservación, la congelación empieza en donde la refrigeración y el almacenamiento en frío terminan. Junto con la conservación, la congelación ha sido uno de los factores principales en colocar alimentos cómodos al alcance del ama de casa, el restaurante y el establecimiento institucional de alimentación. Ya que la congelación correctamente lograda conserva los alimentos sin producir cambios radicales en su tamaño, forma, textura y sabor hace posible que gran parte del trabajo de preparación de un artículo alimenticio o hasta que una comida completa se haga antes de la etapa de la congelación. Esto transfiere al procesador de alimentos operaciones que antes tenían que ser hechas por el ama de casa o chef.

El número casi sin límite de productos, muchos de ellos congelados en los mismos recipientes en que serán servidos, y de los que se elaboran grandes cantidades, representan una revolución importante en la industria y reflejan cambios radicales en las costumbres del comer. Estos cambios se deben a fenómenos sociales de los tiempos actuales como son los siguientes:

- 1) Se consumen más alimentos fuera del hogar que en ningún tiempo anterior. Estos incluyen alimentos en restaurantes, universidades, programas de alimentación escolar, hoteles, aviones, hospitales, etc..

- 2) Hay una necesidad cada vez mayor de preparación y servicio rápido de alimentos.

3) El costo de la mano de obra está en aumento constante, contribuyendo más a imponer el uso de alimentos cómodos en los establecimientos dedicados a la alimentación.

Actualmente ninguna otra forma de conservación de alimentos puede proporcionar el mismo grado de comodidad que la congelación. Muchos artículos pueden ser preparados juntos en una sola operación de descongelación y calentamiento. Este último avance en los alimentos congelados se apoya en principios científicos bien desarrollados.

#### 1.4.1 CARACTERISTICAS DE LOS ALIMENTOS QUE SE CONGELAN.

El agua congelada puede hacer estallar tubos de hierro, de manera que no debe sorprendernos el hecho de que, si no se le controla adecuadamente, la congelación puede quebrantar la textura de los alimentos, romper emulsiones, desnaturalizar proteínas, y causar otros cambios tanto físicos como químicos. Muchos de estos cambios están relacionados con la composición de los alimentos que, a su vez, son influenciados por las prácticas agrícolas que tuvieron lugar mucho antes del proceso de congelación.

a) Composición de los alimentos.- Una propiedad básica de las soluciones acuosas es que, cuando aumentan su concentración de sólidos disueltos, bajan sus puntos de congelación. Así, cuanto mayor sea la cantidad de sal, azúcar, minerales o proteínas en una solución, más bajo será su punto de congelación y más tardará ésta en congelarse

cuando se le coloca en una cámara de congelación. Si se colocan agua y jugo en un congelador, el agua se congelará primero. Además, a menos que la temperatura esté muy por debajo del punto de congelación del agua pura, el jugo nunca se congelará completamente sino que el líquido se llenará de cristales de hielo.

Lo que está sucediendo realmente en este caso es que el agua dentro del jugo se está congelando primero, dejando los sólidos disueltos en una solución más concentrada que requiere una temperatura aún más baja a fin de congelarse.

Puesto que la composición de los diferentes alimentos varía en cuanto al nivel de agua y la clase y cantidad de sólidos en ésta, es de esperarse que los alimentos tengan puntos de congelación diferentes y que, bajo condiciones de congelación determinadas, requieran diferentes períodos a fin de congelarse completamente. Esto en sí explica en gran parte por qué las diferentes variedades de una misma fruta u hortaliza se comportan en forma variable al congelarse.

b) Congelación progresiva.- Una unidad determinada de alimento, ya sea una botella de leche, una pieza de carne de res, o una lata de manzanas rebanadas en almíbar, no se congelará uniformemente; es decir, no se cambiará repentinamente del estado líquido al estado sólido. En el caso de la botella de leche colocada en un congelador, por ejemplo, el líquido que se haya más cerca de la pared de la botella se congelará primero, y los primeros cristales de hielo serán de agua pura.

Decimos que el punto de congelación del agua pura es de  $0^{\circ}\text{C}$ , pero en realidad el agua no empieza a congelarse a  $0^{\circ}\text{C}$ . Más bien su temperatura desciende generalmente varios grados por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$  antes de que algún estímulo, como la nucleación de cristales o la agitación inicie el proceso de congelación. Cuando ocurre este estímulo, la temperatura sube en forma repentina a  $0^{\circ}\text{C}$ , debido a la evolución del calor latente de cristalización. Aún si el agua se encuentra en una atmósfera cuya temperatura está por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ , mientras el agua libre se está congelando y despidiendo el calor latente de la cristalización o la fusión, la temperatura de una mezcla de agua pura y hielo no bajará más allá de  $0^{\circ}\text{C}$ . Sólo después de que toda el agua haya sido convertida en hielo, la temperatura del alimento será más baja que la de equilibrio, o sea  $0^{\circ}\text{C}$ , y luego se aproximará rápidamente a la temperatura de la atmósfera de congelación. Mucho de esto ocurre también en los alimentos que contienen agua, pero ya que contienen sólidos disueltos, su congelación progresiva es un poco más compleja. Esto se debe en gran parte a que, a medida que la congelación separa más agua del alimento, la concentración de los solutos en el agua restante aumenta progresivamente y decrece cada vez más el punto de congelación de la solución restante. Estas pequeñas cantidades de agua sin congelar son muy significativas, sobre todo porque dentro de ellas hay solutos de alimentos disueltos que están concentrados y, por

lo tanto, más propensos a reaccionar entre sí o con otros componentes de los alimentos.

c) Efectos de concentración.- Para que la mayoría de los alimentos conserven su calidad en el almacenamiento congelado, tienen que estar completamente congelados. Un núcleo sin congelar o una zona parcialmente congelada sufriría deterioros en su textura, color, sabor y otras propiedades.

d) Daños causados por los cristales de hielo.- Los alimentos sólidos de tejidos vivos, como carnes, pescado, frutas y hortalizas, tienen una estructura celular de paredes y membranas delicadas.

Dentro de, y entre las células hay agua. Cuando el agua se congela rápidamente, forma cristales de hielo diminutos; cuando se congela más lentamente, forma grandes cristales de hielo y racimos de cristales. Los grandes cristales de hielo que se forman de o entre las células pueden causar la ruptura física y la separación de células en grado mucho mayor que los cristales de hielo más pequeños.

#### 1.4.2 VELOCIDAD DE CONGELACION.

Existe a veces desacuerdo sobre cuál de dos factores, el efecto de la concentración o el daño físico a los grandes cristales de hielo, es más perjudicial durante la congelación y el almacenamiento congelado. Indudablemente la respuesta a esto depende del alimento, siendo a veces uno y a veces el otro. Sin embargo, en ambos casos la

congelación rápida es esencial a la buena calidad. En la congelación rápida se forman cristales de hielo diminutos. Sin embargo, la congelación rápida o instantánea también reduce los efectos de concentración al disminuir el tiempo en que los solutos concentrados permanecerán en contacto con los tejidos de los alimentos, durante la transición del estado original al estado de congelación total.

Por estas razones especialmente, todos los métodos modernos de congelación y todos los aparatos de congelación son diseñados a fin de lograr la congelación rápidamente ya que la calidad superior que resulta puede justificar el costo. En cuanto a las velocidades de congelación, se puede decir que generalmente cuanto más rápida sea la congelación, mejor será la calidad del producto.

#### 1.4.3 SELECCION DE LA TEMPERATURA FINAL.

Al considerar todos los factores, entre ellos los cambios texturales, las reacciones químicas, enzimáticas y no enzimáticas, los cambios microbiológicos, y los costos, se tiene como norma internacional de que los alimentos deben de congelarse hasta alcanzar una temperatura interna de  $-18^{\circ}\text{C}$  como mínimo, y ser conservados a esta temperatura durante todo el tiempo de su transporte y almacenamiento congelado. Las consideraciones económicas generalmente excluyen el uso de temperaturas más bajas que  $-29^{\circ}\text{C}$  durante el transporte y almacenamiento, aunque muchos alimentos se congelan hasta una temperatura algo más baja que  $-29^{\circ}\text{C}$  en su

superficie con el esfuerzo de lograr las ventajas de la congelación rápida en el centro del producto. Desde el punto de vista microbiológico, el almacenamiento a  $-18^{\circ}\text{C}$  no sería requerido, porque los patógenos no crecen a temperaturas inferiores a unos  $4^{\circ}\text{C}$ , y los organismos generadores de la descomposición normalmente no crecen a una temperatura inferior a unos  $10^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, la temperatura de las instalaciones de transporte y almacenamiento congelado fluctuará un poco en ambos sentidos de la que ha sido seleccionada. Puesto que algunos organismos generadores de la descomposición pueden crecer en la proximidad de  $7^{\circ}\text{C}$ , la selección de una temperatura del orden de  $-18^{\circ}\text{C}$  proporciona un margen razonable de seguridad contra éstos y un margen aún mayor contra los patógenos.

En la mayoría de los alimentos, principalmente de peso unitario mayor a 1 kg. y de dimensiones esféricas o cúbicas, queda bastante agua sin congelar a  $-10^{\circ}\text{C}$ , y el almacenamiento por períodos largos resulta en graves deterioros enzimáticos en la calidad de los alimentos, especialmente los de carácter oxidativo. El producto a  $-18^{\circ}\text{C}$  en su zona central retarda suficientemente las acciones de muchas enzimas de los alimentos, pero existen excepciones en el caso de las frutas y hortalizas. En estos casos se inactivan las enzimas antes de la congelación mediante el escaldado (cocimiento parcial) o un tratamiento químico. Diremos solamente que cuanto más baja sea la temperatura, más lentas serán las velocidades de reacción y menos agua

habrá sin congelar para servir de solvente a los reactores químicos. Los efectos globales de la temperatura baja en el almacenamiento de diversos alimentos durante periodos largos son indicados en la Tabla 1.4. Tratándose de hortalizas, frutas, carnes y pescado correctamente envasados y congelados, la calidad se conserva en el almacenamiento a  $-12^{\circ}\text{C}$  por un periodo que fluctúa entre 6 y 10 meses, pero a temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , la mayoría de los alimentos retienen su calidad por más de un año, y a veces hasta por 2 ó 3 años.

Alimento	Temperatura de almacenamiento	
	$-18^{\circ}\text{C}$	$-12^{\circ}\text{C}$
Espárragos	12-18 meses	4 meses
Asados de res	18-24 meses	8-10 meses
Bistecs	12-18 meses	6-8 meses
Moras azules	2-3 años	8-10 meses
Brócoli	2-3 años	8-10 meses
Bietas	12-18 meses	4 meses
Filetes de róbalo	12-15 meses	6-8 meses
Hielados (excepto el de fresa que no se conserva bien a ninguna temperatura)	3-4 meses	1 mes
Filetes de macarela	8-12 meses	2-3 meses
Duraznos	12-18 meses	4 meses
Chicharos	18-24 meses	6-8 meses
Chuletas de puerco	8-12 meses	4 meses
Avena	12-18 meses	6 meses
Frambuesas	2-3 años	8-10 meses
Filetes de salmón	6-8 meses	2-3 meses
Cerezas agrias	2-3 años	8-10 meses
Fresas	18-24 meses	6-8 meses

De Weber (1963).

TABLA 1.4. VIDA DE ALMACENAMIENTO DE ALGUNOS ALIMENTOS CONGELADOS (SUPONIENDO QUE HAN SIDO EMPACADOS CORRECTAMENTE EN ENVASES IMPERMEABLES)

La calidad inicial y la vida subsiguiente en el almacenamiento se podrían mejorar en muchos alimentos si se les congelara y almacenara a una temperatura mucho más baja que  $-18^{\circ}\text{C}$ , pero no es económico a nivel industrial, por lo que para efectos de producción se ha adoptado como Norma este valor.

#### 1.4.4 DAÑOS DEBIDOS A LA DESCONGELACION INTERMITENTE.

Los tipos de daños que pueden ocurrir en los alimentos durante la congelación lenta también ocurren durante la descongelación lenta, y nada es más perjudicial a la calidad de los alimentos congelados que la congelación y descongelación repetidos durante el almacenamiento. Ni hace falta que la descongelación repetida sea completa. La descongelación completa en el almacenamiento es rara y generalmente ocurre sólo en casos de la descompostura total del equipo de enfriamiento en el almacén. Al recongelarse, el agua derretida de pequeñas cristales de hielo, tiende a bañar los cristales no derretidos, aumentando así su tamaño. Cualquiera que sea la variación de temperatura en el área de almacenamiento, debido a que la transmisión de calor tiene una velocidad limitada, habrá un efecto de retardación en el alimento mismo, y generalmente habrá menos variación de temperatura en éste que en la cámara o en el congelador. Sin embargo, si la temperatura en la cámara o congelador varía en cualquier sentido más de unos pocos grados de  $-18^{\circ}\text{C}$  por un período de semanas o meses, será dañados perceptiblemente la calidad de la mayoría de los alimentos congelados que allí se encuentran y habrá que corregir los instalaciones en que ocurren esas variaciones. Los alimentos congelados que se descongelan para su uso final también están expuestos a pérdidas de calidad, especialmente si la descongelación es lenta. En este caso también, los efectos de concentración

pueden aparecer. Las soluciones más concentradas que se congelaron al último son las primeras en descongelarse.

Otra causa de la superioridad de la descongelación final rápida, comparada con la descongelación lenta se ve en la Tabla 1.5. Los alimentos congelados en grandes volúmenes, como por ejemplo una lata de 13.6 kilos de huevo entero congelado, pueden tardar de 20 a 60 horas en descongelarse al aire, según la temperatura del aire. El agua fresca corriente y otras técnicas pueden reducir este tiempo notablemente. Ya que las bacterias sobreviven al proceso de congelación, cuando el tiempo es largo y la temperatura del producto va subiendo, hay demasiada oportunidad para la multiplicación bacteriana.

<i>Método</i>	<i>Horas requeridas</i>	<i>% de aumento en el índice microbiano durante el deshielo</i>
En aire a 27°C	23	1,000
En aire a 21°C	36	750
En aire a 7.5°C	63	225
En agua corriente a 15.5°C	15	250
En agua corriente a 21°C	12	300
En agua agitada a 15.5°C	9	40
Calor dieléctrico	15 min.	Insignificante

De Weiser (1962).

TABLA 1.5. EFECTO DEL DESHIELO EN LA MICROBIOLOGIA DE LOS HUEVOS ENTEROS CONGELADOS SIN CASCARA

#### 1.4.5 METODOS DE CONGELACION DE ALIMENTOS.

Hay tres métodos básicos de congelación que se aplican en escala comercial, y estos son la congelación por aire, la congelación por contacto indirecto con el medio refrigerante y la congelación por inmersión directa en un

medio refrigerante (este último es parte importante en los objetivos de este trabajo).

Estos tres métodos básicos pueden subdividirse de varias maneras, una de las cuales es indicada en la Tabla 1.6.

El aire frío puede utilizarse a varias velocidades que van desde el aire tranquilo de la congelación "aguda" hasta las corrientes intensas de aire a alta velocidad empleadas en un túnel. La velocidad del aire también puede utilizarse para subdividir y mover partículas del material que se está congelando, como en el caso de la congelación en un lecho fluidizado.

<i>Congelación por aire</i>	<i>Congelación por contacto indirecto</i>	<i>Congelación por inmersión</i>
Congelador "agudo" de aire tranquilo	Congelador a una placa	Líquido de intercambio
Congelador por corrientes intensas de aire	Congelador a dos placas	Gas comprimido
Congelador de lecho fluidizado	Congelador con placa a presión	Rocío refrigerante
	Congelador a consistencia de escarcha	

TABLA 1.6. METODOS COMERCIALES DE CONGELACION

La congelación por contacto indirecto incluye aquellos métodos en que el alimento o envase con alimento está en contacto con una superficie enfriada mediante un refrigerante, pero en que el alimento o envase no se pone en contacto directo con el refrigerante. En el caso de alimentos sólidos o en recipientes, generalmente se requiere que una superficie plana o casi plana de los mismos esté en contacto con las placas refrigeradas. El contacto puede

establecerse entre estas y 1 ó 2 superficies del alimento o envase.

La congelación por inmersión establece un contacto directo entre el alimento o envase y el refrigerante, ya sea

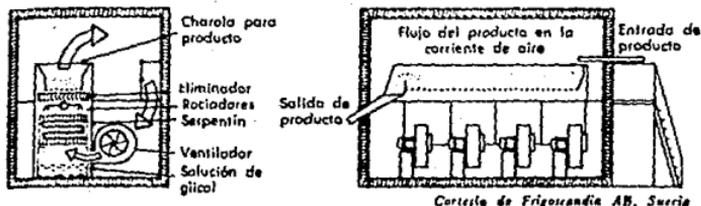


FIGURA 1.2. ESQUEMA DEL CONGELADOR DE LECHO FLUIDIZADO DE OPERACION CONTINUA Y DEL METODO DE DESHIELO

al sumergir el alimento en el líquido frío o al rociar el líquido sobre él. Con excepción de la congelación "aguda" por aire tranquilo, todos los métodos pueden aplicarse a operaciones por lotes y operaciones semicontinuas o continuas. También con excepción de la congelación "aguda" por aire tranquilo, todos los demás son clasificados como métodos de congelación rápida.

#### 1.4.6 CONGELACION POR CONTACTO DIRECTO EN LIQUIDOS CRIOGENICOS Y NO CRIOGENICOS.

Hoy en día el nitrógeno líquido es el único líquido criogénico utilizado en la congelación de alimentos por inmersión. Las principales ventajas de la congelación por nitrógeno líquido son:

1. El punto de ebullición del nitrógeno líquido a la presión atmosférica es  $-195^{\circ}\text{C}$ . Esto significa que el líquido de inmersión que está experimentando la ebullición lenta tiene una temperatura de  $-195^{\circ}\text{C}$ , lo cual proporciona un gran potencial para la transmisión de calor.

2. En el proceso de congelación instantánea por inmersión, el nitrógeno líquido, se pone en contacto íntimo durante unos segundos con todas las porciones de los alimentos de forma irregular, reduciendo así la resistencia a la transmisión de calor.

3. En el proceso de congelación instantánea por agitación de nitrógeno atomizado el alimento es conducido a través de una banda o introducido en un espacio cerrado donde otorga en forma gradual y continua su calor, que es recibido por el nitrógeno gaseoso y frío por una constante agitación de gas sobre el alimento. A mayor temperatura de salida del nitrógeno mejor será el rendimiento.

4. El nitrógeno líquido cuyas propiedades se detallan en el Capítulo 2, no es tóxico y es inerte a los componentes de los alimentos. En forma gaseosa se usa como atmósfera que desplaza aire de los empaques en áreas de conservación o almacén de alimentos, además de que puede reducir los cambios debidos a la oxidación durante la congelación mecánica por chorro de aire frío.

5. Como habremos de detallar en el Capítulo 3, la congelación con LIN es con mucho el más rápido de los métodos comerciales actuales de congelación de alimentos. En

tanto que algunos productos poco húmedos no requieren una congelación tan rápida para tener buena calidad, otros, como por ejemplo las rebanadas de tomate, no pueden congelarse por ningún otro método sin que sus tejidos se deterioren excesivamente. También se pueden obtener, mediante este método, productos novedosos. Se han frigorizado segmentos de naranja por medio de nitrógeno líquido, y luego en su estado quebradizo se les ha fragmentado en celdas de jugo individuales cuyas paredes estaban en gran parte intactas.

La que se cita generalmente como principal desventaja de la congelación por nitrógeno líquido tiene que ver con su costo, pero según el producto, y luego de un análisis de ahorros en espacio, mantenimiento de equipos de refrigeración mecánica, costo de energía eléctrica, así como la certeza de obtener un lote de producto uniformemente congelado, esta objeción puede ser inválida.

Generalmente la congelación con nitrógeno líquido resulta en menos pérdidas debidas a la deshidratación durante la congelación y menos pérdidas debidas al escurrimiento durante la congelación que los otros métodos de congelación. Hay que tomar en cuenta estos factores al calcular el verdadero costo de la congelación por nitrógeno o por cualquier otro método. En algunos casos la congelación por nitrógeno líquido, considerado generalmente más costosa que otros métodos, puede resultar en realidad menos costosa, si se le analiza así. Esta clase de sutileza, frecuentemente relacionada exclusivamente con determinados productos, se

encuentra en todos los tipos de procesamiento de alimentos y aumenta la dificultad de desarrollar comparaciones de costo acertadas. En todo caso, mientras todavía se están descubriendo los atributos de la congelación por medio de nitrógeno líquido, la evolución constante de los métodos de procesamiento prosigue.

Por otro lado, existe otro líquido congelante que por sus propiedades físicas es ampliamente utilizado en la congelación súbita de los alimentos. Este líquido es el Dióxido de Carbono, el cual no es criogénico, porque según habremos de conocer en el Capítulo 2, la criogenia es la ciencia física relacionada con las propiedades de los elementos por debajo de los  $-150^{\circ}\text{C}$ ; y la temperatura de ebullición del  $\text{CO}_2$  es de  $-78.44^{\circ}\text{C}$ .

Sin embargo, existe a nivel industrial una amplia variedad de equipos de congelación que apoyan sus características de diseño al comportamiento del  $\text{CO}_2$  a la temperatura mencionada.

En verdad diferentes a los equipos criogénicos como lo veremos en el Capítulo 3, inciso 3.4, los congeladores que utilizan  $\text{CO}_2$  aprovechan el fenómeno de este líquido que al ser atomizado y despresurizado en forma súbita genera la llamada nieve carbónica.

Esta nieve al tocar directamente al alimento recibe la energía calorífica que éste posee, pero además, el  $\text{CO}_2$  gaseoso creado por la sublimación de la nieve carbónica que ha incrementado su temperatura poco antes, se aprovecha

mediante agitación turbulenta para preenfriar el alimento a congelar.

La principal ventaja del CO<sub>2</sub>, es que al igual que con el uso del nitrógeno permite asegurar una calidad uniforme de alimento congelado, en virtud del control instrumentado en los equipos de proceso que, como veremos en el Capítulo 4 permiten inyectar en forma directamente proporcional el líquido congelante en relación a la cantidad de producto introducido al equipo.

## CAPITULO 2

### CRIOGENIA

#### 2.1 ANTECEDENTES.

La criogenia trata con la aplicación práctica de procesos y técnicas a muy bajas temperaturas. Estas temperaturas se encuentran debajo de aquellas encontradas en la ingeniería de refrigeración.

Realmente es difícil asignar una temperatura que sirva de punto divisor entre ingeniería de refrigeración e ingeniería criogénica, aunque probablemente de acuerdo a su actual uso, la ingeniería criogénica concierne a temperaturas abajo de los  $-150^{\circ}\text{C}$ . Otro parámetro aceptable de división de la ingeniería criogénica sería la región de temperaturas alcanzadas al producirse la licuefacción de los gases cuyas temperaturas críticas se encuentran por debajo de las temperaturas encontradas en nuestro planeta.

Hay amplias razones para tratar a la criogenia como un campo aparte. Las propiedades físicas de los materiales a muy bajas temperaturas difieren tan drásticamente de las comúnmente conocidas que el ingeniero no puede confiar en sus experiencias ordinarias, por ejemplo, el acero al carbón y los hules se fragilizan y rompen, otros materiales se vuelven superconductivos, etc.. Es por eso que más adelante

se dará una explicación de lo que sucede a los materiales a temperaturas criogénicas.

### 2.1.1 RESEÑA HISTORICA.

Alrededor de 1840, en un intento de darles un alivio a los pacientes que sufrían de malaria, el Dr. John Gorrie, médico estadounidense, desarrolló una máquina de expansión para la producción de hielo. Sin embargo, la máquina del Dr. Gorrie fue utilizada tan sólo para enfriar aire como aire acondicionado en los cuartos de los enfermos. A esto no se le podía considerar parte de un sistema criogénico, aunque hoy en día muchos grandes sistemas de licuefacción de aire utilizan el mismo principio de la expansión de aire a través de algún dispositivo productor de trabajo, tales como motores de expansión o turbinas de expansión y se hace con el fin de extraer energía del aire para que éste pueda ser licuado.

No fué sino hasta 1877 en que un llamado "gas permanente" fué licuado por primera vez. En este año Louis Paul Caillete, un ingeniero minero francés, produjo una niebla de gotitas de oxígeno líquido enfriando un envase lleno de oxígeno gaseoso a aproximadamente 300 atm. y permitiendo al gas a expandirse repentinamente abriendo una válvula del aparato. En el mismo tiempo Raoul Pictet, físico suizo, tuvo éxito produciendo oxígeno líquido por su proceso en cascada.

Al principio de la década de 1880 uno de los primeros laboratorios de baja temperatura, el laboratorio de la Universidad de Cracovia en Polonia, fué establecido por Szymunt von Wroblewski y K. Olszewski. Obtuvieron oxígeno líquido "hirviendo silenciosamente en un tubo de prueba" en cantidad suficiente como para estudiar sus propiedades en Abril de 1883. Días después, también licuaron nitrógeno.

Wroblewski y Olszewski, ya trabajando aparte en Cracovia, intentaron licuar hidrógeno usando la técnica de expansión de Cailletet. Primero enfriaban hidrógeno en un tubo capilar a temperaturas del oxígeno líquido y expandiéndolo repentinamente de 100 atm. a 1 atm.. Wroblewski obtuvo una niebla de gotitas de hidrógeno líquido en 1884, pero no pudo obtener hidrógeno en su estado líquido completamente.

Los científicos polacos del Laboratorio de la Universidad de Cracovia estaban interesados primeramente en determinar las propiedades de los gases licuados. El problema que siempre se presentó fué el de la transferencia de calor del ambiente que impedía a los investigadores trabajar ya que los fluidos criogénicos sólo se retenían por un momento antes de que se evaporaran. Para evitar esta situación, una ingeniosa técnica experimental fué desarrollada en Cracovia.

El tubo de pruebas experimental conteniendo el fluido criogénico estaba rodeado por una serie de tubos concéntricos, cerrados en un extremo. El vapor frío que

salía del líquido fluía a través de los espacios anulares entre los tubos e interceptaba parte del calor que viajaba hacia el tubo de prueba frío. Este concepto de escudo de vapor es usado hoy en día en conjunción con aislamientos altamente efectivos para almacenar durante largos períodos helio líquido en grandes volúmenes.

Un gigantesco paso se dió en la preservación de líquidos criogénicos en 1892, cuando James Dewar, profesor de química del Real Instituto de Londres, desarrolló un envase aislado por vacío para almacenar fluidos criogénicos. Dewar encontró que usando un envase con doble pared de vidrio y teniendo las superficies internas plateadas (como los termos de hoy en día) resultaba en una reducción de la razón de evaporización del fluido guardado en razón de 30 veces sobre uno que no estuviera aislado. Este simple envase jugó un papel signficante en la licuefacción de hidrógeno y helio en grandes volúmenes.

En Mayo de 1898, Dewar produjo 20 cm<sup>3</sup> de hidrógeno líquido hirviendo silenciosamente en un tubo aislado por el vacío.

En 1895 dos eventos significativos en la tecnología criogénica ocurrieron. Carl von Linde, que había establecido la Linde Eismaschinen AG en 1879, obtuvo la concesión de una patente de la licuefacción de aire en Alemania. Y aunque Linde no fue el primero en licuar el aire, fué de los primeros en reconocer las implicaciones industriales de la licuefacción de los gases y en ponerlo en la práctica.

Después de más de 10 años de estudios de las bajas temperaturas, Heike Kamerling h'Onnes estableció el Laboratorio de Física en la Universidad de Leiden en Holanda en 1895. La primera licuefacción del helio por h'Onnes fue un tributo a sus habilidades y al cuidado en su planeación. Tenía tan sólo 360 litros de helio gaseoso obtenido al calentar arena monazítica de la India. Onnes produjo más de 60 cm<sup>3</sup> de helio líquido en su primer intento. En 1910, Onnes pudo alcanzar la temperatura de 1.04°K en un infructuoso intento para solidificar helio bajando la presión de un envase de helio líquido.

Los físicos del laboratorio de Leiden estaban interesados en investigar las propiedades de los materiales a bajas temperaturas y revisando los principios naturales conocidos como válidos a temperatura ambiente, en temperaturas criogénicas. Fue hasta 1911, que mientras Onnes checaba las teorías de la resistencia eléctrica de los sólidos a temperaturas del helio líquido, descubrió que la resistencia eléctrica del cable de mercurio con que experimentaba, repentinamente decrecía a cero. Esto marcó la primera observación del fenómeno de superconductividad, que es la base de muchos innovados dispositivos usados actualmente.

En 1902 Georges Claude, ingeniero francés, desarrolló un sistema práctico para la licuefacción del aire en que una larga parte del efecto de enfriamiento del sistema era obtenida a través del uso de una máquina de expansión. Las

primeras máquinas que utilizó Claude fueron máquinas reciprocantes que tenían sellos de piel (en realidad eran motores de vapor modificados). Durante este mismo año, Claude estableció la compañía l' Air Liquide para desarrollar y producir sus sistemas.

Aunque la ingeniería criogénica es considerada un campo relativamente nuevo, deberá recordarse que el uso de los gases licuados en la industria se remontan al inicio de 1900. En E.U. Linde estableció la primera planta de licuefacción de aire en los Estados Unidos en 1907, y la primera planta de licuefacción hecha en América fue terminada en 1912. La primera producción de argón se inició en 1916 por la compañía de Linde en Cleveland, Ohio. En 1917 se construyeron tres plantas experimentales por el Departamento de Minas de los E.U. con la ayuda de Linde Company, Air Reduction Company, y de Jefferies-Norton Corporation para extraer helio del gas natural en Clay County, Texas. El helio se quería utilizar para la construcción de naves aéreas en la I Guerra Mundial.

La producción comercial del neón empezó en E.U. en 1922, aunque Claude lo había producido en ciertas cantidades en Francia desde 1907.

El 16 de Marzo de 1926, el Dr. Robert H. Goddard condujo el primer vuelo exitoso en el mundo de un cohete propulsado con una mezcla oxígeno líquido-gasolina en Auburn, Massachusetts. Este vuelo duró sólo 25 segundos y alcanzó una velocidad de tan sólo 22 m/s (80 km/hr). El Dr. Goddard

continuó su trabajo durante los 30's, y para 1941 llevó su cohete criogénico a un buen grado de perfección. De hecho, muchos de los dispositivos utilizados en sus cohetes fueron utilizados en la fabricación de los cohetes alemanes V-2.

Alrededor de 1898, Sir James Dewar hizo medidas de transferencia de calor a través de talcos (polveres evacuados). En 1910 Smoluchowski demostró la significativa mejoría en la calidad del aislamiento que se podía lograr utilizando este tipo de polvos. En 1937 se utilizaron por primera vez los aislamientos con este tipo de polvos para el almacenamiento de líquidos criogénicos. Dos años después se construyó el primer vagón tanque con aislamiento de polvos evacuados y al vacío para el transporte de oxígeno líquido.

El mundo se dió cuenta de las implicaciones militares de la tecnología criogénica en 1942 cuando los cohetes alemanes V-2 fueron probados exitosamente en Peenemunde bajo la dirección del Dr. Walter Dornberger. El sistema V-2 fue el primer gran cohete en utilizar combustible líquido. Este vehículo estaba propulsado por oxígeno líquido y una mezcla de 75% alcohol etílico y 25% de agua.

Alrededor de 1947, el Dr. Samuel C. Collins del departamento de ingeniería mecánica en el Instituto Tecnológico de Massachussetts desarrolló un eficiente laboratorio para helio líquido. Este evento marcó el inicio en que las temperaturas del helio líquido se volvieron factibles y regularmente económicas. El crióstato de helio de Collins, hecho por Arthur D. Little Inc. era un sistema

completo para la segura y económica licuefacción del helio y podía usarse también para mantener temperaturas en cualquier nivel entre la temperatura ambiente y aproximadamente  $2^{\circ}\text{K}$ .

En el inicio de 1956 los trabajos con hidrógeno líquido fueron acelerados cuando Pratt & Whitney Aircraft obtuvo un contrato para desarrollar un motor de cohete propulsado con hidrógeno líquido para el programa espacial de los Estados Unidos. Al año siguiente el cohete Atlas ICBM fué probado satisfactoriamente. El Atlas estaba propulsado por una combinación oxígeno líquido-propelente RP-1 y tenía un empuje a nivel del mar de 1.7 MN. En el Centro Espacial de Cabo Kennedy, el 27 de Octubre de 1961, fué hecho el primer vuelo de pruebas del vehículo de lanzamiento Saturno. El Saturno V fué el primer vehículo espacial en usar la combinación hidrógeno líquido-oxígeno líquido como propelente.

En 1966 Hall, Furd y Thompson en Manchester, y Neganov, Barisov, y Liburg en Moscú, lograron independientemente alcanzar una refrigeración continua abajo de  $0.1^{\circ}\text{K}$  utilizando un refrigerador de dilusión He3-He4.

Esta nueva técnica de refrigeración fué propuesta en 1951 por H. London. El refrigerador de dilusión tiene ciertas ventajas sobre el refrigerador magnético, que se apoyaba en el principio de desmagnetización adiabático para alcanzar temperaturas en el rango de  $0.01^{\circ}\text{K}$  a  $0.1^{\circ}\text{K}$ . Es por esto que se ha dado un apoyo considerable al estudio y mejoramiento de este tipo de refrigeradores.

En 1969, un motor superconductor (motor de Fawley) con 3250 H.P. y 200 rpm. fué construido por el International Research and Development Co. Ltd. de Inglaterra. En 1972, IRD instaló un motor superconductor en un barco para que llevara los sistemas eléctricos de propulsión.

### 2.1.2 LA INGENIERIA CRIOGENICA EN LA ACTUALIDAD.

Las aplicaciones de hoy en día de la ingeniería criogénica son por demás muy variadas, ya sea en proyección o en magnitud. Algunas de las áreas que envuelven a la ingeniería criogénica incluyen:

1.- Sistemas de propulsión de cohetes. Todos los vehículos de lanzamiento de los Estados Unidos utilizan al oxígeno líquido como oxidante. El programa de transbordadores espaciales utiliza ambos fluidos criogénicos, el oxígeno líquido y el hidrógeno líquido.

2.- Estudios en física de alta energía. La cámara de burbujeo de hidrógeno utiliza hidrógeno líquido en la detección y estudio de las partículas de alta energía producidos en grandes aceleradores de partículas.

3.-Electrónica. Amplificadores sensitivos de microondas, llamados masers son enfriados a temperaturas del nitrógeno líquido o del helio-líquido para que las vibraciones térmicas de los átomos del elemento amplificados no interfieran seriamente con la absorción y emisión de energía por microondas. Los masers enfriados criogénicamente han sido utilizados en la detección de misiles, en astronomía

radial para escuchar las galaxias lejanas, y en sistemas de comunicación espacial.

Diminutos elementos electrónicos superconductores, llamados SQUID (dispositivos de interferencia cuántica superconductor, esto por sus siglas en inglés) han sido utilizados como voltímetros y magnetómetros digitales extremadamente sensibles. Estos dispositivos están basados en un fenómeno superconductor llamado el efecto de Josephson, que envuelve un entubamiento por mecánica cuántica de electrones de un superconductor a otro a través de una barrera aislada.

Además de los SQUID, otros dispositivos electrónicos que utilizan a la superconductividad en su operación incluyen amplificadores superconductivos, rectificadores, transformadores y magnetos. Los magnetos superconductores han sido utilizados para producir los grandes campos magnéticos requeridos en sistemas MHD, aceleradores lineales y tokamaks. Los magnetos superconductores han sido utilizados para levitar trenes de alta velocidad a velocidades de 500 km/hr.

4.- Diseño mecánico. Utilizando el efecto de Meissner relacionado con la superconductividad, baleros con prácticamente fricción cero han sido construidos utilizando un campo magnético como lubricante en lugar de aceite o aire. Los motores superconductores han sido construidos con pérdidas eléctricas casi iguales a cero en aplicaciones tales como sistemas de propulsión de barcos. Giroscopios

superconductores con extremadamente bajo efecto al giro han sido desarrollados.

5.- Simuladores espaciales y tecnología de alto vacío. Para producir un vacío que se aproxime al del espacio exterior (de  $10E-12$  torr a  $10E-14$  torr) uno de los métodos más efectivos utiliza las bajas temperaturas. Bombeo criogénico, o congelación de los gases residuales, son utilizados para obtener un altísimo vacío requerido en las cámaras de simulación y cámaras de prueba para sistemas de propulsión espacial. El frío del espacio es simulado enfriando una cubierta dentro de la cámara por chorros de nitrógeno líquido. Denso helio gaseoso a menos de  $20^{\circ}K$  ó helio líquido es usado para enfriar los paneles criogénicos que congelan los gases residuales.

6.- Aplicaciones médicas y biomédicas. El uso de la criogenia en la biología o criobiología ha causado mucho interés. Contenedores enfriados con nitrógeno líquido se usan para preservar sangre, tejido, médula ósea y semen animal por periodos de tiempo prolongados. La cirugía criogénica se ha utilizado para el tratamiento del mal de Parkinson, cirugía en los ojos y para el tratamiento de varias lesiones. Este tipo de cirugía tiene muchísimas ventajas sobre la cirugía convencional en diversas aplicaciones.

7.- Procesamiento de alimentos. El congelamiento se utiliza como medio de preservación de alimentos desde aproximadamente 1840. Hoy en día se congela el alimento

haciéndolo pasar por una banda a través de un baño con nitrógeno líquido o un rociado en un túnel con nitrógeno gaseoso frío. El contacto inicial con el nitrógeno líquido congela toda la superficie expuesta conservando su aroma y su sabor. El proceso criogénico por túneles y cámaras será detallado en el siguiente Capítulo.

8.- Procesos de manufactura. El oxígeno se utiliza para hacer más eficientes los procesos de manufactura del acero. Los sistemas criogénicos se utilizan para hacer amoníaco. Envases de alta presión son hechos colocando un cilindro preformado en un dado enfriado a temperatura del nitrógeno líquido. Nitrógeno gaseoso a alta presión es inyectado al envase hasta que el contenedor se elonga alrededor del 15%. El envase es retirado del dado y dejado a que tome la temperatura ambiente. Con el uso de este método, el esfuerzo de cedencia del material se ha incrementado en un 400 a 500%.

9.- Reciclaje de materiales. Hasta ahora uno de las cosas más difíciles de recircular son las llantas de los automóviles. Congelando las llantas con nitrógeno líquido, el hule se volverá frágil y se podrá moler en pequeñas partículas.

Las cuerdas de las llantas y materiales metálicos en la llanta original pueden ser separados fácilmente del hule y este mismo hule se podrá volver a utilizar. Actualmente esta técnica criogénica es la única efectiva para recobrar el hule de las llantas radiales y convencionales

## 2.2 OBTENCION DE LIQUIDOS CRIOGENICOS.

Para poder comprender bien el proceso de destilación del aire, su explicación se dividirá en tres etapas a saber:

1a.Etapa: Compresión, purificación y enfriamiento del aire

2a.Etapa: Destilación del aire, adsorción de hidrocarburos  
obtención del LIN y LOX (nitrógeno y oxígeno  
líquidos respectivamente).

3a.Etapa: Destilación, purificación y obtención del LAR  
(argón líquido).

### 2.2.1. COMPRESION, PURIFICACION Y ENFRIAMIENTO DEL AIRE.

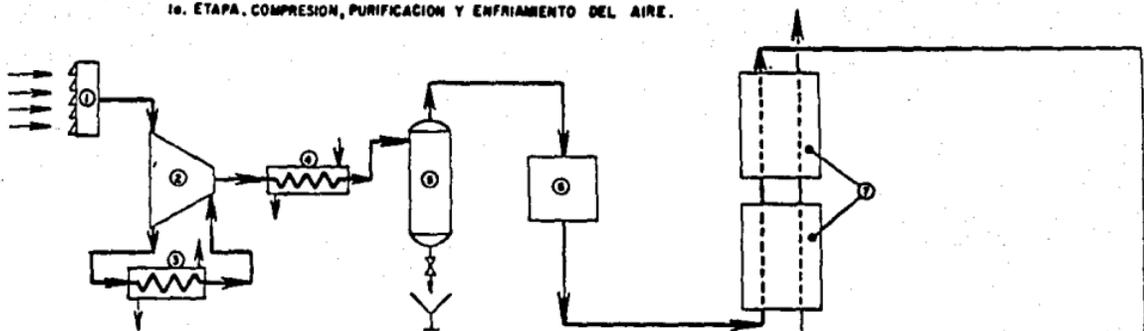
La necesidad básica en una planta de separación de aire es precisamente el aire, el cual debe tener el volumen, la presión y la temperatura adecuada para ser suministrado a la columna de destilación. El aire fluye a través de un filtro mecánico que atrapa impurezas tales como: polvos, insectos, hollín, etc. que de no ser eliminados dañarían las partes internas del compresor.

El aire fluye entonces, a través de los álabes del impulsor de la primera etapa. Cada uno de los impulsores está formado de una serie de álabes curvados montados sobre una flecha y soportados por rodamientos. En la rotación del impulsor de alta velocidad jalará el aire dentro del sistema.

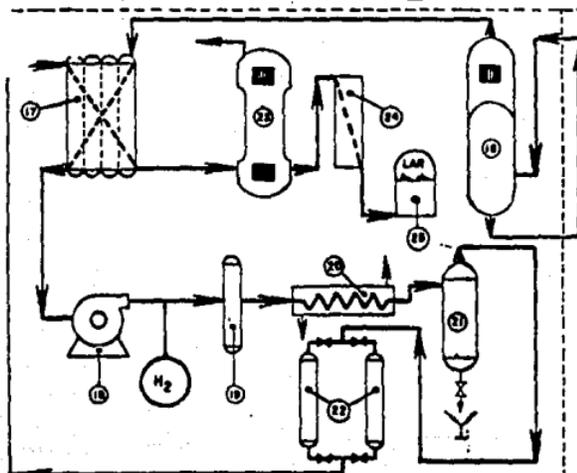
Una variedad de fuentes proporcionan energía al compresor, como pueden ser motores diesel, eléctricos,

FIGURA 2.1. PLANTA DE DESTILACION DEL AIRE

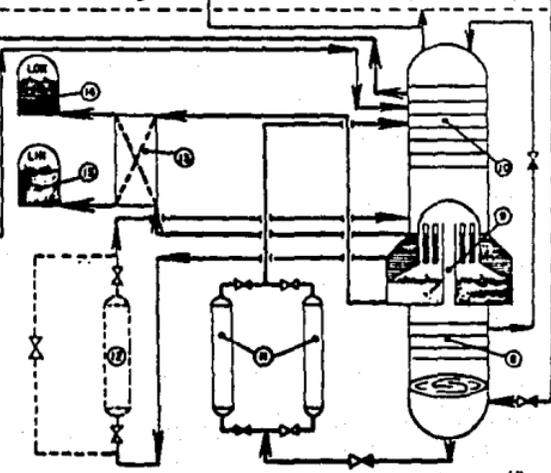
1a. ETAPA. COMPRESION, PURIFICACION Y ENFRIAMIENTO DEL AIRE.



3a. ETAPA. DESTILACION, PURIFICACION Y OBTENCION DEL LAR.



2a. ETAPA. DESTILACION DEL AIRE, ABSORCION DE HIDROCARBUROS Y OBTENCION DEL LIN-LOX.



- 1.- FILTRO DE AIRE
- 2.- COMPRESOR DE AIRE
- 3.- INTER-ENFRIADOR
- 4.- POST-ENFRIADOR
- 5.- SEPARADOR DE HUMEDAD
- 6.- SISTEMA DE PURIFICACION DE AIRE
- 7.- INTERCAMBIADOR DE CALOR PRINCIPAL DE AIRE
- 8.- COLUMNA DE ALTA PRESION
- 9.- REHERVIDOR - CONDENSADOR
- 10.- COLUMNA DE BAJA PRESION
- 11.- ADSORBEDORES DE HIDROCARBUROS
- 12.- ADSORBEDOR DE SEGURIDAD
- 13.- SUB-ENFRIADOR
- 14.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE OXIGENO LIQUIDO
- 15.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE NITROGENO LIQUIDO
- 16.- COLUMNA DE ARGON CRUDO
- 17.- INTERCAMBIADOR PRINCIPAL DE ARGON
- 18.- COMPRESOR DE ARGON
- 19.- TANQUE DE OXO
- 20.- INTERCAMBIADOR DE CALOR
- 21.- SEPARADOR DE HUMEDAD
- 22.- SECADORES DE ALUMINA
- 23.- COLUMNA DE ARGON PURO
- 24.- SUB-ENFRIADOR
- 25.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ARGON LIQUIDO

turbinas de vapor o de gas. En el momento de realizarse la compresión también se obtiene energía en forma de calor, el cual si no es retirado hará ineficiente a nuestro sistema. De tal manera, se utilizará un intercambiador de calor que

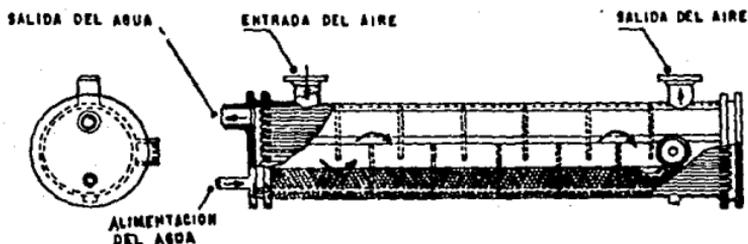


FIGURA 2.2. INTERCAMBIADOR DE CALOR

utilizará a contra corriente un flujo de agua en relación al flujo de aire comprimido que circula en el interior de los tubos. Este mismo paso se lleva al cabo al descargarse el aire en la última etapa de compresión, mediante el postenfriador. Ya que se ha enfriado el flujo de aire, se envía al separador de humedad, que consiste de un recipiente de acero especialmente diseñado para eliminar parte de la humedad por condensamiento de la corriente de aire.

La construcción básica consiste de un cilindro exterior y un faldón interior. El aire entra por la parte superior tangencialmente, arremolinándose alrededor y hacia abajo entre el cilindro y el faldón interior a alta velocidad. El agua cae fuera del faldón y fluye al fondo del separador. Aproximadamente a dos terceras partes del camino hacia

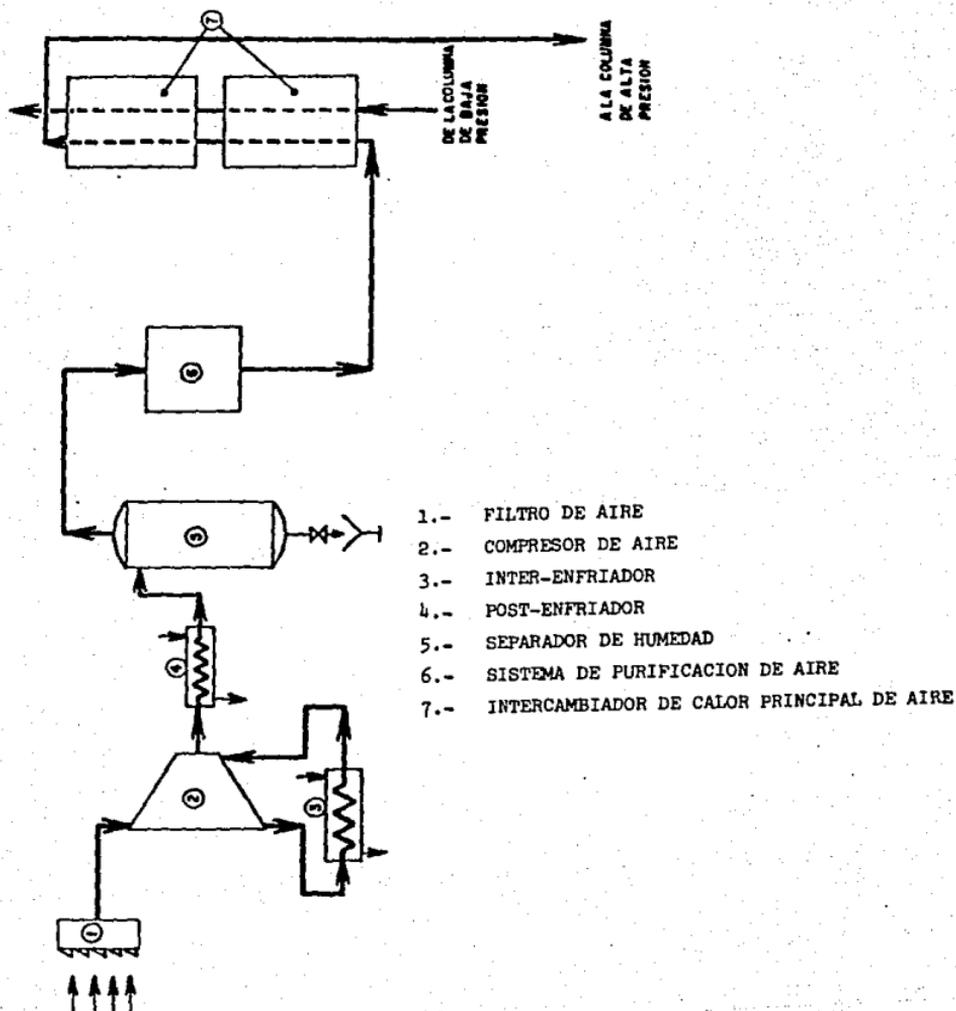


FIGURA 2.3. 1a. ETAPA: COMPRESION, PURIFICACION Y ENFRIAMIENTO DEL AIRE.

abajo, se invierte la dirección del aire. La velocidad disminuye y fluye hacia arriba a través del faldón interior.

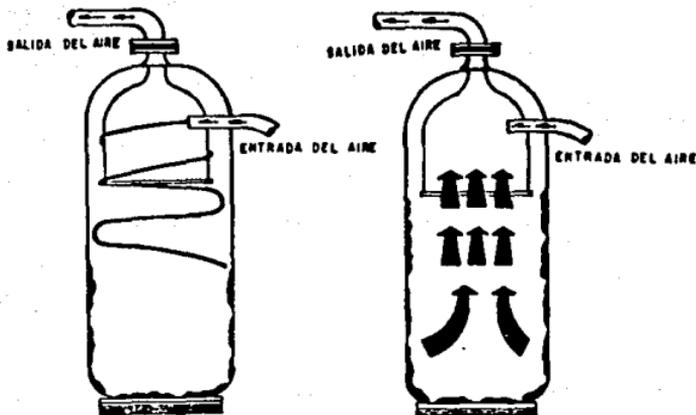


FIGURA 2.4. SEPARADOR DE HUMEDAD

Esta inversión tiende a sacar cualquier agua remanente. El aire con movimiento más lento tiende a pasar después a través de un separador de partículas sólidas o líquidas de los gases. Aquí las gotitas de agua o la neblina se condensan sobre un cedazo de malla. Esta dreña después al fondo del separador en donde es eliminada por una válvula de drenado.

Para entender esto de una mejor manera cabe recordar que en los gases comprimidos existen fuerzas de atracción y repulsión entre sus moléculas. Debido a esto, si se hace que un gas comprimido cambie de velocidad bruscamente, el gas tiene que efectuar un trabajo para vencer dichas fuerzas. Por lo tanto la energía indispensable para ello la obtiene consumiendo parte de la energía calorífica existente en el

gas, lo que se traduce en enfriamiento del mismo manifestándose físicamente como agua condensada.

En cualquier planta de separación de aire, el flujo de aire del proceso a alta presión se enfría a temperaturas tan bajas que si existiera algún vapor de agua en este aire, se congelaría como hielo de agua y cualquier bióxido de carbono se solidificaría también como hielo seco. Por lo tanto si no se toma precaución alguna para retirar el vapor de agua y el bióxido de carbono, acabarían por bloquear las tuberías e intercambiadores de calor. Para eliminar el bióxido de carbono se utilizan torres de sosa, intercambiadores reversibles o malla molecular. La humedad se elimina con separadores, secadores de alúmina o intercambiadores reversibles o malla molecular.

Después de pasar por esta purificación el aire pasará al último paso de esta etapa, que es el enfriamiento. Este se logra haciendo pasar el aire por un intercambiador de calor principal, que utiliza nitrógeno de desperdicio como medio de refrigeración.

#### 2.2.2. DESTILACION DEL AIRE, ADSORCION DE HIDROCARBUROS Y OBTENCION DE NITROGENO Y OXIGENO LIQUIDOS

Aquí el aire entrará a la columna de destilación, que es del tipo doble para producir el nitrógeno y oxígeno líquidos. La superficie que separa las dos columnas es un rehervidor-condensador. Este está compuesto por una serie de tubos que se encuentran en la cabeza de la columna de alta

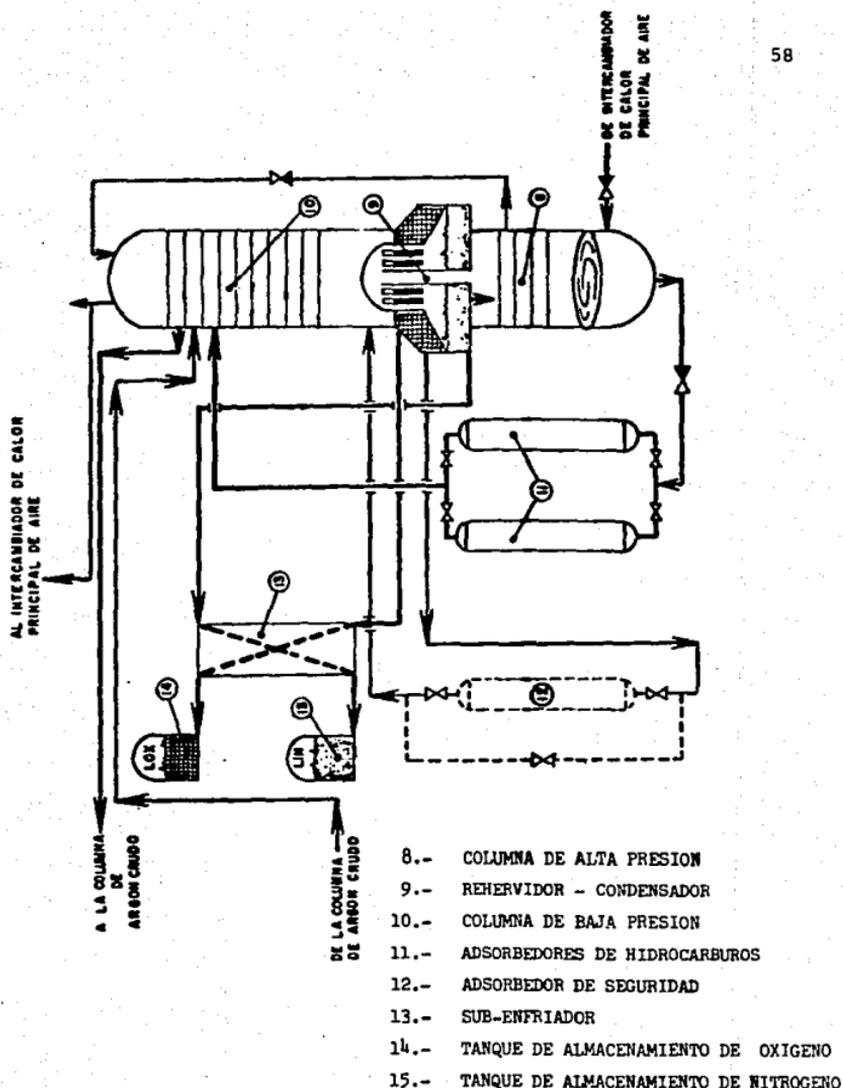


FIGURA 2.5. 2a. ETAPA: DESTILACION DEL AIRE, ADSORCION DE HIDROCARBUROS Y OBTENCION DE NITROGENO LIQUIDO Y OXIGENO LIQUIDO

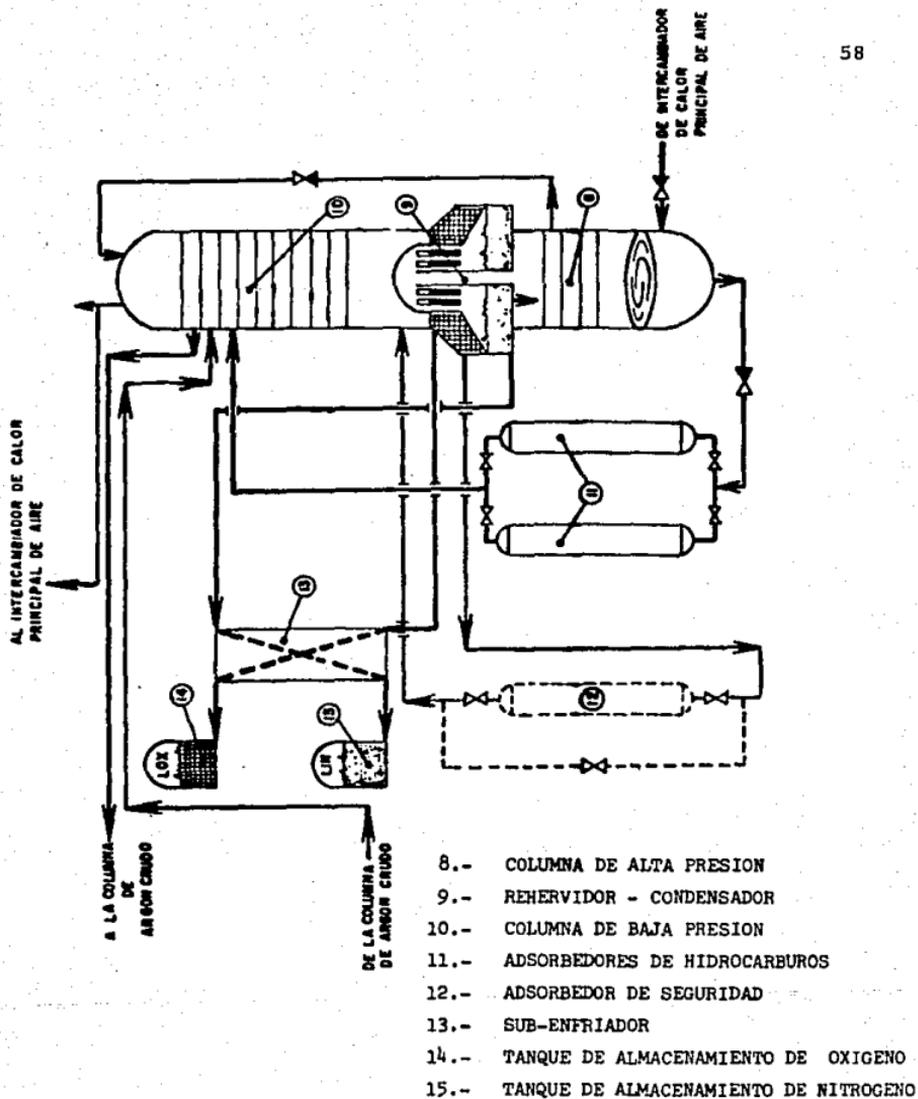


FIGURA 2.5. 2a. ETAPA: DESTILACION DEL AIRE, ADSORCION DE HIDROCARBUROS Y OBTENCION DE NITROGENO LIQUIDO Y OXIGENO LIQUIDO

presión, la cual se proyecta dentro de la base de la columna de baja presión. La parte de la columna por debajo del rehervidor-condensador es la columna de alta presión, y la parte de la columna por arriba del mismo es la columna de baja presión.

El flujo de aire alta presión, habiendo pasado por el sistema de purificación de aire y por el intercambiador de calor principal de la primera etapa descrita es expandido por la primera válvula de expansión de 21 Kg/cm<sup>2</sup> a 6 Kg/cm<sup>2</sup>. Este flujo de aire pasa entonces directamente dentro del fondo de la columna de alta presión, como alimentación a la columna. Una vez alcanzadas las condiciones de operación estables en el ciclo continuo, se formará una acumulación de líquidos en el fondo de la columna de alta presión que tendrá un contenido de oxígeno de aproximadamente 40%. A este líquido se le suele llamar oxígeno crudo.

Es en la columna de alta presión donde se consigue la mayor parte de la purificación del nitrógeno. Conforme la corriente de vapor asciende a través de la columna de alta presión se va haciendo progresivamente más rica en nitrógeno. Cuando este vapor hace contacto con el rehervidor-condensador, se condensa en líquido. Obviamente para condensar el vapor de nitrógeno, que para una presión determinada tiene una temperatura de condensación más baja que el oxígeno, debe encontrarse un método para hacer lo suficientemente fría la superficie condensadora del

rehervidor-condensador. Esto se logra reduciendo la presión del oxígeno líquido tomado de la base de la columna a alta presión a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> antes de que entre a la columna de baja presión. Esta reducción en presión de 6Kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> da como resultado la reducción de temperatura lo suficientemente baja para condensar el nitrógeno a 6 Kg/cm<sup>2</sup>. Cuando el oxígeno líquido se encuentra en un lado del rehervidor-condensador y el nitrógeno gaseoso en el otro lado, están en contacto térmico, por lo tanto el oxígeno hierve y el nitrógeno es condensado. Cuando el nitrógeno líquido cae de la superficie del rehervidor-condensador, alguna parte se derrama directamente dentro de las charolas de la columna de alta presión para actuar como reflujo, que es la corriente líquida que va hacia abajo. El resto del nitrógeno condensado cae dentro de una charola colectora cercana al tope de esta columna. Una parte del nitrógeno de la columna de alta presión es extraída y expandida también de 6 Kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> a través de la válvula de expansión de nitrógeno, la cual es descargada al tope de la columna de baja presión. Para proporcionar el reflujo para dicha columna otra parte es enviada de la charola colectora a un subenfriador y de aquí al tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido.

La línea que sale del fondo de la columna de alta presión lleva oxígeno crudo a una válvula de expansión de oxígeno. Esta reduce la presión del oxígeno crudo a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> y alimenta a la columna de baja presión en algún

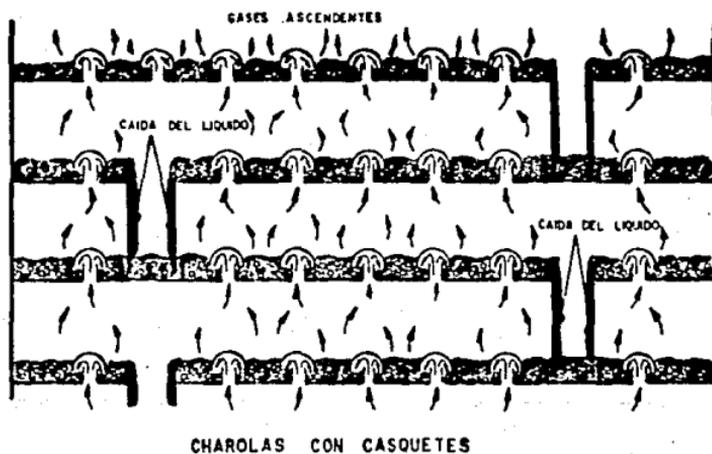
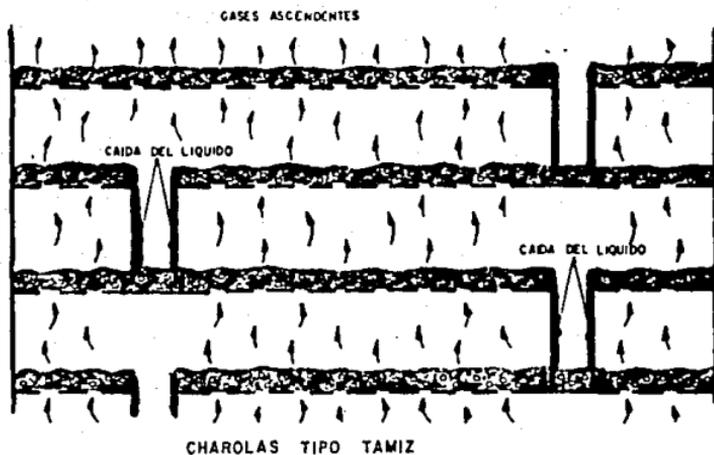


FIGURA 2.6. TIPOS DE CHAROLAS PARA COLUMNA DE DESTILACION

punto intermedio. En el fondo de la columna de baja presión está el recolector de oxígeno líquido puro, de donde es extraído para ser enviado al subenfriador y de aquí también a su tanque de almacenamiento como oxígeno líquido. Como la proporciones líquidas y de vapor varían de un extremo de la columna a otro, la corriente de oxígeno crudo deberá introducirse en el nivel más apropiado para obtener el equilibrio de la mezcla.

Debido a las descargas industriales y los contaminantes naturales en la atmósfera, las impurezas de hidrocarburos como metano, etano y acetileno están siempre presentes en el aire. El aire de alimentación a una planta de separación de aire contiene por lo tanto, hidrocarburos. Debido a su temperatura de ebullición más elevada en comparación con el oxígeno líquido crudo en el fondo de la columna de alta presión, estos hidrocarburos pasarán a la columna de baja presión concentrándose en el rehervidor-condensador formando una mezcla explosiva con el oxígeno líquido.

El hidrocarburo más simple, que es el metano, no entraña un serio problema a la operación de la planta debido a que se evapora con el oxígeno líquido en el rehervidor-condensador. Otros hidrocarburos como el etano y el acetileno, no son evaporados y podrían acumularse en la columna de baja presión. Es por esto que las plantas de separación de aire utilizan adsorbedores de hidrocarburos y/o adsorbedores de seguridad.

El adsorbedor de hidrocarburos se encuentra instalado en la corriente de oxígeno líquido crudo entre las columnas de alta y baja presión y está diseñado para limpiar esta corriente de hidrocarburos antes de que penetre a la columna de baja presión.

El adsorbedor de hidrocarburos es un recipiente de acero inoxidable en cuyo interior se encuentra un material adsorbente. Este material suele ser la sílica gel, que normalmente es granular, translúcida de color blanco, dura y vídrica. Además presenta una estructura sumamente porosa, no tóxica, no combustible y se daña fácilmente si se pone en contacto con el agua. Es un adsorbente preparado del silicato de sodio y ácido sulfúrico. El que sea "gel" indica el estado del material en una etapa de su fabricación.

En el proceso de adsorción de hidrocarburos, el oxígeno líquido crudo que contiene hidrocarburos contaminantes es pasado a través de un glóbulo o partículas de sílica gel. Este adsorbe selectivamente algunos hidrocarburos como el acetileno y el etileno, mientras que otros como el metano y etano sólo son adsorbidos débilmente. Esto ocurre ya que al inicio del proceso de adsorción, todos los contaminantes son adsorbidos por la sílica gel fresca. Sin embargo después de un corto período, la sílica gel es incapaz de adsorber el metano, etano y propano, por lo que pasan libremente a través del adsorbedor a la columna de baja presión donde son evaporados y enviados a la atmósfera. Por otra parte, la sílica gel adsorberá todo el acetileno y

el etileno durante varios días. Sin embargo, eventualmente se va saturando hasta el momento en que no adsorberá ninguno de los contaminantes. Mucho antes de que esta situación crítica ocurra, la sílica gel es regenerada por el proceso de reactivación, el cual se lleva a cabo fluyendo nitrógeno caliente a través de la sílica gel saturada. En el diagrama vemos que existen dos recipientes adsorbedores de hidrocarburos interconectados con las válvulas apropiadas para operar en paralelo, de manera que uno estará en servicio de adsorción mientras que el otro es reactivado. Esto proporciona servicio continuo del proceso de adsorción.

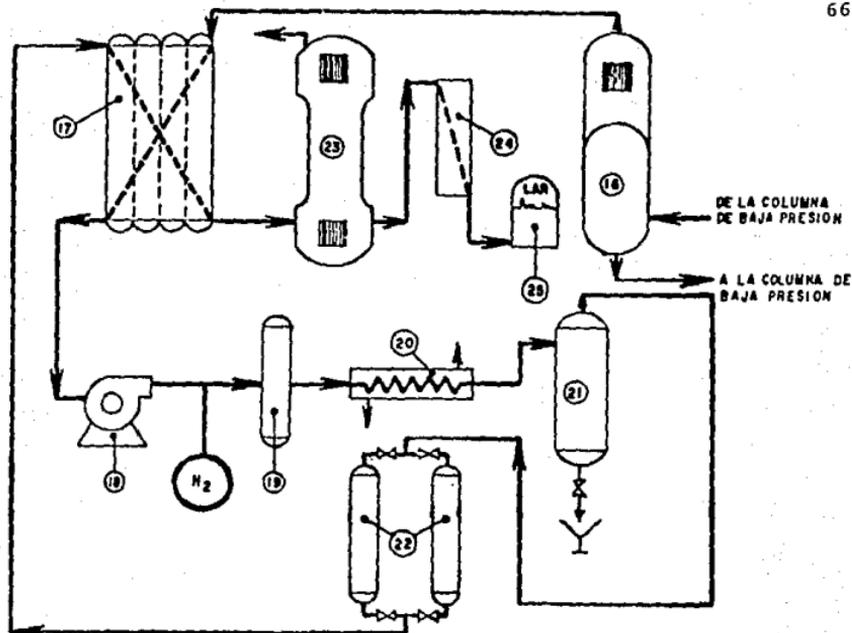
En plantas de separación de aire provistas con un equipo de malla molecular, se elimina la necesidad del adsorbedor de hidrocarburos ya que el sistema molecular además de eliminar humedad y bióxido de carbono también adsorbe los hidrocarburos como el acetileno y el etileno, mientras que otros hidrocarburos como el etano y el propano no son adsorbidos. Por tal motivo en estas instalaciones se utiliza un adsorbedor de seguridad, el cual tendrá la función principal de adsorber el etano y propano fundamentalmente. El recipiente adsorbedor de seguridad es idéntico al adsorbedor de hidrocarburos, así como su contenido y reactivación.

El oxígeno líquido de la columna de baja presión es enviado al adsorbedor de seguridad pasando a través de ésta y regresando posteriormente a la misma columna.

### 2.2.3. DESTILACION, PURIFICACION Y OBTENCION DEL ARGON LIQUIDO.

En esta etapa, una mezcla de aproximadamente 90% oxígeno y 10% argón es extraída de la parte media de la columna de baja presión (debido a que es en las cercanías de este punto donde la concentración de argón alcanza su punto máximo) y es enviada a la columna de argón crudo, introduciéndola por el fondo de ésta con la finalidad de incrementar la concentración de argón a medida que asciende este gas de la columna. El condensador de argón que se encuentra en esta columna licúa la mayor parte del gas ascendente, sirviendo este líquido a su vez como reflujo al caer al fondo de la columna para ser enviado posteriormente a la columna de baja presión.

Argón crudo se extrae como gas frío de la parte superior de la columna conteniendo aproximadamente 95% de argón, 2% de nitrógeno y 3% de oxígeno, para pasar por el exterior de los tubos del intercambiador de argón donde es calentado a temperatura ambiente aproximadamente por el intercambio calorífico en contracorriente con el argón que viene de la unidad de oxo o unidad de purificación de argón. En estas condiciones el argón crudo es comprimido y posteriormente dirigido al tanque de oxo. A esta corriente de argón crudo se le añade hidrógeno el cual reaccionará con el oxígeno para formar agua, que como sabemos lleva una relación hidrógeno-oxígeno de 2 a 1. Esto es, que si en el argón crudo se tuvieran 2 unidades de oxígeno y se mezclaran



- 16.- COLUMNA DE ARGON CRUDO
- 17.- INTERCAMBIADOR PRINCIPAL, DE ARGON
- 18.- COMPRESOR DE ARGON
- 19.- TANQUE DE OXO
- 20.- INTERCAMBIADOR DE CALOR
- 21.- SEPARADOR DE HUMEDAD
- 22.- SECADORES DE ALUMINA
- 23.- COLUMNA DE ARGON PURO
- 24.- SUB-ENFRIADOR
- 25.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ARGON LIQUIDO

FIGURA 2.7. 3a. ETAPA: DESTILACION, PURIFICACION Y OBTENCION DE ARGON LIQUIDO

con 7 de hidrógeno la reacción consumiría 2 unidades de oxígeno y 4 de las 7 de hidrógeno. Esto significa que el gas argón contiene ahora 3 unidades de hidrógeno, 2 unidades de agua y ninguna de oxígeno. Como todo el oxígeno ha reaccionado y ha sobrado algo de hidrógeno (3 unidades), llamaremos a esta reacción como una reacción con exceso de hidrógeno.

Una característica de la mezcla hidrógeno-oxígeno-argón es que puede ser flamable, ya que tiene suficiente combustible (hidrógeno) y comburente (oxígeno) para que se lleve a cabo una combustión completa. Por esta razón la concentración de hidrógeno no se deberá exceder del 3.1% y la del oxígeno del 4.9%. Otra característica de esta reacción es que debido a que se manejan bajas concentraciones no reacciona fácilmente, de manera que se necesita un catalizador para acelerar la reacción. Por lo tanto una vez eliminado el oxígeno en el recipiente de oxo, la corriente de argón fluye a través de un intercambiador de calor para eliminar parte del calor ganado en el recipiente de oxo. Del intercambiador de calor, el gas de proceso y el agua condensada fluyen al separador donde será eliminada parcialmente. La humedad remanente es eliminada haciendo pasar la corriente de gas argón a través de la alúmina contenida en el adsorbedor. Esta deshidratación la produce la alúmina por adsorción.

La alúmina es un material adsorbente granular formado por trihidrato de aluminio al que se ha hecho muy poroso y

desde luego adsorbente. Es químicamente inerte, no corrosivo, no tóxico y muy resistente al desgaste por rozamiento o abrasión.

La humedad existente en el gas queda retenida en la estructura porosa de la alúmina hasta su saturación, para lo que se tiene prevista la regeneración que consiste en hacer pasar argón caliente en sentido inverso a la normal circulación del gas argón, con la finalidad de desprender la humedad retenida por la alúmina. De esta manera una vez seca queda lista para entrar en servicio nuevamente. Así, mientras esto sucede el recipiente con alúmina seca instalado en paralelo al anterior, estará trabajando hasta su saturación de humedad.

El argón seco, libre de oxígeno con aproximadamente 2% de hidrógeno y un poco de nitrógeno es enfriado en el intercambiador de argón mediante el intercambio de calor que efectúa con el argón crudo frío proveniente de la columna de destilación de argón crudo. Posteriormente es enviado a la columna de argón puro, donde el nitrógeno e hidrógeno son separados y venteados fuera de esta columna. Mientras tanto el argón líquido puro se concentra en el fondo de donde es extraído para enviarse al subenfriador y de aquí a su almacenamiento.

En la columna de argón puro se tiene un condensador cuya función es la de condensar el vapor generado por la ebullición del argón líquido que se encuentra en el fondo de

la columna y que a su vez nos sirve como reflujo para la misma.

### 2.3 PROPIEDADES DE FLUIDOS CRIOGENICOS

A continuación se presenta una tabla con las propiedades termodinámicas y de transporte de fluidos comúnmente usado en la ingeniería criogénica. En el apéndice se contienen también propiedades de los fluidos.

PROPIEDADES DE LIQUIDO SATURADO A 1 ATM		HELIO LIQUIDO	HIDROGENO LIQUIDO	NEON LIQUIDO	NITROGENO LIQUIDO	AIRE LIQUIDO	FLUOR LIQUIDO	ARGON LIQUIDO	OXIGENO LIQUIDO
PUNTO NORMAL DE EBULLICION	K °R	3.19 5.74	20.27 36.5	27.09 48.8	77.36 139.3	78.8 142	85.24 153.4	87.28 157.1	90.18 162.3
TEMPERATURA CRITICA	K °R	3.32 5.98	33.2 59.7	44.4 79.9	126.1 227.0	133 240	144.0 259.2	150.7 271.2	154.6 278.3
PRESION CRITICA	MPa atm	0.117 1.15	1.315 12.98	2.65 26.2	3.39 33.5	3.92 38.7	5.57 55.0	4.89 48.3	5.04 50.1
TEMPERATURA DE PUNTO TRIPLE	K °R	...	13.9 25.1	24.54 44.26	63.2 113.7	...	53.5 96.4	83.8 150.8	54.4 98.0
PRESION DE PUNTO TRIPLE	kPa atm	...	7.20 0.0711	43.3 0.427	12.85 0.127	...	0.221 0.00218	68.8 0.679	0.132 0.0015
DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup> lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	58.9 3.68	70.79 4.42	1206 75.3	807.3 50.4	874 54.6	1507 94.1	1394 87.0	1141 71.2
CALOR LATENTE	kJ/kg Btu/lb <sub>m</sub>	8.49 3.85	443 190.5	85.9 36.9	199.3 85.7	205 88.1	166.3 71.5	161.9 69.6	213 91.6
CALOR ESPECIFICO	kJ/kg-K Btu/lb <sub>m</sub> -°R	4.61 1.10	9.68 2.31	1.83 0.437	2.05 0.490	1.96 0.468	1.54 0.367	1.136 0.271	1.695 0.405
VISCOSIDAD	μPa-s lb <sub>m</sub> /ft-hr	1.62 0.0039	13.2 0.0319	130 0.314	158 0.382	168 0.407	244 0.542	252 0.610	190 0.460
CONDUCTIVIDAD TERMICA	mW/m-K Btu/hr-ft-F	17.1 0.0099	118.5 0.0685	113 0.653	139.6 0.0407	141 0.0815	148 0.0855	123.2 0.0712	151.4 0.0875
CONSTANTE DIELECTRICA	ε	...	1.226	1.188	1.434	1.445	1.43	1.52	1.484
VELOCIDAD DEL SONIDO	m/s ft/sec	115 376	1189 3900	...	856 2810	866 2840	...	847 2780	902 2960

° TEMPERATURA DEL PUNTO LAMBDA=2.171 K= 3.91°R  
 † PRESION EN EL PUNTO LAMBDA=5.073 kPa=0.050 atm.

TÁBLA 2.1. PROPIEDADES DE FLUIDOS CRIOGENICOS

#### 2.3.1. NITROGENO LIQUIDO

El nitrógeno líquido es un fluido sin color, transparente que en apariencia se asemeja al agua. A presión atmosférica estándar (101.3 kPa) el nitrógeno líquido hierve

a 77.36°K y se congela a 63.2°K. El nitrógeno líquido saturado a 1 atmósfera tiene una densidad de 807 kg/m<sup>3</sup> en comparación del agua a 15.6°C que tiene una densidad de 999 kg/m<sup>3</sup>. Una de las diferencias importantes entre las propiedades del nitrógeno líquido y del agua (aparte de la diferencia en los puntos normales de ebullición) es que el calor generado en la vaporización del nitrógeno es mucho menor en magnitud que el del agua. En el punto normal de ebullición, el nitrógeno tiene un calor de vaporización de 199.3 kJ/kg, mientras que para el agua tiene un valor de 2257 kJ/kg.

El nitrógeno tiene un número atómico de 14 y es el mayor constituyente del aire (78.08% del volumen ó 75.45% de su peso).

### 2.3.2. OXIGENO LIQUIDO

El oxígeno líquido tiene un color azul característico causado por la presencia de un polímero o moléculas de cadena larga de O<sub>4</sub>. El oxígeno líquido a 1 atmósfera hierve a 90.18°K y se congela a 54.4°K. El oxígeno líquido saturado a 1 atmósfera es más denso que el agua a 15°C (densidad del oxígeno líquido=1141 kg/m<sup>3</sup>). El oxígeno es ligeramente magnético (paramagnético) en contraste con los otros fluidos criogénicos que son no magnéticos. Midiendo la susceptibilidad magnética, pequeñas cantidades de oxígeno pueden ser detectadas en mezclas de otros gases. Debido a su actividad química, el oxígeno presenta problemas de

seguridad en su manejo. Graves explosiones resultan de la combinación de oxígeno y lubricantes.

El oxígeno tiene un número atómico de 16. Es la segunda sustancia más abundante en el aire (20.95% en volumen ó 23.2% en peso).

### 2.3.3. ARGON LIQUIDO.

El argón líquido es transparente, sin color y con propiedades similares a las del nitrógeno líquido. Es inerte y no es tóxico. A 1 atmósfera de presión, el argón líquido hierve a 87.3°K y se congela a 83.3°K. El argón líquido saturado a 1 atmósfera es más denso que el oxígeno como debemos esperar debido a que el argón tiene un peso molecular mayor que el del oxígeno (densidad del argón=1394 kg/m<sup>3</sup> para líquido saturado a 1 atmósfera). La diferencia entre el punto de ebullición normal y el punto de congelación para el argón es de tan sólo 3.5°K.

El argón está presente en el aire atmosférico en una concentración de 0.934% en volumen ó 1.25% en peso. Debido a que el punto de ebullición del argón se encuentra entre el del nitrógeno líquido y del oxígeno líquido (poco más cercano al del oxígeno líquido), un grado de crudeza del argón (90-95% de pureza) se puede obtener añadiendo una pequeña columna de recuperación de argón auxiliar en una planta de separación de aire.

#### 2.3.4. NEON LIQUIDO.

El neón es otro gas que se puede producir como un subproducto en una planta de separación de aire. El neón líquido es un líquido incoloro, transparente que hierve a 1 atmósfera a 27.09°K y se congela a 24.54°K. El punto de ebullición del neón está de alguna manera por encima del que tiene el hidrógeno líquido. Pero dado el hecho de que el neón es inerte, tiene un mayor calor de vaporización por unidad de volumen, y tiene una densidad mayor, hacen que sea un refrigerante atractivo comparado con el hidrógeno.

#### 2.3.5. OTROS FLUIDOS CRIOGENICOS NO DERIVADOS DEL AIRE

El FLUOR líquido es un líquido con un color ligeramente amarillo y cuyo punto normal de ebullición es de 85.24°. A 53.5°K y 101.3 kPa (1 atmósfera), el fluor líquido se congela como un sólido amarillo, pero arriba de un subenfriamiento a 45.6°K se transforma en un sólido blanco. El fluor líquido es uno de los líquidos criogénicos más densos (densidad en su punto normal de ebullición=1507 kg/m<sup>3</sup>).

El fluor se caracteriza químicamente por su extrema reactividad. El fluor reacciona con casi todas las sustancias inorgánicas. Si el fluor tiene contacto con hidrocarburos reaccionará hipergólicamente con mucho calor de reacción, el cual muchas veces es suficientemente alto que el contenedor metálico en que se encuentra se enciende. Algunos metales como aceros inoxidable de bajo carbón y el

monel, que son usados en sistemas de fluor, desarrollan una película protectora en la superficie al ponerse en contacto con el fluor gaseoso. Esta película en la superficie previene la propagación de la reacción fluor-metal en todo el volumen del metal.

El fluor es altamente tóxico. La razón de concentración fatal para animales es de 200 ppm-hr. Esto es, que para una exposición de 1 hora, 200 ppm de fluor es fatal; para una exposición de 15 minutos, 800 ppm es fatal; y para una exposición de 4 horas, 50 ppm es fatal. La máxima concentración permitida para la que el hombre pueda estar expuesto se considera debe de ser de 1 ppm-hr. La presencia de fluor en el aire puede ser detectado por su olor picante e irritante en concentraciones tan bajas como 1 a 3 ppm. Debido a su alta toxicidad, el fluor líquido casi no es utilizado.

El METANO es el principal componente del gas natural. Es un líquido incoloro, claro que hierve a 1 atmósfera a  $111.7^{\circ}\text{K}$  y se congela a  $88.7^{\circ}\text{K}$ . El metano líquido tiene una densidad aproximada de uno y medio de la que tiene el nitrógeno líquido (densidad del metano= $424.1 \text{ kg/m}^3$ ). El metano forma mezclas explosivas con el aire en concentraciones que van de 5.8 a 13.3% en volumen.

El HIDROGENO líquido tiene su punto normal de ebullición en  $20.3^{\circ}\text{K}$  y una densidad en su punto normal de ebullición de tan sólo  $70.79 \text{ kg/m}^3$ . La densidad del hidrógeno líquido es de 1/14 de la del agua, lo que

significa que es el más ligero de todos los líquidos. El hidrógeno líquido es inodoro e incoloro y sólo no puede mantener la combustión. En combinación con el oxígeno o aire, es sin embargo bastante flamable. Trabajos experimentales han mostrado que mezclas hidrógeno-aire son explosivas en un espacio sin confinar en un rango de 18 a 59% hidrógeno en volumen.

El HELIO tiene dos isótopos estables: He4, que es el más común, y He3. El helio gaseoso ordinario contiene alrededor de  $1.3 \times 10^{-4}$  % He3, así que cuando hablamos de helio o helio líquido, nos deberemos referir al He4, a menos que se nos indique lo contrario. El He4 líquido tiene un punto normal de ebullición de 4.214°K y una densidad en este punto de 124 kg/m<sup>3</sup> o cercano al 1/8 que la del agua. El helio líquido no tiene punto de congelación a una presión de 101.3 kPa (1 atmósfera). De hecho, el helio líquido no se congela abajo de su propia presión de vaporización aunque la temperatura se reduzca al cero absoluto. A cero absoluto, el helio 4 líquido deberá de ser comprimido a una presión de 2529.8 kPa (24.97 atm.) antes de que se congele. El calor de vaporización del He4 líquido es su punto normal de ebullición es 20.90kJ/kg que es tan sólo 1/110 el del agua.

Si bien el helio está clasificado como un gas raro, y es uno de los gases más difíciles de licuar, sus propiedades tan inusuales han despertado tanto interés que el helio ha sido objeto de mucho más estudios teóricos y experimentales que cualquier fluido criogénico.

## 2.4. SEGURIDAD

### 2.4.1. EN EL MANEJO DE LIQUIDOS CRIOGENICOS

Cuando se maneje el nitrógeno líquido es necesario tener conocimiento de los efectos que produce el tener contacto con él y la manera en que uno se podría cuidar.

De tal manera, deberán usarse cuando se maneje el nitrógeno líquido ropas de algodón, lana, poliéster, etc. El equipo de protección personal incluye para la cabeza y los ojos, accesorios tales como anteojos de seguridad, cascos y caretas. Las manos, los brazos, las piernas y los pies se protegen con guantes no ajustados, botas, zapatos y vestimentas en general de algodón, porque siempre existirá la posibilidad de una exposición al derramado del líquido. Los anteojos, máscaras y guantes deberán ser de material impermeable.

El conocimiento de los primeros auxilios, tiene una gran importancia en cualquier lugar que se necesite de ellos, para ayudar a personas accidentadas en casos urgentes.

La baja temperatura del nitrógeno líquido produce rápido congelamiento profundo con extensa destrucción del tejido humano que ataque. Las temperaturas criogénicas provocan una "quemadura en frío" resultante del contacto físico con el nitrógeno líquido o con líneas de nitrógeno líquido (o vapores de nitrógeno líquido), que pueden reconocerse por las áreas amarillo pálido que deja en la

piel, para después tomar un color rosado conforme la circulación de la sangre se restaura.

El procedimiento de auxilio en tales casos es el siguiente:

- a) Aflojar cualquier ropaje de la víctima que pueda impedir la circulación de la sangre al área afectada.
- b) Rocíe el área afectada con grandes cantidades de agua tibia para deshielar la quemadura lentamente. Esto se hace así, porque ayuda a disminuir el dolor de la víctima, de lo contrario si fuera rápidamente aumentaría extremadamente el dolor.
- c) No frote la lesión porque el frotamiento puede dañar aún más el tejido quemado (congelado).
- d) No aplique calor en forma de almohadillas calientes o ventiladores, porque esto puede sobreimponer una quemadura termal a la lesión ya existente.
- e) Cubra la lesión con un vendaje de protección estéril, o con sábanas limpias si el área quemada es grande, y proteja el área de un daño posterior.
- f) Solicitar atención médica calificada cuanto antes ya que la víctima puede sufrir arritmias cardíacas (irregularidad en el ritmo del corazón).

#### 2.4.2. EN ATMOSFERAS DEFICIENTES DE OXIGENO

El nitrógeno es no tóxico, pero no mantendrá la vida. En concentraciones suficientes el nitrógeno gaseoso actuará como un asfixiante simple al desplazar la cantidad de

oxígeno en el aire circundante, que es necesario para la respiración. Se ha establecido un mínimo de contenido de oxígeno atmosférico del 19% para áreas de trabajo como protección contra riesgos de asfixia.

Sabemos que la respiración normal requiere un 21% de contenido de oxígeno atmosférico, pero el nitrógeno en cantidades mayores puede desplazarlo y como este gas no se puede ver ni oler, el personal que sospeche la presencia del nitrógeno en exceso (por acumulación), tendrá que utilizar un indicador analizador para verificar el contenido de oxígeno en el área.

Debemos tener en cuenta que, la respiración es una interacción química entre la sangre y el oxígeno. Esta interacción ocurre en los alveolos, que son pequeñas estructuras bolsiformes que están contenidas en los pulmones. En los alveolos, el oxígeno forma una liga química con la hemoglobina (materia colorante roja de la sangre) acarrada por la sangre, y es transportada a todos los órganos del cuerpo.

Cuando el nitrógeno o cualquier otro asfixiante simple, está presente en cantidades lo bastante grande para desplazar el volumen de oxígeno necesario (provoca bajas concentraciones de oxígeno), la liga hemoglobina-oxígeno no puede formarse, y el cuerpo se ve necesitado de oxígeno. La sangre privada del oxígeno llegará al cerebro en 10 segundos, y la inconciencia puede sobrevenir rápidamente.

Los síntomas de asfixia simple que se producen por la exposición a atmósferas deficientes de oxígeno pueden variar ligeramente, dependiendo de la condición física normal de la víctima.

Los síntomas que se producen generalmente son: mareos, náuseas, vómitos, pérdida de la conciencia y muerte. La muerte puede sobrevenir en segundos sin aviso alguno. La siguiente tabla muestra algunos porcentajes aproximados, y sus síntomas correspondientes:

% O <sub>2</sub>	Síntomas
12-14%	Respiración profunda, pulso acelerado, pobre coordinación.
10-12%	Respiración rápida y superficial, mareos, juicio deteriorado y labios azules.
8-10%	Náusea, vómitos, inconciencia, cara grisácea.
6-8%	8 minutos, fatal 100%; 6 minutos, fatal 50%; 4-5 minutos, recuperación con tratamiento.
4%	Comatosidad en 40 segundos, convulsiones, cesa la respiración, muerte.

Las personas que sufran falta de oxígeno deberán ser retiradas a áreas con atmósfera normal. Ahora, si la víctima no está respirando, suministrarle respiración de boca a boca y oxígeno complementario.

## 2.5 TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL NITROGENO LIQUIDO.

El almacenamiento, carga, distribución y descarga del nitrógeno depende de su estado físico, ya sea líquido o

gaseoso. Puesto que el nitrógeno es no corrosivo, no requieren materiales de construcción especiales, excepto que deben ser apropiados para usarlos a las temperaturas a las que se encuentra el nitrógeno líquido.

El diseño de los recipientes y tuberías que se utilizarán en el servicio del nitrógeno líquido se deberán basar en las normas de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) que implica la presión y temperatura y en especificaciones de Ingeniería. Aunque principalmente se usa nitrógeno gaseoso, también se almacena frecuentemente como un líquido. Con el nitrógeno líquido se presentan dos ventajas que son: ocupa menos volumen y es menos costoso que el almacenamiento gaseoso de alta presión.

Dependiendo de la cantidad de nitrógeno líquido requerido por el usuario, éste se almacena y distribuye en varios tipos de recipientes. Los recipientes comúnmente usados son: termos (garrafas), tanques y cilindros.

Dependiendo del diseño del recipiente y del volumen del producto almacenado, las cantidades de vaporización suelen ser relativamente bajas como un 0.4% y altas como el 3% del volumen del recipiente por día.

Los termos o garrafas son recipientes sin presión interior. Consta de una tapa de poliuretano colocada encima de la boca del tubo del cuello evitando que la humedad atmosférica se congele y obstruya el tubo del cuello. La unidad de medida de capacidad para el termo es el litro y se pueden encontrar de 5 a 200 litros de capacidad.

Para los termos con capacidad de 50 litros ó más, el nitrógeno se debe extraer utilizando una baja presión y un tubo de transferencia. Para los de menor capacidad sólo se vacía el nitrógeno líquido directamente en recipientes más pequeños.

Los tanques para el almacenamiento de líquidos se fabrican en varios tamaños desde muy pequeños hasta tanques con capacidad para miles de litros. Las formas más comúnmente usadas son esféricas, cilíndricas de fondo plano y cilíndricas con tapas semiesféricas.

Los tanques de almacenamiento en forma cilíndrica se utilizan cuando la necesidad de almacenamiento excede a los 378542.6 litros (100000 galones). Estos tanques operan a una presión menor de  $0.35136 \text{ kg/cm}^2$  ( $5 \text{ lb/pulg}^2$ ).

Los tanques para el almacenamiento de líquidos consisten de un tanque interior y un tanque exterior. El primero es el que almacena el nitrógeno líquido y debe ser fabricado de aluminio o aceros especiales, tales como el inoxidable, para soportar las bajas temperaturas. El exterior está hecho de acero al carbón. El espacio entre estos dos se conoce con el nombre de espacio anular y es llenado con un material aislante, para que el producto no se vaporice provocando pérdidas.

El tanque interior está equipado con un dispositivo anti-sifón, para impedir que el nitrógeno líquido fluya de regreso en caso de una rotura en la línea de llenado.

Los tanques pueden estar equipados con diversos dispositivos de protección tales como:

- Dos controladores de presión, uno para alta presión y otro para baja presión. Están instalados en todos los tanques de almacenamiento, con objeto de mantener la presión del tanque dentro de los límites de diseño correctos. El primero se utiliza para ventear el exceso de vapor a la atmósfera, y el segundo para añadir vapor al tanque.

- Las válvulas de seguridad y los discos de ruptura ofrecen una protección a los tanques de almacenamiento, contra la presión y las temperaturas excesivas involucradas.

Otro tipo de recipiente para el almacenamiento son los cilindros tipo termo llamados comúnmente Dewars, los cuales se utilizan para cantidades de nitrógeno líquido pequeñas, como de 100 a 200 litros.

Estos recipientes consisten de dos recipientes, uno exterior y uno interior. El tanque interior es de acero inoxidable y el tanque exterior es de lámina de acero al carbón.

Entre los dos tanques se encuentra un aislante de poliuretano recubierto de papel aluminio para que el calor no se transmita del exterior al interior del recipiente.

Además se tiene sobre el aislamiento y entre el tanque exterior un gasificador ambiental, todo esto al alto vacío. El gasificador tiene la función de tomar LIN, que al pasar a través del gasificador cambia de estado líquido al estado

gaseoso. Un cilindro de este tipo se representa en la siguiente figura:

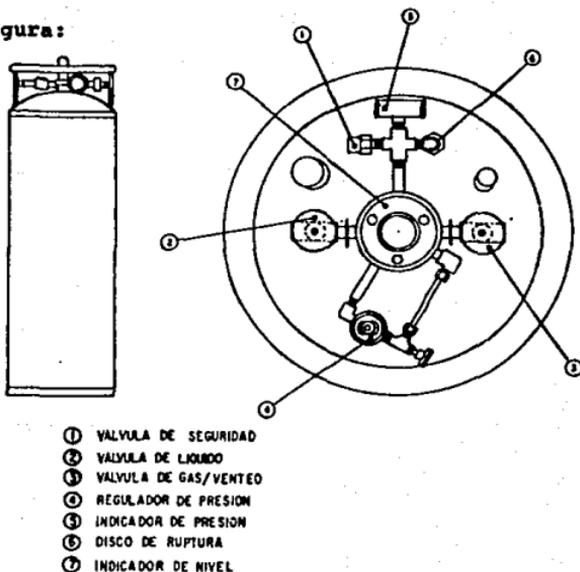


FIGURA 2.8. ESQUEMATIZACION DE UN TANQUE DEWAR

Dentro de los dispositivos de seguridad con que cuentan los cilindros Dewar, se tienen los discos de ruptura. Cuentan con 2 discos de ruptura, donde uno protege el espacio anular por si éste se llegara a presionar en caso de una fuga en el tanque interior, o bien si llegara a perforar el gasificador que se encuentra entre los dos tanques.

El otro disco de ruptura se encuentra en la línea de presión del tanque interior, éste operará si por alguna razón no opera la válvula de seguridad del cilindro. Este disco abre a 29.8 kg/cm<sup>2</sup> de presión.

Otro dispositivo es la válvula de seguridad, la cual opera a  $16.5 \text{ kg/cm}^2$ . Así permite que el cilindro ventee la presión excedente que se genere dentro del tanque interior cuando no esté en uso el cilindro.

El regulador de presión nos servirá para mantener la presión del LIN desde  $3.51 \text{ kg/cm}^2$  a  $16.1 \text{ kg/cm}^2$  y se opera manualmente. En caso de que este regulador quede abierto, el producto se gasificará y hará abrir la válvula de seguridad.

Los termos devar cuentan con un indicador de líquido para checar que el recipiente esté lleno o vacío.

#### 2.5.1. ESPECIFICACIONES Y CAPACIDADES DE TANQUES

##### 2.5.1.1 ESTACIONES DE SERVICIO

Los tanques criogénicos para servicio, llamados también convertidores o estaciones de servicio, son utilizados para suministrar en estado gaseoso a presión constante el producto que el cliente recibe en estado líquido.

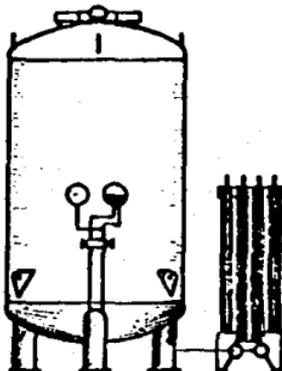


FIGURA 2.9. ESTACION DE SERVICIO

Los convertidores están diseñados y fabricados con alto vacío de acuerdo a normas y códigos vigentes como son código ASME sección VIII Div.1 Norma ANSI, AWS, ASTM. CGA (Compressed Gas Association) y Norma Oficial Mexicana NOM-H-17-1977

**Características:**

Presión de diseño.....18.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Presión máxima de trabajo.....17.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Presión de prueba hidrostática..27.9 kg/cm<sup>2</sup>  
 Presión máxima de vacío.....50 Micrones  
 Material del cuerpo interior....SA-240-304

**Equipado con:**

Sistema dual de seguridad  
 Instrumentos de medición de nivel y presión  
 Sistema de válvulas y reguladores  
 Vaporizador de línea o consumo  
 Vaporizador de elevación de presión

MODELO	CAPACIDAD (LTS)		CONTENIDO (Kg)			DIMENSIONES (mts)	PESO Kg.	VAPORIZADOR DE CONSUMO
	TOTAL	DE TRABAJO	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	DIAM x ALTURA		
C	2 884	2 740	3 129	2 214	3 817	1.66 x 3.58	2 500	2 x 3
1500	6 053	5 790	6 967	4 846	6 040	2.03 x 4.48	4 670	4 x 3
3000	12 584	11 894	13 651	9 659	—	2.54 x 5.23	6 150	6 x 3
6000	23 576	22 397	25 977	18 097	—	2.54 x 8.25	13 260	6 x 6
9000	36 129	34 323	39 197	27 733	—	3.11 x 7.92	17 300	6 x 6
S	39 835	37 843	43 217	30 977	—	3.11 x 8.96	19 800	6 x 6
H								

TABLA 2.2. CAPACIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE ESTACIONES DE SERVICIO

### 2.5.1.2 TANQUES CRIOGENICOS PARA TRANSPORTE

Para el transporte de líquidos criogénicos se fabrican dos tipos de unidades:

- a) Semi-remolques, con suspensión, perno rey de arrastre y tren de aterrizaje o patín integrado.
- b) Autotanque para ser montado sobre chasis comercial. Los recipientes para transporte están diseñados y fabricados con alto vacío.

Están fabricados de acuerdo a normas y códigos vigentes como son: Código ASME Sección VIII Div. 1. Norma ANSI, AWS, ASTM, CGA (Compressed Gas Association) y Norma Oficial Mexicana NOM-H-17-1977 y reglamento de tránsito.



FIGURA 2.10. TANQUES CRIOGENICOS PARA TRANSPORTE

#### Características:

- Presión de diseño.....Ver tabla
- Presión de trabajo.....Ver tabla
- Presión de prueba hidrostática...1.5 veces presión diseño
- Presión máxima de vacío.....50 Micrones
- Material del cuerpo interior.....SA-240-304

#### Equipado con:

- Sistema dual de seguridad
- Instrumentos de medición de nivel de presión y control de bombeo
- Sistemas de válvulas y bombeo
- Vaporizador de elevación de presión

MODELO	CAPACIDAD (LTS)		PRESION Kg/cm <sup>2</sup>		CONTENIDO (Kg.)			DIMENSIONES mt.	PESO
	TOTAL(Lts)	DE TRABAJO	DISEÑO	TRABAJO	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>	Ancho x Largo	Kg.
G	22 723	21 587	4.2	3.2	24 652	17 442	—	2.4 x 9.9	10 475
GM	23 993	22 798	4.2	3.2	26 029	18 417	—	2.4 x 10.4	10 875
GMM	26 743	25 408	4.2	3.2	29 015	20 530	—	2.4 x 11.4	12 150
TN	30 532	29 005	4.1	2.9	—	23 436	—	2.4 x 11.4	11 400
..									
ET	7 784	7 395	5.3	4.2	—	—	10 301	1.5 x 4.7	3 200
ETMM	10 081	9 577	5.3	4.2	10 837	7 738	—	2.1 x 6.5	4 100
EA	12 563	11 935	4.2	3.1	—	9 643	—	2.1 x 5.2	4 500

TABLA 2.3. CAPACIDADES Y CARACTERISTICAS DE TANQUES PARA TRANSPORTE

### 2.5.1.3. TANQUES CRIOGENICOS PARA ALMACENAMIENTO

Estos tanques se utilizan para almacenar fluidos criogénicos en los centros de llenado y distribución de gases. Carecen de vaporizador ya que su función es almacenar líquido a la presión más baja posible para después comprimirlo con una bomba reciprocante y gasificarlo con un vaporizador ambiental de alta presión.

Los tanques de almacenamiento son diseñados y fabricados al alto vacío de acuerdo a normas y códigos vigentes como son: Código ASME Secciones II, VIII, IX, Norma ANSI, AWS, ASTM, CGA (Compressed Gas Association) y Norma Oficial Mexicana NOM-H-17-1977.

#### Características:

Presión de diseño.....Ver tabla

Presión máxima de trabajo.....Ver tabla

Presión de prueba hidrostática...1.5 veces presión diseño

Presión máxima de vacío.....50 Micrones

Material del cuerpo interior.....SA-240-304

Material del cuerpo exterior.....SA-285-C

Equipado con:

Sistema dual de seguridad

Instrumentos de medición de nivel y presión

Sistemas de válvulas

MODELO	CAPACIDAD		PRESIONES		CONTENIDO			DIMENSIONES		PESO Kgs.
	TOTAL	DE TRABAJO	DISEÑO	TRABAJO	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	VERT.	HORIZ.	
	LTS.	LTS.	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kgs.	Kgs.	Kgs.	Mts.	Mts.	
N	14 338	13 621	6.4	5.4	15558	11005	18 974	6.20	—	8500
O	11 200	10 640	6.4	5.4	12 151	8597	14 821	5.13	—	4720
R	22 138	21 031	4.8	3.7	24 017	16993	29 296	6.20	—	11500
JMM	33 874	32 180	4.7	3.6	36780	26000	44827	—	7.25	14300
B	60 923	57 876	4.3	3.3	66094	46763	80 621	—	10.40	18000
S										

TABLA 2.4. CAPACIDADES Y CARACTERISTICAS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

#### 2.5.2. CONDICIONES ESPECIALES DE ALMACENAMIENTO DE NITROGENO LIQUIDO PARA CONGELACION

Quando se instalan tanques de almacenamiento y tubería para equipos de congelación por nitrógeno líquido las consideraciones más importantes a tomar en cuenta deberán ser la presión del tanque de almacenamiento, diámetro de tubería, trayectoria de la tubería y el aislamiento de la tubería.

Al considerar la presión del tanque de almacenamiento, habrá que saber que el exceso en la presión del mismo resultará en:

- Operación ineficiente del congelador debido a pérdidas flash que ocurren en la válvula de control del congelador y en las boquillas de aspersión.
- Reducción en la capacidad de refrigeración por unidad de LIN.

- Reducción en la capacidad de almacenamiento efectiva y de entrega del producto por unidad.

Una presión de almacenamiento inadecuada del nitrógeno líquido resultará en:

- Incremento de la presión de almacenamiento durante el llenado (si el transporte líquido tiene una mayor saturación que la presión de almacenamiento) causando problemas en los controles del congelador.

- Pérdidas por cambio de fase causados por la depresurización del producto entregado en la entrega del tanque del cliente (venteadado a la atmósfera) resultando en una aparente pobre eficiencia de congelación.

- Presión inadecuada en el congelador debidas a caídas de presión en la tubería y en las válvulas que acarrearán pobre eficiencia y control del proceso.

De acuerdo a datos históricos de operación de tanques, la presión de almacenamiento en los mismo no deberá ser menor a 10 psig y no mayor a 20 psig.

En el dimensionamiento de la tubería vemos que el excesivo dimensionamiento de la misma, resultará en:

- Inversión inicial muy alta.

- Altas pérdidas de LIN debidas a altos burbujeos.

El inadecuado dimensionamiento de la tubería resultará en:

- Altas caídas de presión y pérdidas por cambio de fase.

- Flujo inadecuado de LIN al equipo de congelación.

- Ondas debidas al flujo de 2 fases.

El dimensionamiento de la tubería para la operación de un sólo equipo de congelación deberá estar basada en el máximo flujo de demandará el mismo equipo con una caída máxima de presión de 3 a 5 psi desde el tanque. Conviene utilizar la tabla que se anexa de caídas de presión ya sea por diámetro de línea, longitud de línea y el flujo. Para minimizar la caída de presión global, deberá hacerse uso de una válvula de bola de compuerta extendida o utilizar la siguiente válvula de globo en tamaño respecto al tamaño de la tubería.

Cabe hacer notar que a menos que condiciones inusuales prevalecieran, la línea de alimentación de LIN deberá tener como mínimo, un diámetro de 25.4 milímetros.

El dimensionamiento de líneas para una instalación múltiple de equipos de congelación es un poco más complicado, especialmente cuando se hace para la instalación de equipos a futuro. La línea principal deberá ser inicialmente dimensionada para el flujo máximo de todos los equipos de congelación. La inversión en una gran línea pueden ser comparadas con la opción de instalar una línea adicional al instalarse nuevos equipos.

Al determinarse la localización del tanque de almacenamiento y del equipo de congelación, la trayectoria de la línea de suministro deberá ser considerada. Para la mejor operación del equipo de congelación, la línea de suministro deberá llevar las siguientes características:

- Mínimo de longitud.

- Mínimos cambios de dirección.
- Mínimo incremento en la elevación.

Por lo tanto, la condición óptima es la de tener el tanque de almacenamiento justo encima de la toma de entrada del equipo de congelación. En la realidad esto no es posible. Como es de esperarse la peor situación es la de tener el equipo de congelación mucho más lejos de lo deseado, mucho más alto que el tanque mientras que el LIN tendrá cambio de fase mientras sube y la presión de la línea decae (2.8 pies de elevación resulta en una caída de presión de 1.0 psi)

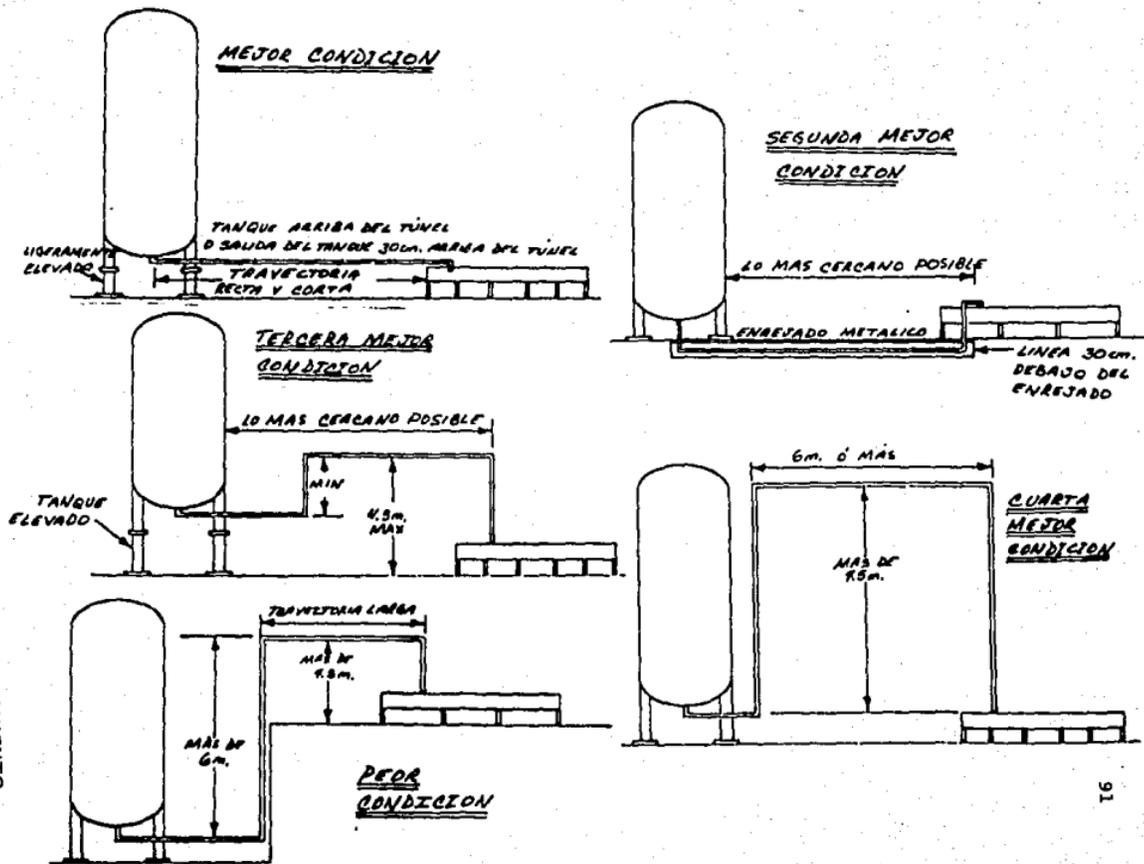
El uso de soportes para mantener horizontal la trayectoria de la línea y con la mínima elevación es una manera de mantener la línea corta y tener bajas pérdidas por cambio de fase. Llevando la línea debajo del piso, es muy recomendable.

### 2.5.3. COMPENSACION DE ALTURAS

Debido a que el nitrógeno líquido cambiará de fase en mayor proporción a una distancia y diferencia de alturas grandes, se deberá buscar que la salida del producto del tanque de almacenamiento de LIN esté en lo posible a la misma altura que la entrada de los equipos de congelación.

De tal manera para tratar de tener esta nivelación, se ha optado por colocar unas patas mayores a los tanques. Así, de acuerdo a los siguientes esquemas, nos damos cuenta de las mejores opciones en altura y en distancia. De igual

FIGURA 2.11. 5 FORMAS DE UBICAR EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO



manera se esquematiza la salida de la línea de suministro, a fin de obtener el mejor arreglo.

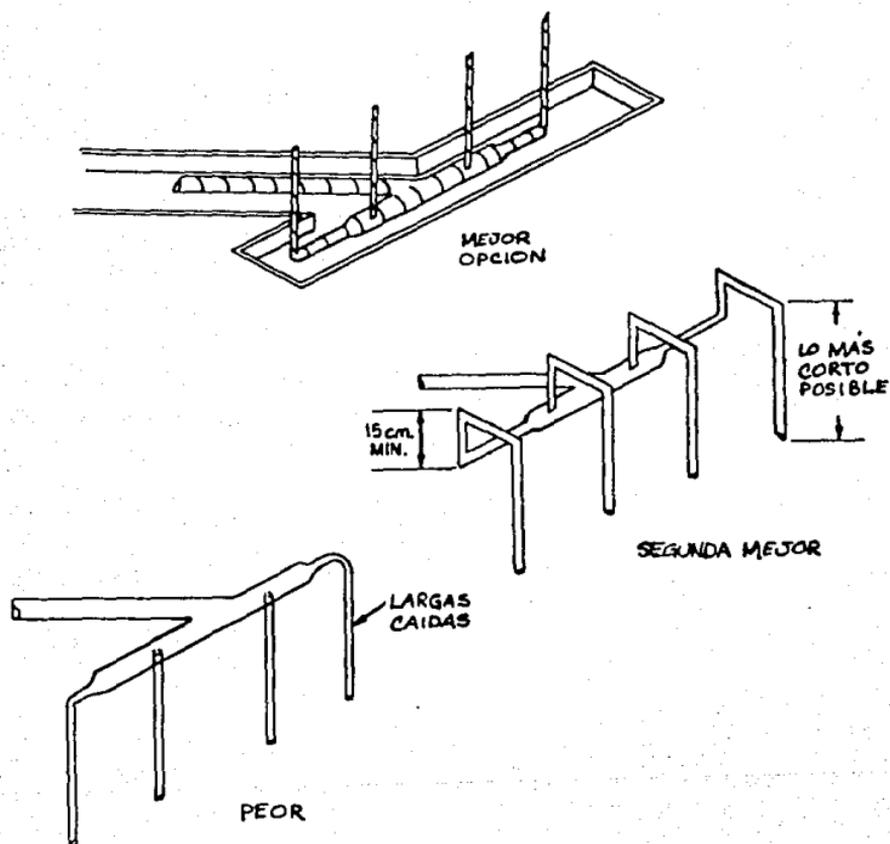


FIGURA 2.12. SALIDAS DE LA LINEA DE SUMINISTRO

## 2.6 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A TEMPERATURAS CRIOGENICAS

Familiarizarse con las propiedades y comportamiento de los materiales usados en cualquier sistema es esencial para el ingeniero de diseño. Como primera idea, uno debe suponer que observando la variación de las propiedades de los materiales a temperatura ambiente se podría extrapolar la información hacia las temperaturas criogénicas ( $-195^{\circ}\text{C}$  hasta  $-273^{\circ}\text{C}$ ) con regular confiabilidad. En algunos casos, tales como en las constantes elásticas, esto se puede hacer con aceptable precisión. Por otro lado, hay otros efectos significativos que aparecen solamente a muy bajas temperaturas. Algunos ejemplos de estos efectos incluyen la desaparición de calores específicos, superconductividad, y la transición ductibilidad-fragilidad en el acero al carbón.

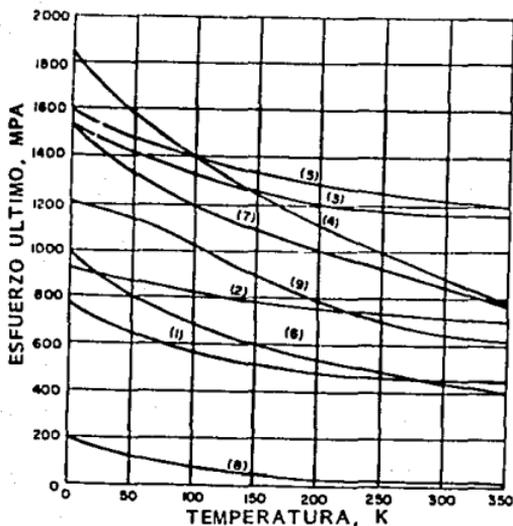
Ninguno de estos fenómenos puede ser inferido de las medidas de las propiedades hechas en temperaturas cercanas a la ambiental.

### 2.6.1. PROPIEDADES MECANICAS.

#### 2.6.1.1. ESFUERZOS ULTIMO Y DE CEDENCIA.

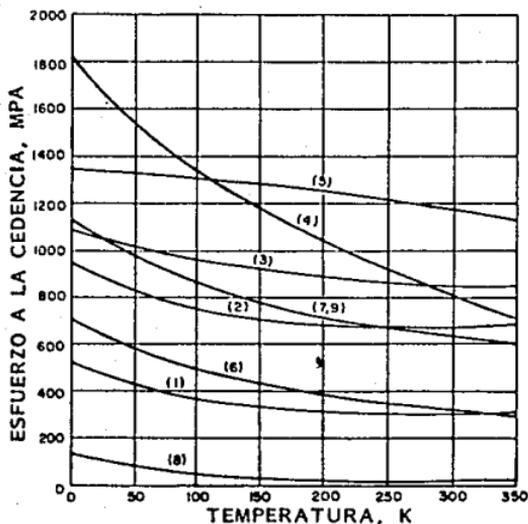
Para muchos materiales, hay un valor definido de esfuerzo a tensión en el que el estiramiento del material en una simple prueba de tensión empieza a incrementarse bastante rápido con el incremento de la misma. A este valor se le conoce como esfuerzo de cedencia  $S_y$  del material. Para otros materiales que no demuestran cambios agudos en la inclinación de la curva esfuerzo-deformación, el esfuerzo de

cedencia se define como el esfuerzo requerido para deformar permanentemente el material en una simple prueba de tensión en un 0.2%. El esfuerzo último  $S_u$  de un material se define como el esfuerzo máximo nominal alcanzado durante la prueba de tensión. La variación de temperatura de los esfuerzos últimos y de cedencia de ciertos materiales de ingeniería son mostrados en las siguientes tablas:



1. ALUMINIO 2024-T4
2. COBRE-BERILIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020
7. ACERO CON 9% Ni
8. TEFLON
9. INVAR-36

GRAFICA 2.1. ESFUERZO ULTIMO DE ALGUNOS MATERIALES



1. ALUMINIO 2024-T4
2. COBRE-BERILIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020
7. ACERON CON 9% DE NI
8. TEFLON
9. INVAR-36

GRAFICA 2.2. ESFUERZO DE CEDENCIA DE ALGUNOS MATERIALES

Muchos materiales de ingeniería son aleaciones, en las que los materiales usados como aleantes con átomos de diferente tamaño son añadidos a otros materiales conocidos como base (por ejemplo, el carbón se suma al hierro para producir acero). Si los átomos del elemento aleante son más pequeños que los del material base, los átomos más pequeños tienden a emigrar a regiones alrededor de las dislocaciones en el metal. La presencia de átomos de menor tamaño tienden a fijar las dislocaciones en su lugar o en su defecto hacen el movimiento de estos más difíciles. El proceso de cedencia en las aleaciones tiene lugar cuando un esfuerzo lo

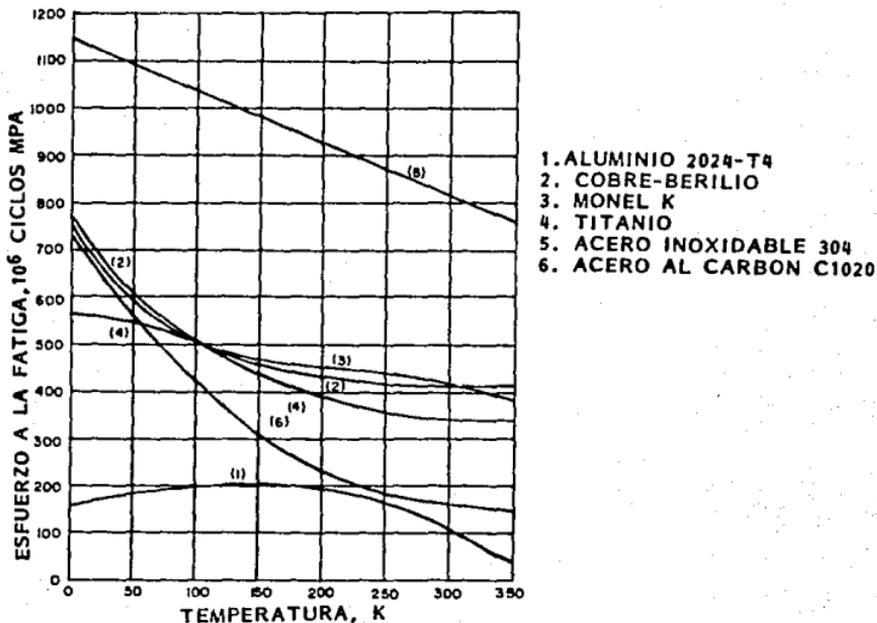
suficientemente grande como para sacar las dislocaciones de su lugar es aplicado. La deformación plástica ocurre por el movimiento de estas dislocaciones en el material.

Al tener un descenso en la temperatura, los átomos en el material vibran con menor intensidad. Debido al decremento en la agitación térmica de los átomos, es necesario aplicar un esfuerzo mayor para romper las dislocaciones. De esta manera podemos esperar que la resistencia a la cedencia en las aleaciones se incrementen conforme disminuyen las temperaturas. Se ha encontrado que esto ocurre para la mayoría de los materiales de ingeniería.

#### 2.6.1.2. RESISTENCIA A LA FATIGA.

Existen diversas maneras de expresar la resistencia de un material a los esfuerzos que varían con el tiempo, pero la forma más común sería el de hacer pruebas de doblado. Al esfuerzo requerido para originar una falla después de un cierto número de ciclos se le conoce como resistencia a la fatiga  $S_f$ . Algunos materiales, tales como aceros al carbón y aleaciones de aluminio-magnesio, tienen la propiedad de que la falla a la fatiga no ocurrirá si el esfuerzo es mantenido abajo de cierto valor, llamado límite de resistencia  $S_e$  sin importar cuantos ciclos hayan pasado. Las variaciones de la resistencia a la fatiga con respecto a la temperatura en  $10E6$  ciclos se muestran en la Tabla 2.7. Debido al tiempo que se necesita para desarrollar una prueba completa, los datos de fatiga a temperaturas

criogénicas, no son tantos como los que se obtienen para esfuerzos últimos y de cedencia. Sin embargo, para los materiales que han sido probados, se encontró que la resistencia a la fatiga se incrementa a medida que la temperatura disminuye.



GRAFICA 2.3. ESFUERZO A LA FATIGA,  $10^6$  CICLOS

La falla a la fatiga generalmente ocurre en tres etapas para el caso de más de  $10^3$  ciclos:

El inicio es una grieta microscópica, luego sigue un crecimiento lento de la grieta hasta la presentación de una grieta de tamaño crítico, y finalmente una falla rápida ya

sea por pasar del límite de la ductibilidad o por alguna incisión.

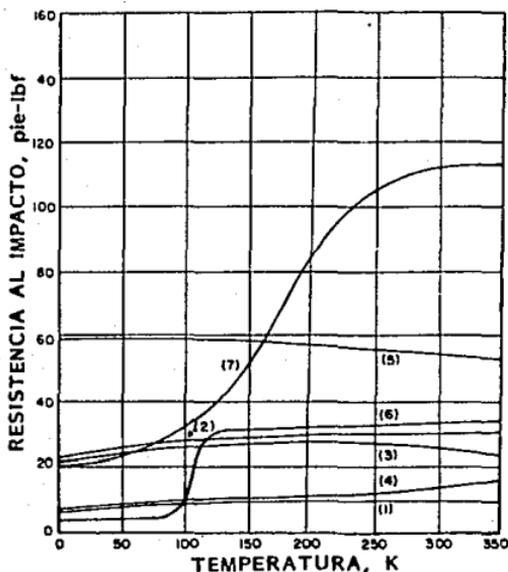
La iniciación de la grieta microscópica ocurre generalmente en la superficie de la muestra como resultado de alguna deformación causada por alguna incisión o por algún defecto cerca de la superficie. El crecimiento de la microgrieta ocurre cuando falla el material en la región de máximo esfuerzo alrededor del extremo de la falla. Conforme disminuye la temperatura del material, se requerirá de un esfuerzo mayor para extender la grieta. De tal manera, podemos esperar que la resistencia a la fatiga se incremente conforme la temperatura disminuye.

Para aleaciones de aluminio, se ha encontrado que el rango de resistencia a la fatiga permanece más o menos constante conforme baja la temperatura. Esto se puede usar al estimar la resistencia a la fatiga para materiales no ferrosos a temperaturas criogénicas si no tenemos datos de fatiga a bajas temperaturas.

#### 2.6.1.3. RESISTENCIA AL IMPACTO.

Las pruebas de impacto de Charpy y de Izod dan una medida de la resistencia de un material a las cargas de un impacto. Estas pruebas indican la energía que es absorbida por el material al ser fracturado por la aplicación repentina de una fuerza. La fuerza de impacto de Charpy es mostrada en la Tabla 2.4" para algunos materiales. Existen transiciones ductilidad-fragilidad en algunos materiales,

tales como aceros al carbón en donde en los rangos de temperatura ambiente hasta 78°K se reduce la resistencia al impacto a bajas temperaturas. El comportamiento de un metal es determinado en gran medida por su estructura cristalina.



1. ALUMINIO 2024-T4
2. COBRE-BERILIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020
7. ACERO CON 9% DE NI

GRAFICA 2.4. RESISTENCIA AL IMPACTO A BAJAS TEMPERATURAS

Cuando tiene una estructura molecular cúbica centrada en las caras (CCC) se tienen más planos de deslizamiento para las deformaciones plásticas que la que tendría uno de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC).

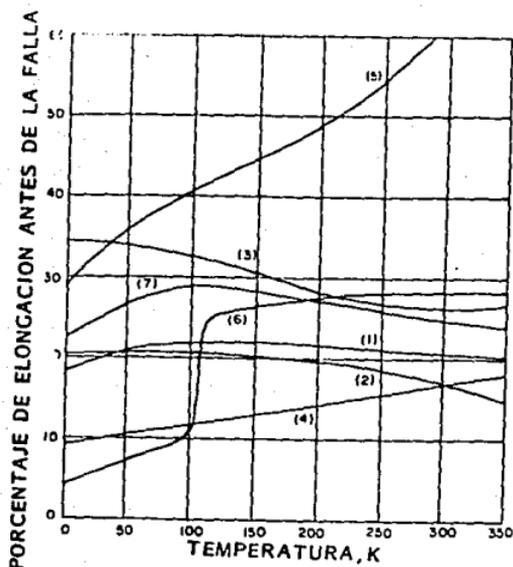
Los metales con una estructura molecular cúbica centrada en las caras o hexagonal tienden a fallar por

deformaciones plásticas en la prueba de impacto (debida a la relativa gran cantidad de energía absorbida antes de la ruptura) y retienen su resistencia al impacto conforme baja la temperatura. Los metales con una estructura cúbica centrada en el cuerpo tienden a alcanzar una temperatura en la que es más favorable energéticamente una fractura por rajadura (debido a la relativa poca cantidad de energía). De esta manera estos materiales se vuelven frágiles a bajas temperaturas.

Muchos materiales plásticos y de hule se vuelven frágiles al enfriar por debajo de una temperatura de transición. Dos notables excepciones son el Teflón y Kel-F, que son marcas registradas de materiales a base de fluor.

#### 2.6.1.4. DUREZA Y DUCTILIDAD.

La ductilidad de los materiales es indicada generalmente por el porcentaje de elongación a la falla o por la reducción en el área transversal de una muestra en una simple prueba a tensión. La línea que divide a un material frágil de un dúctil es de un 5% de elongación o bien un estiramiento de 0.05 cm./cm. hasta la falla. Los materiales que se estiran más de este valor antes de la falla son los llamados dúctiles. Aquellos con menos del 5% de elongación son los frágiles. La ductibilidad de ciertos materiales en función de la temperatura se muestra en la Tabla 2.9.



1. ALUMINIO 2024-T4
2. COBRE-ALUMINIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020
7. ACERO CON 9% DE NI

GRAFICA 2.5. PORCENTAJE DE ELONGACION DE VARIOS MATERIALES

Para materiales que no demuestran una transición de dúctil a frágil a bajas temperaturas, la ductibilidad normalmente se incrementa en la manera en que baja la temperatura. Para los aceros al carbón, que tienen una transición a bajas temperaturas, la elongación hasta la falla baja de 25 a 30% para los aceros suaves hasta 2 ó 3% durante la transición. Obviamente, estos materiales no podrán ser usados a bajas temperaturas en aplicaciones donde la ductibilidad es importante.

La dureza de los metales se mide de acuerdo a la marca que deja en la superficie del material un indentador estándar. Pruebas comunes de dureza son:

- Brinell (identador esférico)
- Vickers (identador piramidal de diamante)
- Rockwell (identador esférico o de diamante para varias cargas)

En general, la dureza de los metales medida con cualquiera de estos métodos es directamente proporcional al esfuerzo último del material, por consiguiente, la dureza se incrementa conforme la temperatura disminuye. Es de esperarse esta proporcionalidad ya que una prueba de penetración es básicamente una prueba de tensión en miniatura.

#### 2.6.1.5. MODULO DE ELASTICIDAD.

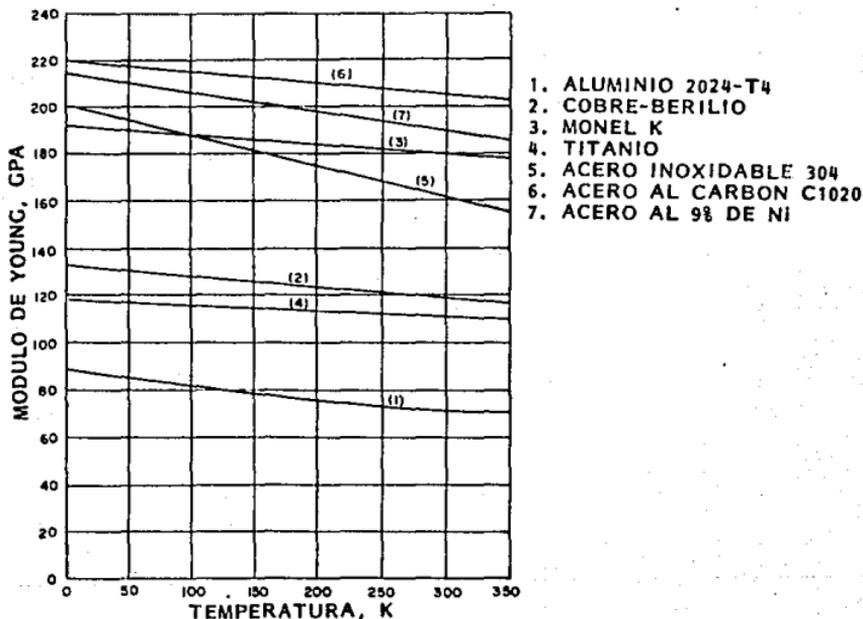
Existen 3 módulos de elasticidad que son los más usados:

- 1) Módulo de Young, E: es la razón de cambio del esfuerzo de tensión con respecto al estiramiento a temperatura constante en la región elástica.
- 2) Módulo de corte, G: es la razón del cambio del esfuerzo de corte con respecto al estiramiento a temperatura constante en la región elástica.
- 3) Módulo del volumen, B: es la razón del cambio de presión (de acuerdo a una fuerza uniforme en las 3 direcciones) con respecto al estiramiento en el volumen (cambio de volumen por unidad volumétrica) a temperatura constante.

Estos tres módulos se relacionan por medio de la relación de Poisson  $\tau$ .

$$B = \frac{E}{3(1-2\tau)} \quad G = \frac{E}{2(1+\tau)}$$

La variación del módulo de Young con la temperatura para algunos materiales se puede apreciar en la Tabla 2.10.



GRAFICA 2.6. MODULO DE YOUNG A BAJAS TEMPERATURAS

Conforme disminuye la temperatura, las fuerzas interatómicas e intermoleculares tienden a incrementarse debido al decremento de las vibraciones atómicas y moleculares. Ya que las reacciones elásticas son debidas a

estas fuerzas intermoleculares e interatómicas, uno podrá esperar que el módulo de elasticidad se incremente conforme disminuye la temperatura. También, se ha encontrado experimentalmente que la relación de Poisson para materiales isotrópicos no tiene cambios apreciables con el cambio de temperaturas en el rango criogénico. Por lo tanto, los tres módulos de elasticidad mencionados anteriormente varían de la misma manera con la temperatura.

## 2.6.2. PROPIEDADES TERMICAS.

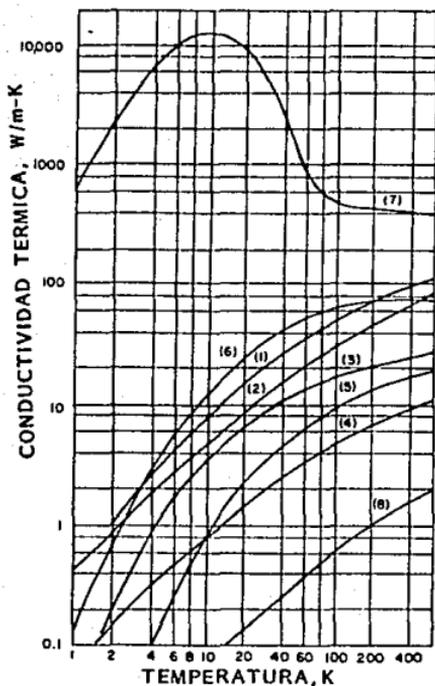
### 2.6.2.1. CONDUCTIVIDAD TERMICA.

La conductividad térmica  $K_t$  de un material está definida como la razón de transferencia de calor por unidad de área, dividido por el gradiente de temperaturas que causa que dicha transferencia se efectúe. La variación de la conductividad térmica se muestra en la Figura 2.7" (Ver apéndices de A-B para los valores de conductividad térmica para líquidos criogénicos y gases).

Para entender la variación de la conductividad térmica de los materiales a bajas temperaturas, uno debe conocer los diferentes mecanismos de transporte de energía por contacto directo. Existen básicamente tres tipos de mecanismos para la conducción de calor:

- 1) Movimiento de electrones, como en los conductores metálicos.
- 2) Transporte por energía vibracional, como en los sólidos.

- 3) Movimiento molecular, como en los sólidos orgánicos y en gases.



1. ALUMINIO 2024-T4
2. COBRE-BERILIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020
7. COBRE PURO
8. TEFLON

GRAFICA 2.7. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALGUNOS MATERIALES A BAJAS TEMPERATURAS

En los líquidos, el principal mecanismo de conducción de calor, es la transferencia por vibración molecular, mientras que para los gases el calor se conduce por una translación de energía (gases monoatómicos) y translación y rotación de energía (gases diatómicos).

### 2.6.2.2. CALOR ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS.

La capacidad calorífica  $C$  de un cuerpo está definida como la razón del calor absorbido  $dQ$ , a la elevación de temperatura  $dt$ :

$$C = \frac{dQ}{dt}$$

La capacidad calorífica es el calor absorbido por un cuerpo, por cada grado de elevación de su temperatura. Su unidad es  $1 \text{ cal/}^\circ\text{C}$  ó  $1 \text{ Btu/}^\circ\text{F}$ . La misma cantidad de calor,  $dQ$ , es cedida cuando la temperatura disminuye en  $dt$ .

La capacidad calorífica por unidad de masa del cuerpo  $C/m$ , se denomina calor específico de la sustancia que constituye el cuerpo, y se representa por  $c$ :

$$c = \frac{C}{m} = \frac{dQ}{m dt}$$

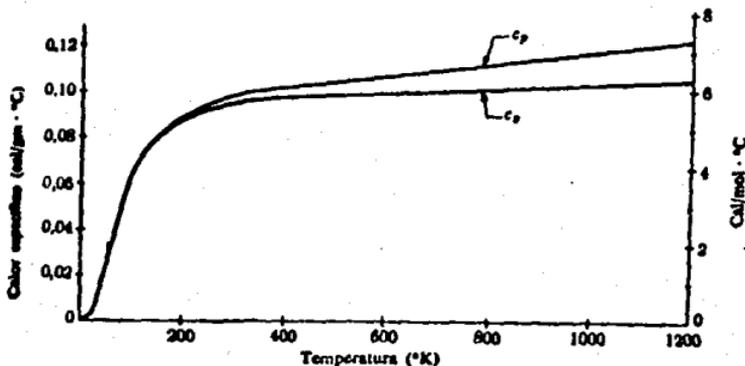
El calor específico es una propiedad de una sustancia dada, mientras que la capacidad calorífica es una propiedad de un cuerpo formado por dicha sustancia. La unidad de calor específico es  $1 \text{ cal/gm } ^\circ\text{C}$  ó  $1 \text{ Btu/lbm } ^\circ\text{F}$ .

Los calores específicos pueden medirse también disipando energía eléctrica en una resistencia, en lugar de disipar energía mecánica por rozamiento. Las medidas eléctricas pueden hacerse con un alto grado de precisión y esta técnica se utiliza hoy casi exclusivamente para la medida precisa de calores específicos.

De acuerdo a la ecuación anterior, la cantidad total de calor  $Q$  que ha de suministrarse a un cuerpo de masa  $m$  para hacer cambiar su temperatura de  $t_1$  a  $t_2$  es

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c dt$$

Los calores específicos de todas las sustancias varían con la temperatura, y para realizar la integración anterior  $c$  ha de expresarse en función de  $t$ . La figura 2.8 es una



-Gráficas de  $c_p$  y  $c_v$  para el cobre, en función de la temperatura.

GRAFICA 2.8. GRAFICAS DE  $C_p$  Y  $C_v$  PARA EL COBRE, EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

gráfica de los calores específicos del cobre, a presión constante y a volumen constante, para un intervalo de temperaturas comprendido entre el cero absoluto y  $1200^\circ\text{K}$ . El descenso del calor específico hasta anularse en el cero absoluto es típico de todas las sustancias.

La tabla 2.5 da la variación de  $c$  para el agua, entre  $0^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$ . Si  $c$  fuera constante, tendríamos la ecuación:

$$Q = mc(t_2 - t_1)$$

Se define el calor específico medio  $c$  en un intervalo de temperaturas como el valor constante de  $c$  que ocasionaría la misma absorción de calor.

Temperatura (°C)	$c$ (cal/gm·°C)
0	1,0087
20	0,9986
40	0,9976
60	0,9993
80	1,0024
100	1,0065
150	1,0240
200	1,0439

TABLA 2.5. CALOR ESPECIFICO DEL AGUA

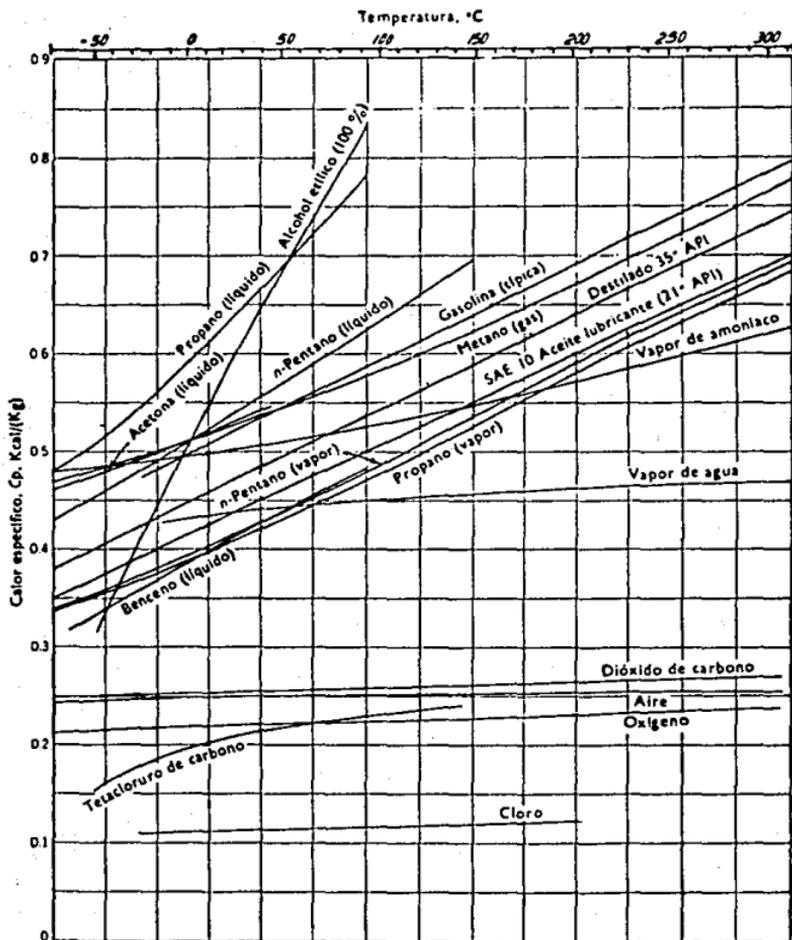
En la siguiente tabla figuran los calores específicos medios de algunos metales:

Symbol	Temperature, K													
	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200	250	300	400	600
Al	0.00026	0.00050	0.00048	0.00140	0.00099	0.00775	0.214	0.357	0.481	0.797	0.859	0.902	0.949	1.042
Be	0.00008			0.00028	0.0014				0.195	1.109	1.537	1.840	2.191	2.605
Bi	0.00054	0.00220	0.00541	0.01040	0.0340	0.0729	0.092	0.102	0.109	0.120	0.121	0.122	0.123	0.142
Cr	0.00016	0.00029	0.00050	0.00081	0.0021	0.0107	0.059	0.127	0.190	0.382	0.424	0.450	0.501	0.565
Co	0.00036	0.00069	0.00045	0.00121	0.0044	0.0404	0.110	0.154	0.234	0.376	0.406	0.426	0.451	0.509
Cu	0.00011	0.00024	0.00048	0.00096	0.0076	0.059	0.137	0.203	0.254	0.357	0.377	0.396	0.396	0.431
Ge				0.00037	0.00081	0.0129	0.0619	0.153	0.192	0.286	0.308	0.323	0.343	0.364
Au	0.00018	0.00047	0.00126	0.00255	0.0183	0.0569	0.094	0.100	0.109	0.124	0.127	0.129	0.131	0.136
Ir				0.00032	0.0021				0.090	0.122	0.128	0.131	0.137	0.140
Fe	0.00038	0.00061	0.00090	0.00127	0.0039	0.0276	0.096	0.154	0.216	0.354	0.422	0.450	0.491	0.555
Pb	0.00075	0.00242	0.00747	0.01350	0.0531	0.0944	0.108	0.114	0.118	0.125	0.127	1.129	0.132	0.142
Mg	0.00034	0.00080	0.00155	0.00172	0.0148	0.136	0.336	0.513	0.644	0.929	0.985	1.005	1.042	1.177
Hg	0.00417	0.01420	0.01820	0.02250	0.0615	0.0925	0.107	0.116	0.121	0.136	0.141	0.139	0.136	0.135
Mn	0.00011	0.00019	0.00032	0.00050	0.0029	0.0236	0.061	0.105	0.140	0.223	0.241	0.248	0.261	0.290
Ni	0.00054	0.00086	0.00121	0.00178	0.0058	0.0350	0.103	0.173	0.232	0.383	0.416	0.444	0.490	0.590
Pt	0.00019	0.00029	0.00067	0.00112	0.0077	0.0352	0.069	0.055	0.101	0.127	0.132	0.134	0.136	0.140
Ag	0.00016	0.00035	0.00093	0.00186	0.0159	0.0778	0.133	0.166	0.187	0.225	0.232	0.236	0.240	0.251
Sn	0.00024	0.00127	0.00423	0.00776	0.0400	0.108	0.149	0.173	0.159	0.214	0.220	0.222	0.245	0.257
Zn	0.00011	0.00029	0.00096	0.00250	0.0069	0.123	0.205	0.254	0.295	0.396	0.390	0.399	0.404	0.415

TABLA 2.6. CALOR ESPECIFICO DE ALGUNOS ELEMENTOS [KJ/(Kg K)]

### 2.6.2.3. CALOR ESPECIFICO DE LIQUIDOS Y GASES.

En general, el calor específico  $c_v$  de líquidos criogénicos decrece en la misma manera en que el calor



GRAFICA 2.9. CALOR ESPECIFICO DE DIVERSOS LIQUIDOS Y GASES A LA PRESION DE 1 ATMOSFERA, EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

especifico de los sólidos de estructura cristalina decrece al bajar la temperatura. A bajas presiones, el calor específico  $C_p$  también decrece al bajar la temperatura. Para altas presiones, en la vecindad del punto crítico, se observará una joroba en la curva del calor específico de todos los fluidos criogénicos (de hecho para todos los fluidos).

#### 2.6.2.4. COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA.

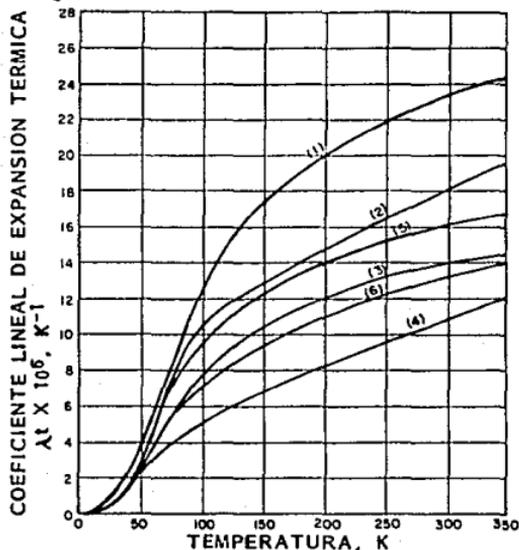
El coeficiente volumétrico de expansión térmica  $\beta$  está definido como el cambio de volumen fraccional por unidad en el cambio de temperatura mientras la presión en el material se mantiene constante. El coeficiente lineal de expansión térmica  $\Delta l$  se define como el cambio fraccional en longitud (o cualquier dimensión lineal) por unidad de cambio en la temperatura mientras la fuerza en el material permanece constante.

Para obtener una buena aproximación del cambio relativo de longitud que sufre un material al variar su temperatura en  $\Delta T$  conviene emplear esta igualdad:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica longitudinal. Siendo que los coeficientes de dilatación de los metales son muy distintos nos damos cuenta que una aplicación práctica de tal diferencia se tiene en el sistema de calefacción hogareño. El elemento bimetalico que activa al termostato consta de una tira de aleación de cobre y otra

de Invar, unidas a lo largo. Si un extremo de tal elemento está fijo, el otro se flexionará notablemente debido a la gran dilatación que sufre la aleación de cobre al variar la temperatura.



1. ALUMINIÓ 2024-T4
2. COBRE-BERILIO
3. MONEL K
4. TITANIO
5. ACERO INOXIDABLE 304
6. ACERO AL CARBON C1020

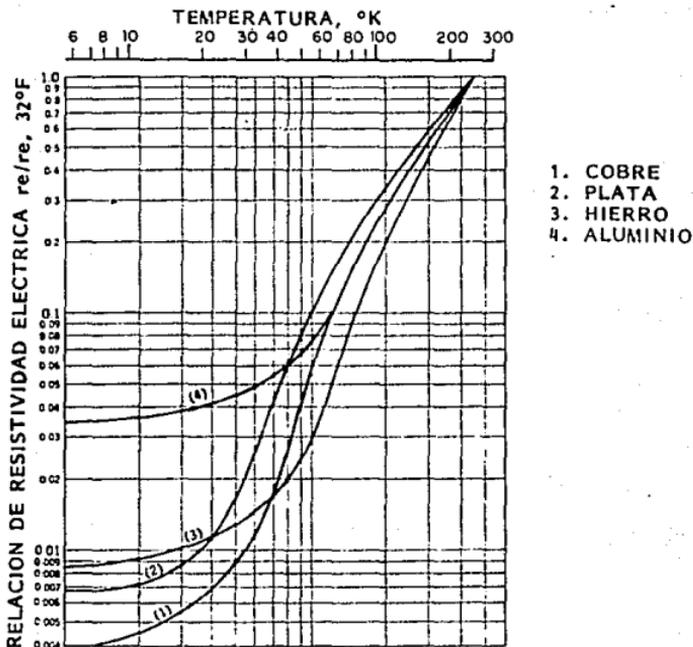
GRAFICA 2.10. COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSION TERMICA DE ALGUNOS MATERIALES

Cuando se unen dos materiales distintos, sus diferencias de dilatación pueden originar esfuerzos excesivos que causen la ruptura. Un ejemplo es la unión de metal con vidrio, como en el caso del conductor de alambre incluido en una lámpara incandescente. Si se empleara el cobre, su gran contracción térmica en relación con el vidrio produciría esfuerzos mucho mayores durante el enfriamiento.

## 2.6.3. PROPIEDADES ELECTRICAS Y MAGNETICAS

## 2.6.3.1. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

La conductividad eléctrica  $k_e$  de un material está definida como la corriente eléctrica por unidad de área transversal dividida por el gradiente de voltaje en la dirección de flujo de corriente. La resistividad eléctrica  $r_e$  es el recíproco de la conductividad eléctrica. La variación con la temperatura de la resistividad eléctrica de algunos materiales se muestra en la siguiente Figura.



GRAFICA 2.11. RELACION DE RESISTIVIDAD ELECTRICA PARA ALGUNOS MATERIALES

La resistividad eléctrica es un ejemplo de la enorme variedad de comportamientos que debe explicarse mediante una descripción universal de la estructura electrónica. Los aisladores eléctricos (cristales iónicos y la mayoría de los metales covalentes) tienen resistividad del orden de  $10$  (ohm-metro); los semiconductores (que son cristales covalentes) están en el orden de la unidad ( $10$ ), o sea, con una resistividad un billón de veces menor que la de un aislador; y los metales, por estar en el orden de  $10E3$ , son buenos conductores de la electricidad. El efecto de las impurezas sobre las propiedades eléctricas, es de crucial importancia para los semiconductores.

#### 2.6.3.2. SUPERCONDUCTIVIDAD.

La conductividad eléctrica de algunos metales y compuestos puros desciende repentinamente a cero cuando la temperatura baja hasta un valor crítico  $T_c$ , cercano al cero absoluto. Este fenómeno del estado de superconducción, a pesar de su gran potencialidad técnica, ha tenido una aplicación limitada por dos dificultades: el costo de mantener los aparatos a temperaturas del orden de  $10$  K; un campo magnético suficientemente intenso puede provocar que el material regrese a su estado normal. Un superconductor del tipo I está en estado o fase de superconducción en un área limitada por la temperatura crítica  $T_c$  (para  $H=0$ ) y el campo magnético crítico  $H_c$  (para  $T=0$ ).

Los superconductores de tipo II son importantes ya que generalmente tienen valores efectivos de  $H_c$  mucho más elevados. Cuando el campo magnético alcanza el valor crítico de  $H_{c1}(T)$  a cierta temperatura útil de operación  $T$ , comienzan a aparecer dominios de fase normal dentro de la fase superconductora. Esta mezcla se conoce como fase de vórtice, sólo que todavía contiene resistencia eléctrica nula, pues la parte superconductora de la misma conduce toda la corriente. La cantidad de fase normal en la mezcla aumenta gradualmente a medida que el campo magnético tiende a  $H_{c2}(T)$ . A este valor todo el espécimen es normal, con excepción de la fase recubriente o de vaina, que sólo existe cerca de la superficie de la muestra. Esta fase desaparece en forma gradual conforme se aproxima a  $H_{c2}(T)$ .

El comportamiento magnético de los superconductores tiene una importancia fundamental. La fase superconductora, que existe por debajo de  $H_{c1}$ , es una sustancia diamagnética perfecta y no contiene flujo magnético. Para eliminar el campo magnético externo  $H$ , la magnetización dentro de la fase superconductora excluyen al flujo magnético; y la magnetización negativa total de la muestra o espécimen disminuye a medida que la cantidad de fase superconductora tiende a cero en  $H_{c2}$ . La resistividad eléctrica aumenta, entonces con rapidez desde cero hasta el valor normal conforme desaparece la fase de vaina en  $H_{c2}$ .

Una forma de aplicación potencial de los superconductores se basa en su capacidad para almacenar

energía en flujo magnético. Una acción mecánica o eléctrica puede desplazar el flujo de un conductor a otro y generar así corrientes eléctricas del tipo directo o continuo.

Muchas aplicaciones potenciales de los superconductores implican su capacidad para conducir corrientes eléctricas extremadamente fuertes. Sin embargo, tal capacidad está limitada por dos factores: el campo magnético que genera la propia corriente, y la interacción de la corriente con un campo magnético aplicado. Los valores de la corriente máxima o crítica a los cuales ocurren los cambios significativos de la superconductividad, dependen en alto grado de la constitución del material. El endurecimiento de un material por precipitado, trabajo en frío o irradiación neutrónica, incrementa la corriente crítica (y también los valores de  $H_c/2$ ), dando origen así a un superconductor superior. Poderosos electroimanes y la transmisión de electricidad a larga distancia son interesantes aplicaciones de la superconductividad.

Existen diversas propiedades que cambian ya sea abruptamente o gradualmente cuando el material hace la transición del estado normal al estado de superconductividad. Algunas de estas propiedades incluyen:

- 1.- Calor específico. El calor específico se incrementa abruptamente cuando un material se vuelve superconductor.
- 2.- Efectos termoeléctricos. Todos los efectos termoeléctricos (Peltier, Thomson y Seebeck) se desvanecen

cuando un material se vuelve superconductor. Un termocople superconductor no funcionaría.

3.- Conductividad térmica. Con la presencia de un campo magnético, la conductividad térmica de un metal puro decrece abruptamente cuando el metal se vuelve superconductor, aunque para algunas aleaciones (por ejemplo Pb-Bi en un limitado rango de composiciones) ocurre lo opuesto. En ausencia de un campo magnético, no hay un cambio discontinuo en la conductividad térmica, pero el cambio de inclinación es agudo en la curva de temperatura-conductividad.

4.- Resistencia eléctrica. Para superconductores Tipo I el decremento de la resistencia a cero es bastante abrupto. Sin embargo para superconductores Tipo II el cambio es algunas veces diseminado en un rango de temperaturas tan grande como  $1^{\circ}\text{K}$ .

5.- Permeabilidad magnética. La permeabilidad magnética decrece repentinamente a cero para superconductores Tipo I (Efecto Meissner). Sin embargo para superconductores Tipo II el efecto Meissner es incompleto para campos magnéticos mayores que el campo crítico inferior.

A través de los años se han gastado considerables recursos económicos en el estudio de aleaciones y compuestos superconductores para desarrollar materiales que mantengan su superconductividad en valores altos de campo magnético y a temperaturas cercanas a la temperatura del hidrógeno líquido (alrededor de  $20^{\circ}\text{K}$ ). Los materiales más usados para la construcción de magnetos superconductores han sido las

aleaciones de cuerpo cúbico centrado de niobio y de titanio o compuesto cúbico tipo beta de tungsteno tipo (A15), como el Nb<sub>3</sub>Sn.

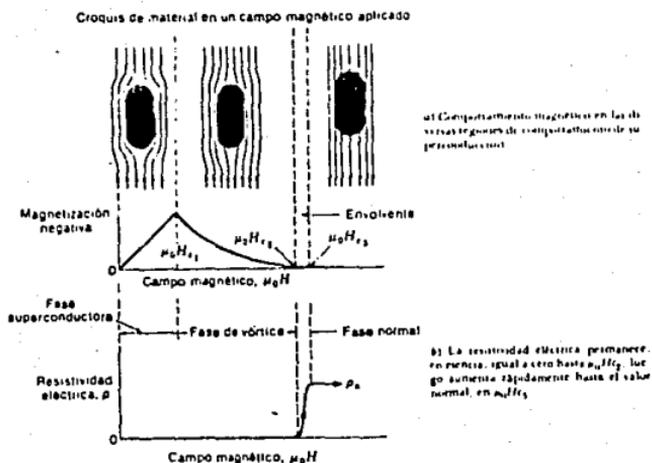


FIGURA 2.13. ILUSTRACION ESQUEMATICA DE LAS PROPIEDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS DE UN SUPERCONDUCTOR TIPO II EN FUNCION DEL CAMPO MAGNETICO

### CAPITULO 3 CONGELACION CRIOGENICA

#### 3.1 ASPECTOS TERMODINAMICOS

El congelamiento de productos alimenticios se logra cuando el contenido de agua intracelular e intercelular en el alimento cambia del estado líquido al estado sólido. Además debido a otros componentes disueltos en el agua, la temperatura de congelamiento baja del punto normal de congelación del agua (0°C) a valores de -2°C. Este valor promedio de congelamiento se define como la temperatura en la que el estado líquido y sólido del producto alimenticio están en equilibrio. La completa transformación del agua en hielo no ocurre a temperaturas prácticas de procesamiento de alimentos, aunque una fracción del agua permanecerá en estado líquido.

El proceso de congelación requiere la extracción de calor del alimento. Este calor puede ser dividido en dos componentes. Al primer componente se le conoce como calor sensible, que es el calor asociado con la temperatura del producto. El segundo componente de la energía del producto es el calor latente que está asociado con el cambio de estado. La congelación de alimentos se lleva a cabo en tres etapas.

Primero la energía sensible deberá ser extraída para reducir la temperatura del producto al punto de congelación

del agua. La energía latente deberá después ser removida para ir del cambio de fase de agua a hielo. Finalmente se le quita más energía sensible para llevar el producto a la temperatura deseada.

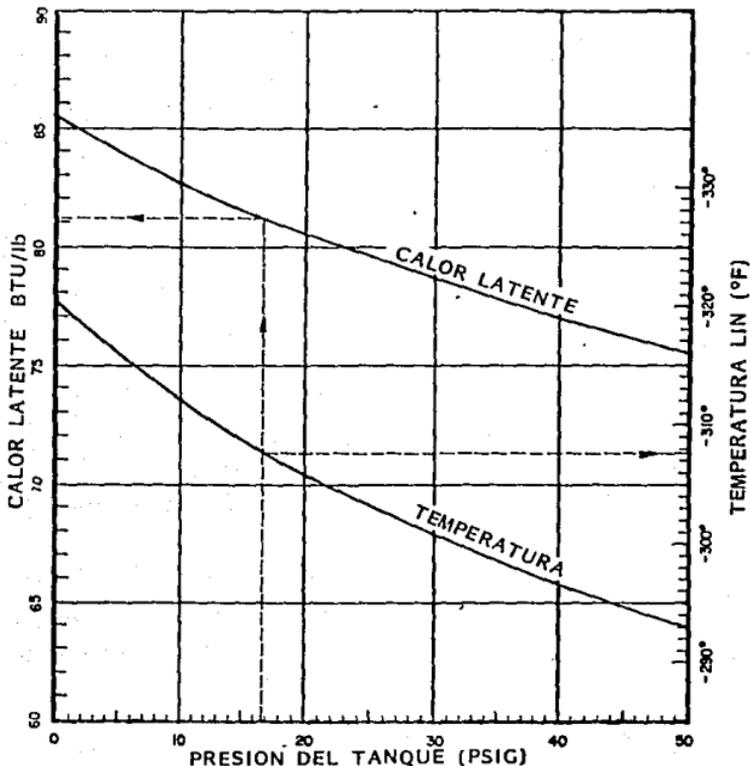
En la congelación de alimentos, como en todos los procesos, se cumple la Ley de la Conservación de la Energía, en virtud de que la energía extraída al producto alimenticio es transferida al medio refrigerante. En este caso el nitrógeno líquido primero absorbe energía latente conforme cambia de fase líquida a gas a  $-196^{\circ}\text{C}$ . La energía sensible del nitrógeno se incrementa conforme se absorbe la energía del alimento y la temperatura del gas aumenta. La energía latente y la sensible contribuyen cada uno casi en la mitad del total del potencial refrigerante del nitrógeno.

Los procesadores de alimentos tienen como principal preocupación la variable "costo de congelación del producto". Esta consiste principalmente en el costo del nitrógeno líquido, que no depende sólo del precio, sino de la cantidad requerida por cada kilogramo de producto. La cantidad de nitrógeno líquido requerida para congelar una unidad en peso de producto puede ser calculada fácilmente haciendo un balance de energía del proceso.

El primer componente en el balance de energía es la energía requerida para congelar el alimento. Esto puede ser determinado por diversos métodos siendo el más fácil el de un análisis de la composición. Esto es, el conocimiento del calor específico y del calor latente constante aplicado a la

cantidad presente en porcentaje de cada uno de los cinco componentes (agua, proteínas, grasas, carbohidratos, cenizas) que conforman el alimento y así lograr la reducción deseada de temperatura. El total de estos valores es la energía que deberá ser extraída para congelar una unidad de peso del producto alimenticio.

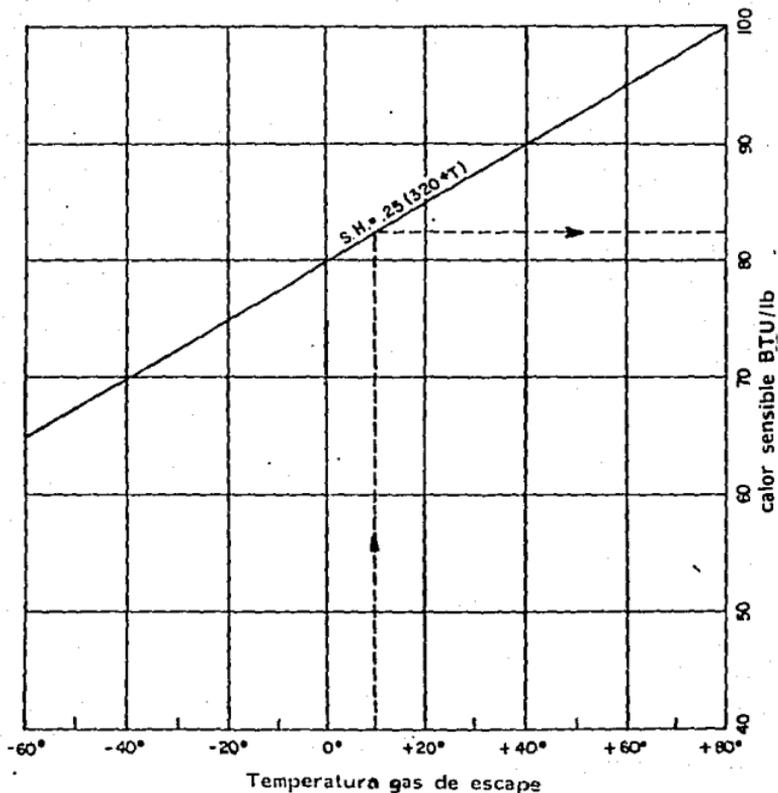
El siguiente paso es el de determinar la cantidad de energía que puede ser transferida a una unidad de peso del nitrógeno líquido. La capacidad refrigerante del nitrógeno líquido es la suma de la energía latente y la energía sensible. La energía latente depende de la presión del nitrógeno en el tanque de almacenamiento. Mientras más alta es la presión del tanque, menor será la energía latente requerida para completar el cambio de fase de nitrógeno líquido a nitrógeno gaseoso. Valores de la energía latente en función de la presión del tanque son mostrados en la Tabla 3.1. Dichos valores muestran que resulta más ventajoso utilizar el LIN a baja presión para fines de congelación. La energía sensible transferida al nitrógeno puede ser calculada multiplicando el calor específico del nitrógeno ( $1.05 \text{ kJ/Kg.}/^{\circ}\text{C}$ ) por el cambio de la temperatura del gas. Inicialmente la temperatura del nitrógeno gaseoso es de  $-196^{\circ}\text{C}$  cuando el líquido es vaporizado a presión atmosférica. La temperatura del nitrógeno gaseoso se incrementa conforme se extrae la energía del alimento hasta que el gas es extraído. Para un dimensionamiento adecuado del equipo (en



GRAFICA 3.1. CALOR LATENTE Vs. PRESION TANQUE

nuestro caso un túnel) de congelación, la temperatura del gas a la entrada del mismo donde es descargado deberá ser 42°C más frío que la temperatura de entrada del producto alimenticio (según datos experimentales de los fabricantes de estos equipos). Otros tipos de equipos de congelación pueden descargar el nitrógeno caliente a diferentes temperaturas, pero para todos los casos, es conveniente mantener una diferencia de temperatura entre el producto a congelar y el nitrógeno gaseoso extraído. Una fórmula y una gráfica de la energía sensible como función de la

temperatura del gas a la salida se muestra en la Tabla 3.2. De acuerdo al ejemplo de la siguiente tabla para cálculo de consumo de nitrógeno, la parte 4 muestra los pasos neces-



GRAFICA 3.2. CALOR SENSIBLE Vs. TEMPERATURA GAS SALIDA

rios para determinar la energía de refrigeración disponible de una unidad de peso de LIN.

NOMBRE DEL CLIENTE \_\_\_\_\_ UBICACION \_\_\_\_\_  
 TIPO DE PRODUCTO \_\_\_\_\_ FECHA \_\_\_\_\_

1. ASUMIMOS

PUNTO DE CONGELACION AGUA	-2 °C	CALOR ESPECIFICO DE PROT	1.55 kJ/kg/°C
CALOR ESPECIFICO DEL AGUA	4.19 kJ/kg/°C	CALOR ESPECIFICO DE GRASAS	2.09 kJ/kg/°C
CALOR LATENTE DE FUSION	335 KJ/kg	CALOR ESPECIFICO CARBOHIDRA	1.42 kJ/kg/°C
CALOR ESPECIFICO DEL HIELO	2.01 kJ/kg/°C	CALOR ESPECIFICO DE CENIZAS	0.84 kJ/kg/°C

2. DATOS DEL PRODUCTO

TEMPERATURA INICIAL  $T_i$  \_\_\_\_\_ °C  
 TEMPERATURA FINAL  $T_f$  \_\_\_\_\_ °C

COMPOSICION DEL PRODUCTO %  
 AGUA \_\_\_\_\_ %  
 PROTEINAS \_\_\_\_\_ %  
 GRASAS \_\_\_\_\_ %  
 CARBOHIDRATOS \_\_\_\_\_ %  
 CENIZAS \_\_\_\_\_ %

3. ENERGIA REQUERIDA PARA CONGELAR EL PRODUCTO

	°C	Q <sub>i</sub>	%/100	kJ/kg/°C	(	T <sub>i</sub> °C	-	T <sub>f</sub> °C	) =	kJ/kg
ENFRIAR EL AGUA A	-2 °C	Q <sub>1</sub> = _____	4.19	*	(	_____	-	-2	) =	_____
CONGELAR EL AGUA A	-2 °C	Q <sub>2</sub> = _____	335	*	(	_____	-	_____	) =	_____
ENFRIAR EL HIELO A	_____ °C	Q <sub>3</sub> = _____	2.01	*	(	-2	-	_____	) =	_____
ENFRIAR LAS PROTEINAS	_____ °C	Q <sub>4</sub> = _____	1.55	*	(	_____	-	_____	) =	_____
ENFRIAR LAS GRASAS A	_____ °C	Q <sub>5</sub> = _____	2.09	*	(	_____	-	_____	) =	_____
ENFRIAR LOS CARBOHIDRA	_____ °C	Q <sub>6</sub> = _____	1.42	*	(	_____	-	_____	) =	_____
ENFRIAR LAS CENIZAS A	_____ °C	Q <sub>7</sub> = _____	0.84	*	(	_____	-	_____	) =	_____

ENERGIA TOTAL REQUERIDA PARA CONGELAR EL PRODUCTO  $Q_t$  = \_\_\_\_\_

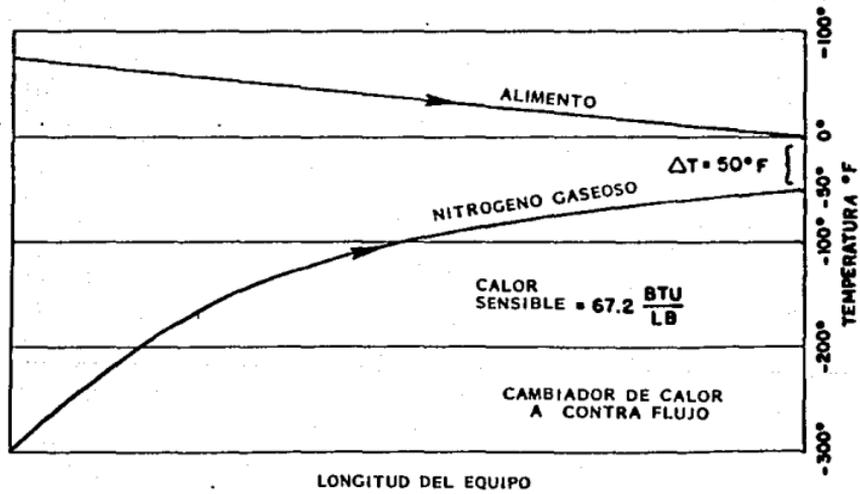
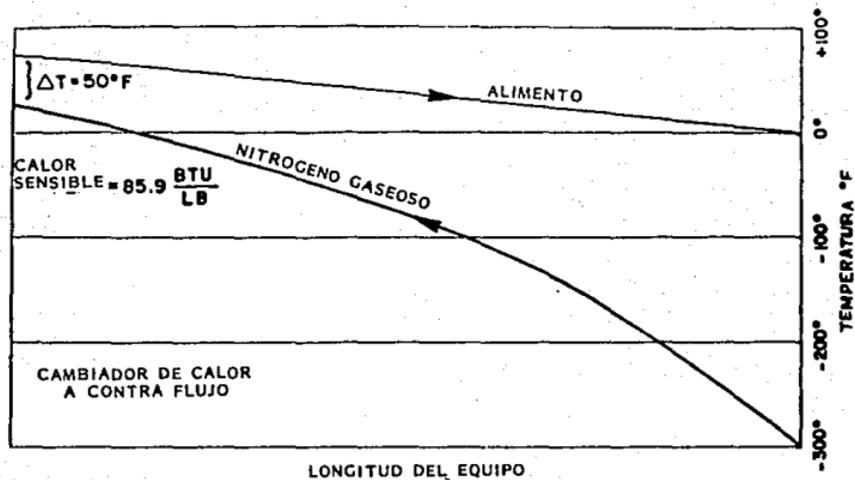
4. CAPACIDAD DE REFRIGERACION DEL LIN

CALOR LATENTE A \_\_\_\_\_ BAR DE PRESION DEL TANQUE  
 $Q_1$  = \_\_\_\_\_ kJ/kg ( TEMPERATURA INICIAL DEL PRODUCTO -42°C )  
 CALOR SENSIBLE A \_\_\_\_\_ °C DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL GAS ( 42°C )  
 $Q_2$  = 1.05 kJ/kg/°C \* ( \_\_\_\_\_ °C + 195 °C ) = \_\_\_\_\_ kJ/kg

CAPACIDAD TOTAL DE REFRIGE  $Q_a = Q_1 + Q_2 =$  \_\_\_\_\_ + \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ kJ/kg  
 RACION DISPONIBLE

5. RELACION DE CONSUMO DE LIN

$Q_t / Q_a * 1.25 =$  \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ \* 1.25 = \_\_\_\_\_ kgs LIN / kgs producto



GRAFICA 3.3. CONTRA FLUJO Vs. FLUJO CONCURRENTE

La relación del consumo de LIN es después calculada en la sección 5 de la hoja de cálculo dividiendo la energía requerida para congelar el alimento entre la energía de refrigeración disponible en el LIN. A esta relación de consumo deberá incrementársele un factor que considere las pérdidas en estado estacionario. De acuerdo a datos experimentales un factor de 25% de pérdidas es el recomendable para este tipo de equipos. Pérdidas adicionales ocurrirán durante el inicio de las operaciones del equipo mientras la tubería y el mismo túnel son enfriados a la temperatura de operación. Las pérdidas por enfriamiento y del tanque de almacenamiento estarán consideradas dentro del consumo de operación pero no para el cálculo de consumo de nitrógeno.

Aunque el uso de un análisis composicional para determinar la energía requerida para congelar un producto es relativamente sencillo, no es muy preciso. Este análisis siempre llevará a tener una extracción de energía menor que la que realmente necesita ser extraída. La razón de esta imprecisión es que el análisis composicional asume que toda el agua se congela. En la realidad, la temperatura de congelación del agua es continuamente disminuida de su punto original de congelación. Conforme el agua comienza a congelarse, la concentración de otros elementos en el agua aumenta, reduciendo la temperatura de congelación del líquido remanente. Como resultado, sólo una porción del agua estará congelada cuando sea alcanzada la temperatura final.

Desde este punto, sólo esta porción de la energía latente es extraída en el proceso de congelación.

Un método preciso para determinar la energía requerida para congelar un producto alimenticio es por un proceso experimental conocido como calorimetría del nitrógeno líquido. Este proceso mide la energía extraída de un alimento midiendo el hervimiento del nitrógeno líquido necesario para alcanzar la reducción de temperatura deseada. Muestras del producto son sumergidas en nitrógeno líquido, primero a la temperatura a la que entran al túnel de congelación y después a la temperatura a la que salen del mismo. La diferencia en los pesos del LIN vaporizado es multiplicada por la energía latente del LIN para determinar la cantidad real de energía extraída del producto.

La calorimetría del nitrógeno líquido es un procedimiento que se puede hacer fácilmente en un recipiente aislado si se siguen con cuidado los siguientes pasos. Este procedimiento es muy preciso ya que cuantifica también el LIN que hierve como resultado de la entrada de calor al contenedor de LIN.

Las lecturas que se deben hacer son:

a) Tiempo inicial y peso del LIN

Esperar un minuto

b) Tiempo y peso del LIN

Sumergir la muestra de producto previamente pesado en LIN, esperar a que el hervimiento del LIN se complete

## c) Tiempo y peso del LIN

Esperar a que el tiempo sea igual al tiempo de hervimiento (c-b) menos la espera inicial (b-a)

## d) Tiempo y peso del LIN

Con estas lecturas se podrá determinar ya la energía requerida para congelar el producto. Este procedimiento se deberá repetir por lo menos 3 veces para así tener unos datos más precisos y será de acuerdo al siguiente proceso:

1. Peso neto de la muestra en kg.
2. Lectura inicial de la escala en kg. (b)
3. Peso inicial total calculado en kg. (1+2)
4. Lectura final de la escala en kg. (c)
5. Hervimiento del LIN (3-4)
6. Pérdidas por calentamiento (a-b)+(c-d)
7. Hervimiento neto del LIN (5-6)
8. Kg. de LIN / Kg. de producto (7/1)

## Cálculos:

Temp. inicial \_\_\_\_\_ °C Cal \_\_\_\_\_

Temp. final \_\_\_\_\_ °C Cal \_\_\_\_\_

Dif. \_\_\_\_\_ \* 85.8 = \_\_\_\_\_ Kcal/kg.

## 3.2 EQUIPOS DE CONGELACION CONTINUA.

## 3.2.1 TUNELES DE CONGELACION CRIOGENICOS.

El túnel de congelación es un sistema continuo cerrado, donde la congelación se lleva a cabo dentro del mismo y que

utiliza al nitrógeno líquido como el agente refrigerante. Su configuración básica es la de un tubo aislado que dentro lleva una banda transportadora del producto. En estos túneles, el producto alimenticio es transportado individualmente a través del túnel por medio de la banda, mientras que el nitrógeno frío se mueve en dirección opuesta. Esta configuración es esencialmente el principio por el cual trabaja un intercambiador de calor a contraflujo, lo cual resulta en una alta eficiencia térmica y un bajo consumo de LIN. Las ventajas de tener un intercambiador a contra flujo en lugar de tenerlo en flujo concurrente se demuestra en la gráfica 3.3. El flujo a contracorriente produce un incremento mayor de la energía sensible del nitrógeno para el mismo cambio de temperatura del producto que en el caso del de flujo concurrente.

El LIN es inyectado dentro del túnel a través de un arreglo de espreas que rocía el LIN directamente en el producto alimenticio que pasa debajo del arreglo en la banda en la banda transportadora. Este proceso utiliza la energía latente del LIN para proveer altos rangos de congelamiento. Nitrógeno frío gaseoso se genera al contactar el LIN el alimento y ser vaporizado. El gas frío viaja a través de múltiples zonas de recirculación de gas conforme se mueve a la zona de descarga de gas, que es a la entrada del túnel. Cada una de las zonas de recirculación de gas se vuelve progresivamente más caliente al ser transferido calor del producto alimenticio. Después de extraer la máxima energía

refrigerante utilizable del nitrógeno gaseoso, entrará al sistema de extracción y será venteado a la atmósfera. El flujo del nitrógeno dentro del túnel se muestra en la figura 3.1.

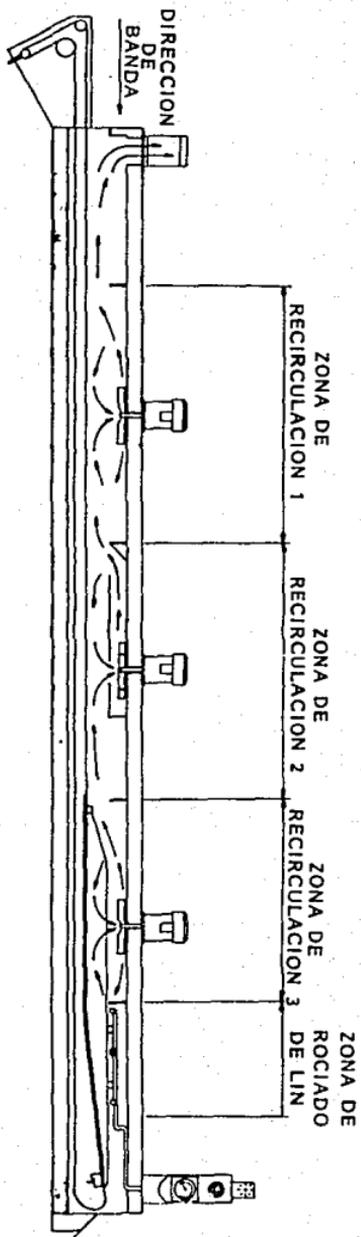
Los túneles de congelación pueden variar en tamaño de acuerdo a su ancho de banda, y pueden variar en longitud de acuerdo al producto que se tenga y el también de acuerdo al tiempo que se le quiera dar de residencia al producto.

Los túneles de congelación están fabricados de materiales durables y compatibles para temperaturas criogénicas, de fácil limpieza y que deberán estar aprobados para su utilización en la industria alimenticia. Los principales componentes se mostrarán en la Figura 3.1.

Los túneles, por lo general, de acuerdo a su longitud se encuentran fabricados en secciones móviles que permitirán su transporte y que presentan una caída de 3° para drenaje en momentos de limpieza. Las secciones móviles están separadas por las secciones fijas que son las que dan soporte a las cubiertas y a la estructura que sostiene a la banda transportadora. Todos los demás componentes, tales como los ventiladores de recirculación del nitrógeno gaseoso, la campana del sistema de extracción y los termopares son montados en las secciones fijas.

Las secciones individuales móviles del túnel son hechas de acero inoxidable tipo 304, de acuerdo a las características que se verán en el siguiente capítulo, y están aisladas con espuma de poliuretano inyectado. Cada

FIGURA 3.1. FLUJO DE NITROGENO EN UN TUNEL DE CONGELACION



sección está completamente soldada para proveer máxima protección al aislamiento de la infiltración que pueda tener del agua utilizada para su limpieza. Las juntas criogénicas que se encuentran entre las secciones del túnel presentan sello por aplastamiento para prevenir pérdidas de refrigeración durante su operación.

Las secciones fijas del túnel que están hechas también de acero inoxidable tipo 304 pueden estar montadas en una estructura de acero al carbón. Esta estructura estará hecha de tubo rectangular que podrá llevar también el tubo conduit que contiene el cableado eléctrico. Cuando los túneles sobrepasen los 6.5 metros de longitud, estos estarán divididos en módulos para su transporte. Cada sección deberá tener la inclinación adecuada para ser drenada.

La banda transportadora es una banda hecha de acero inoxidable con una cadena en los extremos que le dará un movimiento positivo a la banda. Las espigas de acero que cruzan la banda de una cadena a la otra están cubiertas por una malla entretejida que servirá para sostener el producto a congelar. La banda que se utiliza tendrá variaciones en cuanto al calibre del alambre, y al largo y ancho de los nudos de la malla (vueltas por metro a lo largo y ancho de la banda), y su selección depende del tamaño del producto a congelar, del agua que desaloje al ser depositado en la banda, así como de la recirculación de nitrógeno gaseoso a través de la malla.

Al utilizar un tipo de banda habrá que considerar que deberá permitir la mejor circulación del gas frío a través de la misma y dejar que la porción inferior del alimento se congele debidamente.

La porción superior e inferior de la banda es soportada por unas tiras de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y que van sujetas a las secciones fijas del túnel. Este material se utiliza por la baja fricción que resulta al tener contacto con el acero inoxidable, así como por su compatibilidad y estabilidad a baja temperatura.

La banda es movida por un motor de corriente directa controlado por potenciómetro o bien uno de corriente alterna controlado por inversor, o bien con transmisión regulada mecánicamente. Esto con el fin de regular a voluntad la velocidad de la misma. En el otro extremo de la banda existe un tensor que compensa las contracciones térmicas de la banda.

En la entrada del túnel la banda pasa sobre una mesa de carga, que permitirá la colocación del producto en la misma. La mesa se encontrará también aislada para prevenir la condensación.

El túnel de congelación incluye un cabezal con boquillas de atomizado para el LIN que se encuentra cerca de la zona de descarga y que rocía el LIN directamente sobre el producto. El cabezal de boquillas está fabricado de tubería de cobre cromado o acero inoxidable. Las boquillas están colocadas individualmente para permitir su limpieza y su

reposición. Las boquillas están diseñadas para rociar el LIN en forma de cono elíptico y que está orientado a lo ancho de la banda para cubrirla totalmente con el rociado.

Para una producción normal de producto congelado, la presión del LIN en el cabezal de boquillas deberá de ser de 41 a 55 KPa ya que como vimos anteriormente, a la mínima presión posible, el calor latente por absorber para cambiar de fase será mayor. El flujo de nitrógeno en el cabezal puede ser ajustado instalando boquillas más grandes o más chicas según el caso necesario, como se verá en el Capítulo 4. Bajo la banda se encuentra una charola recolectora que captará el nitrógeno sobrante de un sobre-rociado del cabezal de boquillas.

Debido a que hay productos alimenticios que no tolerarían el contacto directo con el nitrógeno líquido, ya sean postres o comida cubierta, el túnel podrá trabajar utilizando solamente nitrógeno gaseoso. Esto es, que el LIN es rociado directamente a los ventiladores donde es inmediatamente vaporizado y circulado como gas frío; sin embargo la configuración del equipo sería diferente.

Para ambos equipos, a la entrada de éstos, conectada a la sección fija se encuentra un sistema de extracción. Este sistema se conecta por medio de un ducto hasta un extractor y se utiliza para sacar el nitrógeno ya caliente del túnel a través del ducto. La capacidad de extracción deberá ser de 1.5 veces la de la entrada máxima del nitrógeno vaporizado para crear una presión diferencial que succione el gas. El

extractor es un soplador centrifugo con álabes de aluminio y conectado a un motor de corriente alterna. Dicho motor podrá ser gobernado, como veremos en el Capítulo 4, por un controlador automático de velocidad.

El extractor deberá localizarse justo arriba de la salida del ducto del túnel, donde el ducto deberá ser recto y sin ninguna curva en el trayecto. Esto se debe a que el nitrógeno conducido al ducto se disolverá inevitablemente con aire atmosférico el cual contiene humedad. Esta humedad se tornará en escarcha, y se acumulará en cualquier curva del ducto.

### 3.2.2. TUNELES DE CONGELACION CRIOGENICA POR INMERSION.

Los túneles de inmersión, son también sistemas continuos de congelamiento de producto. El sistema produce alimento congelado individualmente por medio de una inmersión del producto en una tina de LIN que congelará la superficie del producto en un periodo de 2 a 3 segundos según tamaño. Después de la inmersión en LIN, el alimento será llevado a través de diferentes zonas de recirculación de gas para completar el proceso de congelación, durante 2 a 3 minutos más, a efecto de aprovechar la capacidad del nitrógeno vaporizado para absorber calor sensible del producto.

Este sistema de congelación logra una buena eficiencia térmica, pero no puede superar en rendimiento al túnel de nitrógeno líquido atomizado, ya que el LIN además de tener

un contacto directo con el producto está enfriando continuamente su propia tina, luego el nitrógeno gaseoso frío entrará en un cambiador de calor de flujo concurrente, que como vimos con anterioridad no supera la transferencia de calor de un flujo a contracorriente.

Durante la inmersión del producto en el LIN, este se vaporiza produciendo nitrógeno gaseoso a  $-196^{\circ}\text{C}$ . El nitrógeno gaseoso frío fluye de la unidad de inmersión a zonas de recirculación que serán progresivamente más calientes hasta llegar a la zona de descarga del equipo. Este equipo, a diferencia del túnel de boquillas, tendrá su extracción a la descarga del producto.

El túnel de inmersión se podrá dividir en cuatro subsistemas:

- Sistema de suministro de LIN (dos líneas independientes)
- Unidad de inmersión de LIN
- Túnel de convección forzada de flujo concurrente
- Sistema de extracción

Para el suministro de LIN tendremos varias válvulas manuales y automáticas, además de otros componentes para que exista LIN en la unidad tanto de inmersión como en el túnel de convección forzada. El flujo de LIN en la unidad de inmersión es controlada automáticamente para mantener constante el nivel del líquido. En el túnel de convección forzada, el LIN es inyectado a los ventiladores de recirculación donde se vaporizará para automáticamente mantener una temperatura máxima de operación.

La unidad de inmersión de LIN tiene una base estacionaria con una cubierta removible para su inspección y limpieza. Dentro existirá un recipiente que contendrá al LIN. Dentro del mismo existe una banda transportadora con controles ajustables de velocidad que llevarán al producto a través de éste y lo sacarán del mismo. Así, tendremos un indicador del tiempo de retención del producto en el baño de LIN.

La sección del túnel de convección forzada contiene: un soplador centrífugo, los ventiladores de recirculación y otra banda transportadora que formarán el cambiador de calor de flujo concurrente. Esta banda transportadora es independiente de la banda de la unidad de inmersión y tendrá velocidad también ajustable. Al inicio de esta sección de túnel, el soplador centrífugo sacará el nitrógeno vaporizado de la unidad de inmersión y lo conducirá a los ventiladores de recirculación. La velocidad de este soplador es controlada automáticamente para impedir el escape del nitrógeno gaseoso por la entrada del producto alimenticio en la sección de la tina de inmersión.

Estos túneles de inmersión están hechos en secciones modulares, los cuales tendrán cubiertas removibles para su limpieza. Estas secciones móviles del túnel están separadas por otras pequeñas secciones que darán soporte a las cubiertas y a la estructura que llevará a la banda de transporte. Todos los demás componentes, como son los ventiladores de recirculación, la cubierta del sistema de

extracción y los termopares estarán montados en las secciones modulares.

La unidad de inmersión y la del túnel de convección forzada están fabricadas de materiales compatibles para baja temperatura y de fácil limpieza aceptados internacionalmente para el manejo de alimentos. Estas secciones están fabricadas con acero inoxidable del tipo AISI 304SS y estarán aislados con poliuretano inyectado. La estructura que soportará a todo el equipo está hecha de tubo de acero rectangular que también podrá contener las líneas de conducción eléctrica.

La campana del sistema de extracción se encuentra montado al final de la zona de descarga en el túnel de convección forzado. El rotor del extractor es del tipo centrífugo con álabes de aluminio y se encuentra justo arriba de la campana para tener una trayectoria vertical.

Para este túnel de inmersión el equipo de control está diseñado para tener una operación automática además de minimizar el consumo de nitrógeno líquido. Este túnel tiene 3 sistemas independientes de control de flujo de nitrógeno que son: control del nivel de inmersión del LIN, flujo de nitrógeno gaseoso y control de temperatura del túnel.

### 3.3 EQUIPOS DE CONGELACION INTERMITENTE

#### 3.3.1. CAMARA DE CONGELACION CRIOGENICA

Este tipo de equipo tiene como objetivo congelar rápidamente dentro de una cámara cerrada productos alimenticios usando nitrógeno líquido.

El producto a congelar se colocará en un carrito especial para el proceso. Una vez cargado con producto será llevado al interior de la cámara. Nuevamente la cámara estará lista para repetir la operación.

La construcción básica será el de una cámara para el proceso a la cual irá incorporado un panel de control del LIN que contendrá un controlador de tiempo, un controlador de temperatura, un interruptor de encendido con señal luminosa, interruptor de inicio del controlador de tiempo y un indicador de que la válvula solenoide que controla el flujo de nitrógeno está en operación.

La secuencia de operación será la siguiente: cerrando la puerta de la cámara, el interruptor de la puerta cambiará de normalmente abierta a normalmente cerrada. Posteriormente se girará el interruptor de selección de la posición de apagado a la de encendido. Hecho esto, se encenderá una luz indicadora, el controlador de temperatura leerá la temperatura interna de la cámara y la válvula solenoide será energizada. El siguiente paso consistirá en seleccionar la temperatura a la cual queremos congelar el producto en el controlador de temperatura. La temperatura en la cámara no deberá ser menor a  $-73^{\circ}\text{C}$ . Se procederá a seleccionar el

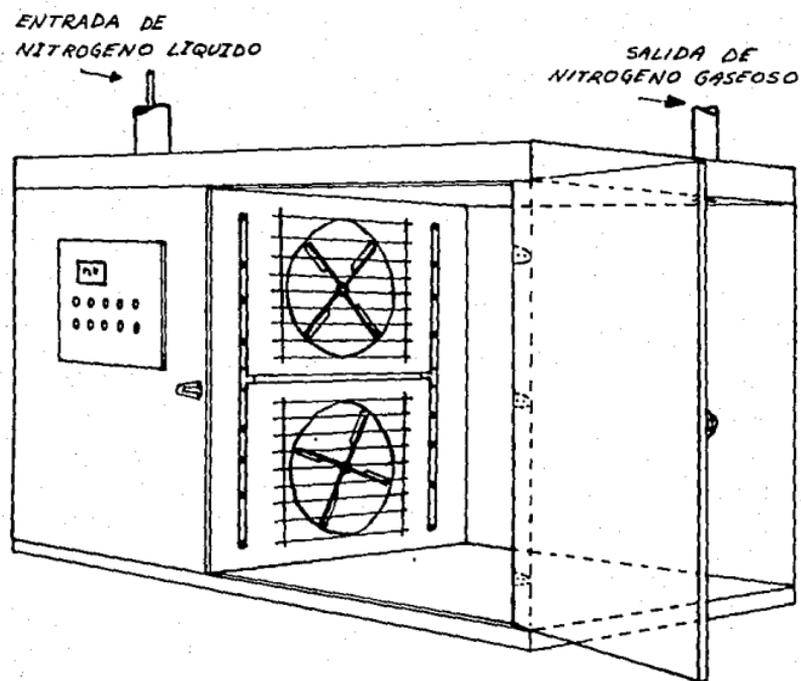


FIGURA 3.2. CAMARA DE CONGELACION CRIOGENICA

tiempo de residencia del producto en el controlador de tiempo de los ciclos. Finalmente se presionará el botón de arranque, que activará el sistema. El controlador de temperatura regulará la temperatura energizando a la válvula solenoide y los ventiladores harán circular al gas frío en la cámara. El controlador de tiempo iniciará la cuenta regresiva para el tiempo seleccionado de residencia. Mientras tanto una luz piloto indicará el momento en que la solenoide es energizada. De abrirse la puerta de la cámara durante la operación, el sistema será desenergizado.

La cámara está fabricada de acero inoxidable del tipo AISI 304SS, en doble capa. Entre ambas capas existirá un aislamiento de espuma de poliuretano. La cámara en su interior se podrá dividir en dos secciones. La sección de carga y la sección de operación e instrumentación.

Es en la sección de carga donde el producto a congelar es colocado. En la sección superior de la cámara, existirá un ducto de venteo del nitrógeno gaseoso caliente.

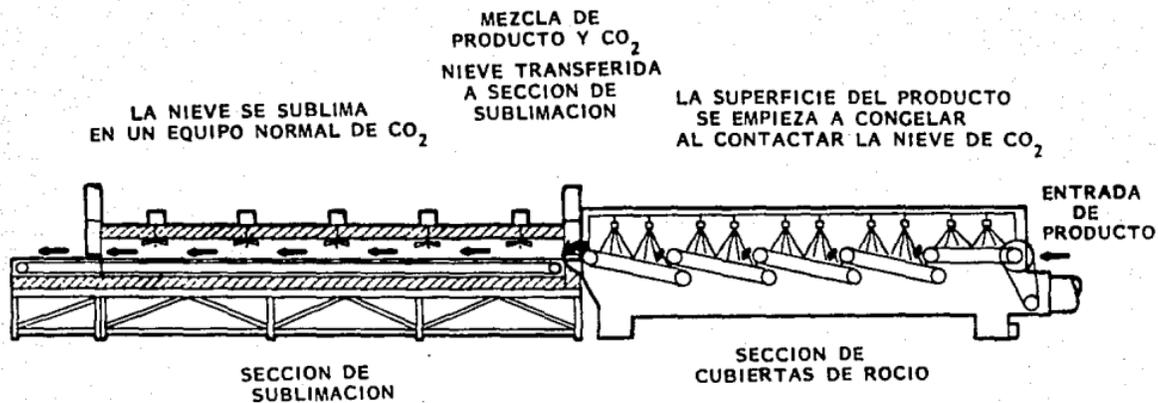
En la sección de operación e instrumentación se encuentra el arreglo de boquillas que son las encargadas de atomizar el nitrógeno líquido dentro de la cámara. Para que el poder de congelación del nitrógeno líquido y gaseoso pueda ser aprovechado al máximo existen unos ventiladores de recirculación. Estos ventiladores, colocados de manera horizontal, crearán una turbulencia que hará que el nitrógeno gaseoso atomizado y frío circule por todas las partes posibles en contacto íntimo del producto a congelar.

El nitrógeno gaseoso caliente tenderá a salir a la atmósfera por el ducto.

Es en esta última etapa en donde nos damos cuenta de la baja eficiencia del sistema. Y es que el nitrógeno gaseoso que sale a la atmósfera podrá tener capacidad todavía de congelación.

#### 3.4. VENTAJAS DE LA CONGELACION CRIOGENICA CON NITROGENO LIQUIDO RESPECTO A LA CONGELACION CON CO2 LIQUIDO

VENTAJAS	DESVENTAJAS
-Mejor eficiencia 1.6 BTU/lb Vs. 1.2 BTU/lb	-Aceptación comercial del CO2
-Es más frío: -195°C Vs. -85°C	-Costos variables más altos El costo del nitrógeno es más alto que el de la energía (de sistemas mecánicos)
-Menor espacio para congelar la misma producción	-Los costos totales de una unidad de refrigeración mecánica son menores que con nitrógeno líquido en rangos por encima de 3000-4000 lb/hr.
-Confiabilidad en el suministro de nitrógeno líquido Vs. dependencia del CO2 de amoníaco disponible, así como de refineries de petróleo	
-Menor inversión	
-Tiempo de retención para congelación menor	
-Mejor calidad del producto	
-Mejor apariencia	

FIGURA 3. EQUIPO DE CONGELACION PARA CO<sub>2</sub>

## CAPITULO 4

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE UN TUNEL DE CONGELACION  
CRIOGENICO.

Como se pudo observar en el Capítulo 3, dentro de los equipos de congelación criogénica, el que presenta los mejores rendimientos y en consecuencia una mejor eficiencia es el túnel de congelación a contracorriente del flujo de alimento porque la temperatura del nitrógeno extraído es mayor que en otros equipos de velocidad de congelación similar, lo que significa una mayor absorción de calor sensible.

Pero por otro lado, el túnel de inmersión garantiza proveer una excelente calidad de congelación individual en el producto, tipo IQF (Individual Quality Freezing, por sus siglas en inglés), en el menor tiempo posible por cualquier otro equipo conocido a la fecha. Sin embargo, el consumo de nitrógeno líquido es superior al necesario en los túneles con boquillas de atomizado, por la cantidad de nitrógeno perdido en el enfriamiento del tanque de inmersión y el trabajo que efectúa la segunda sección del túnel como un cambiador de calor de flujo concurrente que no recibe la misma cantidad de calor sensible, como lo es a contracorriente en el túnel de LIN atomizado.

Ahora bien en lo referente a la cámara de congelación, esta no es recomendable para alta producción, ya que es un proceso intermitente el cual permite la entrada de calor al reiniciar cada ciclo de congelación por lote, lo cual se traduce en un mayor consumo de nitrógeno para reenfriar la cámara, y además porque para lograr una congelación suficientemente rápida, se origina una extracción de nitrógeno más frío que con cualquiera de los túneles, lo que se traduce en una absorción mínima de calor sensible.

Es por lo anterior, y que para efectos de esta tesis, que el túnel de congelación por atomizado de LIN será conocido con mayor detalle y atención a fin de seleccionar todas sus partes y componentes tanto en compatibilidad higiénica y de baja temperatura como en funcionamiento.

#### 4.1 DESCRIPCION DE UN TUNEL DE CONGELACION CRIOGENICO POR ATOMIZADO DE NITROGENO LIQUIDO

El túnel de congelación es un cuerpo aislado, fabricado de lámina y accesorios de acero inoxidable tanto en el interior como en el exterior. Las bajas temperaturas a la que es sometido (dilataciones y contracciones severas), el comportamiento mecánico, así como el comportamiento inerte que presenta al tener contacto con los alimentos hacen de este material el óptimo para su fabricación. Existe entre ambas placas un aislamiento que impedirá que el calor del medio ambiente afecte nuestro proceso, el cual estará

controlado en temperatura, tiempo de congelación individual, inertización, y flujo de nitrógeno líquido.

Hay que darnos cuenta que este túnel es en realidad un intercambiador de calor en donde habrá una transferencia de calor entre un gas (nitrógeno) y un sólido (alimento) principalmente. Este intercambiador de calor podrá trabajar a flujo concurrente o con flujo a contracorriente dependiendo de la dirección de viaje de la banda transportadora. La mejor eficiencia térmica se logra en este equipo trabajando con un flujo a contracorriente como se demostró en el Capítulo 3. Además en este túnel se podrá incrementar o disminuir la permanencia en el interior de un producto a procesar, el cual se conoce como el tiempo de residencia, a fin de lograr el nivel de congelación deseado según el tamaño y constituyentes del alimento.

El túnel contendrá en su interior una atmósfera inerte a temperatura controlada cuya magnitud en volumen estará en función de la carga y temperatura del producto a procesar. La transferencia de calor en el interior del túnel entre el gas y el sólido es optimizada gracias a una agitación que logrará que el gas tenga el mayor contacto posible con el sólido siendo también un factor importante la longitud del mismo.

A su vez contará con un extractor, el cual además de crear una presión diferencial dentro del túnel, extrae el gas caliente. Al mismo tiempo es inyectado nitrógeno en el

otro extremo, y al evaporarse formará un gas frío, para así tener un proceso continuo.

#### 4.2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CUERPO DEL TUNEL

De acuerdo al comportamiento que existe en los materiales a temperaturas criogénicas nos podremos dar cuenta que de acuerdo a sus características el material que mejor resistirá los cambios de temperatura que ocurren al trabajar con nitrógeno líquido es el acero inoxidable.

Los aceros inoxidables más comúnmente usados en la industria en general son:

TIPO	CARACTERISTICAS
- 304,304L	Resistencia general a la corrosión
- 308,309,309S 310,310S	Trabajo a altas temperaturas, tales como en precalentadores, varilla para soldar
- 316,316L	Resistencia general a la corrosión, especialmente cuando los tipos 304 y 304L están sujetos a una corrosión diseminada o excesiva
- 317	Aplicaciones en donde se necesite mejor resistencia a la corrosión de la que se puede obtener del 316 y 316L
- 430	Resistencia al ácido nítrico y otros medios altamente oxidantes, así como para cloruros conteniendo agua donde los tipos 304 y 316 puedan estar sujetos a fracturación por esfuerzos en la corrosión

## ESPESOR

Calibre No.	en milímetros	en Milésimas de Pulg.
3	6.372	239.1
4	5.695	224.2
5	5.314	209.2
6	4.935	194.3
7	4.554	179.3
8	4.174	164.4
9	3.797	149.5
10	3.416	134.5
11	3.038	119.6
12	2.657	104.6
13	2.278	89.7
14	1.897	74.7
15	1.709	67.3
16	1.519	59.8
17	1.366	53.8
18	1.214	47.8
19	1.062	41.8
20	0.912	35.9
21	0.836	32.9
22	0.759	29.9
23	0.683	26.9
24	0.607	23.9
25	0.531	20.9
26	0.455	17.9
27	0.416	16.4
28	0.378	14.9
29	0.343	13.5
30	0.305	12.0
31	0.267	10.5
32	0.246	9.7

TABLA 4.1 CALIBRES DE LAMINA

- 301 Recipientes y contenedores para guardar resinas y evitar contaminación
- 303,303Se Tuercas y tornillos que no necesiten maquinado
- 305 Sujetadores, desviadores corrugados y techados en los procesos de la industria química
- 321,347,348 Relativamente poco uso desde la versatilidad obtenida en el 304L, que es más barato y casi con la misma resistencia a la corrosión
- 405 Este es más fácil de soldar que el 410. Algunos tubos para reacción y intercambiadores de calor son del tipo 405 debido a su alta ductibilidad que lo hace más fácil de trabajar.
- 410 Partes de compresores, de bombas y diversas aplicaciones ingenieriles. Tubos del tipo 410 tratados térmicamente para alta resistencia son usados en procesos de alta presión para fabricar tubos de polietileno
- 416,416Se Tuercas y tornillos que se requiera no estén maquinados
- 420 Vástago de válvulas
- 442,446 Aplicaciones a alta temperatura en donde existan atmósferas altamente sulfúricas que hacen la presencia del níquel indeseable.

El tipo 446 es también utilizado en cambiadores de calor tubulares con agua salina ya que no es susceptible al agrietamiento por los esfuerzos de la corrosión

Los tipos 304L y 316L se prefieren sobre los tipos 304 y 316 si se han de soldar sin algún tratamiento térmico posterior.

El acero inoxidable se utilizará en todos los componentes metálicos del túnel, sujetos a contracciones, fricción o movimiento de rotación o traslación y de ahí la importancia de seleccionar el material adecuado para éste.

#### 4.2.1. DILATACION Y CONTRACCION TERMICA DE MATERIALES

A) Materiales diferentes, mismo  $\Delta T$

Material 1= Plástico

Material 2= Acero inoxidable

Ambos sujetos a la misma temperatura.

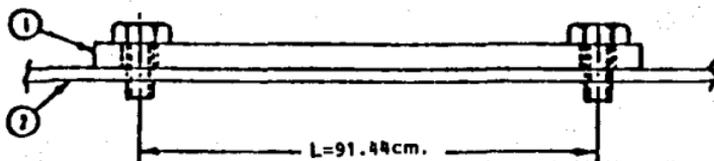


FIGURA 4.1 MATERIALES DIFERENTES, MISMO  $\Delta T$

$\alpha_{\text{acero inoxidable}} = 19.1 \text{ cm./cm./}^\circ\text{C} \times 10^{-6}$        $T = 200^\circ\text{C}$

$\alpha_{\text{plástico}} = 20 \text{ cm./cm./}^\circ\text{C} \times 10^{-6}$        $L = 91.44 \text{ cm.}$

Estamos interesados en la contracción que ocurrirá entre los 2 barrenos de los tornillos.

Sabemos que  $L = \alpha L_0 \Delta T$

$$\Delta L \text{ acero inoxidable} = (19.1 \times 10^{-6})(91.44 \text{ cm.})(200^\circ\text{C}) = 0.349 \text{ cm.}$$

$$\Delta L \text{ plástico} = (20 \times 10^{-5})(91.44 \text{ cm.})(200^\circ\text{C}) = 0.657 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} \text{Holgura total requerida} &= \Delta L \text{ acero inoxidable} - \Delta L \text{ plástico} \\ &= 0.349 - 0.657 = -3.308 \text{ cm.} \end{aligned}$$

el plástico se encoge 3.308cm. más que el acero inoxidable, así la holgura requerida es de 3.308cm.

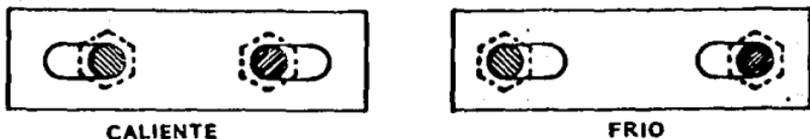


FIGURA 4.2 CONTRACCION DEL MATERIAL

En la transición de caliente a frío, el plástico se contrae 3.308cm. más que el acero inoxidable. Para mantener centrado al plástico en relación al acero inoxidable, habrá que dividir la contracción total equivalente entre los dos barrenos, es decir,  $3.308/2 = 1.65 \text{ cm.}$  de tolerancia para cada barreno.

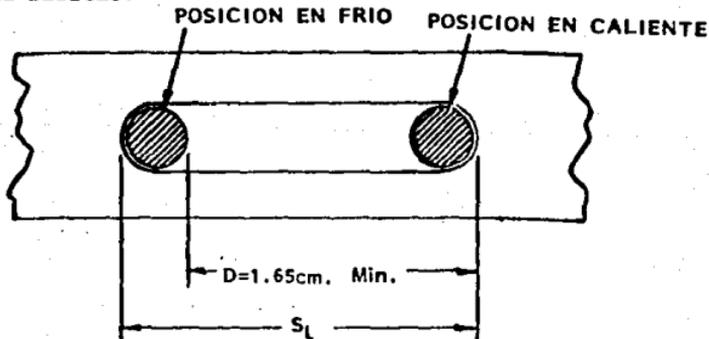


FIGURA 4.3 POSICION DE LOS BARRENOS

Ahora, para permitir que el plástico se deslice a través del barreno, los tornillos no deberán apretarse totalmente. Deberá dejarse un atornillado relativamente suave (lo más fuertemente apretado con la mano) y asegurar los tornillos con algún sellador plástico.

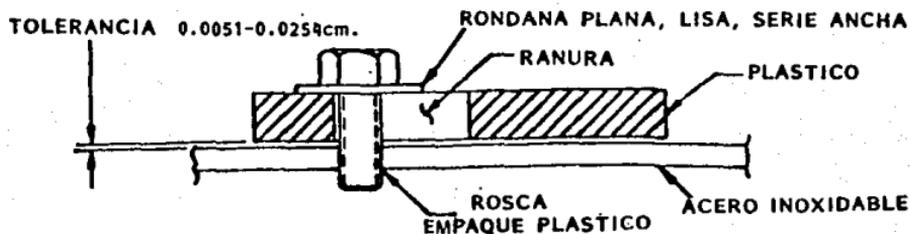


FIGURA 4.4 FIJACION

Una variación a esta técnica de diseño es la de fijar un extremo del arreglo a colocar y permitir que el otro extremo flote libremente. De tal manera, el arreglo se podrá contraer todo lo necesario sin desarrollar ningún esfuerzo.

Los soportes de las bandas de los túneles, por lo general se encuentran fijos por un lado y sueltos por el otro.

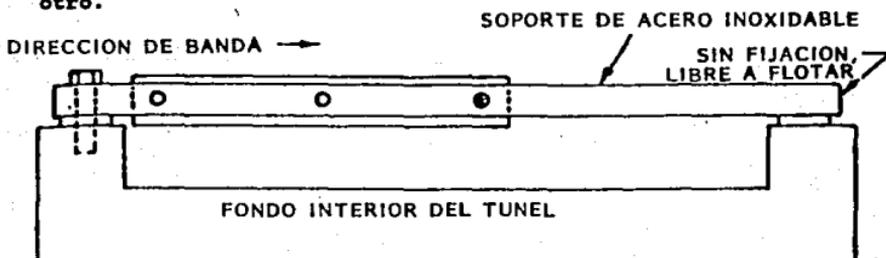


FIGURA 4.5 EJEMPLO DE FIJACION

Con este diseño no será necesario hacerle un barreno sobredimensionado a la pieza, ya que estará libre para contraerse pues no está fijo en ambos extremos.

B) Metales similares, diferentes  $\Delta T$

Para una construcción tipo "sandwich"

Material= Acero inoxidable  $\Delta T_1 = 200^\circ\text{C}$

T inicial=  $50^\circ\text{C}$   $\Delta T_2 = 50^\circ\text{C}$

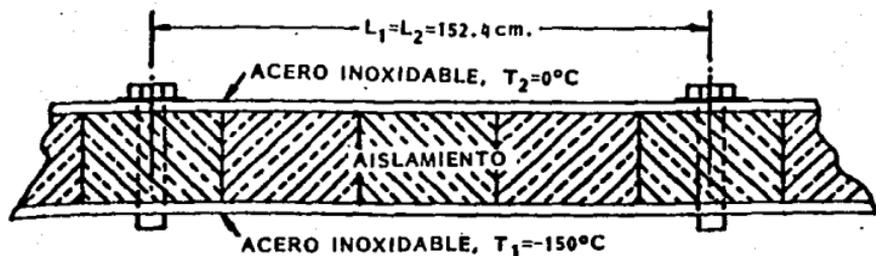


FIGURA 4.6 MATERIALES SIMILARES, DIFERENTE  $\Delta T$

$$\Delta L_1 = (19.1 \cdot 10^{-6} \text{ cm./cm./}^\circ\text{C}) (152.4 \text{ cm.}) (200^\circ\text{C}) = 0.58 \text{ cm.}$$

$$\Delta L_2 = (19.1 \cdot 10^{-6} \text{ cm./cm./}^\circ\text{C}) (152.4 \text{ cm.}) (50^\circ\text{C}) = 0.145 \text{ cm.}$$

$$\Delta L_{1+2} = 0.43 \text{ cm.}$$

Así, la expansión total permitida será de 0.43cm., que si la dividimos entre los 2 barrenos nos dará = 0.217cm. por barreno (D= 2.16 cm.)

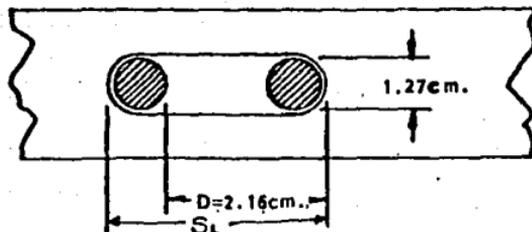


FIGURA 4.7 POSICION DE LOS BARRENOS

Así, si el diámetro del tornillo es de 1.27cm., entonces el barreno deberá tener una longitud de 2.37cm.. Con esta contracción relativamente pequeña, será más fácil sobredimensionar el agujero con una broca que maquinar un barreno largo.

También se usarán los mismos criterios de apretado usados en el inciso A para permitir el movimiento, esto es apretar a mano lo más fuerte posible la tuerca y utilizar fijadores de material plástico para mantenerla en su lugar, recordando que el silicón a utilizar debe ser para servicio criogénico.

C) Estructuras monolíticas, esfuerzos de doblado, y sellado de juntas.

El diferencial de temperatura  $\Delta T$  será grande entre la capa interna y la capa externa que son del mismo material (acero inoxidable) tal como ocurre en los paneles de la estructura que son todos de acero inoxidable.

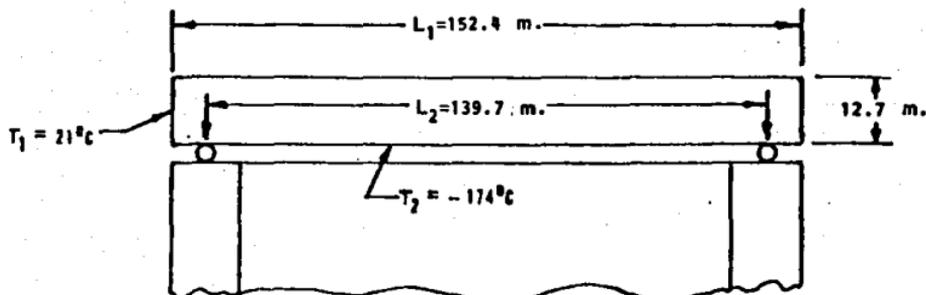


FIGURA 4.8 LONGITUDES Y VARIACION DE TEMPERATURA DEL MODULO

$$\Delta L_1 = 0; \text{ (no hay } \Delta T \text{)}$$

$$\Delta L_2 = (19.1 \times 10^{-6}) (139.7 \text{ cm.}) (195^\circ\text{C}) = 0.52 \text{ cm.}$$

Con la contracción del lado frío (0.52cm.) y sin flexión del acero, el monolito se torcerá hacia la pared que sufre la contracción.

La deformación  $\delta$  puede ser calculada en proporciones geométricas. Esta deformación es importante si el panel debe de sellar contra la junta criogénica.

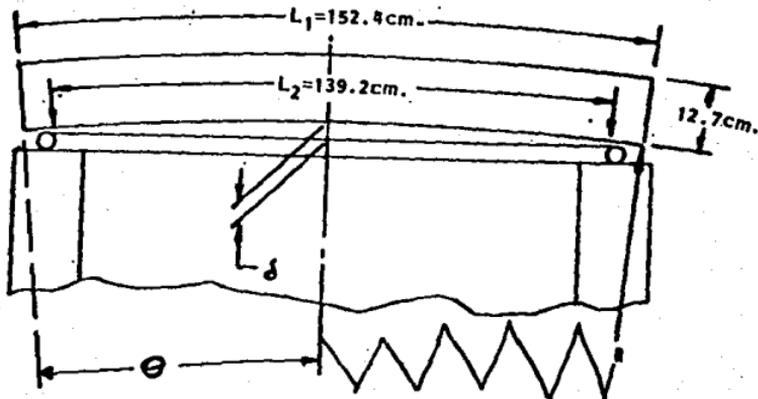


FIGURA 4.9 CONTRACCION DEL MODULO

$$\delta = \frac{H}{\alpha \Delta T} \left[ 1 - \cos \left( \text{ARC SEN} \left[ \frac{(L_0 - \Delta L)(\alpha \Delta T)}{2 H} \right] \right) \right]$$

donde  $L_0$  en la ecuación es  $L_2$  en nuestro problema y se contraerá  $\Delta L$ .

Por ejemplo, de la ecuación anterior para un panel de 152.4 cm. la deformación será:

$$\delta = 0.7112 \text{ cm.}$$

Como norma de uso, la junta criogénica de 1.27cm. de diámetro transversal se comprimirá a 6.35 mm. de espesor para formar un sello que resistirá una presión hasta de 0.035 kg/cm<sup>2</sup> que comúnmente es provocada por la atmósfera de nitrógeno. Cuando el panel es enfriado a -174°C, la deflexión del panel de 0.0711cm. ocurrirá en el centro de las 4 esquinas. Esto liberará 0.0711cm. de compresión en la junta. Dado que la compresión original era de sólo 0.635 cm., la deflexión del panel abrirá un hueco de 0.0762cm.. El nitrógeno líquido se fugará por este hueco.

Las soluciones para evitar este pandeo serán:

- 1) Procurar tener las secciones expuestas al frío cortas, normalmente menores a 152.4 cm.. Habrá que cuidar que la deformación no sea mayor a la compresión de las juntas.
- 2) Un buen diseño de las juntas del lado frío se logra con instalación de nervaduras.

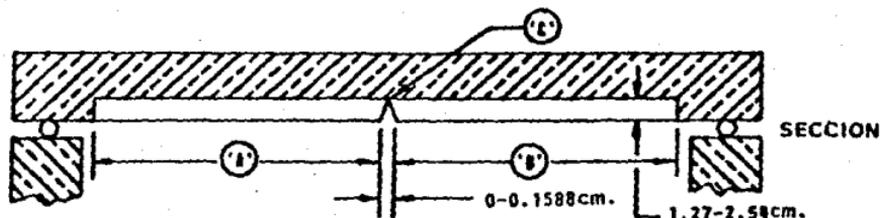


FIGURA 4.10 INSTALACION DE NERVADURAS

Con este diseño, "A" se contraerá independientemente de "B" y la contracción será absorbida por estas nervaduras a manera de juntas de expansión. El punto "C" se doblará absorbiendo los esfuerzos de las contracciones.

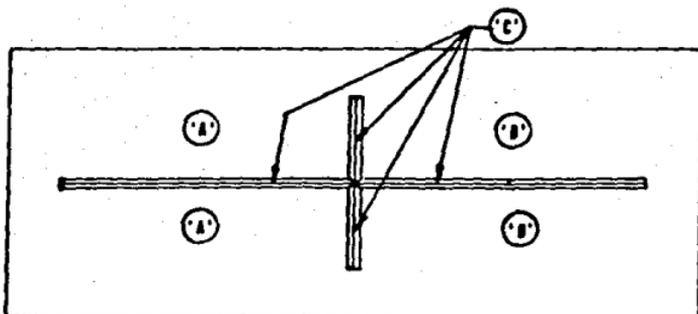


FIGURA 4.11 VISTA INFERIOR DE NERVADURAS

Conforme la superficie fría se contrae, la junta de expansión se abrirá, por ejemplo, un hueco de 0.158cm. se abrirá a 0.476cm. en promedio

- 3) La superficie interna podrá ser diseñada de tal manera que dé cabida a un largo adicional en condiciones calientes para que cuando esté frío, no existan esfuerzos y se tuersan. A temperatura ambiente, la superficie interna parecerá tener volumen y sin fijación. Sin embargo al

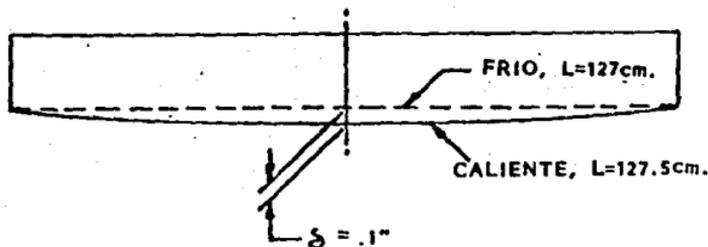


FIGURA 4.12 DIMENSIONES DEL PANEL

enfriarse a  $-173^{\circ}\text{C}$ , se estirará y pondrá tensa, quedando una superficie totalmente plana sin percibirse deformaciones o torceduras. El panel se mantendrá plano al estar frío.

- 4) Se podrá utilizar un metal que funcione como "bisagra" y ponerse dentro del panel. Este metal permitirá ser doblado y tendrá esfuerzos cercanos a su punto de cedencia, es decir, en el rango plástico. Este metal estará colocado en un punto de esfuerzos y podrá ser de un calibre más delgado a fin de recibir los esfuerzos.

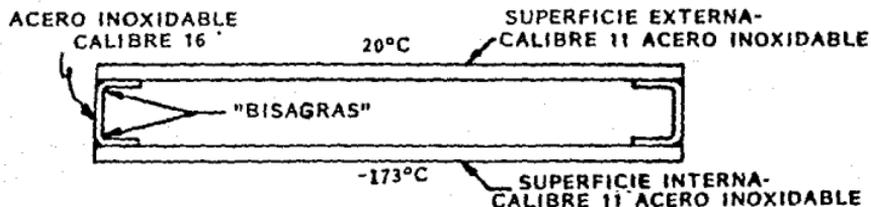


FIGURA 4.13 INTERIOR DEL PANEL.

Conforme la superficie interna de calibre 11 se enfríe, se contraerá alrededor de 0.508cm. a 1.524cm. de su longitud original a  $-173^{\circ}\text{C}$ . Las pequeñas soleras serán de calibre 16 y se doblarán en estos puntos deformándose primero elásticamente y después plásticamente. Esta deformación plástica será permanente, de tal manera que cuando el panel se caliente llegando a temperatura ambiente quedará una deformación en el punto de la bisagra. Esto dará al acero inoxidable de calibre 16 una

apariciencia ondulada al estar caliente.

- 5) Será necesario instalar unos broches para presionar el panel deformado contra la junta.

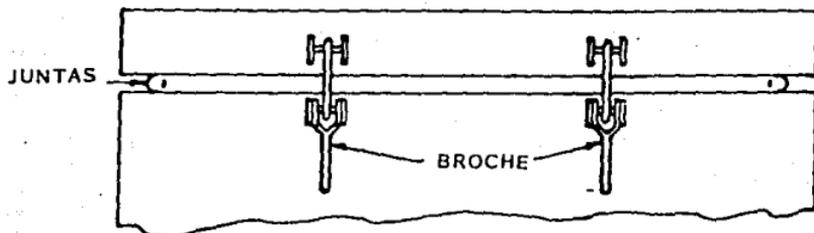


FIGURA 4.14 UBICACION DE JUNTAS

#### 4.3. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

El tipo de aislamiento térmico que se usará en nuestro sistema, ya sea en la línea de suministro o bien en el cuerpo del túnel deberá estar sujeto a las condiciones que exigen las temperaturas criogénicas. Es por eso que se hará un listado de aislamientos propios para este tipo de aplicaciones en un orden que irá de acuerdo a su comportamiento y generalmente en orden del incremento en costo. Así, veremos que el usar un aislamiento en específico para alguna aplicación en particular se determina en función de su costo, facilidad de aplicación, rigidez, y considerando además su eficiencia. Los tipos de aislamiento luego entonces serán:

1. Espumas expandidas
2. Polvos inyectados con gas (porosos) y materiales fibrosos

3. Vacío
4. Polvos evacuados y materiales fibrosos
5. Polvos opacos
6. Aislamientos multicapas

#### 4.3.1. ESPUMAS EXPANDIDAS

El aislamiento con espumas expandidas tiene una estructura celular formada por la emisión de gases durante la fabricación de la espuma. Algunas de estas espumas son las espumas de poliuretano, espuma de poliestireno, hule, sílica y espuma de vidrio. La conductividad térmica de los aislamientos de espuma depende del gas utilizado para hacer la espuma del aislamiento aunado a la contribución debida a una transferencia de calor interna y a una conducción de los sólidos.

El gas espumante que se utiliza en muchas de las espumas expandidas es el dióxido de carbono, que tiene un vapor a baja presión a temperaturas del nitrógeno líquido. La conductividad térmica de la espuma fresca decrece cuando un lado es inicialmente enfriado a temperatura del LIN ya que mucho del CO<sub>2</sub> se condensa del aislamiento.

#### 4.3.2. POLVOS INYECTADOS CON GAS Y MATERIALES FIBROSOS

Otro tipo de aislamientos, tales como los porosos, incluyen a la fibra de vidrio, corcho en polvo, perlita.

El principal mecanismo de estos aislamientos es la reducción o eliminación de la convección debido al pequeño

tamaño de los huecos en el material. En adición, para el caso de polvos muy finos, la distancia entre las partículas de polvos se volverán más pequeñas que la trayectoria media libre del gas dentro del aislamiento y el mecanismo de conducción gaseosa pasará de continuo a una conducción libre molecular.

En este caso, la conductividad térmica efectiva del gas decrece y la aparente conductividad térmica del material es mayor que la de polvos de partículas mayores.

#### 4.3.3. AISLAMIENTOS AL VACIO

Los aislamientos al vacío tienen un uso extensivo en los pequeños tanques de laboratorio. El usar aislamientos por vacío elimina esencialmente dos componentes de la transferencia de calor: la conducción de sólidos y la convección de los gases. El calor se transfiere a través del espacio anular de un recipiente aislado al vacío por radiación que va de la cubierta caliente exterior al recipiente interior que se encuentra frío y por la conducción gaseosa en los gases residuales en el espacio anular.

La transferencia de calor por radiación se puede reducir interponiendo unos escudos de radiación de material altamente reflectivo entre las superficies frías y calientes.

Aunado a la energía transferida por radiación, la energía se transmite por la conducción de gases del gas

residual en el espacio al vacío. Si la presión del gas es lo suficientemente baja que la trayectoria media libre de las partículas de gas sea mayor que la distancia entre las dos superficies, el tipo de conducción diferirá de la conducción continua típica a presión ambiental, dado que las moléculas de gas raramente chocan entre ellas. Por lo tanto, una molécula individual de gas viaja a través del espacio donde está confinado el gas sin transferir energía a otras moléculas de gas.

#### 4.3.4. AISLAMIENTOS FIBROSOS Y DE POLVOS EVACUADOS

Siendo que la conducción de los gases es uno de los modos primarios de transferencia de calor en los aislamientos con polvos y con fibras, el método más obvio para reducir la transferencia de calor a través de estos aislamientos es el de evacuar los gases del aislamiento.

Para polvos altamente evacuados y aislamientos fibrosos a temperatura ambiente, la contribución por radiación es mayor que la contribución por conducción de sólidos del total de una transferencia de calor.

Así mismo, la contribución por radiación se volverá menor que la contribución por conducción de sólidos para temperaturas entre la del nitrógeno líquido y la del hidrógeno líquido. Por esta razón los aislamientos con polvos evacuados tienen una mejor eficiencia que un aislamiento al vacío (esto es para aislamientos con espesor

mayor a 10 cm.) para transferencia de calor entre temperatura ambiente y la del nitrógeno líquido.

#### 4.3.5. AISLAMIENTO CON POLVOS OPACOS

Debido a que una gran parte del total de calor transferido a través de los polvos evacuados de una superficie a temperatura ambiente a otra a temperatura criogénica es por energía radiante, uno puede esperar que el comportamiento del aislamiento pueda mejorarse por cualquier método que reduzca la transferencia de calor radiante. Este mejoramiento en el comportamiento se logra con la adición de cobre o aluminio en forma de hojuelas a los polvos evacuados. La conductividad térmica de los polvos opacos irá en función de la fracción en peso de las hojuelas. Usando la cantidad óptima de éstos (entre 40 y 50% en peso) la conductividad térmica de un polvo evacuado bajará hasta casi 5 veces. El problema con este tipo de aislamiento es el tratar de evitar que las hojuelas se empaqueten, ya que sólo se logrará incrementar la conductividad térmica.

#### 4.3.6. AISLAMIENTOS MULTICAPAS

Consisten en alternar capas de material altamente reflejante tales como hojuelas de aluminio o cobre y un espaciador de baja conductividad, como son hojas de fibra de vidrio, redes de nylon. Las capas reflejantes pueden separarse también arrugando las hojas para que sólo tengan contacto en ciertos puntos y un espaciador no será necesario.

La baja conductividad térmica de este tipo de aislamientos puede ser explicada por el hecho de que todas las formas de transferencia de calor, ya sea por radiación, conducción de sólidos o por conducción en gases son reducidos a un mínimo. La radiación es minimizada usando varias capas de hojuelas de un metal altamente reflejante. La conducción sólida a través del material espaciador es minimizada usando un material fibroso de baja conductividad o arrugando el material de escudo para permitir el contacto sólo en algunos puntos. La conducción gaseosa es minimizada reduciendo la presión del gas residual a valores en el orden de 1.3 mPa (10 torr).

#### VENTAJAS

#### DESVENTAJAS

##### 1. Espumas expandidas

- bajo costo
- no hay necesidad para cubiertas rígidas del vacío
- buena resistencia mecánica

- alta contracción térmica
- la conductividad varía con el tiempo

##### 2. Polvos llenados con gas y materiales fibrosos

- bajo costo
- fácil aplicación en bordes difíciles
- no flamables

- requiere barrera
- los polvos se empaquetan y la conductividad se incrementa

##### 3. Vacío

- los bordes difíciles

- se requiere mantener un al-

suelen ser fácilmente  
aislados

- bajas pérdidas por enfriamientos iniciales
- bajo flujo de calor para bajos espesores entre el recipiente interno y el externo

to vacío permanentemente

- se requieren superficies con bordes de baja emisividad

#### 4. Polvos evacuados y materiales fibrosos

- el nivel de vacío es menos estricto que para aislamientos multicapas
- perfiles complicados pueden ser fácilmente aislados
- relativamente fácil de evacuar

- se pueden empaquetar bajo cargas vibratorias y ciclos térmicos
- filtros de vacío son requeridos

#### 5. Polvos opacos

- mayor rendimiento que los polvos convencionales evacuados
- perfiles complicados pueden ser fácilmente aislados
- los requerimientos de vacío no son tan estrictos como para aislamientos multicapas

- costo mayor que el de los polvos evacuados
- peligros de explosión del aluminio en una atmósfera con oxígeno
- problemas al acomodar las hojuelas metálicas

y de vacío total

#### 6. Aislamientos multicapas

- |  |   |
|--|---|
| -el mejor rendimiento de todos los aislamientos                          | -mayor costo por unidad de volumen                            |
| -bajo peso   | -difícil de aplicar en perfiles complicados                   |
| -pérdidas por enfriamiento inicial menores comparadas a la de los polvos | -problemas con la conducción lateral                          |
| -mejor estabilidad que los polvos  | -se requiere mantener un vacío más estricto que en los polvos |

#### 4.4. SELECCION DE REDUCTORES DE VELOCIDAD

##### 4.4.1. REDUCTORES DE VELOCIDAD FIJA

Los reductores de velocidad pueden ser de muchos tipos, figurando los de tipo compacto con engranes. Los reductores de velocidad tienen una relación de velocidad fija que no se puede cambiar fácilmente. Además de reductores, también podrán funcionar como aumentadores de velocidad. Los reductores de velocidad comunes se pueden clasificar bien sea como integrales con base de montaje, o montados directamente al eje.

Normalmente los reductores montados directamente al eje se combinan con transmisiones por medio de correas en V. Combinando las velocidades normales de los motores eléctricos con las transmisiones de correas en V y las relaciones de los reductores, se obtienen velocidades de

salida desde 10 hasta 400 RPM, potencias hasta de 180 H.P. y momentos torsionales hasta 150,000 lb/pulg.

La relación de velocidad de los reductores montados al eje, es fija. Los aumentos o disminuciones de velocidad se obtienen cambiando la relación de la transmisión de correas en V.

#### 4.4.2. REDUCTORES COMPACTOS DE VELOCIDAD REGULABLE

Estos se aplican desde máquinas herramientas pequeñas hasta camiones. Pueden tener algunas velocidades previamente seleccionadas, o variar la velocidad infinitamente en un amplio límite. La eficiencia es generalmente alta, en algunas unidades puede estar por encima del 90% dependiendo del tipo de transmisión.

#### 4.4.3. TRANSMISIONES DE ENGRANAJES DE VELOCIDAD REGULABLE

Las transmisiones múltiples de velocidad por sistema de engranajes ofrecen velocidades muy exactas a una alta eficiencia. Se usan en máquinas herramientas, equipos móviles y otras aplicaciones donde la selección de varias velocidades fijas es necesaria.

En forma general puede agruparse en cuatro tipos:

- . engranajes desplazables
- . transmisiones de engrane constante
- . engranaje loco
- . engranaje planetario

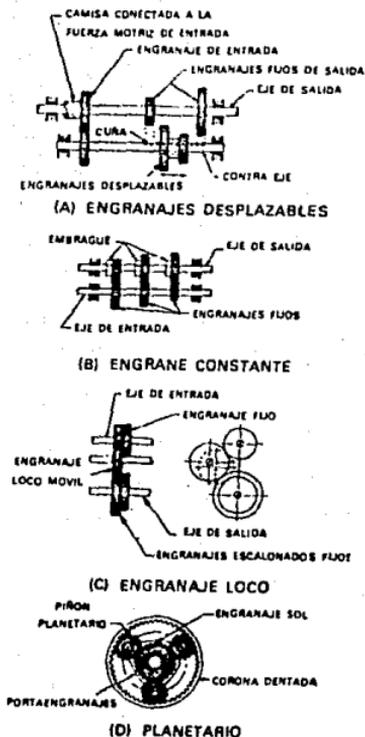


FIGURA 4.15 TRANSMISION REGULABLE DE ENGRANAJES

#### 4.4.4. TRANSMISIONES DE VELOCIDAD REGULABLE DE CORREA Y CADENA

Convierten la velocidad constante de entrada en velocidades de salida no escalonadas dentro de cierto rango. Además pueden estar integradas a motores o reducciones de engranajes obteniéndose bajas velocidades en las salidas.

Generalmente operan conjuntamente con motores eléctricos como fuente de suministro de potencia.

Comúnmente las relaciones de velocidad varían desde 10:1 hasta 2:1. Algunas se consiguen con relaciones hasta de 16:1. Normalmente las velocidades de salida para unidades con engranajes reductores o sin ellas van de 4660 a 1.7 RPM.

#### 4.4.5. TRANSMISION DE VELOCIDAD REGULABLE POR FRICCIÓN Y TRACCION

Estos transmiten el movimiento rotativo por la fricción que se genera en el punto o la línea de contacto. Los cambios de velocidad se efectúan moviendo el punto o la línea de contacto con respecto al centro de rotación de los miembros impulsores e impulsados.

#### 4.4.6. TRANSMISIONES DE VELOCIDAD REGULABLE DE IMPULSO

Las transmisiones de impulso ofrecen regulación infinita de la velocidad de salida, generalmente en una gama baja de velocidades, a altas relaciones de reducción y en un tamaño compacto. Aunque la mayoría de las transmisiones de impulso pueden regularse hasta 0, normalmente las velocidades de salida varían desde 1.5 hasta 40 RPM.

La operación se basa en el continuo espaciamiento, el miembro impulsor engrana el impulso, lo mueve una distancia predeterminada y lo desengrana.

#### 4.5. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE TRANSMISIONES POR CORREAS, CADENAS Y ENGRANAJES

Las cadenas, engranajes y correas se usan para la

<b>TRANSMISIONES DIRECTAS</b>		<p>ACOPLEMENTOS</p> <p>DE BRIDAS</p>
<b>TRANSMISIONES DE CORREA CADENAS O ENGRANAJES</b>		<p>TRANSMISION 1 A 1 DE CORREA</p> <p>TRANSMISION 1 A 1 DE CADENA</p> <p>TRANSMISION 1 A 1 DE ENGRANAJES RECTOS</p> <p>TRANSMISION 1 A 1 DE ENGRANAJES CONICOS</p>
<b>AUMENTADORAS DE FUERZA</b>		<p>POLEA Y CORREA</p> <p>ENGRANAJES MECIOS</p> <p>RUEDAS DENTADAS Y CADENA</p> <p>ENGRANAJE Y TORNILLO SIN FIN</p>
<b>AUMENTADORAS DE VELOCIDAD</b>		<p>POLEA Y CORREA</p> <p>RUEDAS DENTADAS Y CADENA</p> <p>ENGRANAJES CONICOS</p>
<b>TRANSMISIONES INTERMITENTES (ESPACIADORAS)</b>		<p>IMPULSADO IMPULSOR</p> <p>IMPULSADO IMPULSOR</p> <p>RODILLO</p> <p>RUEDA ESPACIADORA</p> <p>CUATRO ESTACIONES</p> <p>SEIS ESTACIONES</p>

TABLA 4.2 TRANSMISIONES Y AUMENTADORES DE VELOCIDAD

transmisión de potencia entre ejes que rotan y que no están directamente acoplados.

Una transmisión de cadena se compone de una cadena sin fin, cuyos eslabones engranan con ruedas dentadas, unidas a los ejes de los mecanismos impulsores e impulsados por medio de cuñas.

Las cadenas de precisión como las cadenas de rodillos y las cadenas silenciosas, están hechas con partes terminadas bajo tolerancias muy estrictas.

Una transmisión simple de engranajes consta de una rueda motriz con dientes que engranan con otra similar. Los dientes son diseñados para garantizar la rotación angular uniforme del eje impulsado durante el engranaje. Existen engranajes simplemente fresados y otros terminados con precisión. Los engranajes podrán ser rectos o bien helicoidales.

La transmisión de bandas consiste en una correa flexible sin fin, que conecta dos ruedas o poleas. La transmisión de potencia en estas transmisiones depende de la fricción entre la superficie de la banda y la polea. El material más comúnmente usado para correas planas es el cuero, bien sea una sola capa, o dos o más capas pegadas entre sí. En la mayoría de los casos, la banda se corta a la longitud requerida, y los dos extremos se unen por medio de un enrejado hecho con tiras de cuero. También se utilizan enlaces disponibles comercialmente.

Las chumaceras o cojinetes de manguito son el medio más simple y económico para soportar una parte en movimiento. No tienen partes móviles y normalmente son de una pieza metálica que encierra un eje. La palabra chumacera significa la parte soportada del eje.

Los cojinetes antifricción pueden ser los cojinetes de bolas, de rodillos y de agujas, en los cuales la fricción se reduce a un mínimo.

Las consideraciones de los cojinetes a utilizar se basa en las características de la aplicación. Aunque algunas veces la selección puede presentar problemas complejos que demanden considerable experiencia, las siguientes consideraciones sirven como una guía general para las aplicaciones comunes:

. Por lo general los cojinetes de bolas en tamaños pequeños y cargas livianas son los más económicos, mientras que los cojinetes de rodillos son los menos costosos en los tamaños mayores y más altas cargas.

. Los cojinetes de rodillos operan de manera más satisfactoria que los de bolas bajo cargas de impacto.

. En el caso de existir desalineamiento entre el bastidor y el eje, se debe usar un cojinete autoalineador de bolas o un cojinete de rodillos esféricos.

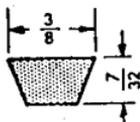
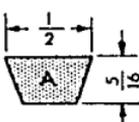
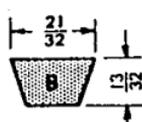
. Los cojinetes axiales de bolas sólo se deben someter a cargas de puro empuje. A altas velocidades es mejor usar rodamientos con garganta profunda o con contacto angular, aún para casos de puro empuje.

## CAPACIDAD EN HP

HP de la polea pequeña	Diámetro exterior de la polea grande — pulgadas														
	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
200	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
400	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
600	0.04	0.07	0.08	0.12	0.18	0.22	0.27	0.32	0.36	0.44	0.51	0.58	0.66	0.73	0.81
800	0.05	0.08	0.11	0.15	0.22	0.28	0.34	0.41	0.45	0.55	0.64	0.74	0.81	0.93	1.03
1000	0.06	0.10	0.12	0.18	0.26	0.33	0.42	0.48	0.55	0.64	0.75	0.86	0.96	1.10	1.21
1160	0.07	0.11	0.15	0.21	0.29	0.38	0.46	0.54	0.62	0.69	0.84	0.98	1.07	1.23	1.35
1400	0.08	0.12	0.17	0.23	0.33	0.43	0.53	0.64	0.74	0.84	0.96	1.10	1.25	1.42	1.55
1600	0.08	0.14	0.19	0.25	0.36	0.48	0.58	0.69	0.80	0.90	1.02	1.20	1.36	1.53	1.68
1750	0.08	0.15	0.20	0.25	0.38	0.51	0.63	0.74	0.85	0.96	1.08	1.25	1.43	1.61	1.78
2000	0.09	0.16	0.22	0.28	0.41	0.55	0.68	0.81	0.92	1.05	1.17	1.35	1.54	1.73	1.90
2200	0.09	0.17	0.24	0.31	0.44	0.58	0.72	0.86	0.99	1.12	1.25	1.41	1.61	1.80	1.99
2400	0.10	0.18	0.25	0.32	0.45	0.61	0.76	0.91	1.05	1.19	1.32	1.45	1.65	1.86	2.02
2600	0.10	0.19	0.26	0.35	0.47	0.64	0.79	0.96	1.09	1.24	1.38	1.48	1.80	1.99	2.09
2800	0.11	0.19	0.28	0.36	0.48	0.66	0.83	0.99	1.14	1.28	1.42	1.48	1.71	1.91	2.11
3000	0.11	0.21	0.29	0.39	0.49	0.68	0.85	1.02	1.18	1.32	1.46	1.48	1.69	1.89	2.08
3200	0.11	0.21	0.30	0.39	0.51	0.70	0.88	1.05	1.20	1.36	1.50	1.50	1.67	1.86	2.03
3450	0.12	0.22	0.32	0.41	0.51	0.71	0.90	1.07	1.23	1.38	1.52	1.52	1.61	1.78	1.94
3500	0.12	0.22	0.33	0.42	0.52	0.72	0.91	1.09	1.25	1.40	1.54	1.54	1.54	1.71	1.85
3800	0.12	0.22	0.33	0.42	0.52	0.72	0.92	1.09	1.25	1.41	1.54	1.54	1.54	1.59	1.72
4000	0.12	0.22	0.34	0.44	0.53	0.72	0.92	1.10	1.26	1.40	1.52	1.52	1.52	1.52	1.55

FONDO

USAR

FONDO  USARFONDO  USAR

Nota: Un factor de servicio de 1.30 se ha incorporado en los valores de esta tabla. Para servicio pesado, se debe multiplicar la potencia de operación por .85, para servicio liviano por 1.20

TABLA 4.3 CAPACIDAD EN H.P. DE LAS BANDAS

Para la construcción de bandas también se utilizan materiales tales como hule, acero y lona impregnada de hule.

## 4.6. SELECCION DE COJINETES

Todas las partes rotatorias de maquinaria se soportan mediante algún tipo de cojinete. Estos pueden clasificarse en 2 grupos: chumaceras o cojinetes de manguito y cojinetes antifricción.

Sin embargo existe una zona donde la temperatura del túnel no es afectada por la longitud del mismo en la misma proporción que la carga de producto en la banda.

Esta zona se llama sensitiva porque responde al calor que el producto está cediendo al nitrógeno gaseoso y comprende desde la zona de atomizado hasta 0.5 m. aproximadamente después de dicha zona.

Es en la zona sensitiva donde se ubica un sensor de temperatura cuya señal nos proveerá el control en la inyección de nitrógeno líquido.

Sin embargo, resulta conveniente afirmar que la temperatura que dicho sensor recibirá de ninguna forma es la del alimento.

Es un promedio de valores cuya magnitud es muy cercana a la del nitrógeno líquido, mientras que en esa misma zona, la temperatura del producto es cercana a los  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Como consecuencia entonces, dicha señal servirá para el diseño de un control de temperatura, ya sea proporcional o bien de encendido-apagado.

Pero, para efectos de economía de proceso, el control encendido-apagado posee demasiada inercia para una inyección fina o proporcional de líquido, por lo que se preferirá un tipo de controlador que emita una señal a una válvula de alimentación durante todo el rango de temperaturas que se manifiestan en la zona sensible.

A mayor temperatura monitoreada, mayor inyección de líquido, y a menor temperatura menor inyección de líquido.

. Los cojinetes autoalineadores de bolas y de rodillos cilíndricos tienen muy bajos coeficientes de fricción.

Hay dos razones importantes por las cuales se usan lubricantes en los rodamientos:

- a) Para reducir la fricción entre las superficies que se rozan
- b) Como medio enfriador, que absorbe y disipa el calor que se genera.

#### 4.7. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA

Como intercambiador de calor, el túnel de congelación tiene diferentes temperaturas a lo largo de toda su longitud mientras se efectúa la congelación del alimento.

En efecto, tal y como se ilustra, un perfil de temperaturas existe dentro del equipo, y en función de la cantidad de nitrógeno líquido inyectado, así como de la carga del túnel, este perfil variará.

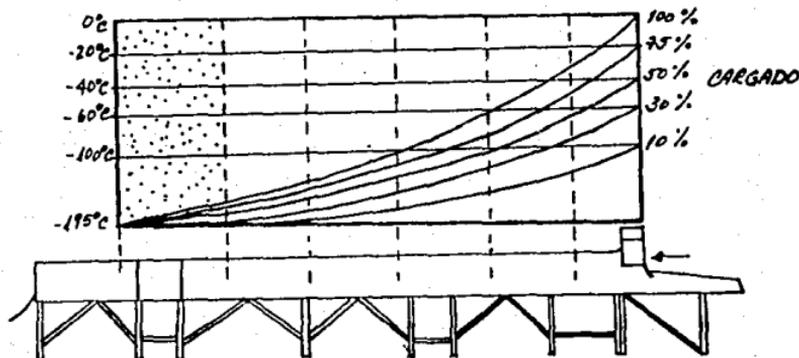


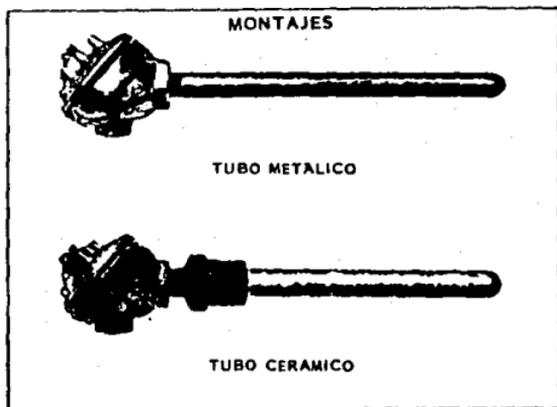
FIGURA 4.16 PERFIL DE TEMPERATURAS

DESCRIPCION

Estos termopares incluyen un elemento que consiste en alambres para el termopar, doble aislamiento cerámico, cabeza protectora, tubo protector. Construidos con materiales de alta calidad para cumplir con los altos estándares de Honeywell, estos termopares dan una solución para la medición de temperatura en aplicaciones alrededor de todo el mundo.

ACCESORIOS DE MONTAJE

Las cabezas terminales se pueden conseguir en dos tipos: cubierta rosca (a prueba de la Intemperie) como se muestran en la figura y los de uso general. Ambos tipos tienen conexión para tubo conduit de 1/2 pulg. y la cubierta rosca se puede obtener también con conexión de 3/4 pulg.



PRECISION DE LOS TERMOPARES

TIPO DE ALAMBRE	RANGO DE TEMPERATURA	LIMITES DE ERROR	
		STANDAR	PREMIUM
TIPO T	-200 a 0°C	±1°C ±15%	—
	0 a 350°C	±1°C ±0.75%	±0.5°C ±0.4%
	-300 a 32°F	±1.5°F ±2%	±0.75°F ±1%
	32 a 700°F	±1.5°F ±0.75%	±0.75°F ±0.38%
TIPO J	0 a 750°C	±2.2°C ±0.5%	±1.1°C ±0.4%
	32 a 1400°F	±4°F ±0.5%	±2°F ±0.38%
TIPO E	0 a 900°C	±1.7°C ±0.5%	±1°C ±0.4%
	32 a 1600°F	±3°F ±0.5%	±2°F ±0.38%
TIPO K	0 a 1250°C	±2.2°C ±0.75%	±1.1°C ±0.4%
	32 a 2300°F	±4°F ±0.75%	±2°F ±0.38%
TIPO R ó TIPO S	0 a 1450°C	±1.5°C ±0.25%	—
	32 a 2700°F	±3°C ±0.25%	—

FIGURA 4.17 CARACTERISTICAS DE UN TERMOPAR

#### PODER DEL MICROPROCESADOR

- Su display alfanumérico VF muestra las palabras clave para informar al operador
- Programación frontal. No necesita interruptores internos, tornillos u otro tipo de dispositivo de ajuste o selección
- Pantalla digital de colores incluye indicadores de ALARMA, SALIDA, y STATUS
- Auto-diagnóstico con mensajes en pantalla
- Seguridad en el teclado para calibración

Su capacidad de reconfiguración a través del teclado hace de estos controladores rápidamente adaptable a muchas aplicaciones. Cambiando el tipo de termopar, secuencia de entrada, unidades de display, acción de conatos y de alarmas y muchas más pueden ser hechas sin tener que cambiar el hardware. Un modelo en stock puede ser configurado para muchas condiciones de operación. Para controles y funciones especiales, contactar a LFE.

#### CARACTERISTICAS

Selección de entradas

Termopares: cualquier termopar puede ser utilizado. Para termopares especiales, contactar a LFE.

Voltaje DC : cualquier voltaje CD incluyendo señales de voltaje de proceso

Corriente DC: cualquier corriente CD incluyendo señales de voltaje de proceso

Protección de memoria

Una batería interna de litio protege la memoria al faltarle corriente y pérdidas de esta.

Selección de controles

Control ON/OFF con selector de banda muerta y relevador de salida de estado sólido



MODEL 2000

FIGURA 4.18 CARACTERISTICAS DE UN CONTROLADOR

Los sensores más comunes se ilustran a continuación, los cuales están instalados dentro de un termopozo de acero inoxidable, y su señal la recibe un controlador programable de temperatura tal y como se ilustra en la figura 4.18.

#### 4.8. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL CONTROL DE ALIMENTACION DE NITROGENO LIQUIDO

El túnel de congelación trabajará atomizando nitrógeno líquido al producto y que al ser gasificada será conducido a todo lo largo del túnel. Sin embargo, esta inyección no puede ser continua por razones económicas. De suceder así, el producto se estaría congelando a temperaturas alrededor de los  $-196^{\circ}\text{C}$  ocasionando daños al producto y un altísimo consumo de LIN. Por lo tanto, a nuestro sistema de control de alimentación se le iniciará colocando una válvula de control para el flujo de LIN, gobernada por la señal que el controlador programable de temperatura le ordene.

La línea de alimentación deberá tener también una válvula de globo, cuya acción manual permitirá limitar el flujo de LIN a un máximo. Esta será necesaria para cerrar la línea cuando ocurra algún paro por mantenimiento. El tipo de válvula a utilizar será también de uso criogénico.

Otros elementos que deberán instalarse por norma en el control de alimentación de LIN son las válvulas de alivio. Siempre, entre cada dos elementos de control o corte, deberá existir una válvula de alivio en virtud de que el nitrógeno contenido dentro de la tubería incrementará su presión al

## USO SUPERIOR

Empleados con hidrógeno, aceites minerales, agua oxigenada, ácido clórico, ácido carbónico, bióxido de carbono, sistemas de refrigeración y para aquellos fluidos altamente corrosivos no reactivos al acero inoxidable.

**TIPO: MACRO**

**TAMAÑOS:** 115 mm (4 1/2") - modelos 11550, 11560, y 11565  
152 mm (6") - modelos 15250 y 15260

**CARACTERÍSTICAS:**

**EXACTITUD.** Error no mayor del 1% en su escala total

**TUBO BOURDON.** Acero inoxidable

**MECANISMO.** Piñón-cromallera, en acero inoxidable

**CONEXION.** Acero inoxidable, rosca macho de 1/4" o 1/2" NPT, inferior o posterior

**CAJA.** Resina fenólica negra, con dispositivo de seguridad en presiones que excedan 70 kg/cm<sup>2</sup>, completamente hermética

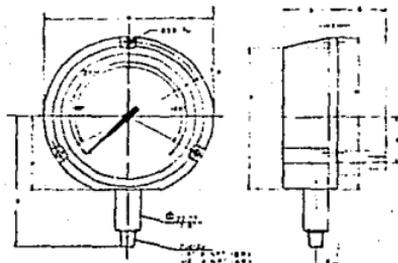
**VIDRIO.** Inastillable en presiones arriba de 70 kg/cm<sup>2</sup> con bisel tipo seguro de acero inoxidable.

**CARATULA.** Aluminio, impresa en blanco y negro con escala dual Kg/cm<sup>2</sup> y Lb/pulg.<sup>2</sup> con franja azul para diferenciación de escalas y precisión de la lectura.

**RANGOS.** Vacuómetros: De 0-76 cm Hg (mercurio)

Manómetros: Desde 0-1 kg/cm<sup>2</sup> hasta 0-700 kg/cm<sup>2</sup>

Manovacuómetros: Desde 76 cm Hg-0-1 kg/cm<sup>2</sup> hasta 76 cm Hg-0-28 kg/cm<sup>2</sup>.



Diam nom. caratula	A	B	C	D	G	H	K	M	P	Q	R
115	130	50	19	10	42	139	138	42	66	102	145
152	165	50	19	10	42	173	169	49	83	130	181

Acor. mm

FIGURA 4.19 CARACTERÍSTICAS DE UN MANOMETRO

## PARTE

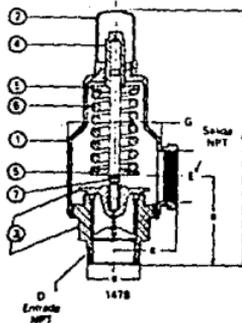
- 1 Bonete
- 2 Casquillo
- 3 Base y disco
- 4 Tornillo de compresión
- 5 Roldana de resorte
- 6 Resorte
- 7 Vástago

## MATERIAL

- Bronce  
 Latón Fundido  
 Bronce  
 Bronce  
 Acero  
 Acero al carbón  
 Acero al carbón

## CARACTERÍSTICAS

- Descarga lateral para servicio de líquidos.  
 Presión máxima de operación: "excepto 3" 1. 21.10 kg./cm<sup>2</sup> (300 PSIG)  
 Temperatura máxima de operación: 228° C (436° F).  
 Medidas nominales desde 13 mm (1/2") hasta 76 mm (3").



H TAMAÑO		DIMENSIONES					
		A	B	C	D	E	G
Pulg.	mm.	PULGADAS Y MILIMETROS					
1/2		5 9/16	2 3/8	1 5/16	1/2	1 1/2	1 11/16
	12.7	141.3	60.3	33.3	12.17	12.17	42.9
3/4		5 9/16	2 3/8	1 5/16	3/4	3/4	1 11/16
	19.1	141.3	60.3	33.3	19.1	19.1	42.9
1		6 9/16	2 11/16	1 5/8	1	1	2 1/8
	25.4	166.7	68.3	41.3	25.4	25.4	54.0
1 1/4		7 9/16	2 15/16	2	1 1/4	1 1/4	2 9/16
	31.8	182.1	74.6	50.8	31.8	31.8	65.1
1 1/2		8 5/16	3 5/16	2 1/8	1 1/2	1 1/2	2 7/8
	38.1	211.1	84.1	54.0	38.1	38.1	73.0
2		10 1/2	3 7/8	2 11/16	2	2	3 13/16
	50.8	266.7	98.4	68.3	50.8	50.8	96.8
2 1/2		12 3/8	4 5/8	3 1/8	2 1/2	2 1/2	4 13/32
	63.5	314.4	117.5	79.4	63.5	63.5	340.5
3		12 11/16	6 1/16	3 1/2	3	3	5 3/16
	76.2	322.3	154	89	76.2	76.2	131.8

## CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO SERIE 1478

MEDIDA NOMINAL		Presión máxima de servicio PSIG	Temperatura máxima de servicio °F	CONEXIONES					
Milímetros	Pulgadas			ENTRADA MACHO NPT			SALIDA HEMBRA NPT		
				mm	pulg.	conexión	mm	pulg.	conexión
13	1/2	300	406	13	1/2	macho	13	1/2	hembra
18	3/4	300	406	18	3/4	macho	18	3/4	hembra
25	1	300	406	25	1	macho	25	1	hembra
32	1 1/4	300	406	32	1 1/4	macho	32	1 1/4	hembra
38	1 1/2	300	406	38	1 1/2	macho	38	1 1/2	hembra
51	2	300	406	51	2	macho	50	2	hembra
64	2 1/2	300	406	64	2 1/2	macho	64	2 1/2	hembra
76	3"	150	406	76	3	macho	76	3	hembra

FIGURA 4.20 CARACTERÍSTICAS DE UNA VALVULA DE ALIVIO

MOTORES MODUTROL**OPCIONES  
MONTAJE**

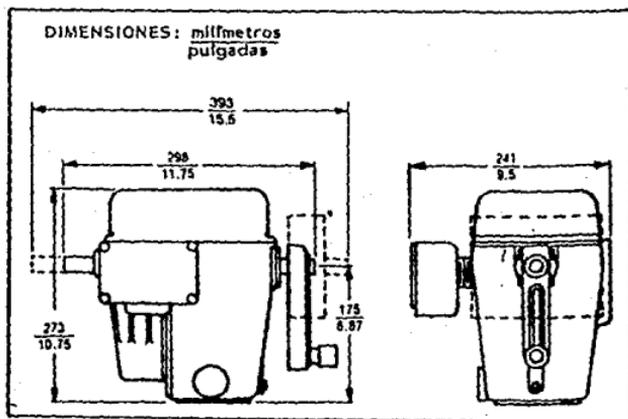
El montaje se puede hacer en la base o en la parte posterior (sólo en modelos que carezcan de resorte de retorno) de la carcasa del motor; da al motor mayores posibilidades para su montaje.

**CABLEADO DE RETRANSMISION**

Montado en serie al cableado principal.

**BRAZO ACCIONADOR**

Un sólo brazo lleva ambos movimientos para mantener posiciones relativas.

**ESPECIFICACIONES  
CONDICIONES DE OPERACION**

Límites de temperatura - 18 a. 66°C (0 to 150°F) a. 100%  
ambiente - 18 a. 79°C (0 to 175°F) a. 50%

**OPERACION**

Voltsje y frecuencia *Modelo 831E1, 831E2: 120 a. 240 Vac, 50 o 60 Hz*  
*Modelo 831E3, 831E4: 120 Vac, 50 or 60 Hz*

Consumo de potencia *Modelo 831E1, 831E2: 40 watts*  
*Modelo 831E3, 831E4: 45 watts*

FIGURA 4.21 CARACTERISTICAS DE MOTORES MODUTROL

## VALVULAS DE GLOBO DE BRONCE PARA USO CRIOGENICO

### VALVULAS POWELL

#### CARACTERISTICAS

- Discos de Teflón renovables
- Asientos de los anillos son renovables
- Extensión del cuerpo se encuentran plateados en las conexiones

#### ESPECIFICACIONES

- Las válvulas son limpiadas, desengrasadas y los extremos para unión en tuberías son sellados para evitar una contaminación.

#### MATERIALES

El cuerpo es de bronce, el tubo de extensión es de acero inoxidable, empaques de teflón así como los insertos de los discos

#### DIMENSIONES (en pulgadas)

Tamaños	½	¾	1	1½	2	2½	3	3½	4	
A (S.J.T.)	2½	3	3½	4¼	4¾	5½	6	7¼	8¼	10¼
(S.B.T.)	2½	3	3½	4¾	5	5½	6½	8¼	8¼	10½
G	1½	1½	1¾	2¼	2¾	3	3¼	4	4	4¾
H	2½	2½	3	3½	4	4½	5	7	8	8
K (S.J.T.)	¾	¾	¾	1	1¼	1½	1¾	1¾	1¾	1¾
(S.B.T.)	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾
J	.379	.504	.629	.879	1.130	1.380	1.630	2.130	2.630	3.130
X	12	12	12	12	13	13	13	14	18	18

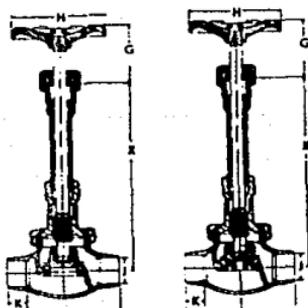


FIGURA 4.23 CARACTERISTICAS DE VALVULA DE GLOBO

encontrarse entrapado si las válvulas de control son cerradas. La razón física es que el nitrógeno gasificado al requerir más volumen eleva necesariamente la presión de la tubería.

Los manómetros son otros elementos que se incluyen en el arreglo y sensan para la medición las presiones a las que estamos trabajando. La primera lectura será la de la línea, y la segunda la de inyección al proceso.

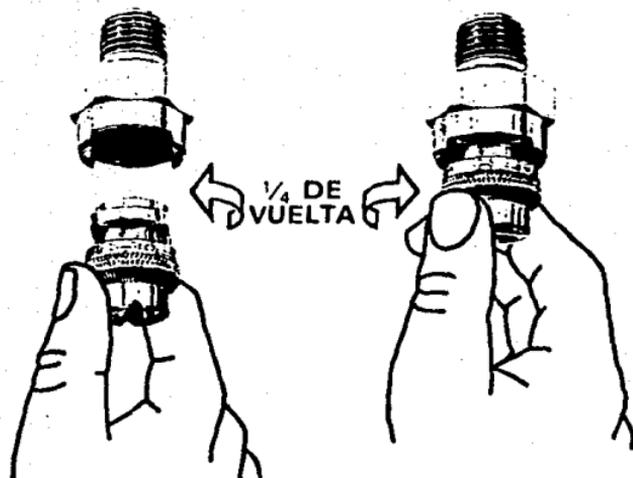
La línea de suministro de LIN podrá ser de acero inoxidable o bien de cobre unido con soldadura de plata que es lo recomendable para este rango de temperaturas.

#### 4.9. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE ATOMIZADO O ASPERSION

El sistema de aspersión tiene como finalidad el lograr la atomización del nitrógeno líquido al producto a congelar. Este sistema se encuentra localizado al final del sistema de control de inyección de nitrógeno líquido.

Este sistema es un conjunto de derivaciones de tubos con diámetro calculado, unidos con plata, al cual le son instalados un conjunto de boquillas cuyo diámetro interno está diseñado para un atomizado de cierta cantidad de líquido en una área uniforme según las necesidades de uso del túnel.

Las boquillas variarán en diseño de acuerdo a la capacidad de atomización requerida, al tipo de rociado necesario, al tipo de conexión disponible y también estarán

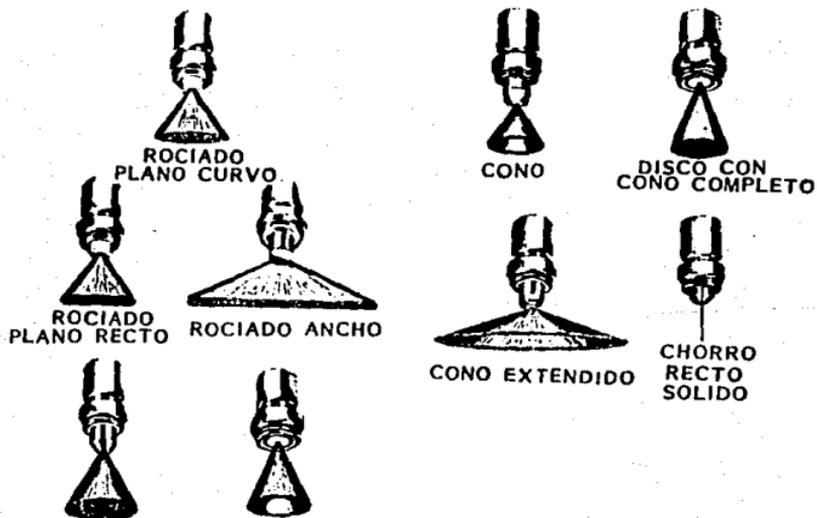


**PRESIONAR Y GIRAR  
1/4 DE VUELTA**

La boquilla antigua queda retirada.

**PRESIONAR Y GIRAR  
1/4 DE VUELTA**

La nueva boquilla está  
AUTOMATICAMENTE ALINEADA!



CONO COMPLETO CONO EN DISCO

FIGURA 4.24 CARACTERISTICAS DE BOQUILLAS DE ASPERSION

en función de la presión de la tubería de alimentación del líquido.

Estas boquillas se fijan por medio de un arreglo esférico o longitudinal a la toma del líquido, ya sea una tubería, tanque, o arreglo especial. Estos adaptadores podrán tener conexión roscada, ya sea macho o hembra, conexiones soldables, o por fijación con abrazaderas; debido a que existen diversas aplicaciones en los sistemas de aspersión, tales como: en sistemas de enfriamiento por agua, protección contra incendios, enfriamiento de gases, humidificación, lavados de bandas. Ya que cada uno presenta diferentes objetivos, la manera del rociado deberá ser diferente para cada uno de los casos mencionados. Por lo tanto se tendrán patrones de rociado diferentes, los cuales serán básicamente en forma de cono hueco, de cono completo, de aspersión plana, fina aspersión y para atomizado auxiliado por aire.

El número de boquillas estará no sólo en función del área que habrá que cubrir de una superficie determinada, sino que tampoco deberá exceder una relación calculada entre el área total transversal de las boquillas y el área transversal de la línea de suministro del líquido a fin de tener un correcto atomizado de líquido.

#### 4.10. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE EXTRACCIÓN

Los ventiladores utilizados en sistemas de extracción se pueden separar en 2 grupos básicos:

1. Tipo centrífugo, donde el aire fluye radialmente a través del rotor. Los ventiladores centrífugos se clasifican de acuerdo al tipo de aspa que la rueda del ventilador tenga; ya sea curvada hacia adelante, hacia atrás, o radial (recta).

2. Tipo axial, en donde el aire fluye axialmente a través del rotor. Los ventiladores axiales se clasifican en tipo propela, turbo axial y en aspa axial.

Cada tipo de ventilador y de aspas se puede dividir además en 4 diferentes clases de acuerdo a sus capacidades de presión estática:

Clase I	0- 95 mm. C.A.
Clase II	95- 171 mm. C.A.
Clase III	171- 324 mm. C.A.
Clase IV	324- en adelante mm. C.A.

Investigaciones y experiencias en el manejo de estos equipos han demostrado que los ventiladores centrífugos con aspas curvadas hacia atrás, aletas aerodinámicas o aspas radiales de la Clase I funcionan de la mejor manera en sistemas de extracción criogénicos. Las ventajas son:

- Autolimpieza, además el mismo diseño dispersa cualquier formación de hielo.
- Mayores eficiencias
- La potencia requerida es tal, que el motor utilizado cubre el rango completo de operaciones, esto es, de un 0 a un 100% con una sola velocidad, mediante el uso de una mampara.

- No hay sobrecarga en el diseño
- Más silencioso que cualquier otro.

Todos los ventiladores se catalogan por su capacidad para succionar aire (medido en m /min.) en contra de alguna resistencia llamada presión estática que se mide en mm. de columna de agua por su bajo valor de succión, pero de alto flujo de aire a desalojar.

Sin embargo, no basta con calcular la capacidad de extracción del equipo, también habrá que determinar las pérdidas por fricción conforme el nitrógeno gaseoso es removido a través del ducto de extracción. El tamaño del ducto y la apertura de captura en los ductos son también importantes. El área de la apertura de captura no deberá ser menor que el área del ducto.

TABLA 4.4 PERDIDAS EN LA LINEA DE EXTRACCION

VOLUMEN REQUERIDO DE EXTRACCION SCFM	DIAMETRO DUCTO (pulg.)	VELOCIDAD DUCTO (pies/min.)	PERDIDAS				
			ENTRADA DE SOPLADOR (puerta cerrada) (en C.A.)	ENSANCHAMIENTO DE SECCION (A1=1.5 A) (en C.A.)	DUCTO RECTO (circular) (en C.A./pie)	CODOS (en C.A./codo)	DOBLADO 90°
500	8	1432	0.05	0.01	0.032	0.16	0.07
	10	917	0.02	0.01	0.004	0.07	0.03
	12	636	0.01	NIL	0.001	0.03	0.01
1000	8	2865	0.18	0.06	0.118	0.62	0.28
	10	1833	0.07	0.03	0.015	0.25	0.12
	12	1273	0.04	0.01	0.003	0.12	0.06
1500	8	4297	0.41	0.15	0.251	1.50	0.64
	10	2750	0.17	0.06	0.035	0.60	0.26
	12	1909	0.08	0.03	0.007	0.28	0.13
2000	8	5729	0.75	0.22	0.440	2.50	1.15
	10	3667	0.29	0.10	0.061	1.10	0.48
	12	2546	0.15	0.04	0.012	0.51	0.22
2500	10	4584	0.46	0.05	0.095	1.62	0.74
	12	3183	0.22	0.07	0.018	0.85	0.34
	14	2318	0.13	0.04	0.005	0.44	0.16
3000	10	5500	0.68	0.22	0.138	2.30	1.05
	12	3820	0.33	0.11	0.027	1.15	0.53
	14	2806	0.18	0.06	0.007	0.63	0.30
3500	12	4456	0.45	0.15	0.035	1.05	0.70
	14	3274	0.22	0.08	0.009	0.80	0.36
	16	2507	0.14	0.05	0.003	0.49	0.23
4000	12	5093	0.59	0.18	0.046	2.08	0.90
	14	3741	0.30	0.10	0.011	1.05	0.48
	16	2865	0.18	0.06	0.003	0.65	0.31
4500	14	4209	0.40	0.13	0.015	1.38	0.62
	16	3222	0.23	0.08	0.004	0.81	0.37
	18	2546	0.14	0.05	0.002	0.52	0.22

NOTA: 1) Para ductos de sección rectangular calcular el diámetro hidráulico (De)

$$De = \frac{4A}{P}$$

donde: A=área de la sección transversal (pulg<sup>2</sup>)

P=perímetro de la sección cruzada (pulg)

2) Todos los datos son a condiciones estándar

#### 4.11. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TURBULENCIA

Como hemos visto, dentro del túnel de congelación se encuentra la zona de recirculación del nitrógeno gaseoso. El nitrógeno líquido al ser atomizado tendrá un cambio de fase pasando al estado gaseoso. El nitrógeno gaseoso estará aún muy frío y se le hará circular por todo el túnel para aprovechar al máximo todo el calor que esté en posibilidad de recibir. Sin embargo, habrá que forzar esa circulación a través de la banda que transporta el alimento, para lo cual se utilizarán unos ventiladores que crearán una turbulencia dentro del túnel. Estos ventiladores deberán estar fabricados de material resistente a las bajas temperaturas, en donde uno de los materiales más altamente recomendables se encuentra el acero inoxidable.

La función de estos ventiladores será crear un perfil de temperatura aproximadamente lineal desde la salida del nitrógeno en el arreglo de boquillas hasta la campana de extracción. Debido a que lo que se busca en el túnel es lograr una buena circulación del nitrógeno gaseoso frío alrededor del producto, sin que este sufra alteraciones, se decidió utilizar unos ventiladores cuyas características no se obtenían de ventiladores comerciales. De tal manera, se debió recurrir a un diseño patentado de ventiladores, cuya configuración es la mostrada en la figura 4.25, y cuyo comportamiento aerodinámico es más parecido al de un agitador de reactor, que al de una hélice común.

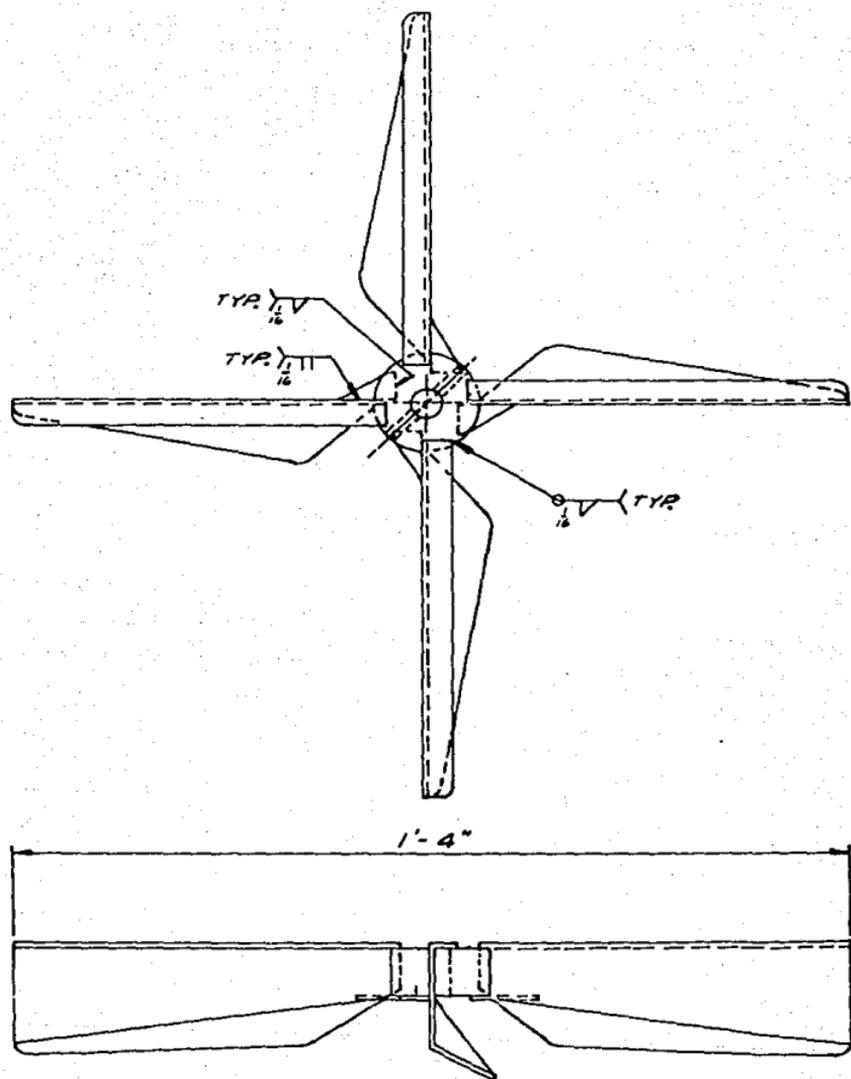


FIGURA 4.25 VENTILADORES DE RECIRCULACION

#### 4.12. METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION

La tendencia de los metales a corroerse es un fenómeno natural que debe reconocerse como inevitable. Existen 5 métodos de control para el efecto.

##### 4.12.1. SOBREDISEÑO

Se refiere al uso de miembros estructurales más pesados o placas más gruesas, anticipándose a las pérdidas de material por los efectos de la corrosión. Esto es especificar placas de espesores muy gruesas por hábito o costumbre en lugar de placas más ligeras, protegiéndolas contra los efectos de la corrosión.

La principal desventaja del sobrediseño es que no se puede predecir con exactitud ni la vida de servicio, ni el costo de reemplazo del material corroído.

##### 4.12.2. USO DE MATERIALES RESISTENTES A LA CORROSION

Debido principalmente a su costo y cualidades estructurales, el hierro y el acero son los más ampliamente usados en las construcciones industriales. Desafortunadamente, estos materiales tienden a corroerse o a retornar a su forma de óxidos más rápidamente que otros tipos de metales. Es por ello, que se recurre a metales más inertes o a las aleaciones para retardar el proceso de corrosión. Frecuentemente, en condiciones de exposición extremadamente severas, sólo el uso de estos materiales es

la solución adecuada. En operaciones que involucran altas temperaturas y productos químicos muy corrosivos, producirán también condiciones muy severas para cualquier otro tipo de protección o material estructural. En estos casos, el relativo alto costo inicial de estos metales es fácilmente justificado por su larga vida de servicio. Entre los metales más comúnmente usados para alearse con el hierro o el acero, están el cromo, cobre, níquel y molibdeno. De los metales usados en su estado natural, el aluminio es el que se usa más ampliamente y los metales raros como el tantalio y el titanio, sólo se emplean en condiciones muy severas. Además de las aleaciones, se dispone actualmente de muchos materiales plásticos resistentes a la corrosión. Materiales termoplásticos como el cloruro de polivinilico (PVC) y el polietileno son usados en tuberías y ductos de vapores. Los componentes epóxicos y poliéster reforzados con fibra de vidrio son empleados en tuberías de proceso con limitaciones en altas temperaturas, y también pueden usarse en la construcción de tanques y reactores.

#### 4.12.3. MODIFICACION DEL MEDIO AMBIENTE: USO DE INHIBIDORES

Este método usualmente involucra el control de descargas accidentales de vapores corrosivos, o la adición de inhibidores a líquidos en sistemas cerrados. El uso de inhibidores químicos se limita, generalmente a sistemas de abastecimiento de agua, sistemas de circulación de agua, líneas de vapor y condensados, y sistemas de salmueras. De

hecho son una solución para servicio de inmersión y su uso en el campo de mantenimiento es definitivamente muy limitado. Deberá tenerse mucho cuidado en la selección de las cantidades y tipos de sustancias químicas. La selección de un inhibidor inadecuado puede acelerar la corrosión en lugar de retardarla o detenerla. Si se usan adecuadamente constituyen una solución sencilla y relativamente económica para controlar la corrosión.

#### 4.12.4. PROTECCION CATODICA

Este método se fundamenta en que cuando dos metales se acoplan, se produce corrosión galvánica; y si bien lo que nos interesa frecuentemente es discriminar la corrosión del metal activo, es posible sacar ventaja del hecho de que el metal que actúa como cátodo queda protegido, mientras que el ánodo se corroe. Acoplando debidamente dos metales diferentes, podemos evitar la corrosión del menos activo (cátodo) a expensas del otro metal. Por lo tanto, para proteger la superficie del acero, debemos escoger un metal más activo, es decir, uno que se halle arriba de la serie galvánica. Para este objeto, se usa generalmente el magnesio, el cual acoplado eléctricamente al acero, formará una batería amplificadora de corrosión en la cual el magnesio, debido a su mayor actividad, constituye el ánodo y el acero el cátodo. De este modo el ánodo de magnesio se corroe, quedando el cátodo de acero intacto.

El método de protección catódica ha encontrado su principal aplicación en equipo marino, tanques de agua caliente, tuberías subterráneas y submarinas. La sencillez es ciertamente una de sus principales ventajas y su eficacia en presencia de un buen electrolito es indiscutible. Sin embargo, en áreas secas o poco húmedas su uso es limitado y por lo general en estos ambientes es eliminado y se emplea como complemento al uso de recubrimientos protectores.

#### 4.12.5. PROTECCION POR BARRERAS DE RECUBRIMIENTO

Todas las medidas protectoras a la que nos hemos venido refiriendo, pueden utilizarse ventajosamente en diversas áreas particulares de las plantas industriales. Sin embargo, el medio de control de la corrosión que en virtud de su versatilidad y eficacia ha logrado la mayor aceptación, es la aplicación de pinturas o recubrimientos protectores, los cuales actúan como barreras que impiden el acceso a los agentes de corrosión. Estas barreras tienen a su cargo la protección de la mayor parte de las superficies de metal, madera o concreto en casi todas las plantas. Son indiscutiblemente, los principales para la conservación y mantenimiento de las plantas. Estas barreras pueden variar desde capas relativamente delgadas, aplicadas a espesores de 5 milésimas de pulgada hasta revestimiento de ladrillo antiácido de 30 centímetros de espesor. Un recubrimiento controla principalmente la corrosión, sirviendo de barrera frente al medio ambiente corrosivo. Sin embargo esto no es

tan sencillo como pudiera creerse, teniendo en cuenta el mecanismo de la corrosión, puede verse que un recubrimiento protector eficaz debe llevar ciertos requisitos. Si el primer requisito es evitar el ambiente corrosivo, es obvio que el recubrimiento debe ser resistente a la acción corrosiva de dicho ambiente.

En resumen, un recubrimiento para que sea eficaz, debe llenar los siguientes requisitos:

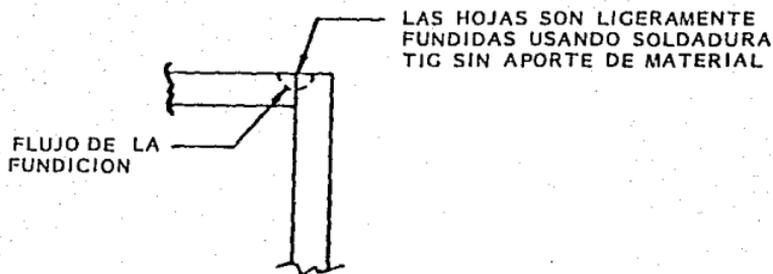
1. Resistir el ambiente exterior
2. Excluir los iones
3. Excluir la humedad
4. Excluir el oxígeno
5. Adherirse a las superficies

#### 4.13. SOLDADURA

Existen 2 tipos de soldaduras usadas en los diseños de equipos criogénicos, los cuales son:

1. Soldadura de ligera fusión. Se usa en puntos donde existen pocos esfuerzos. Es fuerte en el esfuerzo cortante, pero débil a la tensión o a la flexión. Las hojas serán ligeramente fundidas usando TIG sin aporte de material. La fusión será menor que el espesor de la hoja metálica.

2. Soldadura de penetración. Normalmente usada en secciones más gruesas. Con esta penetración completa, podrá existir más calor y por lo tanto distorsiones.



SIN FUSION-DEBIL EN FLEXION

FIGURA 4.26 SOLDADURA SIN FUSION

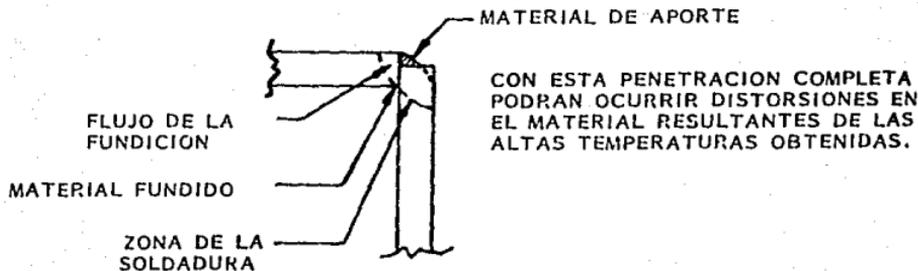


FIGURA 4.27 SOLDADURA CON PENETRACION

En la fusión no se necesitará material de relleno.

Material adyacente se funde y actúa como material de relleno

(secciones a y b se funden para ocupar c).

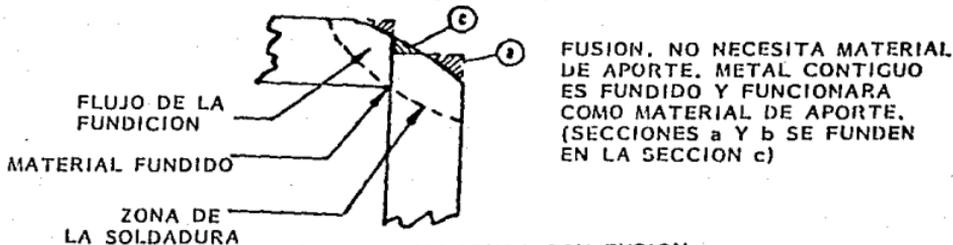


FIGURA 4.28 SOLDADURA CON FUSION

- Selección entre TIG y MIG

La soldadura TIG es la que prefieren todos los soldadores. Una buena soldadura sin torceduras también es lograda más fácilmente con TIG. El gas inerte usado con más preferencia es el argón, que es más barato que el helio y tendrá mayor control de temperatura. El nitrógeno no se usa debido a que el acero lo pueda absorber en la temperatura de soldadura. La absorción de nitrógeno formará nitratos metálicos frágiles en la soldadura ya solidificada. Deberá existir una adecuada inertización con argón para prevenir la oxidación del material, causando defectos en la soldadura y poca resistencia de ésta.

La soldadura TIG se prefiere en metales de calibre delgado donde la soldadura sin material de relleno es hecha. La TIG deberá utilizarse con alambre de aporte, que será alimentado manualmente. El material de relleno requiere calor para ser fundido, lo cual podrá provocar una distorsión del metal.

La soldadura MIG deberá ser utilizada solamente por soldadores con mucha experiencia. La mezcla preferida por los soldadores es de argón con 2½ de CO<sub>2</sub>. La soldadura MIG produce menos distorsión que el TIG pero solamente si es hecho por un operador muy capaz. La soldadura MIG será preferida donde se necesite soldadura de penetración (especialmente en material de gran espesor) o cuando existan boquetes entre el material de las piezas. El aporte será alimentado a la soldadura por el electrodo consumible. El

alambre de aporte es del mismo material que se está trabajando. Se podrá utilizar alambre de SS308 para soldar SS304 ó SS316. El diámetro del alambre para MIG deberá ser de 0.025" para lámina de calibre delgado.

#### 4.14. SELECCION DE MOTORES EN CORRIENTE ALTERNA Y CORRIENTE DIRECTA

Existe una gran variedad de motores eléctricos utilizables en un túnel de congelación. Entre los motores que encontramos en el mercado nos encontramos con que los de corriente alterna (C.A.) pueden ser monofásicos o bien trifásicos. También pueden ser totalmente cerrados con ventilación o sin ventilación, a prueba de explosión, lavables, para ambientes hostiles, de dos velocidades, con frenos, etc.. Sin embargo los motores de C.A. son de velocidad constante. Es por ello, que si se busca regular la velocidad de estos motores, deberá entonces utilizarse un inversor. Es entonces que para poder regular la velocidad nos encontramos que el motor de corriente directa (C.D.) presenta más versatilidad al regular la velocidad. Sin embargo habrá que adicionar al tablero de control un transformador de C.A. a C.D. conectado a un controlador de velocidad.

#### 4.15. SELECCION DE BANDAS TRANSPORTADORAS

La banda transportadora será la encargada de llevar el producto a lo largo de todo el túnel a fin de que tenga el

**MOTORES COMPLETAMENTE CERRADOS  
CON VENTILACION (TEFC) CON BASE PARA  
MONTAJE EN LA CARA**

**MOTORES MONOFASICOS**

H.P.	R.P.M. 60 HZ.	NEMA FRAME	ENCL. SURE	MULT. SYM.	TIPO	AP'X. SHPG. WGT.	% EFF.	VOLT.	H.P.	R.P.M. 60 HZ.	NEMA FRAME	ENCL. SURE	MULT. SYM.	TIPO	AP'X. SHPG. WGT.	% EFF.	VOLT.
1/2	1725	56C	TEFC	DK	520L	34	64	A	1 1/2	1725	56C	TEFC	DK	528L	45	70	A
3/4	1725	56C	TEFC	DK	524L	38	66	A	1 1/2	1725	56C	TEFC	DK	532LC	52	75	A
1	3450	56C	TEFC	DK	524L	40	66	A	2	1725	184TC	TEFC	D1	628L	78	75	A
1	1725	56C	TEFC	DK	528L	38	67	A									



**MOTORES TRIFASICOS**

H.P.	R.P.M. 60 HZ.	NEMA FRAME	ENCL. SURE	MULT. SYM.	TIPO	AP'X. SHPG. WGT.	% EFF.	VOLT.	H.P.	R.P.M. 60 HZ.	NEMA FRAME	ENCL. SURE	MULT. SYM.	TIPO	AP'X. SHPG. WGT.	% EFF.	VOLT.
1/2	3450	56C	TENV	DK	513M	28	76	E	3	1725	182TC	TEFC	D1	623M	63	82	E
1/2	1725	56C	TENV	DK	516M	31	75	E	5	3450	184TC	TEFC	D1	634M	72	85	E
3/4	3450	56C	TENV	DK	520M	30	80	E	5	1725	184TC	TEFC	D1	634M	79	85	E
3/4	1725	56C	TENV	DK	520M	34	80	E	7 1/2	3450	213TC	TEFC	D1	723M	113	84	E
1	3450	56C	TEFC	DK	513M	28	74	E	7 1/2	1725	213TC	TEFC	D1	735M	130	87	E
1	1725	56C	TENV	DK	524M	36	81	E	10	3450	215TC	TEFC	D1	740M	136	85	E
1	1725	143TC	TENV	D1	524M	39	81	E	10	1725	215TC	TEFC	D1	740M	136	87	E
1 1/2	3450	56C	TEFC	DK	516M	32	75	E	15	3450	215TC	TEFC	D1	740M	147	85	F
1 1/2	1725	145TC	TENV	D1	535M	49	82	E	15	3450	254TC	TEFC	D2	3932M	266	88	F
2	3450	56HC	TEFC	DK	524M	39	78	E	15	1725	254TC	TEFC	D2	3940M	276	91	F
2	3450	145TC	TEFC	D1	524M	39	78	E	20	3450	256TC	TEFC	D2	3940M	246	90	F
2	1725	145TC	TEFC	D1	528M	45	82	E	20	1725	256TC	TEFC	D2	3952M	300	91	F
3	3450	145TC	TEFC	D1	535M	50	82	E									

TABLA 4.5 MOTORES ELECTRICOS

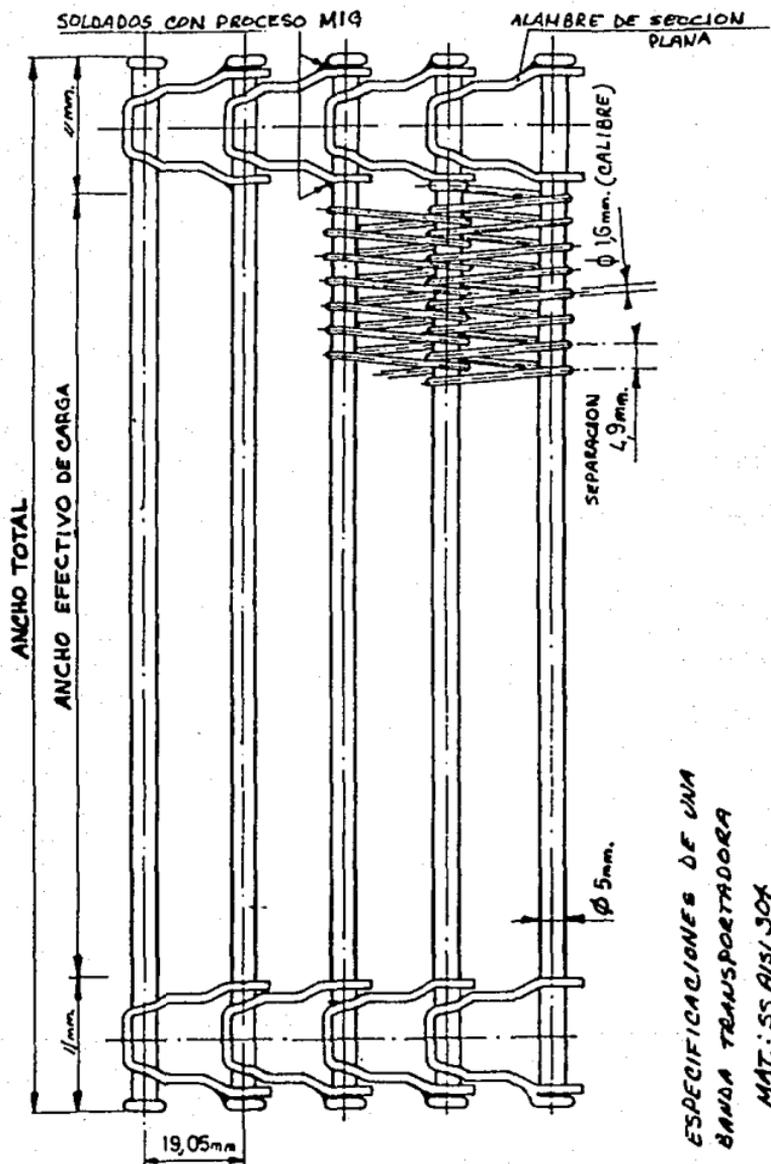


FIGURA 4.29 CARACTERISTICAS DE BANDA TRANSPORTADORA

tiempo de residencia necesario y que sea rociado con el nitrógeno líquido. Por lo tanto, dicha banda estará en contacto directo con el LIN lo cual provocará un descenso considerable de su temperatura. Como hemos visto en capítulos anteriores el metal adecuado para estos cambios será el acero inoxidable, que si bien también recibe contracciones, soportará también el esfuerzo mecánico al cual es sometido. El criterio de diseño entonces no será solamente la carga que soporte la banda por el alimento, sino que en mayor medida a los esfuerzos mecánicos debidos a la contracción por baja temperatura.

Como criterio adoptado por los principales fabricantes de túneles de congelación, las bandas deben estar acopladas perno por perno a cadenas de paso 50, independientemente de la apertura de la trama de la banda, en virtud de la robustez de pernos y cadenas.

#### 4.16. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE LA INSTALACION

##### ELECTRICA

Para la realización de un trabajo eléctrico siempre deberán seguirse normas de seguridad. Estas normas estarán contenidas en un reglamento de obras e instalaciones eléctricas. De tal manera, lo referente al tipo de cable a utilizar, el calibre requerido y su aislamiento, protecciones de sobrecarga, de calentamiento, tipo de interruptores, la carga máxima de corriente, etc., deberán estar considerados al hacerse la instalación.

CALIBRE A.M.C. o M.C.M.	TIPO DE AISLAMIENTO			A LA INTemperIE	
	TW	THW	VINANEL-NYLON Y VINANEL 900	TW	VINANEL NYLON-900 THW
14	15	25	25	20	30
12	20	30	30	25	40
10'	30	40	40	40	55
8	40	50	50	55	70
6	55	70	70	80	100
4	70	90	90	105	135
2	95	120	120	140	180
0	125	155	155	195	245
00	145	185	185	225	285
000	165	210	210	260	330
0000	195	235	235	300	385
250	215	270	270	340	425
300	240	300	300	375	480
350	260	325	325	420	530
400	280	360	360	455	575
500	320	405	405	515	660
FACTORES DE CORRECCION POR TEMPERATURA AMBIENTE MAYOR DE 30°C					
°C	MULTIPLIQUESE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE POR LOS SIGUIENTES FACTORES.				
40	NO SE	0.88	0.90		
45	USA A	NO A	0.85		
50	MAS DE	MAS DE	0.80		
55	35°	40°	0.74		
FACTORES DE CORRECCION POR AGRUPAMIENTO.					
DE 4 a 6 CONDUCTORES 80%					
DE 7 a 20 CONDUCTORES 70%					
DE 21 a 30 CONDUCTORES 60%					

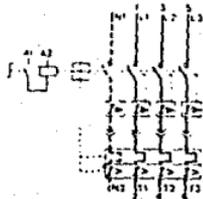
TABLA 4.6 CALIBRES DE CABLE

#### 4.17. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL

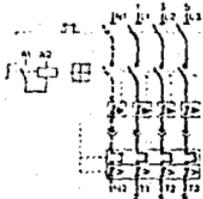
De igual manera el gabinete que funcione como panel de control deberá regirse por las normas de protección vigentes en los códigos en relación a la concentración máxima de elementos de control así como la distribución de las líneas de control y alimentación. El cumplir con estas normas resultará en una instalación libre de peligro, pero no necesariamente eficiente, conveniente o adecuada para un buen servicio.

Contactor interruptor 32A  
con módulo de protección LBE

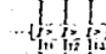
LD1-LC00 + LB1-LC00\*



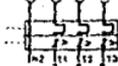
LD4-LC00 + LB1-LC00\*



LB6-LC03M

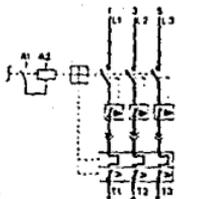


LB1-LC03L

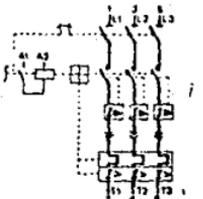


Contactor interruptor 63A  
con módulo de protección LBE

LD1-LD030 + LB1-LD03\*



LD4-LD030 + LB1-LD03\*

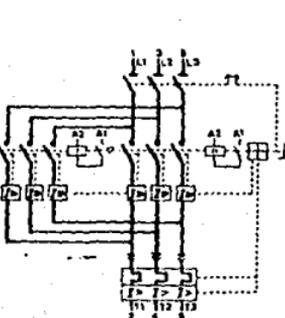


LB6-LD03M

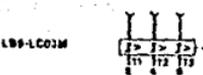


Contactor interruptor  
inverso 125A  
con módulo de protección LBE

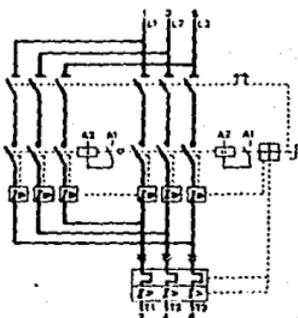
LD5-LC030 + LB1-LC03M (52 A)



LB9-LC03M



LD5-LD030 + LB1-LD03M (63 A)



LB9-LD03M

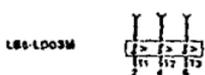


FIGURA 4.30 CARACTERÍSTICAS DE CONTACTORES E INTERRUPTORES

Empieo en categoría AC3 (temperatura ambiente  $\leq 40^{\circ}\text{C}$ )

Potencia e intensidad de empleo

Interr.	V	220	380	415	660	800	660
Potencia nominal de empleo P	Integral 32	RW 7,5	15	7,5	15	18,5	18,5
		(MP) (10)	(20)	(20)	(20)	(25)	(25)
		RW 15	30	33	33	37	45
(potencias normalizadas de los motores)	Integral 63	(MP) (20)	(40)	(45)	(45)	(50)	(60)
Intensidad de empleo hasta	Integral 32	A 32	32	32	32	30	23
(temper. AC3)	Integral 63	A 63	63	63	63	55	48

Frecuencias máximas de maniobras de la función CC "actor"

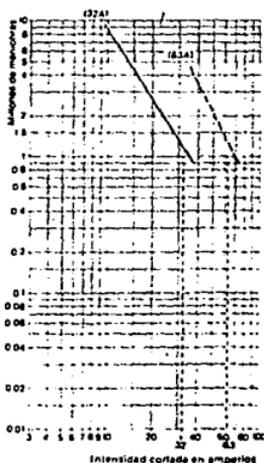
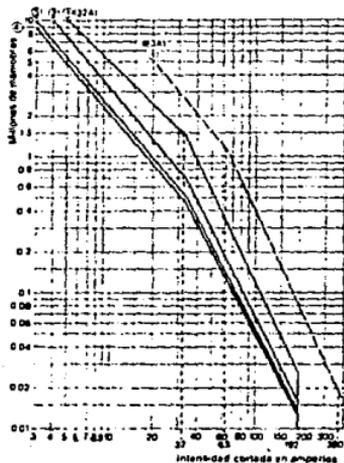
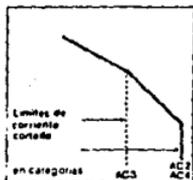
Factor de marcha 85%	Empieo a potencia nominal P	1200 maniobras/hora
	Empieo a potencia nominal P	2400 maniobras/hora

Factor de marcha 25%	Empieo a potencia nominal P	1800 maniobras/hora
----------------------	-----------------------------	---------------------

Intensidad de empleo $I_e$ (AC1)	$^{\circ}\text{C}$	$\leq 40$	$\leq 55$	$\leq 70$
Integral 32 con cable de 6 mm <sup>2</sup>	A	32	28	25
Integral 63 con cable de 25 mm <sup>2</sup>	A	63	55	50

Mando y protección de los motores en categorías de empleo AC2, AC3, AC4.  $U_e \leq 580\text{ V}$

Categoría de empleo AC1  $U_e \leq 530\text{ V}$



1. aparato que no ha tenido que cortar corriente de cortocircuito
  2. después de 16 cortes de una corriente de cortocircuito de 30 In
  3. después de 20 cortes de una corriente de corto circuito de 30 In
  4. después de 10 cortes de una corriente de cortocircuito de 100 In
- \* Cortocircuito más frecuentes en explotación

FIGURA 4.31 ELECCION DE LOS CONTACTORES E INTERRUPTORES



Descripción	Contacto	Color	Referencia del aparato completo	Referencia de la base	Referencia de la cabeza	
Pulsadores	Rasante	"NA"	Negro XB2BA21	=	ZB2B2101 + ZB2BA2	
		Verde XB2BA31	=	ZB2B2101 + ZB2BA3		
		Amarillo XB2BA51	=	ZB2B2101 + ZB2BA5		
		Azul XB2BA81	=	ZB2B2101 + ZB2BA6		
		"NC"	Rojo XB2BA42	=	ZB2B2102 + ZB2BA4	
		Con capuchón	"NA"	Negro XB2BP21	=	ZB2B2101 + ZB2BP2
	Verde XB2BP31	=	ZB2B2101 + ZB2BP3			
	"NC"	Rojo XB2BP42	=	ZB2B2102 + ZB2BP4		
	Hongo	"NA"	Negro XB2BC21	=	ZB2B2101 + ZB2BC2	
		"NC"	Rojo XB2BC42	=	ZB2B2102 + ZB2BC4	
	Hongo con refacción	"NC"	Rojo XB2BT42	=	ZB2B2102 + ZB2BT4	
	Selectores	Con Manija	2 pos. 1 "NA"	Negro XB2BJ21	=	ZB2B2101 + ZB2BJ2
2 pos. 2 "NA"			Negro XB2BJ33	=	ZB2B2103 + ZB2BJ3	
Con llave		2 pos. 1 "NA"	XB2BG21	=	ZB2B2101 + ZB2BG2	
Pulsos de señalización	Alimentación directa 440V. sin lámpara	Verde	XB2BV63	=	ZB2BV6 + ZB2BV60	
		Rojo	XB2BV64	=	ZB2BV6 + ZB2BV61	
		Amarillo	XB2BV65	=	ZB2BV6 + ZB2BV62	
		Azul	XB2BV66	=	ZB2BV6 + ZB2BV63	
		Bianca	XB2BV67	=	ZB2BV6 + ZB2BV64	
Pulsadores iluminados	Rasante, alimentación directa 440V. sin lámpara	1 "NA" + 1 "NC"	Verde XB2BW345	=	ZB2BW065 + ZB2BW33	
		Rojo	XB2BW346	=	ZB2BW063 + ZB2BW34	
		Amarillo	XB2BW345	=	ZB2BW065 + ZB2BW35	
		Azul	XB2BW345	=	ZB2BW065 + ZB2BW36	
		Bianco	XB2BW345	=	ZB2BW065 + ZB2BW37	
Pulsador sobrietiqueta con piloto	Rasante, alimentación directa 440V. sin lámpara	1 "NA" + 1 "NC"	Verde Rojo Amarillo	XB2BW445	=	ZB2BW065 + ZB2BW234
<b>Accesorios y refacciones</b>						
Piezas de leyenda	Sin texto	Rojo y Negro			ZB2BY2101	
	Contorno Arco	Negro			ZB2BY2403	
	Contorno Placa	Rojo			ZB2BY2404	
	Contorno Dimple	Amarillo			ZB2BY2432	
Contactos adicionales	"NA"				ZB2BE101	
"NC"					ZB2BE102	
Focos	Incandescentes	12V			DL1CE019	
		24V			DL1CE024	
		48V			DL1CE048	
		110V			DL1CE110	
		220V			DL1CE220	
		Neon	110V			DL1CF110
	220V				DL1CF220	

FIGURA 4.33 UNIDADES DE MANDO Y SEÑALIZACION

Cabinetes serie 13 Sin platina	Dimensiones exteriores (mm)			Para planchadores y reventones Tamaño	Referencia
	Alura	Ancho	Profundidad		
300	250	155		0.1 y 2	DE1050025
400	250	220		3	DE1040025
480	325	220		3 y 8	DE1048025
580	410	300		3 y 8	DE1048041
750	550	348		7	DE1075055
900	700	385		equipos diversos	DE1090079
1000	850	450		equipos diversos	DE1100098

Platinas perforadas tipo "telequia"	Dimensiones (mm)			Referencia
	Alura	Ancho	Paragabarrte	
135	897			AM1PA9519
350	750	DE1040025		AM1PA9523
430	300	DE1048032		AM1PA8430
540	370	DE1058041		AM1PA5437

Riel DIN	Dimensiones (mm)			Referencia
	Largo	Ancho	Para hiler contactores tamaño	
880	35		0 y 1	AM1RL6838
400	75		CAO-DIN 3 y 3	AM1RL4075

Tubos de para fijación de las aperturas sobre platinas perforadas "telequia"	Para contactores tamaño	Diámetro	Venta por cantidad mínima de	Referencia del lote
	LC1-D12, 16, 24	3/32	100	AF1EA38
	LC1-D40 50, 80, 80	1/4	100	AF1EA16

Terminales de cableado	Sección del conductor mm <sup>2</sup>	Color	Venta por cantidad mínima de	Referencia del lote
	2	Amarillo	1.000	D25-CE020
	2.5	Grís	1.000	D25-CE025
Terminal de cableado con parte referencia tipo AR138	2.5	Grís	100	D25-CA085

Terminales de cableado para parte referencia enganchable AR18C83		Color	Venta por cantidad mínima de	Referencia del lote
	8	Verde	100	D25-CA083
	10	Marrón	100	D25-CA102
	16	Bianco	100	D25-CA182

Parte referencia enganchable	Para enganche tipo de 7 milímetros tipo AR1M	Venta por cantidad mínima de	Referencia del lote
		100	AR1-8C09

Anillo para terminales de cableado	Lote de cifras de 0 a 9 (100 de cada uno)		Referencia del lote
	Lote de cifras de A a Z (200 de cada uno)		
			AR1-MA01
			AR1-MA01

FIGURA 4.34 GABINETES METÁLICOS

**CAPITULO 5**  
**ASPECTOS DE REACONDICIONAMIENTO DE UN TUNEL**  
**DE CONGELACION CRIOGENICO**

A efecto de poner en práctica los conceptos del Capítulo 4, se ejecutaron actividades de construcción de partes y reacondicionamiento de un túnel de congelación fuera de uso, procedente de E.E.U.U. con el fin de ponerlo en operación. De tal manera, las actividades fueron las siguientes:

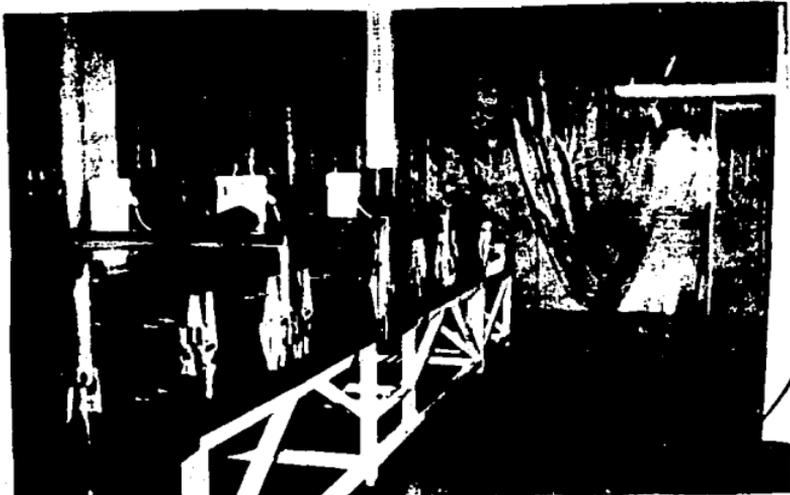
**5.1 DE LA ESTRUCTURA**

**5.1.1 ENDEREZADO Y NIVELADO**

Se realizaron trabajos de enderezado en los módulos estructurales, los cuales presentaban golpes y dobleces provocados por las maniobras de carga en grúa que había tenido anteriormente. Logrado esto se procedió a instalar niveladores roscados en las patas de los mismos a fin de que estuvieran listos para el ensamble y que tuvieran la inclinación adecuada para el escurrimiento de agua posterior al lavado del equipo armado.

**5.1.2 DESENGRASADO Y LIMPIEZA**

El trabajo realizado anteriormente implica tener contacto con grasas y aceites. Es por ello que se hizo una



**Ilustración 5.1 Aspecto general de la estructura limpia para preparar la superficie de la estructura con el fin de lograr una buena adhesión del recubrimiento.**

#### **5.1.3 RECUBRIMIENTO**

El recubrimiento que se usará para la protección de la estructura será un recubrimiento epóxico el cual fué aplicado por medio de una brocha.

#### **5.1.4 ENSAMBLE**

El ensamble de la estructura se hará fijando los módulos unos a otros por medio de tornillos. Será necesario nivelar las reacciones para evitar pandeo de la misma. Se utilizaron tornillos niveladores colocados en las patas de cada sección.



Ilustración 5.2 Ensamble de módulos

## 5.2 DE LA BANDA

### 5.2.1 LIMPIEZA Y REHABILITADO

La banda utilizada presentaba roturas y dobleces del alambre a lo largo de la misma debido a dilataciones y contracciones ocasionadas por su uso. La banda tiene acoplada en cada uno de sus extremos una cadena, la cual dará tracción a la banda. Se procedió entonces a reparar y alinear los tramos de la misma, la cual es de acero inoxidable de la marca Pack-o, con un ancho de 0.9 m. y una longitud de 15.4 m. En ciertos tramos se tuvieron que hacer rellenos de alambre nuevo a fin de reemplazar el maltratado y los huecos resultantes. También se utilizará para su limpieza un polvo abrasivo (Forkey) el cual eliminará los

óxidos e impurezas adheridos al acero inoxidable. Hay que recordar que al estar la banda en contacto directo con los alimentos deberá estar perfectamente limpia.

#### 5.2.2 AJUSTE Y HABILITADO DE GUIAS LATERALES E INFERIORES

Las guías que llevarán la banda en su viaje de retorno se encontraban dobladas. Estas son unas soleras y láminas laterales de acero inoxidable y su función es la de impedir el arrastre de la banda sobre la superficie del módulo aislado. Las guías que soportan a la banda en su viaje de transporte están hechas de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y que impedirán que la banda choque con las paredes laterales del cuerpo aislado. Estas guías sólo requirieron ser limpiadas y realineadas.

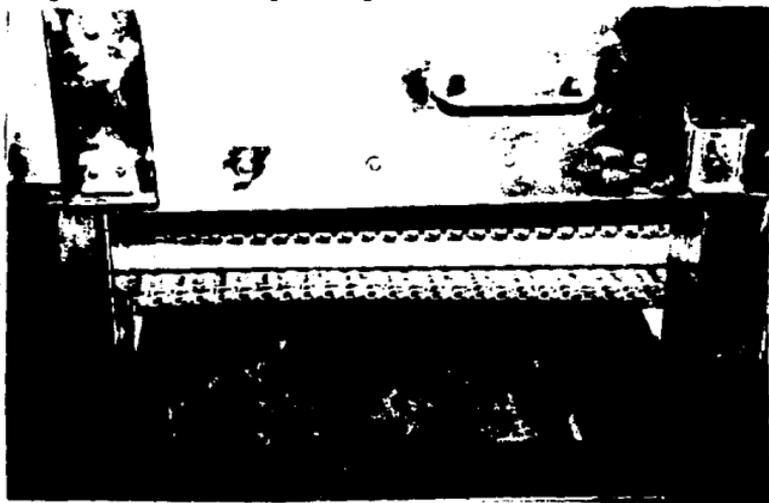


Ilustración 5.3 Ubicación de las guías laterales

### 5.2.3 ACONDICIONAMIENTO DE FLECHAS Y COJINETES

La flecha sólo requirió trabajos de limpieza, debido a la cantidad de sedimentos y aceites acumulados en ellas. Estas flechas son de acero inoxidable y están calculadas para resistir los esfuerzos provocados tanto por torsión, como por la contracción de la banda en operación a temperaturas criogénicas.



Ilustración 5.4 Cojinetes nuevos para ventiladores

En relación a los cojinetes, estos tuvieron que ser desarmados y limpiados individualmente. Posteriormente fueron engrasados y colocados en su lugar. Hay que hacer notar que su ubicación estará fuera del túnel, esto con el

fin de evitar que la grasa o lubricante utilizados, así como los mismo cojinetes estén expuestos a las bajas temperaturas de operación para las cuales no están diseñados éstos.

#### 5.2.4 PRE-ENSAMBLADO

Hablamos de un pre-ensamblado de la banda ya que ésta no podrá ser ensamblada completamente hasta que el resto del cuerpo del túnel esté ensamblado. Esto es debido a que la banda deberá ser tensada de acuerdo a su longitud y de acuerdo a la contracción que sufra al trabajar a temperatura criogénica.

### 5.3 DE LA TRANSMISION Y VARIADOR DE VELOCIDAD

#### 5.3.1 REACONDICIONAMIENTO DE FLECHA DE ACOPLAMIENTO

La flecha ligada a la transmisión se encontraba en buen estado así que se procedió sólo a su limpieza. Esta flecha

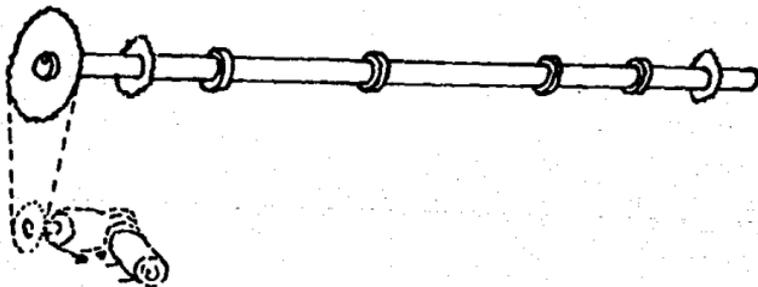


FIGURA 5.1. ENSAMBLE DE LA FLECHA DE ACOPLAMIENTO

es de acero inoxidable y tendrá una catarina en un extremo para la transmisión de potencia.

### 5.3.2 REACONDICIONAMIENTO DE CADENAS Y CATARINAS

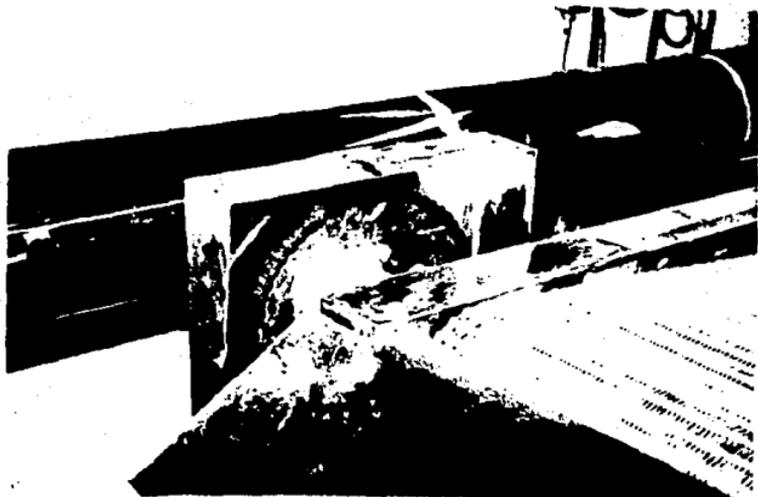


Ilustración 5.5 Cadena y catarina rehabilitada

Las catarinas al tener contacto con la cadena sufren un desgaste. Es por eso que la catarina acoplada a la flecha de la banda, aún siendo de acero inoxidable sufre incrustaciones de óxidos que le deposita la cadena, hecho por el cual se tuvo que limpiar la catarina, la cual tiene un diámetro de 33.2 cm. y un paso de 60 dientes. La cadena fué cambiada. Es necesario evitar cualquier goteo o chorreo de grasas o lubricantes y en lo posible cubrir la transmisión no sólo por protección al personal sino porque

el proceso deberá ser lo más higiénicamente controlado. La catarina acoplada a la flecha del reductor de velocidad es de acero al carbón con diámetro de 16.6 cm. y un paso de 30 dientes. Esta también tuvo que ser cepillada. Esta catarina no necesita ser de acero inoxidable, pues no se encuentra expuesta a las bajas temperaturas del proceso, ni tiene contacto directo con el producto.

### 5.3.3 VARIADOR DE VELOCIDAD

El variador de velocidad utilizado es de diámetro de patea variable con regulación manual de la velocidad.

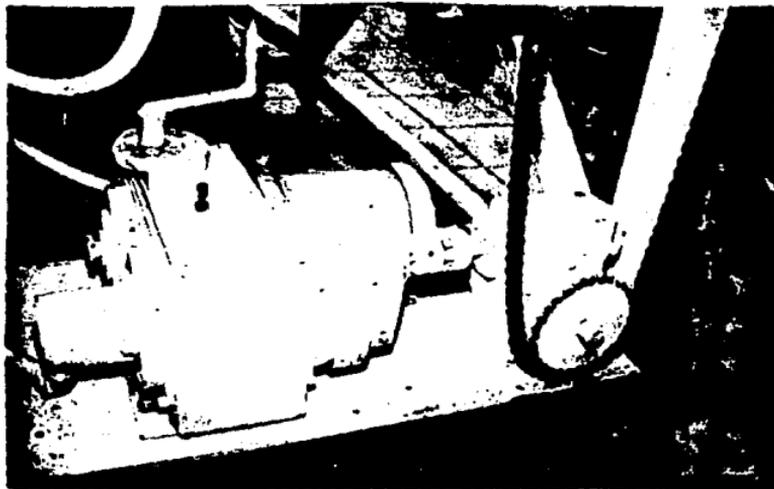


Ilustración 5.6 Aspecto del variador de velocidad

Este variador de velocidad funciona por medio de patea de diámetro variable acopladas con una banda y cuya

distancia entre ejes determinará la regulación de la velocidad. Sin embargo al estar tanto tiempo expuesto a la humedad y fuera de uso, el óxido hizo que se pegaran las poleas al cuerpo de dicho variador. Luego entonces se procedió a su limpieza y a la sustitución de la banda por una nueva. En la sección contigua dentro de la misma carcasa se encuentran los engranes para la transmisión de la potencia. En este espacio fué necesario cambiar el aceite lubricante el cual se encontraba muy degradado.

#### 5.3.4 REPARACION DEL MOTOR

Debido al tiempo que estuvo fuera de uso dicho motor, fué necesario hacerle una limpieza general, revisando

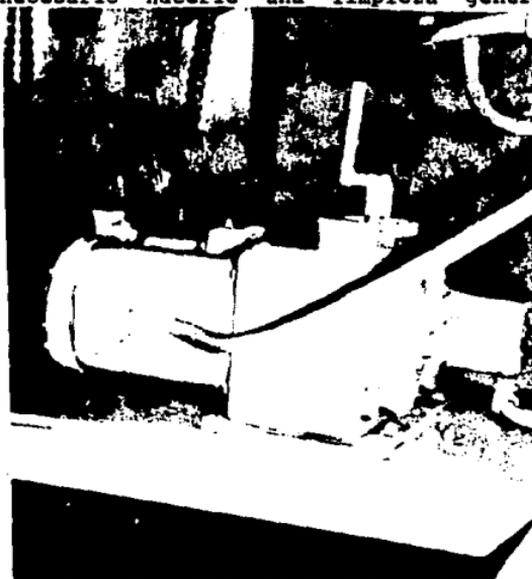


Ilustración 5.7 Motor del variador ya reparado

baleros, carbones, etc.. El motor es de C.A., trifásico, de 60 Hz., 1 H.P., completamente cerrado con ventilación, marca General Electric. Finalmente se acopló al reductor de velocidad.

#### 5.3.5 ENSAMBLE A ESTRUCTURA

Ya habiéndose reparado, limpiado, lubricado, y pintado debidamente dicha transmisión, se procedió a instalarla en la estructura justo debajo de la flecha delantera de la banda transportadora. El tensado de la cadena se logra colocando la transmisión en su línea de acción adecuada y alejándolo a fin de tensarla. Normalmente, una cadena habrá sido tensada cuando la holgura provoque un desplazamiento hacia adentro o hacia afuera de las dos catarinas no mayor al espesor de la cadena en posición estática.

#### 5.4 DEL CONTROL DE TEMPERATURA

##### 5.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA

Los sensores que tiene este túnel son 3 termopares Tipo J de cobre y costantan, los cuales tienen una precisión de operación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  y sólo fué necesario limpiar el tubo que contiene dichos sensores, el cual es de acero inoxidable. También se rectificó que las terminales eléctricas estuvieran en su lugar y que no existiera ningún falso contacto que impidiera una buena medición de la temperatura. Se revisó que el alambrado estuviera en buen estado a través del tubo conduit y que llegara bien al controlador.

#### 5.4.2 CONTROLADOR DE TEMPERATURA

El controlador de temperatura utilizado se seleccionó digital en la carátula, con salida análoga proporcional, fué de la marca Partlow modelo Mic 2000 con circuito impreso para control proporcional. Se decidió utilizar este tipo de controlador ya que la válvula reguladora de suministro de LIN es de tipo proporcional para tener un mejor control del



Ilustración 5.8 Estado de los termopares

proceso. El controlador anterior, que era del tipo apertura-cierre sólo permitía tener una válvula solenoide lo cual provocaba tener un proceso ineficiente. De tal manera, el controlador de temperatura Partlow se instaló como innovación al túnel. Entre otras funciones nos permite

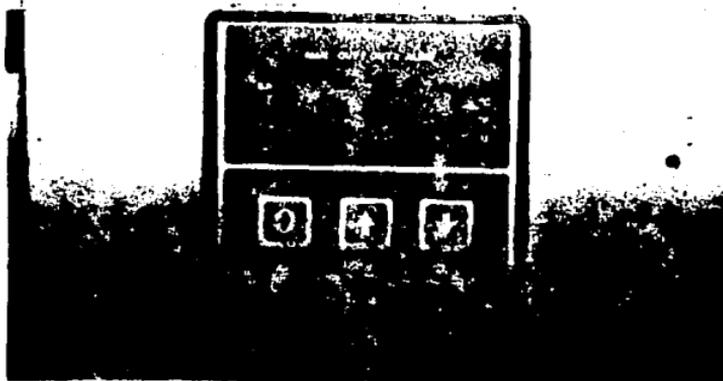


ilustración 5.9 Aspecto del controlador de temperatura nuevo



Ilustración 5.10 Ubicación de los termopares en el túnel

conocer la temperatura en el interior del túnel, así como seleccionar la temperatura de operación deseada controlando la posición de apertura y de cierre de la válvula.

#### 5.4.3. UBICACION EN EL TABLERO

Al controlador de temperatura fué necesario hacerle un pequeño gabinete nuevo el cual sería colocado junto al tablero de control.

El tamaño del nuevo controlador de temperatura incorporado al equipo, no permitía colocarlo en el tablero, el cual estaba fabricado a la medida de los controladores anteriores.

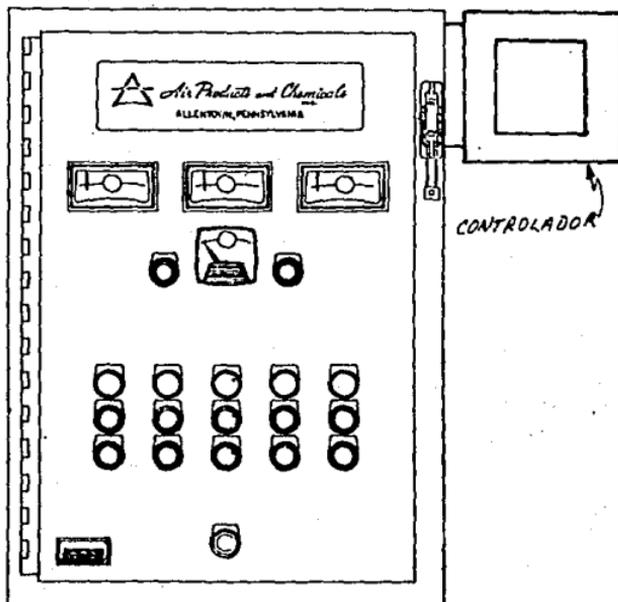


FIGURA 5.2. UBICACION DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN EL TABLERO

#### 5.4.4. ALAMBRADO Y PROGRAMACION

Habiéndose colocado el controlador junto al tablero de control, se procedió a instalarle sus servicios eléctricos además de aquellas conexiones que contenían las señales de entrada y salida. Esto es, las señales de entrada son las generadas por los termopares y las de señales de salida son aquellas que contendrán la respuesta para el controlador proporcional de la válvula de suministro de LIN.

#### 5.5 DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE NITROGENO LIQUIDO

##### 5.5.1 LINEA DE ALIMENTACION

Debido a que el túnel se colocó en una Planta de Proceso nueva, fué necesario preparar una línea para dicha instalación.

La línea de suministro será de tubería de cobre, temple rígido, tipo L de 38mm. de diámetro nominal y deberá tener los menores cambios de dirección que provoquen pérdida de calor latente del LIN por burbujeo excesivo en los codos. De tal manera se buscará tener la trayectoria más directa y más corta del tanque de almacenamiento de LIN al túnel de congelación. Las uniones de secciones se harán con soldadura de plata-estaño (65%-35%) la cual es resistente a las bajas temperaturas del LIN además de tener una excelente penetración y fluidez en las uniones de cobre.



Ilustración 5.11 Línea de alimentación desde el tanque de LIN

El diámetro de la tubería fué sobredimensionado para prevenir futuros acoplamientos de más túneles, dado que normalmente el diámetro es de 25 mm..

La tubería deberá ser limpiada en su interior a fin de eliminar todas las impurezas. Se utilizó para dicha operación percloroetileno, el cual disuelve la mayoría de las grasas que pudieran estar impregnadas en el interior. Se recomienda utilizar agua y jabón neutro también.

#### 5.5.2 TREN DE VALVULAS

Los elementos contenidos en este tren de válvulas son: 2 válvulas de alivio, 2 manómetros, una válvula de globo para uso criogénico y una válvula de control proporcional de flujo

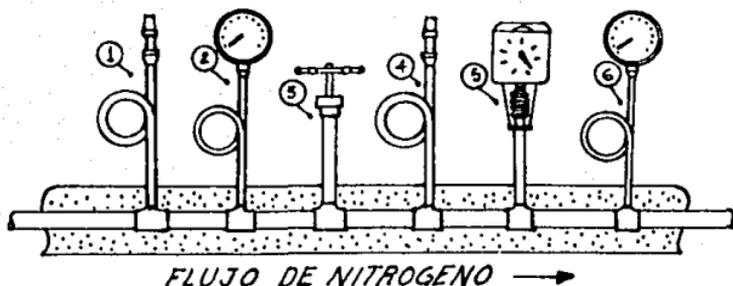
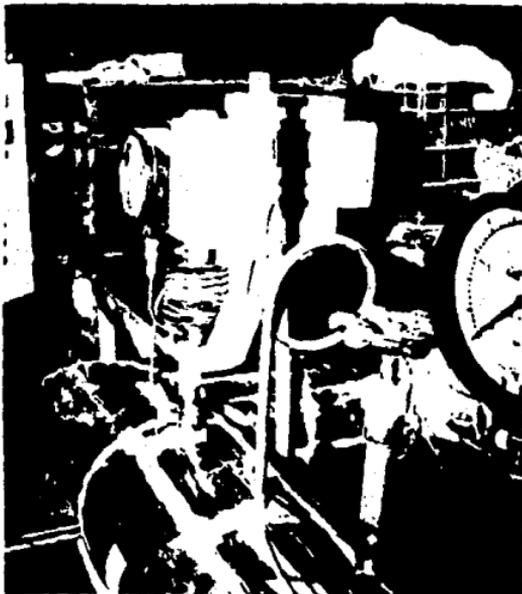


FIGURA 5.3. TREN DE VALVULAS

Se decidió utilizar manómetros de la marca Metrón de uso superior con rango de 0-4 kg/cm<sup>2</sup> con carátula de 152 mm. con conexión de acero inoxidable, rosca macho de 12.7mm con conexión inferior montados en una espiral de tubo de cobre llamada "cola de cochino" y que obliga al LIN a gasificarse en esa zona y hacer posible la medición de la presión. Adicionalmente se le fabricaron unos soportes para impedir oscilación de los mismos provocados por su peso sobre dichas "colas" o espirales.

Las válvulas de alivio fueron 2, ya que por Norma se debe utilizar una de estas válvulas entre dos elementos de control. La conexión de estas válvulas es roscable. Dichas válvulas fueron calibradas para operar a una presión de 1.1 veces la presión de operación, también montadas sobre "colas de cochino" porque las válvulas trabajan con gas, no con líquido.

La válvula de globo utilizada fué de la marca Powell de 38mm. de diámetro para uso criogénico con asientos de teflón. Este tipo de válvula presenta un vástago bastante



Huistración 5.12 Aspecto del tren de válvulas ya instalado

largo con relación al cuerpo de la misma a fin de evitar el congelamiento de la misma. La conexión a la línea será de manera soldada.

La válvula de control proporcional es de la marca Powell con actuador Barber-Colman, con operación de giro proporcional entre  $-10$  a  $+10$  Volts, con vástago de válvula de globo también de uso criogénico. Se le hicieron tareas de reparación y acondicionamiento en función del alto costo que implica adquirir una nueva y al largo tiempo de entrega por ser de importación.

El vástago tuvo que ser enderezado, pues la válvula presentaba fugas al no tener un buen asiento. También se

procedió a calibrar eléctricamente el rango de cierre para que automáticamente calibre el de apertura.

Ya teniendo nuestros elementos de control se procedió a instalarlos en la línea de alimentación, procurando que estuvieran lo más cercanos al túnel y juntos a fin de que funcionen como un dispositivo global de control de flujo.

Cabe hacer notar que la regulación que la válvula de control proporcional hace es en función a la señal que el controlador de temperatura le manda. Es por ello que su apertura dependerá de la temperatura existente en el interior del túnel, la cuál estará o deberá estar lo más cercanamente posible a la temperatura de operación seleccionada.

### 5.5.3. AISLAMIENTO

El tipo de aislamiento utilizado para las tuberías es

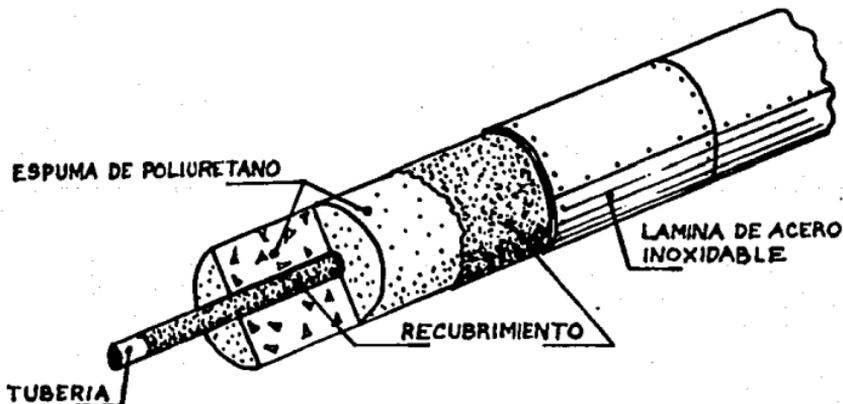


FIGURA 5.4. AISLAMIENTO DE LINEA

del tipo de espumas expandidas de poliuretano de alta densidad y mínimo tamaño de burbujas. Sin embargo el tipo de aplicación es diferente, ya que esta espuma está ya preparada en medias cañas para cubrir tuberías permitiendo una fácil aplicación. Para lograr una mejor adhesión a la

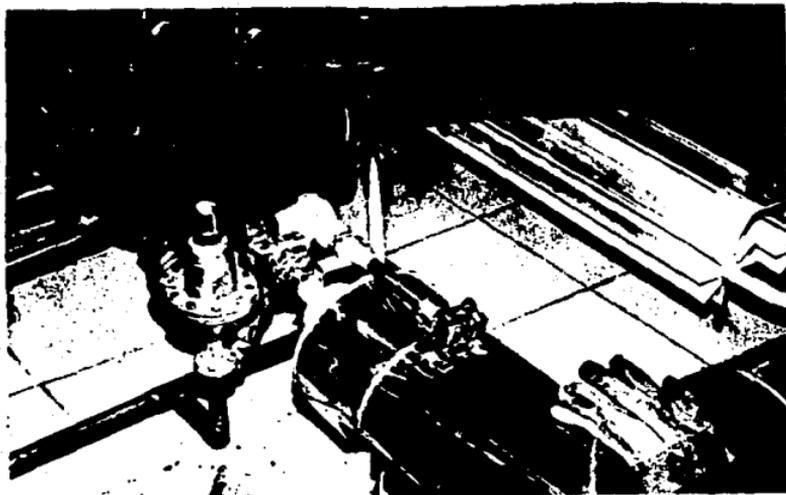


Ilustración 5.13 Aislamiento en la línea de suministro

línea de suministro se le aplica un recubrimiento de tipo impermeabilizante marca Fester y luego se colocarán las medias cañas. Nuevamente es aplicada una capa de impermeabilizante. Este impermeabilizante se utiliza ya que las bajas temperaturas harán que se forme una capa de hielo lo cual acarreará humedad al aislamiento provocando una

degradación del aislamiento por su color negro, el impermeabilizante forma una barrera contra el calor ambiental. Posterior al aislamiento se recubrirá la línea con hojas preformadas de sección circular de acero inoxidable de calibre # 20 que además de dar protección contra el agua y las raspaduras, dará una mejor imagen estética, y reflejará la radiación solar.

Este tipo de aislamiento en la línea de alimentación ha demostrado por su costo y eficiencia ser el más funcional.

#### 5.5.4. SOPORTES

La línea una vez aislada requiere, por la longitud de su tendido y el peso acumulado, soportes que impidan el pandeo y ruptura de la misma. Es por ello que se fabrican

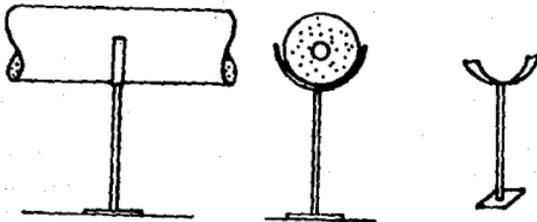


FIGURA 5.5. SOPORTES DE LINEA

unos pequeños soportes en acero al carbón y se colocan debajo de la línea, cada dos metros, en forma de cincho con

una holgura tal que permite a la tubería contraerse y dilatarse de acuerdo a su temperatura. Esta variación de dimensiones es tal, que no se permite soportar la tubería cerca de codos, dado que los mismos trabajan a flexión en un rango de +/- 5° sobre 90°, razón por la que se prefiere al cobre como el material idóneo para este tipo de tuberías.

## 5.6 DEL SISTEMA DE ATOMIZADO

### 5.6.1. ARREGLO DEL MULTIPLE DE BOQUILLAS

Este arreglo se construyó para enlazar el tren de válvulas de LIN con el proceso de congelación buscando tener una distribución uniforme del líquido mediante atomizado con el uso de boquillas de acero inoxidable. De tal manera el arreglo será una serie de tubos de cobre interconectados como un circuito cerrado y conectados al tren de válvulas. También estarán unidos con soldadura de plata. Al estar el arreglo dentro del túnel sobre los alimentos, será necesario cromarlo a fin de mantenerlo lo más higiénicamente posible. En el lugar donde se colocarán las boquillas existirán coples roscados para que éstas puedan ser colocadas.

### 5.6.2 BOQUILLAS

Las boquillas utilizadas son de la marca Spraying Systems de 1.57mm. de diámetro de orificio, del tipo cono plano con conexión roscada de 3.1mm. MNPT para su fácil reposición y mantenimiento y cuerpo de acero inoxidable. El patrón de rociado elegido fué en forma elíptica a fin de

abarcar mayor producto aprovechando el avance del alimento con la banda.

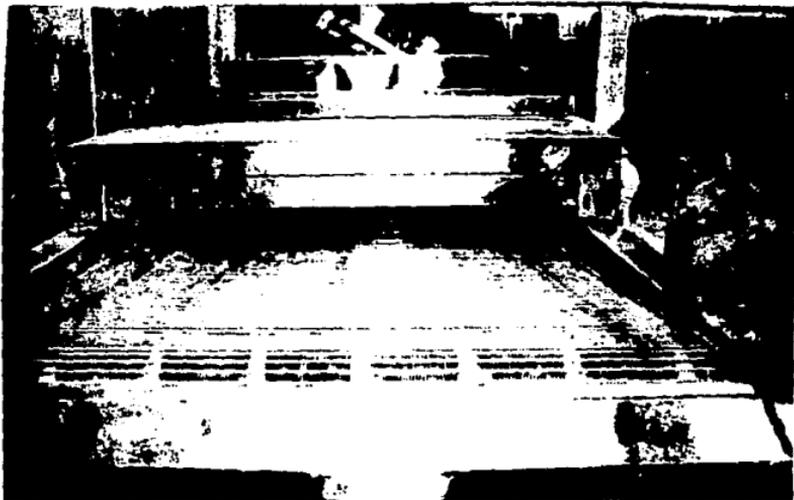


Ilustración 5.14 Aspecto de las boquillas a la salida

Estas boquillas logran la atomización del nitrógeno líquido para obtener el cambio de fase de pequeñas gotas al tener contacto con el producto a congelar y así aprovechar su calor latente. El área que tienen en conjunto las boquillas en su sección transversal es recomendable no sea mayor al 60% del área que tiene la línea de suministro. Esto nos dá como resultado el tener un número máximo de boquillas a fin de garantizar una presión correcta en el atomizado. De acuerdo a los siguientes cálculos se seleccionaron las boquillas:

### 1. Nitrógeno líquido necesario.

Ejemplo para gelatina (2kg.LIN Vs. 1kg. de producto)

-capacidad requerida de producto 500kg./hr

-capacidad de LIN para ese producto  $500 \times 2 = 1000 \text{kg./hr}$

Sea: 808kg/m la densidad del LIN

Entonces:  $\frac{1000}{808} = 1.237$  de LIN

808

NOTA: Para recurrir al catálogo de Spraying Systems se necesita ajustar el gasto de LIN, a gasto de agua, entonces:

$$\frac{P_{\text{AGUA}}}{P_{\text{LIN}}} = \frac{1000}{808} = 1.237$$

Entonces, el gasto de agua es:

$$\frac{5.47}{1.237} = \frac{4.397 \text{ GAL AGUA}}{\text{min.}}$$

### 2. Gasto necesario por boquilla

Supongamos 20 boquillas uniformemente distribuidas a través del circuito de 0.9 cm. de longitud, y cuatro ramas, entonces:

$$\frac{4.397}{20} = 0.219 \text{ GAL. AGUA / MIN / BOQUILLA}$$

### 3. Selección del orificio por boquilla

Entonces, el diámetro de cada rama es:

a) Diámetro interior de la tubería

$$I.D. = 2(0.005) = 0.01"$$

b) Área de flujo  $\pi \left( \frac{0.01}{2} \right)^2 = 0.5944 \text{ pulg}^2$

c) Área de flujo de cada ramal

$$\frac{0.5944}{4} = 0.1486 \text{ pulg}^2$$

d) Diámetro de flujo de cada ramal

$$0.1486 \text{ pulg}^2 = \frac{\pi D^2}{4};$$

$$\text{donde } D = 0.4349''$$

Por lo tanto, el diámetro nominal de cada rama es:

Luego entonces, el orificio de cada boquilla, suponiendo cinco boquillas por rama es:

$$\frac{1}{2}'' - 2(0.04'') = 0.42''; \text{ es el diámetro de cada rama}$$

Luego, el orificio de la boquilla es:

$$\frac{0.42}{5} = 0.084''$$

#### 4. Datos para localización de boquilla

Como mencionamos anteriormente, datos experimentales demuestran que para garantizar un flujo uniformemente atomizado de nitrógeno por todas las boquillas que tienden a bloquearse por la presencia de humedad durante el proceso de congelación, debemos reducir en un 40% el número de las boquillas, o su diámetro.

Lo anterior a efecto de incrementar la eficiencia de la atomización, luego entonces:

Alternativa A

$$20 \text{ boquillas} \times 0.6 = 12 \text{ boquillas}$$

entonces:

$$\frac{4.397}{12} = 0.366 \text{ gal. agua/min / boquilla}$$

Alternativa B

$$\left(\frac{0.42}{3}\right) 0.6 = 0.05"$$

Para la alternativa A

$$d \text{ boquilla} = \frac{3}{36} = 0.093"$$

Gasto por boquilla: 0.366 gal. agua/minuto/boquilla

Presión de trabajo: 10 p.s.i.

Del catálogo del fabricante, la boquilla H1/SU9515 con diámetro de orificio 0.095" provee un flujo de 0.75 gal. agua/minuto/boquilla, el cual es excesivamente alto para una adecuada atomización de todas las boquillas.

Para la alternativa B

$$d \text{ boquilla} = 0.05"$$

Gasto por boquilla: 0.279 gal. agua/minuto/boquilla

Presión de trabajo: 10 p.s.i.

Del catálogo del fabricante, la boquilla H1/SVV11004, con diámetro de orificio de 0.052", provee un flujo de 0.2 gal. agua/minuto/boquilla el cual es 9% menor al necesario.

Por tanto, surgen otras dos alternativas a saber:

Alternativa C

Boquilla de 0.062" con número H1/4VV11006 que a

5 p.s.i. provee 0.21 gal. agua/minuto/boquilla, 6

Alternativa D

La boquilla de 0.052" ya mencionada, que a 20 p.s.i. provee 0.28 gal.agua/minuto/boquilla.

Por lo tanto, se selecciona la boquilla de 0.062" porque el calor latente del nitrógeno se aprovecha en mayor cantidad a menor presión, como se discutió en el Capítulo 3. Comercialmente se pueden fabricar con orificio de 1/16".

### 5.6.3. CONEXION A LA LINEA DE ALIMENTACION

Ya teniendo el arreglo listo, se monta en el interior del cuerpo aislado a fin de que quede en su posición final. Posteriormente se conectará a la línea de alimentación del LIN soldándose también con soldadura de plata. La soportería de este múltiple le permite contraerse y dilatarse durante su operación.

## 5.7. DEL SISTEMA DE EXTRACCION

### 5.7.1. CAMPANA

La campana acoplada a la entrada del túnel es también de acero inoxidable y su forma concentrará la nube de nitrógeno gaseoso caliente. Esta campana se fijó sobre la zona de carga, atornillándola al módulo. Además se le instalaron unos pequeños canales al final de cada costado a fin de recoger el agua condensada en el interior y evitar que caiga sobre el producto.



Ilustración 5.15 Aspecto de la campana de extracción sobre la banda

#### 5.7.2. DUCTO

El ducto no requerirá ser de acero inoxidable pues no se encuentra ya en contacto con el nitrógeno a bajas temperaturas. Luego entonces se utilizó un ducto fabricado de lámina de acero galvanizado. El ducto se fabricó en secciones cuadradas de 0.2 m. X 0.2 m. y comunicará a la campana del túnel con el extractor mismo. Otra sección de ducto se colocará en la salida del extractor para dar salida a la atmósfera al nitrógeno gaseoso. También se tomó en cuenta la mínima longitud de ducto y mínimo número de codos para evitar caída de presión de entrada al extractor.



Ilustración 5.16 Ducto y extractor del túnel

### 5.7.3. MOTOR Y VENTILADOR DEL EXTRACTOR

El motor y ventilador de este extractor se tomaron como un sistema, de tal manera que el motor operará con una velocidad nominal y por lo tanto el ventilador de extracción tendrá una capacidad también nominal de extracción. En nuestro caso se seleccionó uno con una capacidad de extracción de 850 m<sup>3</sup> /hr. Son ventiladores entonces con un motor de 0.5 H.P., el ventilador es de tipo radial. La transmisión de potencia del motor al ventilador es por medio de una banda. La acometida del motor es de 127 Volts, 9.5 Amperes, monofásico y con una velocidad de 1755 RPM. Están diseñados para el manejo de alto flujo de gas a baja

presión. Se buscó colocarlos justo arriba de la zona de carga, de tal manera fueron fijados a una altura aproximada de 4m.. Su colocación requirió la elaboración de unos soportes a fin de tenerlos completamente fijos a la pared.

## 5.8 DEL SISTEMA DE TURBULENCIA

### 5.8.1. MOTORES

Los motores utilizados son de 0.5 H.P., marca Baldor, completamente cerrados con ventilación, trifásicos de 220 Volts, y una velocidad de 1725 RPM, a efecto de lograr un adecuado balance de energía eléctrica con bajo consumo de corriente.

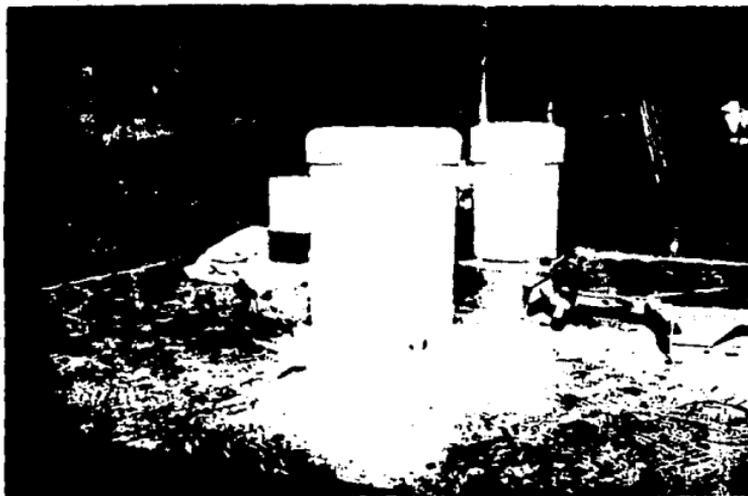


Ilustración 5.17 Ubicación de los motores de los ventiladores

### 5.6.2. VENTILADORES

Los ventiladores utilizados son de flujo radial de acero inoxidable con un diseño aerodinámico que permite generar una turbulencia controlada en el interior del túnel dándole mayor tiempo de residencia al nitrógeno gaseoso

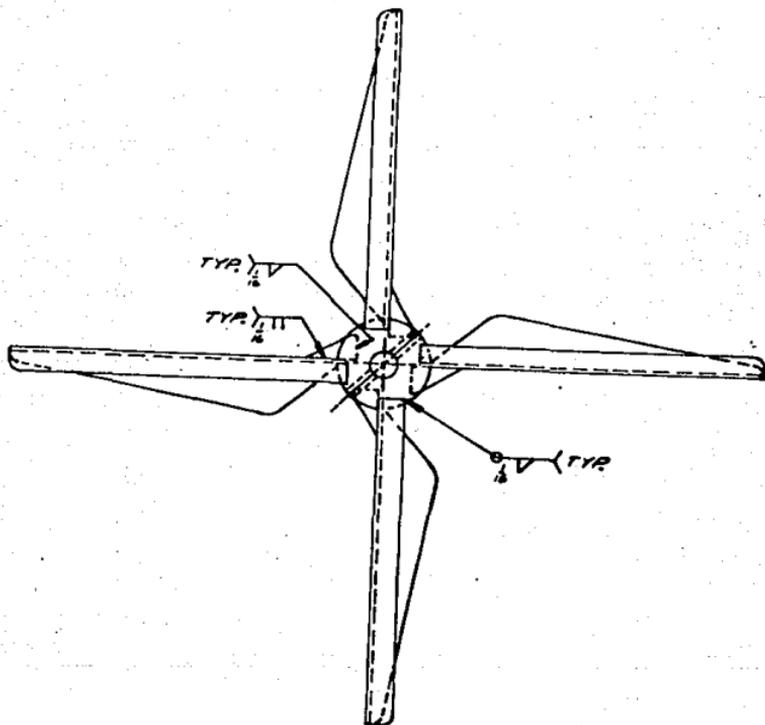


FIGURA 5.6. ASPECTO DE LOS VENTILADORES DE RECIRCULACION

frío. El desarrollo y posterior utilización de este tipo de ventiladores lograron evitar la dispersión de ingredientes en alimentos preparados.



Ilustración 5.18 Aspecto de un ventilador antes de su instalación

### 5.8.3. DEFLECTORES

Los deflectores se encuentran soldados en el interior de la cubierta superior del cuerpo aislado y son pequeñas láminas de acero inoxidable. Se encontraban en buen estado por lo que se procedió sólo a su limpieza.

## 5.9. VENTILADORES DE CIRCULACION PARALELA

### 5.9.1. VENTILADORES

Los ventiladores utilizados son de desplazamiento centrífugo tipo jaula de gas, accionados por banda, acoplados cada uno a un motor eléctrico.



Ilustración 5.19 Ubicación de los motores en el túnel



Ilustración 5.20 Ventiladores y deflectores

## 5.9.2. MOTORES

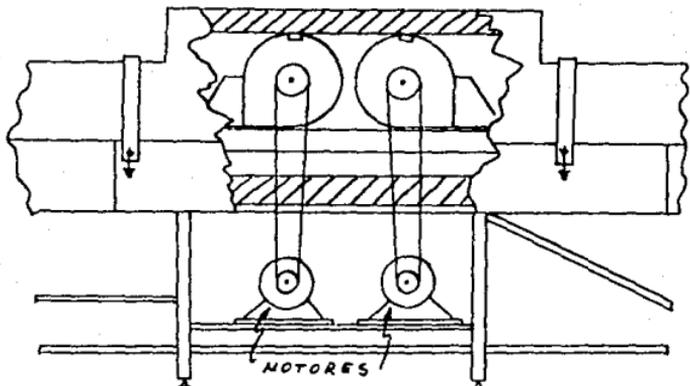


FIGURA 5.7. UBICACION DE LOS MOTORES DE LOS VENTILADORES PARALELOS

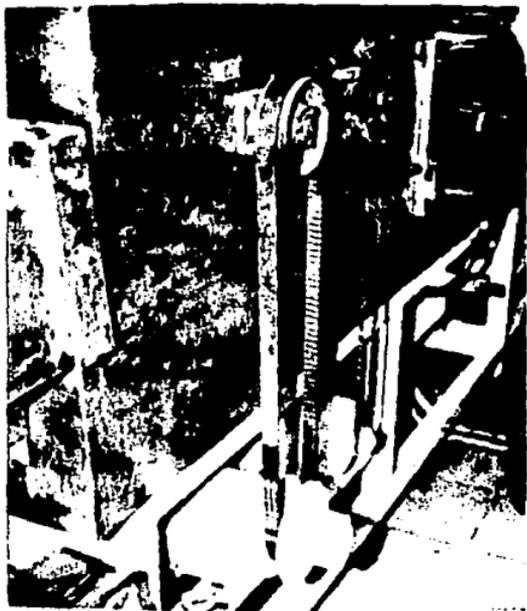


Ilustración 5.21 Aspecto general exterior de los ventiladores paralelos

Los motores que mueven a estos ventiladores son de 1 H.P., de 1725 RPM y se encuentran localizados en la estructura inferior de soporte del cuerpo aislado abajo de los ventiladores. La transmisión de potencia se hace por medio de una banda.

#### 5.10. DE LA INSTALACION ELECTRICA

La acometida eléctrica para el túnel será de 220 Volts, trifásica, y la corriente que utilizará el túnel, la cual no es mayor a 30 ó 60 Amperes permitirá utilizar cable de calibre 8 si se encuentra el túnel a menos de 30 m. y del calibre 6 si son más de 30 m. de distancia de la acometida.

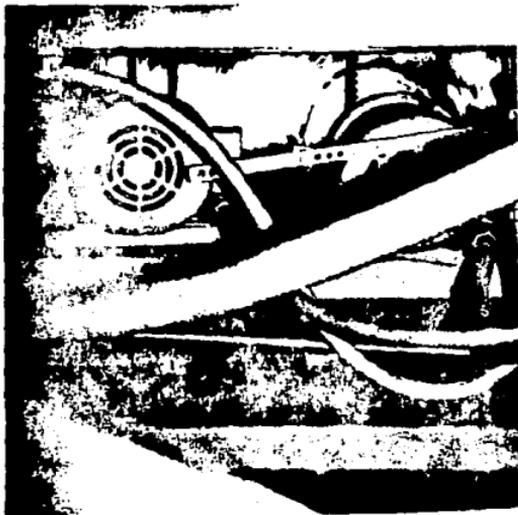


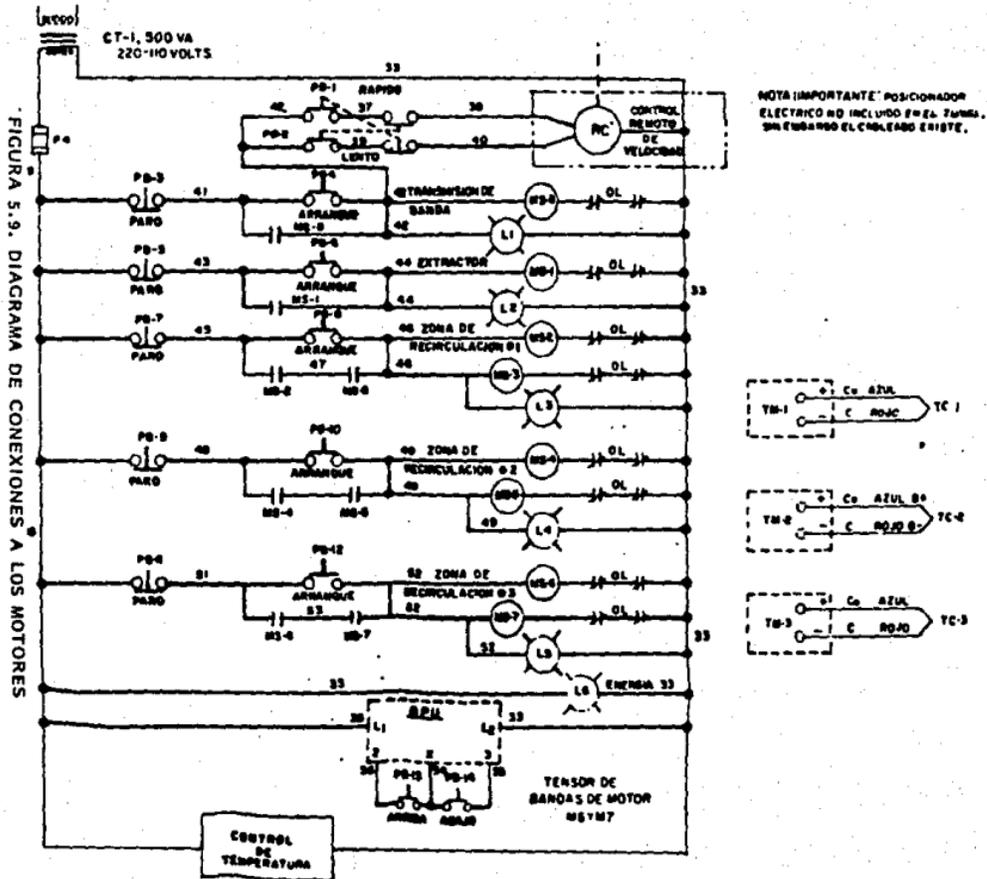
Ilustración 5.22 Líneas de acometida ubicadas debajo del túnel

LISTA DE PARTES DEL TABLERO ELECTRICO

	<u>CANT</u>	<u>CLAVE</u>
ARRANCADOR MAGNETICO A TENSION COMPLETA MCA. ALLEN BRADLEY CAT. No. 709 TOD SERIE K BUL. 709 SIZE 00 CON 2 RELEVADORES DE SOBRECARGA TERMICOS C/U	8	MS-1 a MS-8
ELEMENTO TERMICO MCA. ALLEN BRADLEY No. N11	2	N11
ELEMENTO TERMICO MCA. ALLEN BRADLEY No. N15	8	N15
ELEMENTO TERMICO MCA. ALLEN BRADLEY No. N20	2	N20
ELEMENTO TERMICO MCA. ALLEN BRADLEY No. N22	2	N22
RELEVADOR DE SOBRECARGA TERMICO MCA. SQUARE D CLAVE 9065 TIPO LCO-IL	1	
ELEMENTO TERMICO MCA. SQUARE D No. B28	1	B28
TRANSFORMADOR SQUARE D CLAVE 9070 TIPO E05	1	CT-1
BOTONES DE CONTACTO MOMENTANEO MCA. ALLEN BRADLEY CL 9001 TYPE KA-1	12	PB-1 a PB-14
LAMPARA PILOTO MCA. ALLEN BRADLEY CL 2001 TYPE K M-1	6	L1 a L6
FUSIBLE FUNCTION CLAVE RK4 TYPE FRN-R7	1	F4
FUSIBLE CEFCO CAT No. CR\$ R-30	3	F1 a F3
SWITCH DE NAVAJAS DE 3 POLOS	1	DS-1
GENERADOR TACOMETRICO G.E. kd\$ NP 1900 93 CA	1	TG
INDICADOR DE R.P.M.	1	VM-1
INDICADOR DE TEMPERATURA API PART. No. 5250040000 MOD. PC/CL 502 71 142	3	TM-1 a TM-3

TABLA 5.1. PARTES DEL TABLERO ELECTRICO





### 5.10.1 TABLERO DE CONTROL

El tablero de control incluirá además de los controladores e indicadores elementos de protección eléctrica. Son elementos de protección térmica que además tendrán unos relevadores que son unos contactores de operación normalmente cerrados. Los elementos térmicos son de la marca Square D. La secuencia de conexión de las protecciones en las líneas trifásicas para cada uno de los motores será como se muestra en la figura 5.8. También se enumera una lista de componentes eléctricos incluidos en el túnel.

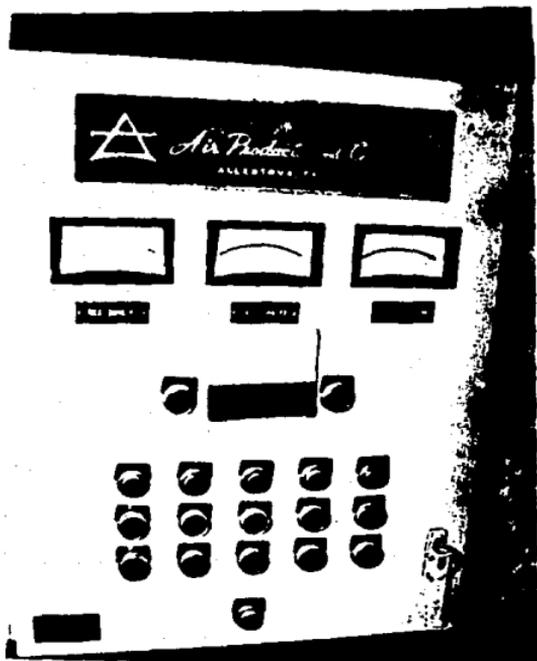


Ilustración 5.23 Tablero de control ya restaurado

### 5.11. DE LA SOLDADURA

La máquina TIG deberá estar en baja corriente (baja velocidad):

calibre 16                    25-35 Amps.                    con criterio

calibre 11                    60 Amps.                    con criterio

Para hojas de calibre 16- 20 se usó el TIG (aunque MIG con alambre menor de 0.025" en diámetro es aceptable, pero menos preferible). El perfil de la punta fué el siguiente:

1/16 DE PULGADA DE  
DIAMETRO PARA PUNTAS  
DE TUNGSTENO AL 28

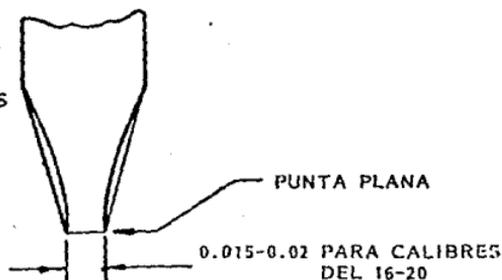


FIGURA 5.10. PERFIL DE LA PUNTA PARA USO TIG



Ilustración 5.24 Puntos  
de soldadura en el cuerpo  
del túnel

También habrá que iniciar la soldadura en puntos, colocándolos de la siguiente manera:

PASO 1:  
PUNTEADO



PASO 2:  
SOLDAR DEL EXTREMO  
A AL PUNTO 1



PASO 3:  
SOLDAR DEL EXTREMO  
B AL PUNTO 2



PASO 4:  
SOLDAR DEL PUNTO  
1 AL PUNTO 3



PASO 5:  
SOLDAR DEL PUNTO  
2 AL PUNTO 3



FIGURA 5.11. SECUENCIA DE PUNTEADO UTILIZADO EN LA SOLDADURA DE HOJAS DE ACERO INOXIDABLE

	Long. puntos	Separación
Más delgadas calibre 16	1/8-3/8	c/2-3
Más gruesas calibre 16	1/2	c/3-4

### 5.12. DE LAS JUNTAS CRIOGENICAS

Estas juntas están fabricadas de virutas de acero inoxidable entrelazadas de tal forma que tengan resistencia

mecánica. Además para impedir cualquier fuga del nitrógeno gaseoso se recubre con una malla de nylon, el cual presionará al panel contra la viruta de acero inoxidable.



Ilustración 5.25 Juntas criogénicas

### 5.13. CONDICIONES DE PRUEBA

El equipo que entrará a servicio criogénico, especialmente aquel que tiene uniones soldadas, ensambles de hojas metálicas o partes maquinadas deberán ser probadas en operación a sus condiciones de diseño extremas, alrededor de  $-195^{\circ}\text{C}$ . Conforme estos ensambles son enfriados, varios esfuerzos en las soldaduras son liberados, causando una sustancial deformación y ondulaciones para largas secciones de metal. Además, los cálculos de diseño no predicen los

efectos reales. Normalmente las tolerancias a  $-195^{\circ}\text{C}$  no concuerdan con las tolerancias de diseño.

Las pruebas llevarán al equipo al máximo choque térmico esperado, es decir, el enfriamiento más rápido hasta  $-195^{\circ}\text{C}$  usando LIN. El sistema deberá operarse en su secuencia normal, esto es:

1. arranque normal
2. enfriamiento normal
3. estado de operación
4. paro de emergencia

El estado de operación deberá mantenerse hasta que se inicie la formación de escarchas en las superficies exteriores (1 hora para aislamientos de 50 mm., 2 horas para aislamientos de 100 mm.). El sistema podrá no llegar a un verdadero estado de operación hasta después de una cierta cantidad de horas, pero la formación de escarcha indicará que la superficie exterior se ha enfriado a cerca de  $0^{\circ}\text{C}$ . El sistema deberá pasar varios ciclos de encendido y apagado a fin de que no existan problemas de fricciones estáticas en condiciones de frío extremo (aunque no haya problemas de fricción dinámica).

Durante la prueba de enfriamiento, se deberá verificar que no existan fallas de fabricación o de diseño, tales como:

1. Fugas de nitrógeno gaseoso de juntas o sellos.
2. Excesiva deflexión, deformación o pandeo de estructura (3mm. por cada 1500 mm. es aceptable)

3. Doblado de flechas, partes movibles (comparar las RPM de diseño contra las actuales, además de checar la potencia necesaria) midiendo el consumo de corriente de los motores.
4. Poner atención a los ruidos existentes en condiciones frías y calientes. El ruido indicará interferencias y tolerancias erróneas.
5. Observar las partes de movimiento lento (banda transportadora, cojinetes, etc.) y revisar si tienen movimiento continuo o bien presentan un corrimiento intermitente. Si es continuo indicará que está bien, de lo contrario será indicativo que las tolerancias están muy cerradas.
6. Checar los puntos fríos más notorios, es decir, aquellos puntos que presentan escarcha. Estos puntos fríos pueden esperarse alrededor de los sellos, bisagras, etc., ocasionados por algún escape de nitrógeno frío. Los puntos fríos no deberán ser excesivos en el cuerpo principal de un panel bien aislado. Estos puntos escarchados indicarán un aislamiento impropio e inadecuado.

Después de terminadas las pruebas en frío, habrá que permitir que la unidad recupere su temperatura ambiente, esto se logra deteniendo el flujo del LIN. Nuevamente se revisarán los puntos anteriores.

Cuando el sistema esté completamente recuperado en lo que a temperatura se refiere (temperatura ambiente) y

aireado (monitoreo de oxígeno) revisar nuevamente los puntos anteriores. Se deberá también abrir el sistema y checar por cualquier deformación permanente en las partes interiores.

Esto indicará:

1. Soldadura impropia en los metales
- 6 2. Inadecuado espacio en las partes corredizas
- 6 3. Partes corredizas demasiado apretadas impidiendo el movimiento y provocando esfuerzos en la parte haciendo que ésta se doble y se deforme.

#### 5.14. ARRANQUE, PUESTA EN MARCHA, Y PARO

Del arranque:

1. cierre todos los módulos del túnel
2. verifique que la presión del tanque termo sea menor a 2 kg./cm<sup>2</sup>. De lo contrario ventee el exceso de presión.
3. abra la válvula de consumo de líquido del tanque termo.
4. abra la válvula de globo del control de alimentación de líquido al túnel.
5. energice el tablero de control
6. establezca la temperatura de operación del túnel, mediante el uso del controlador programable de temperatura.
7. energice los ventiladores axiales y radiales.
8. energice el extractor.

**De la puesta en operación:**

1. verifique la presencia de nube de nitrógeno en los extremos del túnel. En caso afirmativo mueva la válvula de globo del control de alimentación de nitrógeno hasta eliminar el exceso de nube.
2. espere a que el túnel logre la temperatura interna igual a la temperatura establecida.
3. inicie la carga de producto a la banda, al 75% de capacidad a efecto de mantener una buena circulación de nitrógeno.
4. verifique que la temperatura del túnel se sostenga en rangos de oscilación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . De lo contrario abra la válvula de globo del control de alimentación. Con mayor flujo de nitrógeno se evitará que la temperatura del túnel se eleve y disminuya por ciclos debido a la inercia provocada por carga de producto (calor) Vs. inyección de nitrógeno cíclica (frío).
5. verifique la posición de la válvula de control automático se sostiene a la mitad de la trayectoria total. En ese momento el equipo congelará en forma continua el producto a la misma temperatura.

**Del paro:**

1. cerrar la válvula de consumo de líquido del tanque termo.
2. mantener en operación el túnel durante 10 minutos.
3. verificar en manómetros que no exista nitrógeno en la

línea.

4. desenergizar la banda, los motores y el extractor.
5. desenergizar el controlador de temperatura.
6. desenergizar el sistema.
7. lavar exhaustivamente el túnel con agua a presión con todos los módulos abiertos y dejarlos así para evitar acumulación de agua.

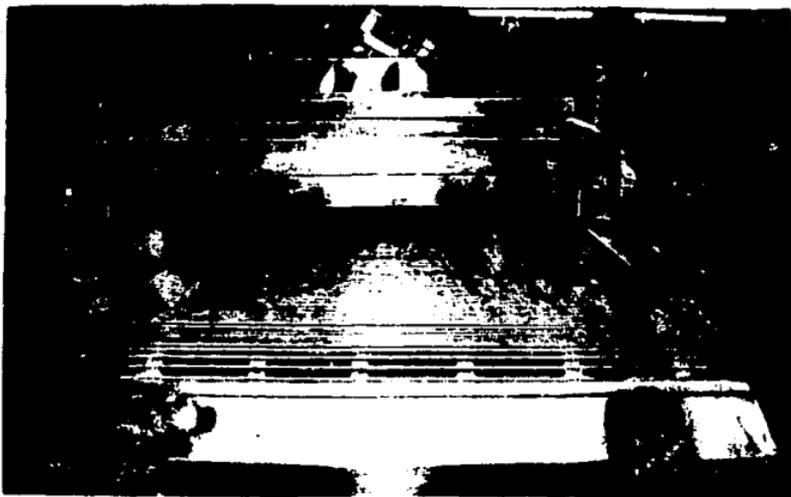


Ilustración 5.26 Aspecto de la zona de descarga

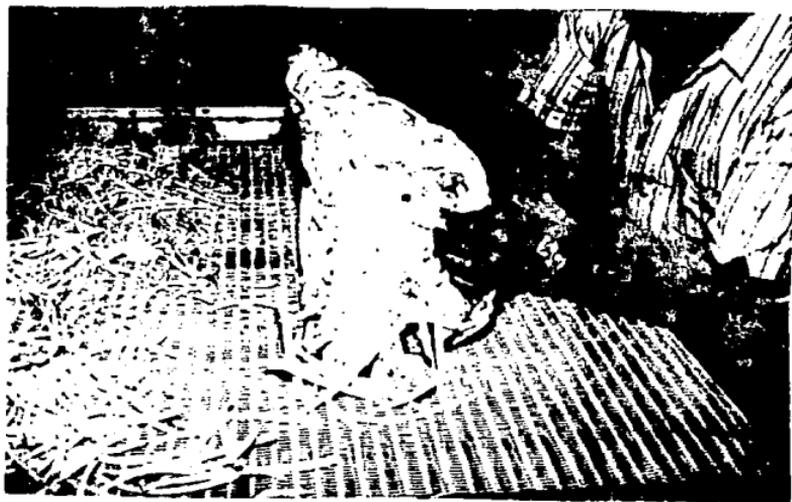
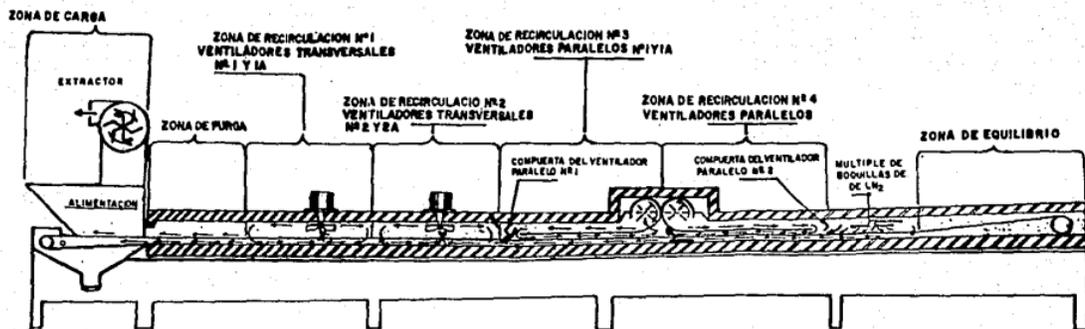


Ilustración del túnel, congelamiento de papas



## CORTE LONGITUDINAL

FIGURA 5.12. CORTE LONGITUDINAL DEL TUNEL

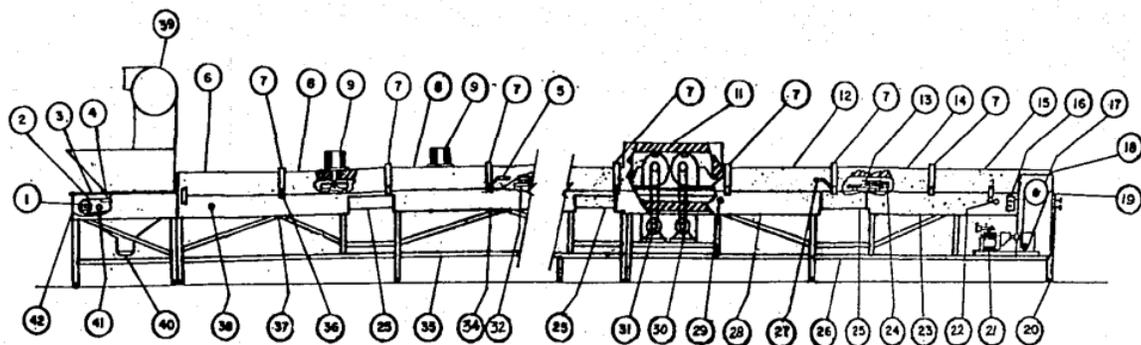


FIGURA 5.13. PARTES DEL TUNEL DE CONGELACION

## COMPONENTES.

1. Catarinas de banda
2. Banda
3. Zona de carga
4. Guías de banda
5. Compuerta manual (diseño original motorizado no incluido)
6. Cubierta móvil
7. Marco sellante
8. Cámara de ventiladores transversales
9. Motores de ventiladores transversales
10. Brazo actuador de compuerta (Inexistente en el túnel actual)
11. Cámara de ventiladores paralelos
12. Cubierta móvil
13. Múltiple de boquillas de nitrógeno líquido
14. Cubierta móvil
15. Cubierta móvil
16. Estación de botones de control de compuerta (motor no incluido)
17. Catarina de transmisión
18. Cubierta metálica de transmisión
19. Placa de descarga
20. Niveladores
21. Transmisión de banda de velocidad variable
22. Termopozo zona de equilibrio
23. Sección IV inferior del túnel
24. Tubo de alimentación de nitrógeno líquido
25. Sección removible inferior
26. Estructura soporte del módulo de transmisión
27. Compuerta de control manual
28. Sección III inferior
29. Termopozo zona de recirculación No. 4

30. Motor de ventilador paralelo
31. Motor de ventilador paralelo
32. Soportes de nivelación de banda
33. Modutrol (inexistente en el túnel actual)
34. Sección II inferior
35. Estructura soporte del módulo de alimentación
36. Picaportes deslizantes
37. Sección I inferior
38. Termopozo zona de recirculación No. 1
39. Extractor
40. Campana de drenaje
41. Múltiple de boquillas de agua de limpieza
42. Cubierta de transmisión

## CAPITULO 6

### ANALISIS COMPARATIVO ENTRE UN TUNEL NUEVO Y UN TUNEL RECONSTRUIDO

Uno de los limitantes a la congelación criogénica de alimentos en México obedece al alto costo de los equipos criogénicos nuevos. De tal manera se ha tomado la alternativa de reconstruir equipos criogénicos, que por su costo de mano de obra de mantenimiento y operación en otros países no son tan rentables pero no menos eficientes. A fin de encontrar las diferencias que existen entre un túnel nuevo y un túnel reconstruido se hace un análisis de costo de cada uno de los túneles, ambos fabricados en diferentes épocas por la misma empresa (APCI) a fin de tener precisamente el costo como un parámetro de selección. También se hará un análisis del aspecto tecnológico en cada uno de los túneles para ver de que manera afecta la diferencia económica en la operación de cada uno de los mismos.

#### 6.1. ASPECTOS TECNOLOGICOS

De acuerdo a las características del túnel reconstruido modelo RP4-4832-6C fabricado en 1965, en relación a su capacidad de producción, el modelo nuevo equivalente sería R5-5036-PL. La diferencia de cada túnel no va en función de su capacidad de producción, sino dependiendo de su longitud

y ancho de banda, así como el tamaño de las boquillas, que en número será siempre de 32. Se juega entonces con el tamaño de las boquillas y sus dimensiones para conocer la capacidad de producción, porque la presión está sujeta a un límite, que es de 10 libras máximo de tal manera que se asegure el flujo de líquido sin presencia de nitrógeno gaseoso provocado por cambio de fase. Entonces, existe una interacción del tiempo de residencia del producto a congelar por hora con la longitud del túnel. La eficiencia de los túneles se da por su longitud, no por su ancho. Asimismo, existe otra interacción entre el tamaño de las 32 boquillas para darle la capacidad en kg/hr. de producto a congelar y el líquido necesario para lograr la congelación.

El aspecto central del desarrollo tecnológico en materia de túneles es la estabilización de la atmósfera de nitrógeno en rangos de temperatura preestablecidos, con ausencia de oscilaciones internas provocadas por variaciones de carga de producto a congelar.

Luego entonces la instrumentación utilizada en los túneles modernos se enfoca tanto al control de las temperaturas asociadas con velocidades de agitación de nitrógeno, a la presión de la línea de suministro de LIN al túnel, así como la velocidad de extracción del nitrógeno hacia la atmósfera. De tal manera asociamos las variaciones de velocidad y presión a las temperaturas. Buscamos que a la más mínima variación de temperatura forzosamente variará alguno de estos parámetros. Esta temperatura es la existente

dentro del túnel. Los logros en este sentido han tenido como consecuencia de que los equipos modernos no necesiten de personal que vigilen la operación provocado por la ubicación de los instrumentos de control proporcionales que gobernarán a la más mínima variación. Luego entonces, si un túnel con 20 años de uso tuviese toda esta instrumentación su valor se incrementaría en la misma proporción que en la instrumentación de un túnel nuevo, restándole sólo la depreciación del mueble y de sus componentes de acero inoxidable, así como la escasa probabilidad de emplear un sistema hidráulico de apertura y cierre de los módulos.

En caso de que la mano de obra de personal no calificado se incrementara a precios semejantes a los E.U. (poco probable) se puede incluir en la reconstrucción un mecanismo de apertura mecánica de las compuertas.

Para efectos de economía y de promoción de este tipo de equipos reconstruido para el mercado nacional, se comprobó que la idea de mantener los puntos de control originalmente creados para estos diseños, incluyendo cambios respecto a equipos digitales y válvula motorizada entre otros, resulta en una operación segura y confiable tal y como lo fué cuando dichos equipos fueron nuevos requiriendo únicamente de la supervisión de un empleado entrenado para tal fin que observe: la temperatura a la zona de entrada en el túnel; la temperatura en el centro del túnel establecida como la adecuada para congelar cierta cantidad de producto por hora;

la velocidad de la banda establecida como la necesaria para mantener un promedio de producción por hora.

Siendo estas tres igualmente importantes, se resume que pequeñas modificaciones durante el período diario de producción a la velocidad de la banda permiten utilizar el túnel reconstruido en condiciones de operación estables y con pocas oscilaciones durante su uso, cosa que el equipo moderno hace por sí solo en virtud del precio de los instrumentos que tiene instalados. Se hace énfasis en que los cambios de tipo modular efectuados a los túneles modernos no mejora su eficiencia como intercambiador de calor con respecto a un túnel reconstruido, dado que los materiales son los mismos (acero inoxidable 304 y espuma de poliuretano de alta densidad); la mejora de este nuevo diseño radica en que por ser de apertura y cierre hidráulico a módulos pequeños (1.5 metros) minimiza el tiempo de limpieza del mismo y como consecuencia también el costo de mano de obra que como es sabido es más cara en Estados Unidos.

En el diseño reconstruido se requiere de media hora de trabajo de 2 obreros para dejar perfectamente limpio el equipo y de 10 minutos adicionales en promedio para abrir y cerrar los módulos. Supervisando estas labores de limpieza con chorro de agua a presión exclusivamente, no se encuentra evidencia de sólidos presentes en el interior del túnel.

Las diferencias tecnológicas para estos dos túneles se concentran en la instrumentación de cada uno de ellos. Nos

podemos dar cuenta que el costo del túnel nuevo se eleva precisamente por aquellos instrumentos que permiten una operación automática del equipo. Sin embargo, esto no quiere decir que el túnel reconstruido tenga que trabajar sin control. Un operador podrá realizar la operación semi-automática del túnel con la instrumentación mínima indispensable tan sólo con mantener equilibrada la temperatura a la entrada de la zona de carga a fin de que en el túnel no se presenten nubes de nitrógeno. Esto se logra con pequeñas variaciones a la velocidad de banda de  $\pm 5\%$  a intervalos de 30 minutos. Los túneles nuevos tienen transmisores de temperatura en cada una de las secciones así como sensores de diferencia de presión que permitirán al túnel operar con todos los parámetros de medición. El túnel nuevo tiene sistemas hidráulicos que permiten la apertura automática de sus módulos para maniobras de limpieza, no así los túneles reconstruidos. Este tipo de diferencias no afectan la eficiencia del proceso de congelación del túnel, pero sí modifican el modo de operarlo: el túnel nuevo no necesita un operador, el reconstruido sí.

Los túneles nuevos son de secciones modulares, a los cuales bastará agregar módulos para encontrar la longitud deseada, no así con los túneles antiguos, los cuales estaban fabricados en secciones mayores de una sola medida, para lo cual si se buscaba uno de mayor longitud había que reemplazarlo casi completamente.

## 6.2. ASPECTOS ECONOMICOS

Dentro del análisis de costos de cada uno de los túneles, el reconstruido (RP4-4832-6C) y el nuevo (RS-5036-PL) es necesario diferenciar los costos fijos y los costos variables. Los costos fijos serán aquellos que independientemente del túnel a escoger será necesario efectuar. El costo variable se referirá al costo de las partes en uno y otro de los túneles.

Los costos fijos se desprenden de la siguiente manera:

Instalación:	RP4-4832-6C	RS-5036-PL
-Tubería de cobre de 1" aislada con espuma de poliuretano de 4" de espesor de pared	\$300,000/m	\$300,000/m
-Tren de válvulas, incluye válvula motorizada, válvula de control manual, 2 válvulas de alivio y dos manómetros (incluye mano de obra.	\$3'710,620.	\$3'710,620.
-Instalación eléctrica con interruptor tipo breaker trifásico de 50 A, 220 VCA, cable #10, conduit pared gruesa, lo más cercano entre túnel y tablero.	\$100,000/m	\$100,000/m
-Extractor tipo turboventilador con motor de 1 H.P., 3450 RPM trifásico, con 6 metros de ducto	\$2'134,000	\$2'134,000

de 6" de diámetro en PVC.

-Costo por flete en transporte  
no especializado tipo plataforma,  
de:

Allentown, PA. a N.Laredo, Tamps.	\$9'000,000	\$9'000,000
N.Laredo, Tamps. a México D.F.	\$4'500,000	\$4'500,000

NOTA: El costo se refiere a carga por volumen, no por peso, lo cual no afecta la capacidad de arrastre.

El costo de los túneles nuevo y reconstruido presentan variaciones considerables de precio:

-Túnel RP4-4832-6C sin reconstruir. Incluye costo inicial, impuesto

de importación, impuesto advalorem e I.V.A. calculado al tipo de

cambio controlado de \$3000. pesos por dólar.....\$90'000,000

-Túnel R5-5036-PL. Incluyendo costo inicial, impuesto de importación

impuesto advalorem e I.V.A., calculado al tipo de cambio de \$3000. pesos por

dólar.....\$585'000,000

Dentro de los costos variables, se aplicarán al túnel RP4-4832-6C en virtud de que fueron equipos que se le instalaron al equipo para su reconstrucción. No así para el

túnel R5-5036-PL, en donde la instrumentación viene incluida en el precio.

Reconstrucción del túnel:

	hombre/ hora	costo/ hora	subtotal mano de o.	mater.
<b>-ESTRUCTURA</b>				
enderizado y nivelado	4*8	\$16000	\$512000	
desengrasado y limpieza	4*8	16000	512000	\$200000
recubrimiento	2*8	16000	256000	400000
ensamble	4*2	16000	128000	20000
<b>-BANDA</b>				
limpieza y rehabilitado	2*4	16000	128000	40000
ajuste y rehabilitado de guías laterales e inf.	4*8	16000	512000	100000
acondicionamiento de flechas y cojinetes	2*8	16000	256000	120000
pre-ensamblado	2*8	16000	256000	
<b>-TRANSMISION Y VARIADOR DE VELOCIDAD</b>				
reacondicionamiento de flecha de acoplamiento	2*4	16000	128000	
reacondicionamiento de cadenas y catarinas	1*2	16000	32000	30000
variador de velocidad	1*4	16000	64000	50000

reparación del motor	1*1	16000	16000	40000
ensamble a estructura	1*1	16000	16000	
<b>-CONTROL DE TEMPERATURA</b>				
sensores de temperatura	4*1	50000	200000	160000
controlador de temp.	2*1	50000	100000	1'400000
<b>-SISTEMA DE ATOMIZADO</b>				
arreglo de múltiple de boquillas	2*16	16000	512000	364000
boquillas (limpieza)	1*2	16000	32000	
conexión a la línea de alimentación	2*3	16000	96000	120000
<b>-SISTEMA DE TURBULENCIA</b>				
motores	1*2	16000	32000	160000
ventiladores de A.I.	1*1	16000	16000	720000
deflectores	1*2	16000	32000	
<b>-VENTILADORES DE CIRCULACION PARALELA</b>				
ventiladores(cambio de cojinetes)	2*2	16000	64000	120000
motores	1*1	16000	16000	110000
<b>-INSTALACION ELECTRICA</b>				
tablero de control e interconexiones	32*1	50000	1'600000	564500

-JUNTAS CRIOGENICAS	1*16	16000	256000	1'530000
---------------------	------	-------	--------	----------

**-MODULOS**

enderizado	2*8	16000	256000	
limpieza	4*40	16000	2'560000	10000
soldadura	(no se presentaron daños que requirieran soldadura)			

-----  
 Total            8'588000    6'330500

Total (Mano de Obra)+(Materiales) = 14'918500

NOTA: El costo por hora de mecánico o soldador se entiende por oficial calificado con herramienta a razón de \$16000/hora

El costo por hora de instrumentista se entiende por un ingeniero con herramienta y dispositivos de calibración a razón de \$50000/hora

El costo de supervisión es igual a cero en virtud de que el personal contratado por hora lo es por trabajos efectivamente ejecutados, por lo cual el sobreestante no cobra.

Es necesario hacer énfasis de que los costos de reconstrucción presentados en este túnel están en función al estado en que se encontraba este túnel en particular. De tal manera no deberá esperarse que las reparaciones en todos los túneles tendrán este costo. Este costo estará entonces en función del estado real del túnel.

Si se quiere hacer funcionar a un túnel reconstruido en forma similar a uno nuevo, esto es en operación completamente automática habrá que fabricar un equipo de control automático, llevando por lo menos los siguientes dispositivos:

1. Controlador de temperatura tipo arranque-paro y de acción proporcional para seguridad de la operación en ausencia de personal que alimente de producto al túnel con termopar tipo T a la entrada.

Costo.....\$1'400000

2. Controlador de temperatura digital programable, de acción proporcional acoplado a válvula motorizada con doble display.

Costo.....\$2'500000

3. Controlador de temperatura programable, acción proporcional digital acoplado a controlador de velocidad para controlar nube a la descarga.

Costo.....\$1'400000

4. Indicador digital de velocidad de extractor.

Costo.....\$600000

5. Indicador digital para velocidad del ventilador con motor de C.A.

Costo.....\$600000

6. Potenciómetro y estación de botón para selección de operación manual durante el arranque.

Costo.....\$400000

7. Potenciómetro y estación de botón para selección de operación automática del túnel a temperatura de estabilización.

Costo.....\$400000

8. Potenciómetro conectado a motor de C.D. para variación de velocidad de banda.

Costo.....\$400000

9. Estación de alarmas conectadas a permisivos de seguridad del túnel.

Costo.....\$180000

10. Estación de alarmas conectadas a permisivos de seguridad del túnel.

Costo.....\$180000

11. Estación de botón de contacto sostenido con iluminación para arranque de extractor en modo automático.

Costo.....\$250000

12. Estación de botón de contacto sostenido con iluminación para arranque automático de control de alimentación de LIN.

Costo.....\$250000

13. Estación de botón de contacto sostenido con iluminación para arranque automático de control de nube a la descarga.

Costo.....\$250000

14. Enchufe para conexiones adicionales.

Costo.....\$60000

15. Estación de botón de contacto sostenido iluminado para energizado del tablero.

Costo.....\$200000

16. Luz de indicación de módulos de túnel cerrado conectado a permisivo de seguridad.

Costo.....\$150000

17. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a arranque de banda.

Costo.....\$250000

18. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a ventilador A.

Costo.....\$250000

19. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a ventilador B.

Costo.....\$250000

20. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a ventilador C.

Costo.....\$250000

21. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a ventilador de control de nube.

Costo.....\$250000

22. Estación de botón de contacto sostenido arranque-para con luz indicadora conectada a extractor.

Costo.....\$250000

23. Luz indicadora de sistema de seguridad en operación.

Costo.....\$150000

24. Estación de botón contacto sostenido arranque-para para inyección de LIN en forma manual e indicación de inyección de LIN en modo automático.

Costo.....\$250000

25. Gabinete de A.I. # 16, doble puerta, puerta inferior con ventana de acrílico con medidas de 150x120x60cm.

Costo.....\$5'000000

26. Interruptor de seguridad con chapa, 220 Volts, 3 hilos, C.A. acoplado a interruptor general.

Costo.....\$350000

27. Controlador de velocidad para motor de C.A. de 1 H.P. gobernado por controlador de temperatura (3).

Costo.....\$2'400000

28. Controlador de velocidad para motor de C.A. de 1 H.P. para controlar la velocidad del extractor acoplado a controlador de temperatura programable.

Costo.....\$2'400000

Se deberá considerar también que un instrumentista que cobra \$50000./hora tarda 2 semanas, durante 8 horas diarias más 1 ayudante que cobra a razón de \$30000 la hora nos da un total de....\$6'400000 a lo cual hay que sumar el costo de cables y conectores, y procurando mantener los mismos contactores y elementos térmicos del anterior tablero. Así, si sumamos mano de obra y componentes tendremos un costo adicional de \$27'670000. pesos. Faltaría sólo hacer una cotización del sistema hidráulico para el levantamiento automático de las cubiertas, pero siendo que este sistema puede ser tan variable, se optó por omitirlo. Aún así nos damos cuenta de que a este túnel en particular los costos

variables sumados representan un muy pequeño porcentaje del costo de un túnel de nueva adquisición.

### 6.3. OBSTACULOS Y MEJORAS EN EL REACONDICIONAMIENTO DEL TUNEL

Dentro de los obstáculos a la reconstrucción del túnel podemos mencionar:

-La escala de mercado es inferior a la necesaria para la fabricación de componentes o reconstrucción en serie de equipos de congelación criogénica.

-Escasez de mano de obra calificada en mantenimiento de instrumentación digital, y proceso de soldadura en acero inoxidable.

-Reducido número de marcas de instrumentos y componentes para uso criogénico, las cuales deben de ser de importación.

-Información técnica especializada en criogenia en idioma español.

Dentro de las mejoras al diseño original, estas se encaminaron a la actualización de componentes y selección de mejores controladores, de tal manera podemos mencionar:

-Sustitución de instrumentos de medición y control analógicos por digitales.

-Cambio de válvula de control neumática la cual era costosa y de mantenimiento complejo por una válvula motorizada que es de bajo precio y de mantenimiento poco frecuente pero con la misma velocidad de control proporcional.

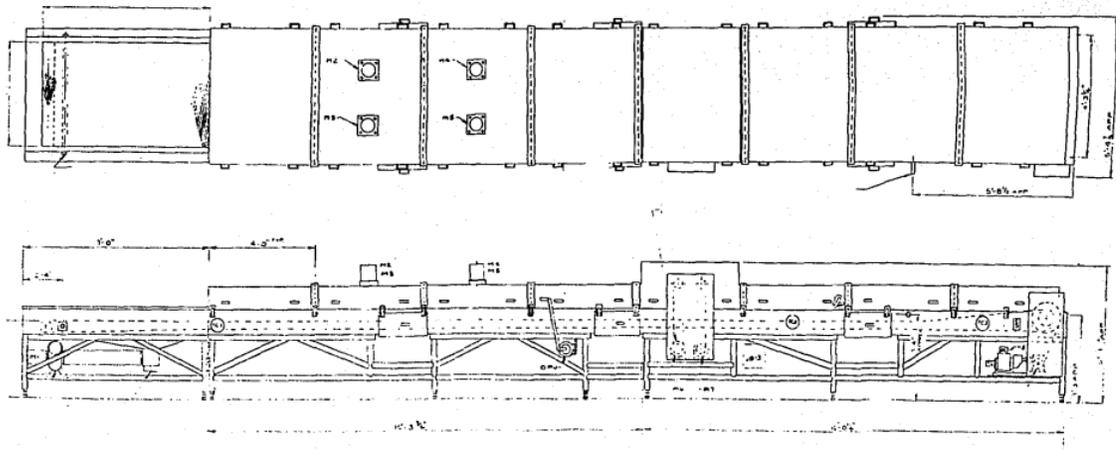
-Cambio de posición del extractor a partir del diseño original bajo el túnel a fin de mejorar las condiciones higiénicas.

-Diseño más compacto de los ventiladores de recirculación.

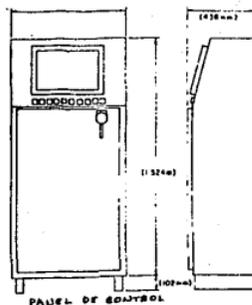
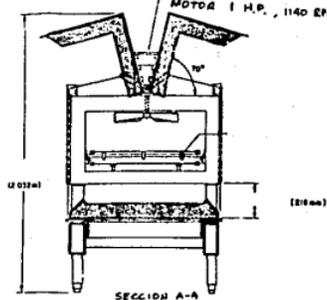
-Nivelación inclinada del túnel para una mejor vaporización del nitrógeno líquido excedente de la atomización así como unas guías longitudinales más largas para un mejor control del líquido remanente.

De tal manera los cambios más significativos en 25 años son los sistemas de agitación así como la instrumentación para el control automático de nubes y temperaturas. Existía el problema de que se enfriaba la zona de carga al iniciar el proceso lo cual congelaba el extractor e impedía su funcionamiento. Se le colocó un control de velocidad al extractor para lograr mantener una temperatura estable. Si no se lograba controlar la nube se optaba por cerrar la alimentación del nitrógeno. No ha habido cambios de espesor de aislamiento, o en el tipo de boquillas.

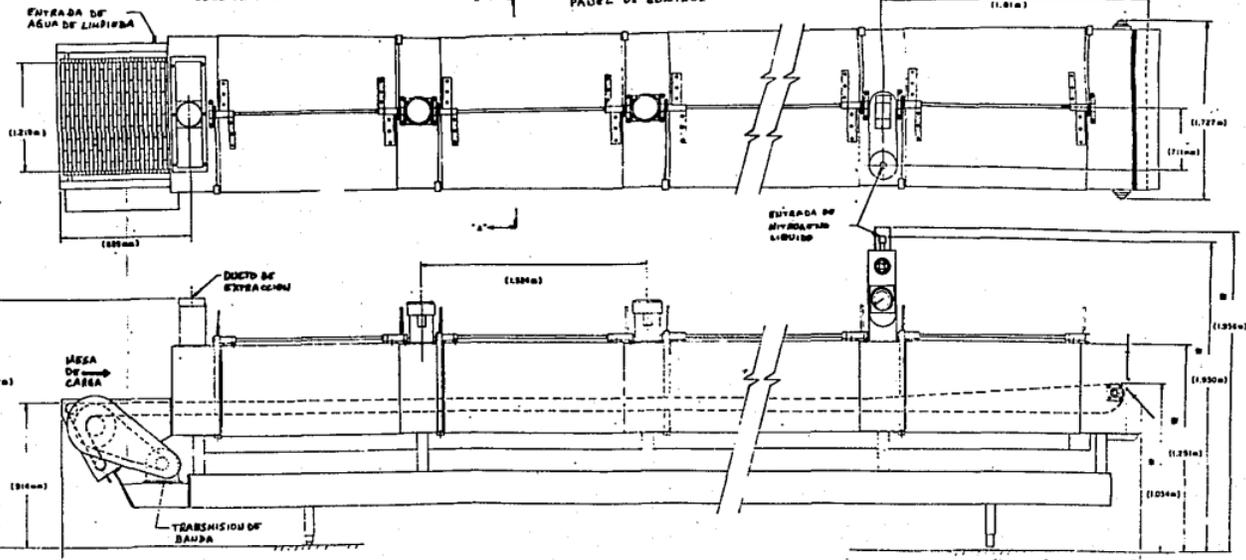
TUNEL RP4-4632-6C



VENTILADOR DE RECIRCULACION  
MOTOR 1 H.P., 1140 RPM



MODELO	LONGITUD	VOLTS	DUCTO EX	SCFM
R4-5031-PL	34'-0" (10.36 m)	230	7" DIA.	10 SCFM
R5-5036-FL	39'-0" (11.89 m)	230	7" DIA.	10 SCFM
R6-5041-PL	44'-0" (13.41 m)	460	7" DIA.	10 SCFM
R7-5046-PL	49'-0" (14.93 m)	460	8" DIA.	15 SCFM
R8-5051-PL	54'-0" (16.46 m)	460	8" DIA.	15 SCFM
R9-5056-PL	59'-0" (17.98 m)	460	8" DIA.	15 SCFM
R10-5061-PL	64'-0" (19.51 m)	460	8" DIA.	15 SCFM
R11-5066-PL	69'-0" (21.03 m)	460	8" DIA.	20 SCFM



### CONCLUSIONES

La reconstrucción de un túnel de congelación no sólo tiene la misma capacidad de producción de un túnel nuevo. El túnel reconstruido podrá presentar la inconveniencia de tener a un operador cuidando el funcionamiento del mismo. El costo que representa mantener al operador en esa labor durante un año (\$30000.diarios) no pesa tanto en relación al costo de automatizar completamente el túnel. Entonces vemos que la opción de reconstruir un túnel y operarlo semi-automático o automáticamente es una gran ventaja económica sobre un túnel nuevo. De tal manera la congelación criogénica ha probado ser más que eficiente y de calidad en la congelación de alimentos.

Si bien el túnel reconstruido tuvo ciertas modificaciones, éstas fueron en función de lograr una mejora en la eficiencia. No debemos pensar que la reconstrucción de un túnel de congelación tendrá exactamente los mismos costos que el que aquí se presenta. Siempre habrá que considerar el estado en que nos es entregado el túnel a fin de poder tener una reconstrucción factible. Esto es, no trabajar sobre un túnel que tenga un costo muy alto por estar severamente deteriorado. Las partes eléctricas son las que por lo general sufren mayor deterioro por el tiempo y el abandono razón por la cual se deberá de tratar de obtener equipos con estos componentes en el mejor estado posible. Si bien la

reconstrucción de túneles puede ser un poco tediosa, su puesta en marcha representa mucha satisfacción por el trabajo realizado. No debemos decir que los túneles nuevos son equipos demasiado costosos, es necesario ver que la gran parte del costo de los túneles es el "mueble" en si, y que en los túneles reconstruidos este costo está más que amortizado.

Es necesario saber que en la tarea de reconstrucción no sólo se presenta la solución de cambiar pieza nueva por pieza vieja, sino que muchas veces fué necesario hacer adaptaciones de acuerdo a lo que se tiene en el mercado nacional. El desarrollo de los ventiladores de recirculación pasó por ventiladores que se deshacían al contacto con las temperaturas manejadas. Hubo que modificar su diseño a fin de que no provocarán verdaderos torbellinos frente a ellos sin tener una recirculación adecuada, por lo tanto hubo que hacer pequeñas "adaptaciones". El poner en marcha transmisiones y variadores de velocidad que se encontraban pegados hacía suponer paros en las reparaciones y optar por equipos de nueva adquisición, sin embargo después de un desmantelamiento completo y de su limpieza se pudieron poner en operación estos componentes. El buscar las conexiones que correspondían a cada controlador exigía el reacomodo de cada una de las líneas. El reacondicionamiento de un túnel es una labor pesada, la cual obligará a disertar entre optar por una reposición de pieza o bien por una reparación buscando que trabajen sin contratiempos mayores.

Cabe entonces concluir que la reconstrucción de túneles de congelación es económica y factible. Sin embargo por la magnitud de las inversiones es necesario que la decisión de instalar túneles de congelación en México se vea apoyada por un serio estudio técnico-económico de proyecto que sustente la rentabilidad para el cliente del uso de esta tecnología de congelación criogénica.

Como se ha podido observar a lo largo de este trabajo, nos podemos dar cuenta de que la Ingeniería Criogénica es todavía un campo joven, el cual tendrá mucho que aportarnos en muchos campos de desarrollo.

Sin embargo no debemos pensar que la criogenia será nuestra solución a problemas que se presenten en el siglo ya venidero.

Los muchos adelantos logrados al trabajar a muy bajas temperaturas nos dejan entrever que falta aún mucho por desarrollar y que este desarrollo sólo se logrará optimizar después de una gran cantidad de estudios e investigaciones.

El utilizar combustibles líquidos mantenidos a muy baja temperatura nos dan una buena solución de espacio para futuros viajes al espacio.

Tampoco debemos olvidar a los superconductores, que si bien aún están en fase experimental, tendrán en un futuro a mediano plazo una aplicación importantísimas tanto en comunicaciones como en transporte. Y estas mismas características de conductividad lograrán hacer motores eléctricos mucho más eficientes.

En el campo de la congelación de alimentos nos damos cuenta que el alimento por medio de este tipo de congelación pierde la menor cantidad de propiedades y de nutrientes. Si bien es un proceso relativamente caro por el costo del nitrógeno líquido, este se logrará pagar sólo en función de la calidad del producto obtenido.

El desarrollo de los productos congelados no es nuevo, sin embargo, la infraestructura necesaria para la congelación, transporte y presentación al público es algo nuevo en México. Vemos que en países desarrollados, esta industria es de las más fuertes y que dan una imagen de desarrollo en cada uno de los países donde se presenta. De tal manera, es que ahora en México se ha presentado un crecimiento en esta industria en tal magnitud que nos asombramos de la cantidad de equipos de refrigeración que se colocan actualmente en las tiendas de autoservicio así como de los productos contenidos en su interior. No es sólo un crecimiento de la importación de productos de este tipo sino que ha logrado activar a la industria nacional en la preparación de este tipo de platillos.

## BIBLIOGRAFIA

-ARREDONDO, Luis Urbano

Manual de Capacitación para Obreros de la Construcción

1a. edición

Edit. Limusa

México

1979

93 pag.

-BARRON, Randall F.

Cryogenic Systems

1st. edition

Edit. Oxford Science Publications

E.U.

1985

383 pag.

-CGA Publications

Compressed Gas Association Inc.

1984, E.U.

SB-2 OXYGEN DEFICIENT ATMOSPHERES

G-10.1 COMMODITY SPECIFICATION FOR NITROGEN

V-6 STANDARD CRYOGENIC LIQUID TRANSFER CONNECTIONS

P-12 SAFE HANDLING OF CRYOGENIC LIQUIDS

CGA-341 TENTATIVE STANDARD INSULATED TANK TRUCK  
SPECIFICATION CGA-341 FOR COLD LIQUIFIED GASES  
HB-2 HANDBOOK OF COMPRESSED GASES, 2nd EDITION

-CHURCH, Austin H.

Cinemática de las Máquinas

1a. edición

Compañía Editorial Continental S.A.

México

1977

325 pag.

-CREUS, Antonio

Instrumentación Industrial

2a. edición

Edit. Publicaciones Marcombo S.A.

México

1981

256 pag.

-Curso de Control de la Corrosión

Amercoat Mexicana

1a. edición

México

1985

-HALL, Allen S.

Diseño de Máquinas

2a. reimpresión

Mc. Graw Hill

México

1971

-HAMMOND, Rolt

Soldadura Automática

2a. edición

Edit. URMO S.A. de Ediciones

España

1976

288 pag.

-JENSEN, C.H.

Dibujo y Diseño de Ingeniería

Edit. Mc Graw Hill

México, 1985

-National Electric Code

National Fire Protection Association

5th. edition

Quincy, Maryland, E.U.

1984

206 pag.

-PERRY, Robert H.

Process Chemical Engineers' Handbook  
6a. edición

Edit. Mc Graw Hill

1984

788 pag.

-POTTER, Norman N.

La Ciencia de los Alimentos

3a. reimpresión

Edit. Harla

México

1978

478 pag.

-Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas

1a. edición

Ediciones Andrade S.A.

México

1957

141 pag.

**-SCOTT, Russell B.**

**Cryogenic Engineering**

**1st. edition**

**D. Van Nostrand Company, Inc.**

**U.S.A.**

**1988**

**271 pag.**

**-SHIGLEY, Joseph E.**

**Diseño en Ingeniería Mecánica**

**3a. edición**

**Edit. Mc. Graw Hill**

**México**

**1983**

**695 pag.**

**-Simon and Schuster's International Dictionary**

**3rd. edition**

**Simon and Schuster**

**E.U.**

**1973**

**-Stainless Steel and the Chemical Industry**

Climax Molybdenum Company

1st. edition

Edit. Stoessel Graphics

E.U.

1966

123 pag.

**-STOECKER, W.F.**

Refrigeración y Acondicionamiento de Aire

2a. reimpression

Edit. Mc. Graw Hill

México

1978

**-Webster's New Collegiate Dictionary**

2nd. edition

G & C. Merrion Company

E. U.

1981

520 pag.

PROPIEDADES DE LIQUIDO SATURADO

Temp. (K)	$p_{sat}$ (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
2.2	5.47	147	3.98	2.89	17.7	22.8	0.650	0.294
2.4	8.53	146	2.38	3.50	18.5	23.1	0.450	0.274
2.6	12.53	144	2.27	3.73	19.5	23.3	0.434	0.254
2.8	17.87	143	2.34	3.78	20.5	23.5	0.431	0.235
3.0	24.42	141.1	2.49	3.76	21.4	23.66	0.437	0.215
3.2	32.42	139.2	2.69	3.74	22.4	23.63	0.449	0.195
3.4	42.15	136.9	2.97	3.70	23.3	23.46	0.472	0.175
3.6	53.60	134.4	3.26	3.67	24.3	23.16	0.492	0.155
3.8	66.98	131.6	3.60	3.63	25.2	22.66	0.519	0.135
4.0	82.48	128.6	3.99	3.60	26.2	21.91	0.548	0.115
4.214	101.3	124.8	4.48	3.563	27.2	20.90	0.587	0.093
4.4	120.6	121.5	5.11	3.533	28.0	19.69	0.644	0.074
4.6	143.6	117.0	5.94	3.501	28.9	17.99	0.721	0.053
4.8	169.4	110.7	7.53	3.472	29.8	15.61	0.877	0.032
5.0	198.5	100.6	11.5	3.443	30.9	12.02	1.281	0.0115

TABLA A.1 HELIO LIQUIDO

Temp. (K)	$p_{sat}$ (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-k)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
14	7.88	76.86	6.98	23.3	103.8	457	1.567	2.958
16	21.58	75.11	7.60	19.7	108.5	454	1.380	2.627
18	48.23	73.20	8.36	16.1	113.2	450	1.189	2.299
20.27	101.2	70.79	9.68	13.2	118.5	443	1.078	1.930
22	163.4	68.72	10.66	11.87	122.5	432.2	1.033	1.651
24	264.6	66.01	11.88	10.82	127.2	420	1.011	1.334
26	403.5	62.83	13.37	10.12	131.8	396	1.027	1.020
28	587.1	58.97	16.03	9.54	136.5	360	1.120	0.711
30	822.6	53.93	20.40	9.08	141.2	298	1.312	0.414

TABLA A.2 HIDROGENO LIQUIDO

Temp. (K)	$\rho_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
25	51.1	1240	1.78	163	118	89.7	2.45	5.55
27.09	101.3	1206	1.83	130	113	85.9	2.11	4.82
28	132.2	1188	1.85	118	110	84.2	1.98	4.51
30	223.8	1151	1.91	97.4	103	80.8	1.81	4.16
32	355.3	1111	1.99	82.8	93.6	77.2	1.76	3.60
34	535.2	1066	2.07	71.7	82.5	73.1	1.80	3.05
36	772.8	1020	2.19	61.4	71.8	68.0	1.87	2.49
38	1078.2	963	2.35	52.3	63.3	61.4	1.94	1.94
40	1452.5	897	2.58	44.6	55.9	53.0	2.06	1.38
42	1938.6	810	2.92	36.4	...	41.1	...	0.82

TABLA A.3 NEON LIQUIDO

Temp. (K)	$\rho_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
65	17.4	860.9	2.008	278	158.7	214.0	3.52	11.66
70	38.5	840.0	2.024	220	149.9	208.3	2.97	10.48
75	76.0	818.1	2.042	173	143.0	202.3	2.47	9.30
77.36	101.3	807.3	2.051	158	139.6	199.3	2.32	8.75
80	136.7	795.1	2.063	141	136.2	195.8	2.14	8.22
85	228.4	771.0	2.088	119	129.3	188.7	1.922	7.18
90	359.8	745.6	2.122	104	122.4	180.9	1.803	6.12
95	539.8	718.6	2.170	93	115.5	172.0	1.747	5.08
100	777.8	689.6	2.240	85	108.5	161.6	1.755	4.04
105	1083.6	657.7	2.350	78	101.1	149.4	1.813	...
110	1467.2	621.7	2.533	73	93.6	135.0	1.976	...
115	1939.4	579.3	2.723	68	84.7	117.3	2.19	...
120	2512.9	524.9	2.920	65	74.6	94.3	2.54	...
125	3204.4	436.8	3.124	62	61.5	54.9	3.14	...

TABLA A.4 NITROGENO LIQUIDO

Temp. (K)	$\rho_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
60	0.73	1281.7	1.660	580	187.2	238	5.14	21.1
70	6.22	1236.7	1.666	358	176.4	231	3.38	18.4
80	30.09	1190.3	1.680	248	164.5	223	2.53	15.8
90.18	101.3	1141.0	1.695	190	151.4	213	2.13	13.2
100	254.2	1090.7	1.720	152	138.0	203	1.894	10.78
110	543.4	1035.4	1.749	127	124.2	190.3	1.788	8.41
120	1021.6	974.0	1.810	113	110.0	174.4	1.859	6.16
130	1747.8	902.8	1.932	106	95.4	152.8	2.15	4.06
140	2786.5	813.1	2.170	101	80.0	126.4	2.74	...
150	4219.0	675.4	...	95	63.8	79.8	...	...

TABLA A.5 OXIGENO LIQUIDO

Temp. (K)	$\rho_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
60	1.51	1669	1.506	637	181.0	187.0	5.30	20.6
70	12.18	1608	1.493	400	167.5	180.5	3.57	17.8
80	54.77	1542	1.519	282	154.0	171.8	2.78	14.9
85.24	101.3	1506.8	1.536	244	148.0	166.3	2.53	13.5
90	173.6	1470.1	1.552	214	139.6	161.0	2.38	12.1
100	434.7	1392.1	1.595	172.5	124.9	148.6	2.20	9.21
110	919.7	1308.2	1.647	144.4	109.7	134.6	2.17	6.36
120	1716.4	1218.4	1.710	124.4	95.3	117.7	2.23	3.51
130	2909.3	1122.7	1.777	109.7	81.7	95.6	2.39	...

TABLA A.6 FLUOR LIQUIDO

Temp. (K)	$p_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
85	78.9	1407.6	1.126	272	125.6	162.2	2.44	11.31
87.28	101.3	1393.9	1.136	252	123.2	161.9	2.32	11.08
90	133.9	1377.2	1.147	230	120.6	159.8	2.19	10.53
95	213.9	1345.2	1.176	197	115.3	155.4	2.01	9.51
100	325.3	1311.7	1.205	172	110.4	150.7	1.877	8.51
105	474.3	1276.6	1.231	153	104.6	145.5	1.801	7.54
110	667.8	1239.9	1.250	141	98.3	139.8	1.793	6.58
115	912.5	1201.0	1.283	127	92.3	133.4	1.765	5.65
120	1215.6	1159.6	1.341	116	85.7	126.4	1.793	4.75
125	1584.4	1114.8	1.440	102	79.4	118.5	1.850	3.87
130	2027.1	1065.4	1.603	90	73.0	109.3	1.976	3.03
135	2552.6	1009.2	1.93	79	66.8	98.4	2.28	...
140	3171.2	942.2	...	68	...	84.7	...	...
145	3895.1	853.4	...	57	...	65.9	...	...

TABLA A.7 ARGON LIQUIDO

Temp. (K)	$p_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
95	17.67	448.3	3.315	175	209.5	537.7	2.78	17.6
100	34.5	440.4	3.394	153	205.5	530.6	2.53	16.5
105	56.6	432.5	3.423	136	200.5	522.8	2.32	15.4
111.7	101.3	424.1	3.451	118	193.1	511.5	2.11	14.1
115	132.5	419.4	3.454	111	187.8	505.1	2.04	13.2
120	191.9	412.1	3.457	101.3	180.0	495.1	1.946	12.2
125	269.3	404.7	3.514	93.2	172.0	484.2	1.904	11.1
130	368.0	396.7	3.601	86.2	164.0	472.4	1.893	10.1
135	491.3	388.4	3.673	80.2	156.2	459.5	1.886	9.09
140	642.2	379.6	3.734	75.1	148.2	445.3	1.892	8.10
150	1041.4	361.1	3.860	66.6	132.3	412.1	1.943	6.20
160	1594.0	339.7	4.146	60.0	116.6	370.9	2.13	4.39
170	2331.0	314.1	4.609	54.7	100.8	318.4	2.50	2.71
180	3288.2	280.0	5.551	50.3	85.1	245.2	3.28	1.21

TABLA A.8 METANO LIQUIDO

Temp. (K)	$p_{sat}$ (kPa)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$N_{Pr}$	$\sigma_L$ (mN/m)
75	63.7	890	1.92	195.6	146.1	209.4	2.57	11.59
78.8	101.3	874	1.96	167.5	141.0	205.2	2.33	10.37
80	114.5	869	1.97	159.6	139.4	203.7	2.26	10.06
85	192.1	846	2.02	136.0	132.6	198.0	2.07	8.78
90	305	822	2.07	118.5	125.7	192.3	1.95	7.67
95	460	795	2.13	105.9	118.8	185.8	1.90	6.59
100	666	766	2.21	96.1	111.8	178.0	1.90	5.52
105	931	733	2.31	88.4	104.5	167.7	1.95	...
110	1263	696	2.44	82.2	96.9	154.5	2.07	...
115	1668	655	2.58	77.3	88.3	138.5	2.26	...
120	2153	607	2.77	73.4	78.6	119.6	2.59	...
125	2723	535	3.10	70.2	66.1	96.0	3.29	...

TABLA A.9 AIRE LIQUIDO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_p$
4.21	16.71	7.068	1.241	9.7	0.904
5	12.07	6.322	1.396	10.7	0.825
10	5.05	5.430	2.147	16.2	0.718
20	2.45	5.254	3.369	25.9	0.684
30	1.625	5.225	4.370	33.8	0.676
40	1.218	5.206	5.275	40.9	0.672
50	0.974	5.200	6.093	47.4	0.669
75	0.641	5.200	7.884	62.4	0.657
100	0.487	5.200	9.470	73.3	0.672
125	0.390	5.200	10.97	84.4	0.676
150	0.325	5.200	12.37	95.1	0.676
175	0.278	5.200	13.69	105.5	0.675
200	0.244	5.200	14.96	115.4	0.674
225	0.217	5.200	16.19	124.9	0.674
250	0.195	5.200	17.40	133.9	0.675
275	0.1773	5.200	18.63	142.5	0.680
300	0.1625	5.200	19.87	150.7	0.686

TABLA B.1 HELIO GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_p$	$\Delta H_c$ (kJ/kg)
20.39	1.331	10.844	1.112	15.77	0.765	703.3
30	0.847	10.700	1.606	22.89	0.751	703.3
40	0.624	10.580	2.067	29.79	0.734	703.3
50	0.485	10.496	2.489	36.19	0.722	702.9
75	0.328	10.668	3.408	51.57	0.705	690.9
100	0.246	11.233	4.212	68.02	0.696	642.6
125	0.1965	11.949	4.943	83.30	0.709	546.7
150	0.1637	12.602	5.603	98.53	0.717	430.3
175	0.1403	13.133	6.219	113.6	0.719	324.4
200	0.1227	13.544	6.809	128.3	0.719	218.5
225	0.1091	13.836	7.379	142.3	0.718	145.7
250	0.0982	14.059	7.925	155.3	0.718	94.1
275	0.0893	14.206	8.453	166.7	0.720	58.1
300	0.0818	14.319	8.959	176.9	0.725	36.8

TABLA B.2 HIDROGENO GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_{Pr}$
27.09	9.367	1.151	4.77	9.86	0.557
40	6.245	1.097	6.63	12.3	0.591
50	4.969	1.063	8.18	14.1	0.617
75	3.301	1.030	11.40	18.2	0.645
100	2.473	1.030	14.35	22.2	0.666
125	1.975	1.030	16.96	26.1	0.669
150	1.644	1.030	19.34	29.8	0.668
175	1.407	1.030	21.60	33.4	0.666
200	1.230	1.030	23.76	36.9	0.663
225	1.092	1.030	25.85	40.2	0.663
250	0.983	1.030	27.88	43.3	0.663
275	0.894	1.030	29.82	46.3	0.663
300	0.820	1.030	31.73	49.2	0.663

TABLA B.3 NEON GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_{Pr}$
77.36	4.604	1.084	5.41	7.23	0.811
100	3.484	1.067	6.98	9.33	0.797
125	2.760	1.055	8.57	11.64	0.776
150	2.289	1.047	10.08	13.77	0.767
175	1.958	1.044	11.54	15.85	0.759
200	1.711	1.043	12.95	18.02	0.750
225	1.519	1.043	14.29	20.05	0.743
250	1.367	1.042	15.55	22.10	0.733
275	1.242	1.042	16.73	24.04	0.725
300	1.142	1.042	17.86	25.79	0.722

TABLA B.4 NITROGENO GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_{Pr}$
90.18	4.470	0.927	6.93	8.10	0.793
100	3.995	0.927	7.68	9.04	0.787
125	3.164	0.925	9.58	11.42	0.777
150	2.623	0.919	11.32	13.76	0.756
175	2.242	0.917	13.06	16.06	0.745
200	1.956	0.915	14.76	18.31	0.737
225	1.737	0.915	16.35	20.47	0.731
250	1.562	0.916	17.86	22.57	0.725
275	1.419	0.918	19.30	24.59	0.720
300	1.301	0.921	20.71	26.58	0.717

TABLA B.5 OXIGENO GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_{Pr}$
85.24	5.631	0.811	7.25	7.18	0.819
100	4.722	0.791	8.50	8.62	0.780
125	3.741	0.779	10.6	11.0	0.751
150	3.105	0.776	12.6	13.4	0.730
175	2.656	0.778	14.7	15.8	0.724
200	2.321	0.785	16.8	18.3	0.720
225	2.061	0.793	18.8	20.6	0.724
250	1.854	0.803	20.8	22.8	0.733
275	1.685	0.815	22.5	24.9	0.737

TABLA B.6 FLUOR GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_p$
87.28	5.767	0.546	7.43	5.48	0.740
100	4.980	0.541	8.39	6.41	0.708
125	3.942	0.532	10.31	8.09	0.678
150	3.246	0.528	12.22	9.58	0.673
175	2.794	0.525	14.10	11.04	0.671
200	2.441	0.524	15.94	12.47	0.670
225	2.168	0.523	17.74	13.84	0.670
250	1.950	0.522	19.47	15.15	0.670
275	1.772	0.522	21.13	16.45	0.670
300	1.624	0.522	22.70	17.67	0.670

TABLA B.7 ARGON GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa-s)	$k$ (mW/m-K)	$N_p$
111.7	1.792	2.172	4.47	11.88	0.817
125	1.582	2.139	4.97	13.39	0.794
150	1.305	2.111	5.91	16.16	0.773
175	1.113	2.102	6.85	18.97	0.759
200	0.971	2.105	7.78	21.83	0.750
225	0.861	2.119	8.68	24.78	0.742
250	0.774	2.145	9.53	27.81	0.735
275	0.703	2.184	10.36	30.95	0.731
300	0.644	2.235	11.16	34.26	0.728

TABLA B.8 METANO GASEOSO

Temp. (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu$ ( $\mu$ Pa·s)	$k$ (mW/m·K)	$N_{Pr}$
81.8	4.485	1.0584	5.57	7.62	0.773
100	3.601	1.0266	6.92	9.25	0.769
125	2.861	1.0144	8.64	11.49	0.763
150	2.368	1.0099	10.28	13.74	0.756
175	2.025	1.0074	11.81	15.91	0.748
200	1.768	1.0061	13.29	18.09	0.739
225	1.571	1.0056	14.65	20.18	0.730
250	1.413	1.0053	15.99	22.27	0.722
275	1.284	1.0054	17.23	24.26	0.714

TABLA B.9 AIRE GASEOSO

REQUISITOS DE ALMACENAMIENTO Y PROPIEDADES DE ALIMENTOS PERECEDEROS<sup>1</sup>

Producto	Tem. de almacenamiento, °F	Humedad relativa %	Vida aproximada de almacenamiento	Contenido de agua, %	Punto de congelación, °F promedio	Calor específico arriba de congelación	Calor específico abajo de congelación	Calor latente (calculado) 4 Btu	Calor de respiración Btu/ton/24 Hrs.
Alfalfa molido	30-40	70-75	...	...	...	...	...	...	
Manzanas	30-32	85-90	...	84.1	28.2	0.87	0.45	121	1,500-12,380(70)
Chabacanos	31-32	85-90	1-2 sem.	85.4	29.6	0.88	0.46	122	
Alcachofas tipo globo	31-32	90-95	1-2 sem.	83.7	29.6	0.87	0.45	120	
tipo Jerusalén	31-32	90-95	2-5 meses	79.5	27.5	0.83	0.44	114	
Espárragos	32	90-95	3-4 sem.	93.0	30.4	0.94	0.48	134	
Aguacates	45-55	85-90	4 sem.	65.4	30.0	0.72	0.40	94	
Plátanos	...	85-95	...	74.8	29.6	0.80	0.42	108	
Ejotes	45	85-90	8-10 días	88.9	30.2	0.91	0.47	128	6,160-52,950(70)
Habas limas	32-40	85-90	10-15 días	66.5	30.8	0.73	0.40	94	2,330-29,220(70)
Cerveza de barril	35-40	...	3-6 sem.	90.2	28.0	0.92	...	...	
Betabeles									
paquetes	32	90-95	10-11 días	...	...	...	...	...	
sin hojas	32	90-95	1-3 meses	87.6	29.2	0.90	0.46	126	2,650-7,240
Zarzamoras	31-32	85-90	7 días	84.8	29.4	0.88	0.46	122	
Murtones	31-32	85-90	3-6 sem.	82.3	28.6	0.86	0.45	118	
Pan	0	...	Varias sem.	72-37	...	0.70	0.34	45-53	
Brócoli	32	90-95	7-10 días	89.9	30.3	0.92	0.47	130	7,450-100,000
Coles de Bruselas	32	90-95	3-4 sem.	84.9	30.2	0.88	0.46	122	
Col	32	90-95	3-4 meses	92.4	30.5	0.94	0.47	132	1,200-6,120(70)
Dulces	0-34	40-65	...	...	...	...	...	...	
Zanahorias									
manojos	32	90-95	10-14 días	...	...	...	...	...	
manojos	32	80-90	3-4 sem.	...	...	...	...	...	
sin hojas	32	90-95	4-5 meses	88.2	28.8	0.90	0.46	126	2,130-8,080
Coliflor	32	85-90	2-3 sem.	91.7	30.2	0.93	0.47	132	
Raíz de apio	32	90-95	3-4 meses	88.3	30.2	0.91	0.46	126	
Apio	31-32	90-95	2-4 meses	93.7	30.9	0.95	0.48	135	1,620-14,150(70)
Cerezas	31-32	85-90	10-14 días	83.0	27.7	0.87	0.45	120	1,249-13,200
Café (verde)	35-37	80-85	2-4 meses	10-15	...	...	...	...	
Maíz	31-32	85-90	4-8 días	73.9	30.8	0.79	0.42	106	6,560-61,950(80)

Arándanos	36-40	85-90	1-3 meses	87.4	30.0	0.90	0.46	124	720-1,800(50) 1,690-10,460
Pepinos	45-50	90-95	10-14 días	96.1	30.5	0.97	0.49	137	
Uvas de corinto	32	80-85	10-14 días	84.7	30.2	0.88	0.45	120	
Productos lácteos									
manicquilla	32-36	80-85	2 meses	5.5-16.5	...	0.33	...	23	
manicquilla	-10 -20	80-85	1 año	5.5-16.5	...	...	0.25	23	
queso	35	65-70	...	37-38	28.0	0.50	0.31	54	
crema endulzada	-15	...	Varios meses	...	...	...	...	...	
helado	-15	...	Varios meses	...	22-29	0.80	0.45	96	
leche descremada									
en polvo	40	...	Varios meses	3.5	...	0.23	...	5	
endulzada	35	...	Varios meses	...	...	...	...	...	
no endulzada	-15	...	Tiempo corto	...	...	...	...	...	
Dátiles	...	...	...	20.0	-4.2	0.36	0.26	29	
Bayas	31-32	85-90	7-10 días	...	29.2	...	...	...	
Frutas secas	32	50-60	9-12 meses	...	...	0.30-0.32	...	17-21	
Berenjena	45-50	85-90	10 días	92.7	30.4	0.94	0.48	132	
Huevos									
secos, claras	35	Más baja pos.	6 meses Up to 6.0	...	...	0.25	...	9	
secos, enteros	35	Más baja pos.	6 meses-1 año	5.0	...	0.25	0.21	9	
secos, yemas	35	Más baja pos.	6 meses-1 año	3.0	...	0.22	0.21	4	
claras fermentadas	Rem temp	Más baja pos.	1 año y más	3-15	...	0.22-0.32	...	4-21	
congelados	-10 0	Más baja pos.	1 año y más	73	28.0	0.74	0.42	104	
en cáscara	29 31'	85-90	8-9 meses	67.0	28.0	0.74	0.40	96	
en cáscara (refri.)	40 55	75	...	67.0	28.0	0.74	0.40	96	
Endibia (escarola)	32	90-95	2-3 sem.	93.3	31.1	0.94	0.48	132	
Higos									
secos	32-40	50-60	9-12 meses	24.0	...	0.39	0.27	34	
frescos	28-32	85-90	5-7 días	78.0	27.1	0.82	0.43	112	
Pescado									
en salmuera	40-50	90-95	10-12 meses	...	...	0.76	0.41	100	
fresco	33-40	90-95	5-20 días	62-85	28.0	0.80	0.40	89-122	
congelado	-10 0	90-95	8-10 meses	62-85	...	0.80	0.40	115	
curado	28-35	75-90	4-8 meses	...	...	0.76	0.41	100	
ahumado	40-50	50-60	6-8 meses	...	...	0.70	0.39	92	
Frutas congeladas	-10-0	...	6-12 meses	...	...	...	...	...	
Hortalizas congeladas	-10-0	...	6-12 meses	...	...	...	...	...	
Pielés finas y telas l									
Ajo seco	32	70-75	6-8 meses	74.2	28.0	0.79	0.42	106	
Grosellas	31-32	80-85	3-4 sem.	88.9	30.0	0.90	0.46	126	

Producto	Tem. de almacenamiento, °F	Humedad relativa %	Vida aproximada de almacenamiento	Contenido de agua, %	Punto de congelación, °F promedio	Calor específico arriba de congelación	Calor específico abajo de congelación	Calor latente (calculado) 4 Btu	Calor de respiración Btu/ton/24 Hrs.
Toronja	32-50	85-90	4-8 sem.	88.8	28.6	0.91	0.46	126	950-6,840(90)
Uvas									
tipo americano	31-32	85-90	3-8 sem.	81.9	29.4	0.86	0.44	116	
tipo europeo	30-31	85-90	3-6 meses	81.6	27.1	0.86	0.44	116	
Miel de colmena	...	...	1 año	18.0	...	0.35	0.26	26	
Lúpulo	29-32	50-60	Varios meses	...	...	...	...	...	
Raíz fuerte	32	90-95	10-12 meses	73.4	26.4	0.78	0.42	104	
Bretones	32	90-95	3-4 sem.	86.6	30.7	0.89	0.46	124	
Colinabo	32	90-95	2-4 sem.	90.1	30.0	0.92	0.47	128	
Manteca de cerdo (sin antioxidante)	45	90-95	4-8 meses	0	...	...	...	...	
Manteca de cerdo (sin antioxidante)	0	90-95	12-14 meses	0	...	...	...	...	
Poros, verdes	32	90-95	1-3 meses	88.2	30.4	0.90	0.46	126	
Limones	32,55-58	85-90	1-4 meses	89.3	29.0	0.92	0.46	127	900-5,490(80)
Lechuga	32	90-95	3-4 sem.	94.8	31.2	0.96	0.48	136	11,320-45,980
Limas	48-50	85-90	6-8 sem.	86.0	28.2	0.89	0.46	122	
Zarzamoras Logan	31-32	85-90	7 días	82.9	29.5	0.86	0.45	118	
Jarabe de malta	...	...	...	...	...	...	...	...	
Mangos	50	85-90	2-3 sem.	81.4	29.4	0.85	0.44	117	
Miel de maple	...	...	...	36.0	...	0.49	0.31	52	
Carne									
tocino, congelado	-10 0	90-95	4-6 meses	...	...	...	...	...	
tocino, curado (granja)	60-65	85	4-6 meses	13-29	...	0.30-0.43	0.24-0.29	18-41	
tocino, curado (empacadora)	34-40	85	2-6 sem.	...	...	...	...	...	
carne de res, fresca	32-34	88-92	1-6 sem.	62-77	28-29	0.70-0.84	0.38-0.43	89-110	
carne de res, congelada	-10-0	90-95	9-12 meses	...	...	...	...	...	
carne grasa de puerco	38-40	85-90	0-3 meses	...	...	...	...	...	
Jamón y cuarto del fresco	32-34	85-90	7-12 días	47-54	28-29	0.58-0.63	0.34-0.36	67-77	
curado	60-65	50-60	0-3 años	40-45	...	0.52-0.56	0.32-0.33	57-64	
congelado	-10 0	90-95	6-8 meses	...	...	...	...	...	

cordero, fresco	32-34	85-90	5-12 días	60-70	28-29	0.68-0.76	0.38-0.51	86-100	
cordero, congelado	10-0	90-95	8-10 meses	...	...	...	...	...	
hígados, congelados	10-0	90-95	3-4 meses	70.0	...	...	...	...	
puerco, fresco	32-34	85-90	3-7 días	35-42	28-29	0.48-0.54	0.30-0.32	50-60	
puerco, congelado	10-0	90-95	4-6 meses	...	...	...	...	...	
tripas para embutidos	40-45	85-90	...	...	...	...	...	...	
salchicha ahumada	40-45	85-90	...	...	...	...	...	...	
ternera	32-34	90-95	5-10 días	70-80	28-29	0.76-0.84	0.42-0.51	100-114	
Melones									
Melones	45-50	85-90	1-2 sem.	92.7	29.9	0.94	0.48	132	1,230-0,500
cantalupo y perm	45-50	85-90	4-6 sem.	92.7	29.9	0.94	0.48	132	
Casa									
valenciano	45-50	85-90	2-4 sem.	92.6	29.8	0.94	0.48	132	
Sandía	36-40	85-90	2-3 sem.	92.1	30.6	0.97	0.48	132	
Leche, en polvo	32-40	Envasas impermeables	Varias sem.	...	...	...	...	...	
Champiñones I	32-35	85-90	3-5 días	91.1	30.0	0.93	0.47	130	6,160-58,000(70)
Micelios de champiñones									
micelios de grano	32-40	75-80	2 sem.	...	...	...	...	...	
micelios de estiércol	34	75-80	8 meses	...	...	...	...	...	
Plantas de vivero	32-35	85-90	3-6 meses	...	...	...	...	...	
Nueces	32-50	65-75	8-12 meses	3-6	...	0.22-0.25	0.21-0.22	4-8	
Aceite vegetal	35	...	1 año	0	...	...	...	...	
Quingombó	50	85-95	7-10 días	89.8	28.6	0.92	0.46	128	
Margarina	35	60-70	1 año	15.5	...	0.32	0.25	22	
Aceitunas, frescas	45-50	85-90	4-6 sem.	75.2	28.5	0.80	0.42	108	
Cebollas	32	70-75	6-8 meses	87.5	30.1	0.90	0.46	124	1,100-4,180(70)
Naranjas	32-34	85-90	8-12 sem.	87.2	30.6	0.90	0.46	124	1,030-9,420(90)
Papayas	45	85-90	2-3 sem.	90.8	30.1	0.82	0.47	130	
Chirivía	32	90-95	2-6 meses	78.6	29.8	0.84	0.46	112	
Duraznos	31-32	85-90	2-4 sem.	86.9	29.6	0.90	0.46	124	1,370-22,460(80)
Peras	29-31	85-90	...	82.7	27.7	0.86	0.45	118	880-13,200
Chicharos	32	85-90	1-2 sem.	74.3	30.1	0.79	0.42	106	8,360-82,920(80)
Chiles secos	32-40	65-75	6-9 meses	12.0	30.9	0.30	0.24	17	
Chile morrón	45-50	85-90	8-10 días	92.4	30.5	0.94	0.47	132	2,720-8,470
Nísperos	30	85-90	2 meses	78.2	27.5	0.84	0.43	112	
Piñas									
verde-maduras	50 60	85-90	3-4 sem.	...	29.1	...	...	122	
maduras	40 45	85-90	2-4 sem.	85.3	29.7	0.88	0.45	122	

Producto	Tem. de almacena- miento, °F	Humedad relativa %	Vida aprox- mada de almacena- miento	Conte- nido de agua, %	Punto de conge- lación, °F promedio	Calor específi- co arriba de con- gelación	Calor específi- co abajo de con- gelación	Calor latente (calcu- lado) 4 Btu	Calor de respiración Btu/ton/24 Hrs.
Granadas	34-35	85-90	2-4 meses	...	26.5	...	...	...	
Maíz para palomitas	32-40	85	...	13.5	...	0.31	0.24	19	
Papas									880-3,530(70)
tempranas	50-55	85-90	...	...	30.0	...	...	...	
tardías	38-50'	85-90	...	77.8	29.8	0.82	0.43	111	
Aves									
frescas	32	...	1 sem.	74.0	27.0	0.79	...	106	
congeladas, desstripadas	-10-0	...	9-10 meses	...	...	...	...	...	
congeladas, preparadas estilo New York	-10-0	...	6-9 meses	...	...	...	0.37	...	
Calabazas	50-55	70-75	2-6 meses	90.5	29.9	0.92	0.47	130	
Membrillos	31-32	90-95	2-3 meses	85.3	28.1	0.88	0.45	122	
Conejos									
frescos	32-34	90-95	1-5 días	...	...	...	...	...	
congelados	-10-0	90-95	0-6 meses	...	...	...	...	...	
Rábanos, primavera, manojos o paquetes	32	90-95	10 días	93.6	30.1	0.95	0.48	134	
tardíos	32	90-95	2-4 meses	93.6	...	0.95	0.48	134	
Frambuesas									
negras	31-32	85-90	7 días	80.6	29.4	0.84	0.44	122	5,500-22,300
congeladas, rojas o negras	-10-0	...	1 año	...	...	...	...	...	
rojas	31-32	85-90	7 días	84.1	30.3	0.87	0.45	121	5,500-22,300
Ruibarbo	32	90-95	2-3 sem.	94.9	29.9	0.96	0.48	134	
Nabas	32	90-95	2-4 meses	89.1	29.7	0.91	0.47	127	
Salafi	32	90-95	2-4 meses	79.1	29.6	0.83	0.44	113	
Espinacas	32	90-95	10-14 días	92.7	31.3	0.94	0.48	132	4,860-33,000
Calabacitas									
"bellota"	45-50	75-85	4-5 sem.	...	30.0	...	...	...	
tempranas	32-40	85-95	10-14 días	95.0	30.4	0.96	...	135	
tardías	50-55	70-75	4-6 meses	88.6	29.8	0.91	...	127	
Fresas									
frescas	31-32	85-90	7-10 días	89.9	30.2	0.92	...	129	3,800-46,400(80)
congeladas	-10-0	...	1 año	72.0	...	...	0.42	103	

Azúcar, granulado	50 100	Abajo de 60	1-3 años	0.5	...	0.20	0.20	72	
Camotes	55 60	90 95	4-6 meses	68.5	29.2	0.75	0.40	97	2,440-6,300
Mandarinas	31 38	90 95	3-4 sem.	87.3	29.5	0.90	0.46	125	
Tomates									
verde-maduros	55 70 <sup>y</sup>	85 90 <sup>y</sup>	2-5 sem.	94.7	30.4	0.95	0.48	134	580-6,230
maduros	32 7	85 90 <sup>y</sup>	7 días	94.1	30.4	0.95	0.48	134	1,020 5,640
Nabos, raíces	32	90 95	4-5 meses	90.9	29.8	0.93	0.47	130	1,940-5,280
Semillas de hortalizas	32-50	50 65	...	...	...	...	...	...	
Lavadura, comprimida	31-32	...	...	70.9	...	0.77	0.41	102	