

Cámaras frigoríficas, Túneles de congelación, en instalaciones de calor y frío industrial

Cámaras frigoríficas

Túneles de Congelación

JUAN CARLOS LOZANO MEDINA

INGENIERO INDUSTRIAL

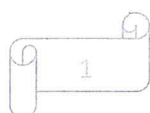
PROFESOR ASOCIADO ULPGC

ISBN 978-84-16989-15-7

1 DE JULIO DE 2013

Índice

1. Introducción	3
2. Componentes	3
2.1. Máquina frigorífica	3
2.1.1. Compresor	3
2.1.2. Evaporador	5
2.1.3. Condensador	8
2.1.4. Dispositivos de expansión	9
2.2. Elementos básicos de las cámaras frigoríficas	10
2.2.1. Aislamiento.....	10
2.2.2. Características de los aislantes	11
2.2.3. Barrera antivapor.....	11
2.2.4. Revestimientos	12
2.3. Elementos auxiliares.....	14
2.3.1. Válvula de equilibrado de presiones.....	14
2.3.2. Puertas	14
2.3.3. Prevención de congelación del suelo.....	15
2.3.4. Desagües	15
2.3.5. Ventanas para renovación de aire	16
3. Refrigeración	16
3.1. Aspectos Generales	16
3.2. Ciclo de refrigeración.....	17
4. Congelación	18
4.1. Aspectos Generales.....	18
4.2. Métodos de Congelación	19
4.3. Velocidad de Congelación.....	20
5. Equipo de congelación por aire	21
5.1. Túnel de Congelación	21
5.2. Congeladores de lecho fluidizado	23
5.3. Congeladores de Banda	24
6. Equipo de congelación por contacto	27



6.1.	Congeladores por Superficie.....	27
6.2.	Congeladores por Líquidos	28
7.	Cálculos para la Realización de una Máquina Frigorífica	29
7.1.	Densidad de Almacenamiento	29
7.2.	Cargas Térmicas	30
7.2.1.	Cargas Debidas al Enfriamiento del Producto	31
7.2.1.1.	Conservación o Refrigeración	31
7.2.1.2.	Congelación	32
7.2.1.3.	Calor desprendido por ciertos productos.....	33
7.2.1.4.	Calor desprendido por el embalaje.....	34
7.2.2.	Ganancias de Calor a través de los Cerramientos	35
7.2.3.	Ganancias de Calor Internas.....	36
7.2.3.1.	Calor Aportado por Motores	36
7.2.3.2.	Calor Aportado por Personas.....	36
7.2.3.3.	Calor Aportado por Luminarias.....	37
7.2.3.4.	Aproximación de Calor Aportado por Personas y Luminarias	37
7.2.4.	Ganancias de Calor debidas a Renovación de Aire.....	38
7.3.	Tiempo de Funcionamiento del Equipo de Refrigeración	38
7.4.	Potencia Frigorífica Total	39

1. Introducción

Una **cámara frigorífica** es una instalación industrial estatal o privada en la cual se almacenan diversos productos. Su uso más extendido se da en el campo de la alimentación al igual que puede utilizarse para cierto tipo de elementos de otros campos.

2. Componentes

Para que las cámaras frigoríficas realicen su función, es necesario de disponer de una instalación que provea el frío necesario para la conservación de estos productos.

El equipo encargado de generar este frío de llama máquina frigorífica, y está formado básicamente por un compresor, un evaporador, un condensador y un depósito de expansión. La cámara frigorífica en sí está formada por unos elementos básicos y unos elementos auxiliares, cuya importancia no deja de ser menor. Por elementos básicos nos referimos al aislamiento, la barrera antivapor y los revestimientos. Los elementos auxiliares son: válvulas de equilibrado de presiones, puertas, protección del suelo contra el hielo, ventanas barométricas, extractores de aire, entre otros.

2.1. Máquina frigorífica

2.1.1. Compresor

El compresor es el elemento encargado de aspirar los vapores a baja presión procedentes del evaporador, a la misma velocidad que se van produciendo, para comprimirlos posteriormente. Esta compresión del vapor disminuye su volumen, por lo que la temperatura y la presión aumentan.

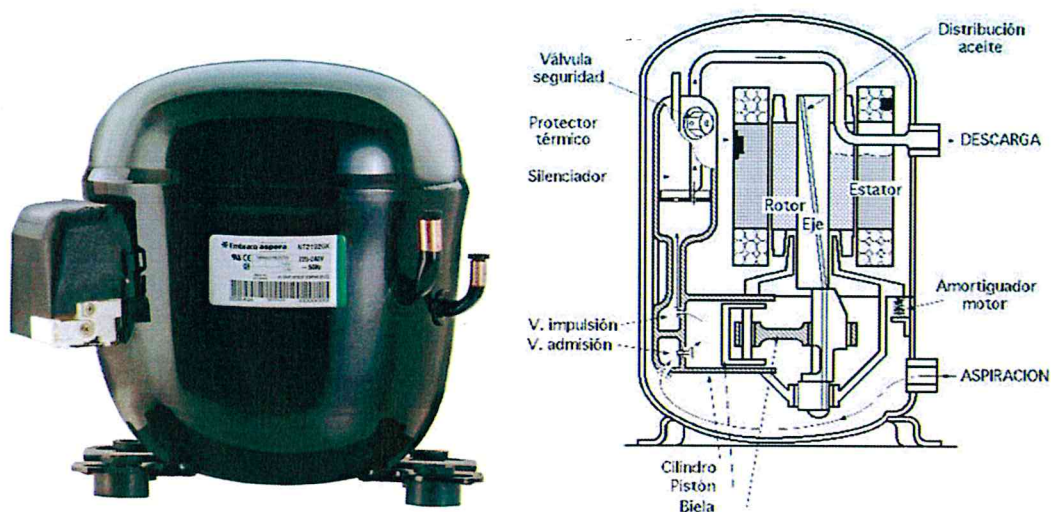
Este aumento de temperatura debe estar controlado, ya que una temperatura muy elevada del gas podría producir que el aceite de lubricación del compresor se

quemara, pudiendo ocasionar problemas en el funcionamiento. Para evitar que la temperatura supere los valores límites soportados por el lubricante, la relación de compresión debe controlarse.

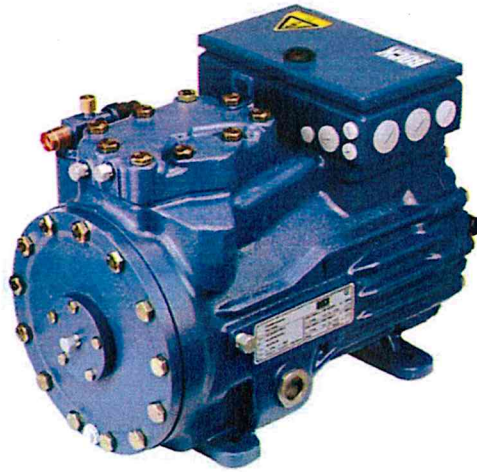
La capacidad de un compresor viene determinada por la temperatura de vaporización del fluido en el evaporador. A mayor temperatura, mayor será la presión de vaporización y menor el volumen específico del fluido.

Los compresores de las instalaciones frigoríficas pueden ser de tres tipos:

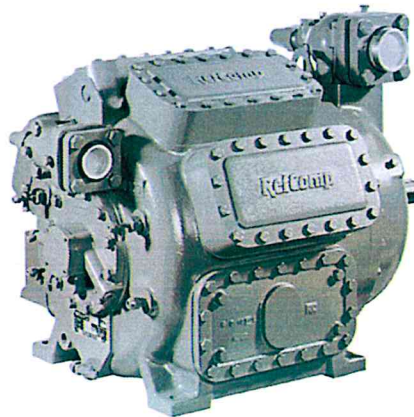
- **Compresores herméticos:** Todo el conjunto motor-compresor va dentro de una carcasa soldada sin accesibilidad. Normalmente se instalan en máquinas de pequeña potencia. Tienen un menor coste y ocupan menos espacio.



- **Compresores semiherméticos (herméticos accesibles):** En este tipo de compresores, el motor y el compresor comparten eje, y ambos están en una misma carcasa, accesible desde el exterior. Se utilizan para potencias medias y eliminan los problemas de alineamiento entre el motor y el compresor. Son más accesibles, ya que el plato de válvulas es desmontable y todas las partes internas pueden cambiarse fácilmente, en caso de ser necesario.



- Compresores abiertos: El cigüeñal es accionado por un motor exterior al compresor. Se utilizan para potencias medias y grandes, y son los más versátiles y accesibles. No existe el riesgo de contaminar el refrigerante. Estos compresores presentan más problemas de vibraciones debido a la correcta alineación de este y el motor, así como debido a la tensión que la correa que lo acciona.



2.1.2. Evaporador

El evaporador es el elemento que se encarga de evaporar el fluido refrigerante, para entregárselo al compresor en estado gaseoso. Al evaporador el fluido refrigerante no le llega completamente en estado líquido, sino que siempre presenta un pequeño porcentaje de vapor.

La evaporación del fluido refrigerante se realiza gracias a la energía que absorbe del ambiente. Este cambio de estado se realiza a temperatura constante.

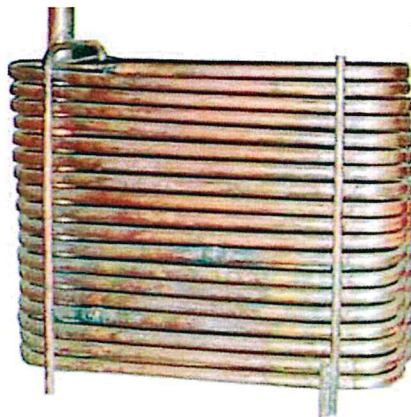
Como consecuencia de esto, el evaporador es el elemento encargado de absorber el calor del espacio refrigerado, además de controlar la humedad. Es decir este elemento elimina tanto el calor sensible como el calor latente. La disminución de calor sensible va relacionada a la reducción de la temperatura, mientras que la disminución de calor latente se relaciona con la reducción de la humedad.

Para que el evaporador pueda extraer calor del espacio refrigerado es necesario que las paredes de éste, el serpentín, estén a una temperatura inferior a la cual se desea llevar la cámara frigorífica.

Los evaporadores se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios.

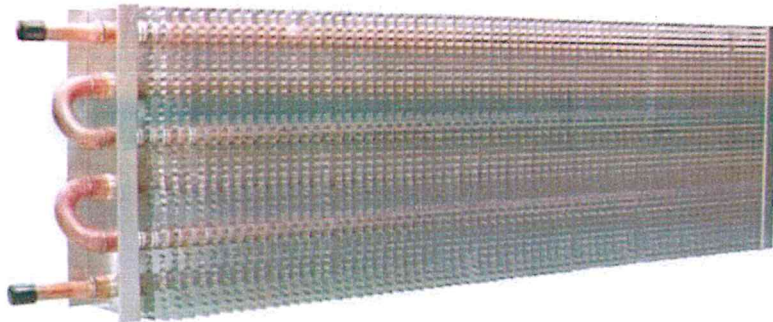
Según tipo constructivo:

- De tubo descubierto: En este tipo de evaporador los tubos son lisos, pudiendo ser de acero o cobre según la capacidad y el tipo de fluido refrigerante que se utilice. Para grandes capacidades y cuando el refrigerante es R-717 se utilizan tubos de acero, mientras que si la capacidad es pequeña y los refrigerantes son fluorados se utiliza cobre.



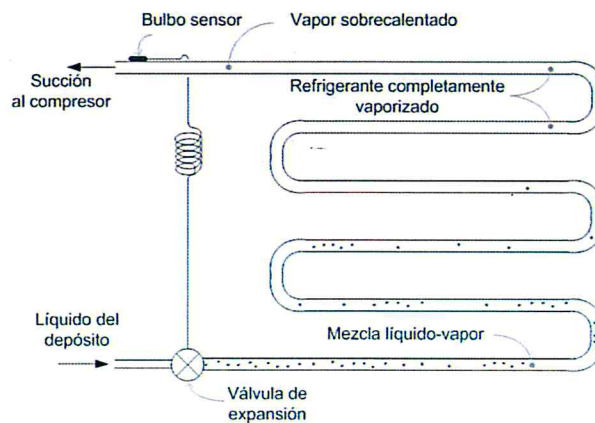
- De tubos aleteados: Estos tipos de serpentines cuentan con unas placas metálicas o de aletas, soldadas sobre los tubos descubiertos, con lo que se aumenta la superficie externa del evaporador y se mejora la capacidad de enfriamiento. Esta superficie de contacto mayor les permite ser más compactos, es decir, necesitar una menor longitud de tubo para conseguir el mismo resultado que con los evaporadores de tubo descubierto.

La separación y el tamaño de las aletas depende del tipo de aplicación, fundamentalmente de la temperatura del serpentín.



Según el método de alimentación del líquido refrigerante:

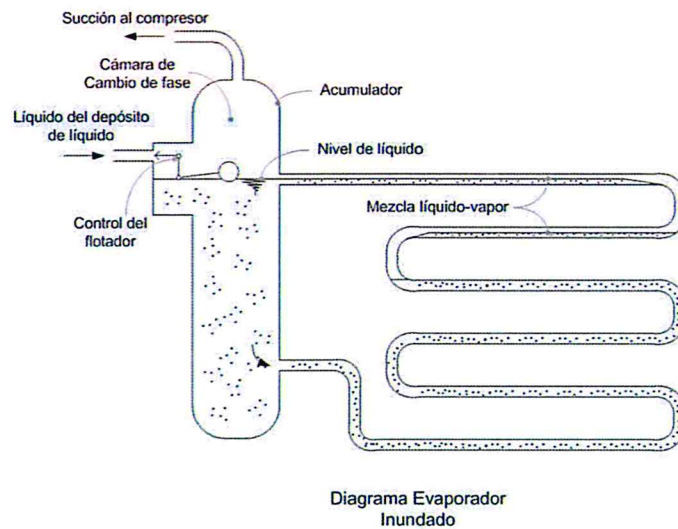
- Evaporadores de expansión seca: A este tipo de evaporador el fluido refrigerante entra en una mezcla líquido-gaseosa, mayormente líquida. Esta entrada de fluido está limitada a la cantidad máxima que el evaporador es capaz de evaporizar para que a su salida el fluido este completamente en fase gaseosa. Para evitar que el compresor aspire algo de líquido se admiten sobrecalentamientos de unos 5 °C.



Esquema de evaporador de expansión seca (o directa)

- Evaporadores de tipo inundado: En este caso, se llena el evaporador con el líquido refrigerante, a través de un depósito acumulador, y se utiliza un mecanismo especial para evitar que el compresor aspire líquido. Este tipo tiene un rendimiento mayor que los evaporadores de expansión seca ya que la

superficie interior del tubo está completamente en contacto con el fluido refrigerante en estado líquido, con lo que la transferencia de calor es mejor.



Según el tipo de fluido a refrigerar:

- Evaporadores para enfriamiento de aire: Dentro de estos podemos encontrar evaporadores de convección natural, en los que los tubos suelen ser aleteados para mejorar la eficiencia, y de convección forzada, llamado también unidad enfriadora, ya que viene en una carcasa junto a ventiladores.
- Evaporadores para enfriamiento de líquido: La forma de operar de estos evaporadores varía según si son de expansión seca o de tipo inundado.

2.1.3. Condensador

A la salida del compresor el fluido refrigerante se encuentra caliente y en estado gaseoso, ya que ha absorbido el calor del espacio refrigerado además del adquirido en la compresión. Para volver a realizar el ciclo, aparte de cambiar a estado líquido, debe enfriarse. Esto se consigue en el condensador.

Los condensadores se clasifican en dos grandes grupos: los condensadores de calor sensible y los condensadores de calor latente.

Los condensadores suelen enfriar el fluido refrigerante empleando aire, por su disponibilidad y su coste nulo. Para máquinas con potencias muy grandes, la cantidad de aire a mover para realizar el enfriamiento sería muy grande, debido al bajo calor específico muy bajo, utilizando agua en estos casos, que cuenta con una mayor capacidad para absorber calor.

2.1.4. Dispositivos de expansión

Estos dispositivos son los encargados de controlar el flujo del refrigerante. A ellos les llega el fluido refrigerante en estado líquido y en su paso a través de un orificio sufre una caída de presión, evaporándose y enfriándose, saliendo en forma de mezcla líquido-vapor. A menor presión de vaporización mayor es la cantidad de vapor en la mezcla. Este elemento representa la separación entre la parte de alta presión y la de baja presión del circuito de la máquina frigorífica.

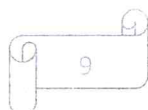
Por tanto, las funciones de este dispositivo son:

- Inyectar al evaporador la cantidad justa de fluido refrigerante para absorber el calor del espacio a refrigerar
- Mantener la diferencia de presión entre ambas partes del circuito, permitiendo evaporar el fluido a baja presión y condensarlo a alta presión.

Los dispositivos de expansión pueden ser de varios tipos:

- Válvula de expansión termostática, VET (sobrecalentamiento constante)
- Válvula de expansión automática, VEA (presión constante)
- Dosificador de tubo capilar
- Válvula de flotador (evaporadores de tipo inundado)

Por sobrecalentamiento se entiende la cantidad de calor sensible que absorbe el fluido refrigerante una vez que la totalidad de su masa se encuentra en estado gaseoso. Según el tipo de evaporador a utilizar el nivel de sobrecalentamiento requerido será uno u otro.



Para máquinas que requieren una gran eficiencia, el sobrecalentamiento debe ser bajo, de forma que el evaporador esté lo más inundado posible. Sin embargo, otro tipo de instalaciones, debido a que el calor a absorber por el refrigerante no es tan elevado, es necesario un sobrecalentamiento mayor, para que a la entrada del compresor el líquido refrigerante se encuentra en su totalidad en estado gaseoso. Un ejemplo de esto último son las unidades de acondicionamiento de aire.

2.2. Elementos básicos de las cámaras frigoríficas

2.2.1. Aislamiento

Los costes de operación de una cámara frigorífica están directamente relacionados con la temperatura en su interior. Esta temperatura es un factor determinante a la hora de conservar productos perecederos, de ahí que este tipo de instalaciones haya alcanzado un gran nivel de desarrollo y aplicación en la industria alimentaria, siendo también importante en otros mercados.

El necesitar una temperatura más baja implica un mayor gasto energético, así como unas mayores pérdidas, ya que el gradiente de temperatura entre el exterior y el interior aumenta. En este punto entran en juego los aislantes, materiales diseñados específicamente para lograr minimizar las pérdidas a través de las paredes, suelo y techo de la cámara frigorífica y también para facilitar que las bajas temperaturas dentro de la cámara sean fáciles de mantener.

Los materiales aislantes son malos conductores del calor, y generalmente están constituidas por un gran número de células rellenas de aire u otros gases con una mala conductividad térmica.

2.2.2. Características de los aislantes

Una de los factores más importantes que debe tenerse en cuenta a la hora de elegir un material aislante para una instalación frigorífica es su higroscopicidad, es decir, la facilidad con la que absorbe agua. El agua posee un coeficiente de conductividad térmica mucho mayor que el aire y que los gases que se encuentran dentro de las células de los materiales aislantes, por lo que si éste absorbe el agua que exista en el ambiente interior y exterior de la cámara frigorífica con facilidad, sus propiedades aislantes disminuirán.

Otras características importantes son:

- Baja conductividad térmica
- Que sea imputrescible
- Inatacable por roedores
- Inodoro y que insensible a la fijación de olores
- Incombustible
- Que sea químicamente neutro frente a materiales y fluidos con los que pueda estar en contacto
- Que sea plástico, de fácil adaptación a la geometría de la cámara y resistente a la compresión y a la tracción.

En España, los materiales más empleados para el aislamiento de las cámaras frigoríficas son el poliuretano, el poliestireno expandido y el poliestireno extrusionado para aislar cerramientos, y la espuma elastomérica para tuberías.

2.2.3. Barrera antivapor

En las cámaras frigoríficas el aire húmedo exterior en su intento por penetrar al interior de la cámara frigorífica va disminuyendo su temperatura. Si la temperatura disminuye hasta llegar a la temperatura de rocío se producirá su condensación.

Incluso, si la cámara se encuentra a una temperatura inferior a cero este aire puede hasta solidificarse. Si el aire condensa, la conductividad térmica del aislamiento disminuye, y en caso de solidificaciones puede rasgar el cerramiento.

Para evitar este tipo de problemas, aparte de otras medidas, se colocan barreras antivapor, que se sitúan en la cara caliente del aislamiento, evitando el paso o difusión del agua hacia el interior de la cámara frigorífica.

Estas pantallas hidrófugas suelen estar constituidas por emulsiones bituminosas o también por láminas de plástico o metal.

Las barreras antivapor deben por lo tanto:

- Mantener el valor de la conductividad térmica del material aislante
- Evitar deterioros en el aislante y en la obra de albañilería
- Un mayor ahorro energético y una mayor vida útil tanto de cerramientos y de aislantes, así como de la máquina frigorífica.

Para que su colocación sea eficaz debe situarse en la cara caliente del aislamiento, ser continua a lo largo de todo el perímetro y estar constituida por materiales impermeables al vapor de agua.

2.2.4. Revestimientos

Los revestimientos se utilizan para cubrir el aislamiento por varias razones:

- Evitar la rotura accidental del material aislante
- Proteger frente a la penetración de agua, acción del fuego y evitar el crecimiento de microorganismos.
- Lograr una superficie lisa que facilite la limpieza.

Los revestimientos se aplican tanto a paredes, techos y suelos.

El revestimiento de las paredes puede variar según sea el producto a almacenar, por ejemplo, para cámaras destinadas a almacenar frutas y hortalizas se ha venido

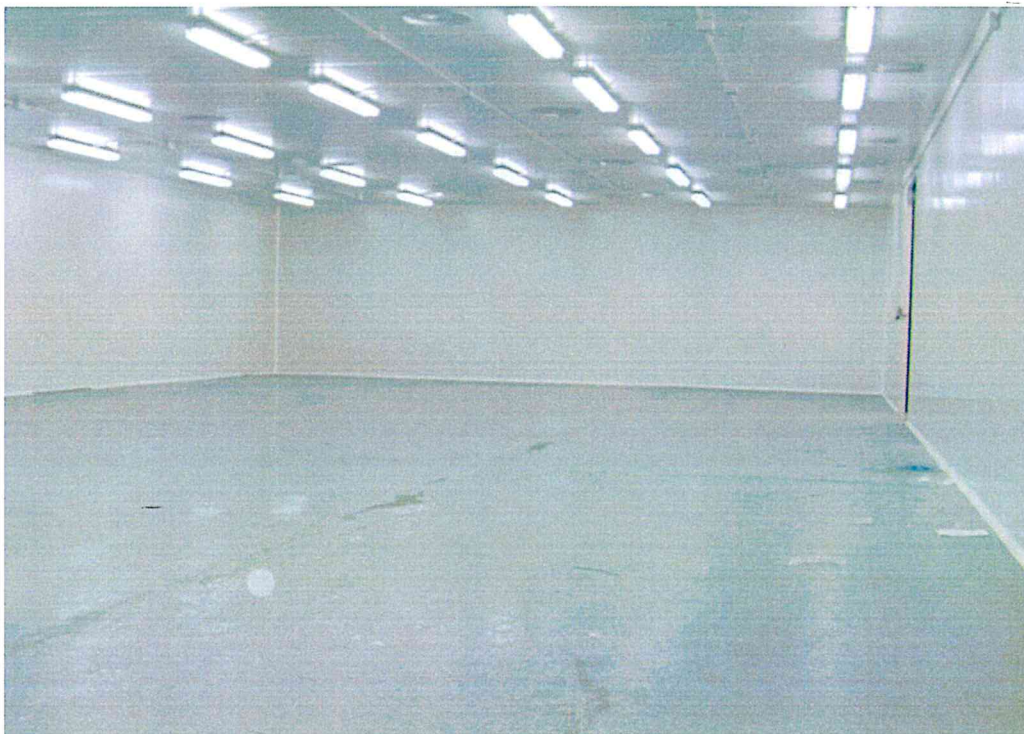
Cámaras Frigoríficas. Túneles de Congelación

utilizando espuma de poliuretano inyectado sin ningún tipo de revestimiento. En cambio, cuando lo que se almacena es carne los revestimientos se hacen más necesarios por temas de higiene.

Actualmente, las cámaras que antes no se protegían se están cubriendo con materiales adecuados según exigencias de los consumidores.

El revestimiento se hace aplicando en primer lugar una capa de hormigón para nivelar el suelo y facilitar la colocación de la barrera antivapor. Posteriormente se aísla y finalmente se recubre con otra capa de hormigón, con una serie de componentes añadidos y un acabado específico, tal que sea antideslizante y permita la operación con maquinaria sin problemas.

Para los techos se tienen en cuenta prácticamente las mismas consideraciones que para las paredes.



2.3. Elementos auxiliares

2.3.1. Válvula de equilibrado de presiones

En el funcionamiento normal de la cámara frigorífica se pueden provocar sobrepresiones o depresiones, como por ejemplo en los siguientes casos:

- Puesta en marcha de las cámaras
- Descongelación de evaporadores
- Grandes entradas de mercancías
- Introducción rápida de gases

Para evitar que estas variaciones de presión provoquen grandes daños, debe existir un sistema que regule automáticamente la presión entre el interior y el exterior.

Estos sistemas de equilibrio de presiones están formados por válvulas móviles, unas de admisión y otras de escape, preparadas para actuar a partir de una determinada presión.

En los casos en los que la cámara frigorífica se encuentre a temperaturas por debajo de 0°C, estas válvulas llevan unos sistemas propios de calentamiento para evitar que se obstruyan, así como para facilitar su funcionamiento, ya que podría formarse hielo, averiándolas.

2.3.2. Puertas

Las puertas son unos de los elementos que más controlados deben estar en las cámaras frigoríficas, necesitando cumplir con unas exigencias muy estrictas. Estos elementos sustituyen a los cerramientos en algunas superficies de las paredes y por tanto deben cumplir los mismos requisitos que éstos, así como los propios por la función que desempeñan.

Entre los requerimientos que se les precisan a las puertas los más destacados son:

- Que estén correctamente aisladas
- Que sean estancas al vapor de agua y al aire
- Que sea resistente a golpes, a los continuos cierres y aperturas y a que sean ligeras para facilitar su manipulación.

El punto más débil de aislamiento en la superficie cubierta por las puertas es entre la junta y el marco, pudiendo colarse al interior el vapor de agua, condensándose y congelándose, en caso de que la temperatura interior de la cámara se negativa. Con objeto de eliminar este problema, se instalan en estas zonas unas resistencias de calentamiento que mantienen estas zonas a una temperatura como mínimo igual a la del ambiente exterior.

2.3.3. Prevención de congelación del suelo

En las cámaras que trabajan a temperaturas negativas se corre el riesgo de que el suelo se congele. Para evitar esto es necesario dejar un vacío sanitario en la construcción de la cámara que permita una circulación de aire por debajo del suelo, evacuando las frigorías que atraviesan el aislante. Este sistema de ventilación puede ser natural si es posible disponer de diferencias de cotas entre el orificio de salida del aire y el de entrada, ya que al calentar el suelo éste se enfría aumentando su densidad y tendiendo a circular por la parte inferior, o en caso que sea imposible lograr esta diferencia de cotas, la ventilación será forzada.

2.3.4. Desagües

Los desagües deben ser sifónicos para evitar la entrada de olores a la cámara así como disponer de rejillas que obstaculicen el paso de roedores. Otro aspecto a tener en cuenta es que la pendiente del suelo deben ser lo menor posible para que en caso de almacenamiento cajas están no precipiten.

Cuando las cámaras operan a temperaturas negativas, no se instalan desagües.

2.3.5. Ventanas para renovación de aire

La colocación de ventanas solamente es necesaria en aquellas cámaras que se utilizan para mantener frutos u órganos vivos, para eliminar los gases producidos en la respiración.

Uno de los métodos para renovar el aire interior de la cámara consiste en disponer en la parte superior de unos ventiladores que impulsan aire por la parte alta del cerramiento, y colocar en la parte inferior ventanas barométricas, que solo se abren cuando la presión ejercida por los ventiladores supera un determinado valor.

3. Refrigeración

3.1. Aspectos Generales

La refrigeración es un proceso que consiste en bajar o evitar que suba el nivel de calor de un cuerpo. Es un proceso termodinámico en el que se extrae calor del objeto considerado y se lleva a otro lugar capaz de admitir esa energía térmica.

Existen diversos métodos para refrigerar, siendo los más antiguos la evaporación o la utilización del hielo o la nieve naturales, así como la refrigeración por agua, por ejemplo la de ríos.

En resumen estos métodos son:

- Mediante un fluido que no cambia de fase, aprovechando el calor sensible
- Mediante un fluido que cambia de estado, aprovechando el calor latente.

Aplicaciones de la refrigeración:

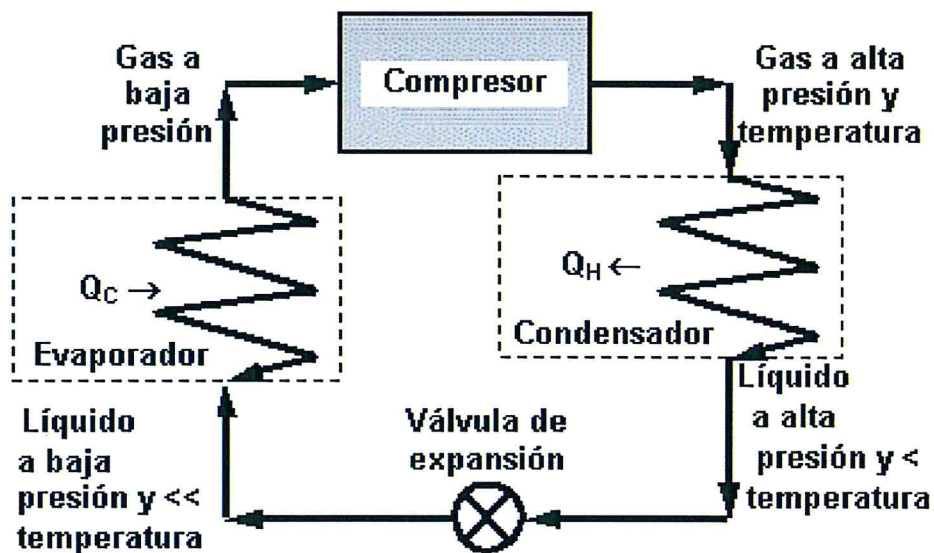
La refrigeración tiene una gran variedad de aplicaciones entre las que se pueden destacar:

- Creación de sensación de confort en edificaciones
- Refrigeración de medicamentos y/o productos perecederos
- Disminución de temperatura en procesos industriales
- Criogenia
- Refrigeración de motores de combustión y máquinas herramientas
- Refrigeración de equipos electrónicos.

3.2. Ciclo de refrigeración

En este ciclo está formado por 4 procesos:

- Compresión
- Disipación de calor a presión constante
- Estrangulamiento en un dispositivo de expansión y evaporación
- Absorción de calor a presión constante en un evaporador



El compresor es el equipo encargado de aspirar el fluido del evaporador y ayudarlo a entrar en el condensador. En este proceso se aporta energía desde el exterior. A continuación el fluido en estado gaseoso y sobrecalentado, ya que ha absorbido el calor de la cámara frigorífica aparte del generado en la compresión, entra en el condensador, donde se condensa, saliendo de este como líquido saturado. Ahora el refrigerante se expande en la válvula de expansión, disminuyendo su presión y su temperatura. Finalmente entra en el evaporador, donde absorbe el calor procedente del espacio a refrigerar.

Existe otro método de refrigeración, llamado **refrigeración por absorción**.

Este método consiste en sustituir la compresión del vapor por una absorción de éste en una disolución. Esto requiere un coste energético menor. Para liberar el vapor de la disolución comprimida debe suministrarse calor.

La diferencia fundamental frente al ciclo clásico de refrigeración es sustituir el compresor por un sistema absorbedor-generador. Las mezclas de trabajo suelen estar formadas por amoníaco y agua o bromuro de litio y agua.

Al suministrar calor se evaporan ambos fluidos y se separan. El vapor refrigerante con una gran presión y temperatura pasa por el condensador y se enfría, pasando a estado líquido. Posteriormente se expande en una válvula de expansión, donde disminuye su presión pasando finalmente al evaporador, extrayendo el calor del espacio a refrigerar.

4. Congelación

4.1. Aspectos Generales

En la congelación se llevan los productos a temperaturas por debajo de su temperatura de congelación. Esta temperatura es muy parecida a la del agua,

elemento que se encuentra en una gran proporción en los productos que se desean congelar como los alimentos (entre un 50% y un 90% de agua).

El principal objetivo de la congelación es poder conservar durante un tiempo prolongado un producto. Esto se consigue ya que al llevar a estas temperaturas los productos, por ejemplos productos alimentarios, se impide el crecimiento de microorganismos, como las bacterias, y se detiene su desarrollo enzimático. Con esto se evita la descomposición y el deterioro de los alimentos durante un largo periodo de tiempo. Para ello, como regla general, se ha de congelar entre un 80% y un 90% de su contenido en agua.

La temperatura a la que empieza la congelación depende del contenido en sales, azúcar y ácidos de los líquidos celulares. Está comprendida entre -1°C y -3°C , para la mayor parte de carnes y pescados, siendo algo superior para las frutas y verduras.

En los alimentos, al igual que en las soluciones salinas, cuando se alcanza el punto de congelación del agua solo se solidifica parte de ella. El líquido que permanece sin congelar se enriquece en sustancias, produciéndose un descenso en el punto de congelación.

Los alimentos congelados deben consumirse inmediatamente después de su descongelación, ya que las enzimas y microorganismos no son destruidos por la baja temperatura, solo se ralentiza su desarrollo y reproducción. Esto implica que, un vez descongelados, volvería a activarse el desarrollo enzimático y la reproducción de microorganismos.

4.2. Métodos de Congelación

La congelación se puede realizar de tres métodos:

- Por contacto: se enfría por el contacto de una superficie sólida o un fluido con el que extrae el calor.
- Por aire: una corriente de aire frío extrae el calor del producto hasta que se consigue la temperatura final.

4.3. Velocidad de Congelación

Un elemento importante en la evaluación de la calidad de los métodos de congelación es la velocidad de congelación media.

Es aquella a la que avanza el frente de hielo a través de un producto, siendo:

$$U_f = \frac{\delta}{t} \text{ (cm/h)}$$

Donde:

- U_f : Velocidad de congelación.
- δ : Espesor que se desea congelar.
- T : Tiempo de congelación.

Si la velocidad de congelación es pequeña, el agua sale de las células y se solidifica en los espacios intercelulares en grandes cristales de hielo, que dañan las células. Posteriormente, cuando se descongela, el fluido sale al exterior arrastrando parte del sabor, color y aroma de los alimentos.

Si la velocidad de congelación es grande, la formación del hielo se inicia igualmente en los espacios intercelulares, pero el agua se difunde tan lentamente que no puede alcanzarse el estado equilibrio sin formación de hielo en el interior de las células. A partir de la misma cantidad de agua se forma un número mucho mayor de cristales de hielo, sustancialmente más pequeños, que se distribuyen casi uniformemente por todo el tejido.

Por tanto, si se desea que el producto se conserve con una gran calidad y sin ser dañado, cuanto más elevada sea la velocidad de congelación, mejor será la conservación.

Según la velocidad de congelación, se puede distinguir tres rangos de velocidades:

- Lenta: < 1cm/h, por ejemplo un congelador doméstico con el aire inmóvil a -18 °C.

- Media: 1-5 cm/h, por ejemplo en un túneles de congelación a 20 km/h y -40 °C.
- Rápida: > 5 cm/h, por ejemplo en la inmersión en nitrógeno líquido.

5. Equipo de congelación por aire

Flujos de aire a bajas temperaturas son empleados en los sistemas de congelación de alimentos por medio de túneles, bandas transportadoras y equipo de lecho fluidizado. En todos los casos, el flujo de aire se aplica continuamente al producto y, dependiendo del equipo de congelación, el flujo es horizontal o vertical.

En el congelador de túnel, el flujo de aire que prevalece es horizontal. En los equipos de lecho fluidizado, el flujo de aire es vertical ascendente, y en el equipo de congelación de bandas, ambos flujos de aire son utilizados. Dado que el calor específico del aire es bajo, las cantidades de aire que se necesitan para la congelación son grandes.

5.1. Túnel de Congelación

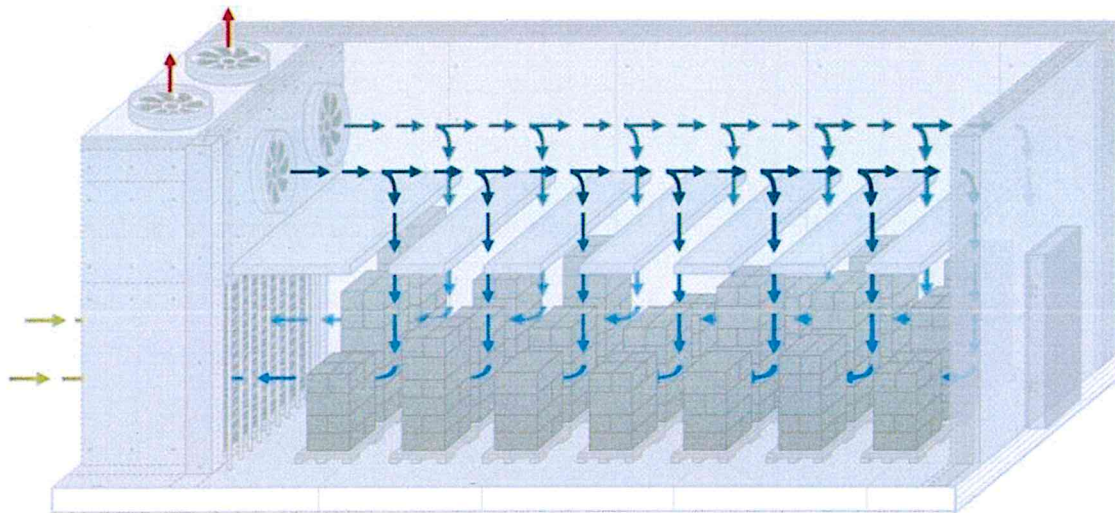
Son empleados para la congelación de un amplio rango de productos, desde productos finamente cortados, productos molidos, hasta las aves de corral o mitades de canales.

Este equipo consta de una cámara de aislamiento gruesa con una sola puerta normalmente, el cual posee un sistema de recirculación de aire a velocidades altas (3-6 m/s) para conseguir una importante velocidad de congelación. Se utilizan bandejas o carros para sustentar o disponer el producto dejando espacios para que circule el aire. Estos equipos se caracterizan por trabajar con temperaturas de entre -30°C y -40°C

Este equipo requiere un intercambiador de calor y ventiladores de alta potencia. El aumento de velocidades de aire reduce el tiempo de congelación, pero el beneficio de dicha reducción no es muy significativo si el incremento de gasto de energía se eleva tres veces en la relación con la velocidad de enfriamiento

Durante el viaje a través del túnel, los productos están todo el tiempo en contacto con aire frío. El aire es enfriado al circular en serpentines refrigerantes, que se enfrían mediante refrigeración mecánica convencional.

Usualmente, los ventiladores se encuentran encima de los carros en el fondo de la cámara. El aire se impulsa y se va distribuyendo por encima de los por los carros por encima de ellos. El intercambiador de calor se suele encontrar en el fondo de la cámara también, para permitir que el aire frío circule por toda la cámara hasta volver a su punto de origen. Hay casos, cuando los equipos poseen de doble fila de productos, los intercambiadores se encuentran también entre los carros.



Si las piezas de alimento no son muy grandes se pueden introducir hasta 40 bandejas por carro y pueden contener 250 a 300 kg de producto. El tiempo de calentamiento depende del tamaño y de la conductividad térmica del producto. Para productos en bandejas, el tiempo es de 1.5 a 6 h.

La capacidad de un túnel con ocho carros de cargas es 1.5 a 4 ton/h. Esto corresponde a una capacidad específica de aproximadamente 25 kg/m²h de bandeja por área.

Sus ventajas son:

- Flexibilidad, ya que los túneles son adecuados para una gran variedad y cantidades de producto.
- Fáciles de limpiar.
- Funcionamiento simple.

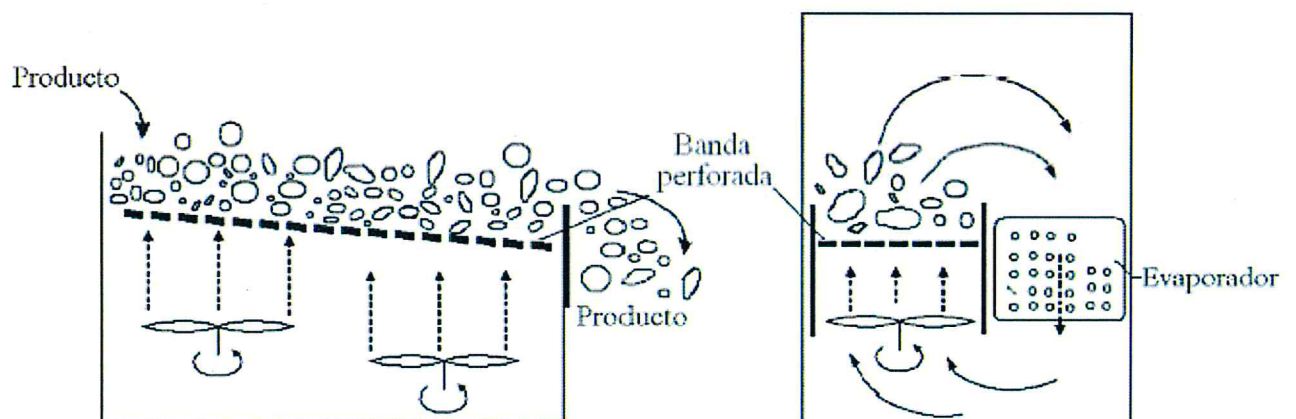
Sus desventajas son:

- Requiere un espacio relativamente amplio.
- Se requiere una mayor mano de obra que en los de lecho fluidizado o de bandas.
- Pérdida significativa del producto.

5.2. Congeladores de lecho fluidizado

Es un método de congelación rápido e individualizado, usado en congelación de piezas pequeñas. Cada pieza de alimento es congelada individualmente.

El equipo consiste en una banda inclinada, ventiladores (usualmente radiales) con flujo de aire descendente y un intercambiador cuya temperatura del aire se encuentra a -40°C . Los productos son enfriados rápidamente debido a que el aire lo rodea completamente, y la transferencia de calor entre el aire y el producto incrementa por el movimiento relativo entre el producto y el transporte del aire, producido por la inclinación de las bandas perforadas.



La capacidad del equipo de lechos fluidizadas varía entre aproximadamente 1-12 ton/h. Las dimensiones del congelador de lecho fluidizado son de 2-11 m de largo, 2-9 m de ancho y 3-6 m de alto.

Sus ventajas son:

- Gran capacidad específica.
- Reducida pérdida de peso del producto.
- Pequeñas dimensiones de la instalación.
- Pocas piezas móviles.

Sus desventajas son:

- Requerimiento energético relativamente alto.
- Su uso no es tan versátil.
- Requiere homogeneidad en el tamaño de las piezas.

5.3. Congeladores de Banda

Este equipo consta de bandas moviéndose a través de un flujo de aire frío. Las bandas pueden ser rectas o curvas, y están elaboradas de acero o plástico. Dichas bandas permiten el paso del aire a través de ellas. En todos los casos, un mecanismo automático mantiene la tensión de las bandas constante.

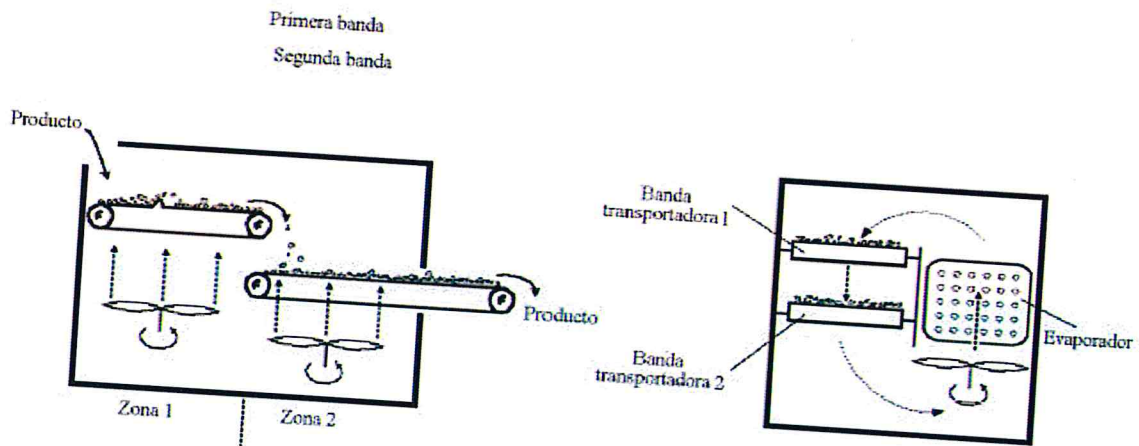
Este tipo de equipo es empleado para piezas sensibles y relativamente grandes de alimento. Ejemplos de producto congelados por ese sistema son rodajas de manzana, coliflor, fresas y alcachofas. También es empleado en endurecimiento de alimentos precongelados.

Existen varios tipos:

- **Bandas Rectas:** Se usan bandas rectas para ir circulando el producto a la vez que se congela.

En algunos casos, las bandas rectas son separadas en zonas. En la primera zona, el aire recircula vigorosamente, causando una congelación en la superficie del producto. La congelación del producto es completada en la segunda zona.

Cámaras Frigoríficas. Túneles de Congelación

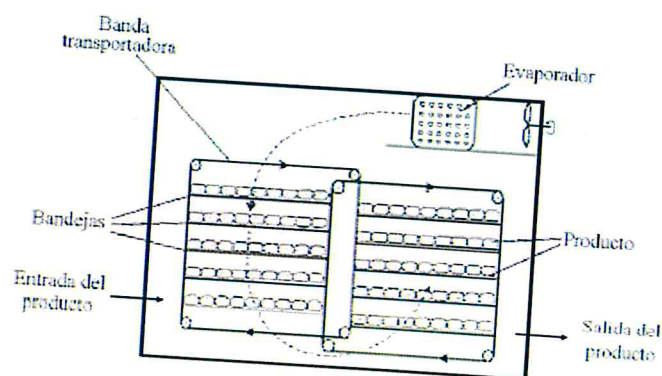


La capacidad de este equipo es de 0.2-6 ton/h. La longitud general del equipo es de 5-13m, el ancho es de 4-5 m y la altura de 5 m.

Para incrementar la versatilidad del equipo, dos o más bandas pueden moverse paralelamente a diferentes velocidades. Una sola banda tiene un ancho de 0.5-0.8 m.

Para congelar la misma cantidad de alimento, este equipo requiere más espacio que el empleado por el equipo de lecho fluidizado, pero es aproximadamente 30% menos que el equipo de congelación por banda en espiral.

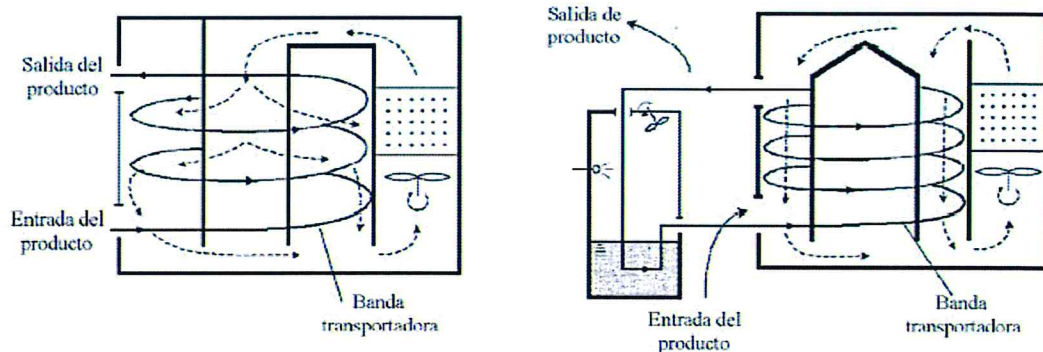
- Sistema de Elevador: Consta de bandas paralelas que llevan grandes estantes cargados la posición más elevada en el equipo y después a la parte inferior. De esta manera, la congelación puede ser controlada por la velocidad de las bandas durante el ascenso y descenso del producto.



Este método es frecuentemente usado en endurecimiento de productos como empaques de helado. La capacidad de endurecimiento del equipo depende del tipo de helado y la textura deseada.

El método es muy flexible. Además, el control de la congelación a través de la velocidad de las bandas, hace posible también la congelación de diferentes productos o paquetes de diferentes tamaños al permitir cargar y vaciar las bandas en diferentes posiciones.

- **Bandas en Espiral:** Las bandas en espiral son usadas para ahorrar espacio. Hay dos tipos principales, el de espiral y el de semiespiral, los cuales consisten en una combinación de bandas curvas y rectas.



El tipo de espiral es usado con frecuencia en congelación de hamburguesas, piezas de pescado y comidas preparadas. Es también usada en endurecimiento de productos congelados.

Para construcción de este tipo de equipos de tipo espira, el largo no debe exceder de 300 m y el ancho de 4-7 m. El aire es soplado horizontalmente o verticalmente a través del producto el cual se mueve alrededor del cilindro.

Sus ventajas son:

- Puede llevar a cabo la congelación de un amplio rango de productos delicados.
- Permite la congelación de productos húmedos y pegajosos.
- Posibilita congelar piezas largas.

- Puede congelar productos empacados y no empacados.

Sus desventajas son:

- Existe un movimiento relativo de piezas (ventiladores y cinturones).
- Consumo relativo elevado de energía.
- Elevada inversión inicial.
- Requiere distribución homogénea de los productos en las bandas.

6. Equipo de congelación por contacto

6.1. Congeladores por Superficie

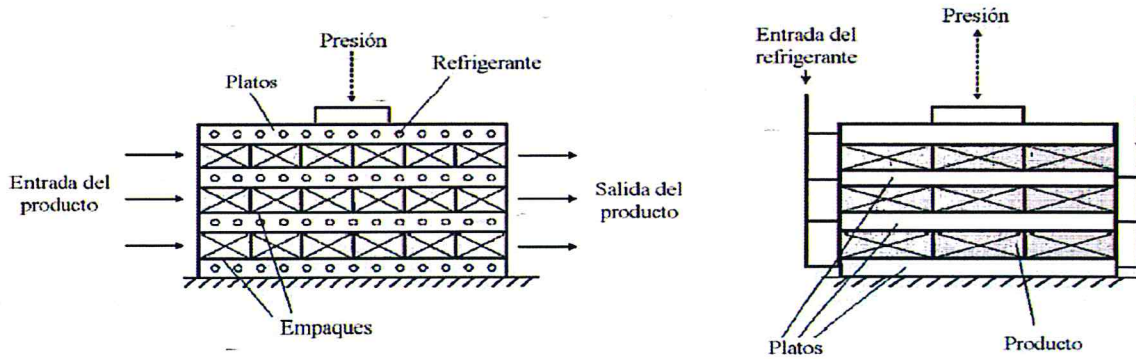
Consiste en varias placas de paredes dobles de una aleación de aluminio, y en su interior se encuentra circulando refrigerante.

El producto es puesto entre las placas, las cuales los presionan por medio de un sistema hidráulico ligero, lo que provoca la reducción de las bolsas de aire entre la superficie de refrigeración y el empaque.

Cuando la congelación termina, las placas son separadas y el producto es removido para recargar.

Las placas pueden darse de forma horizontal o vertical.

Se usan para la congelación de pescado entero, filetes de pescado, piezas de carne, productos con envases rectangulares y productos semisólidos



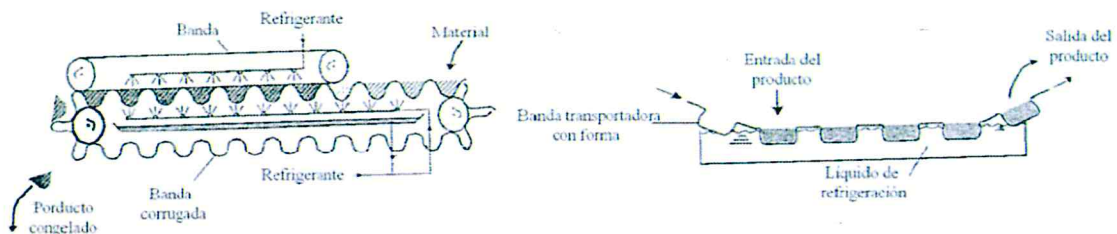
6.2. Congeladores por Líquidos

Se utilizan líquidos criogénicos como el nitrógeno (N_2) o el dióxido de carbono (CO_2), entre muchos otros. En este caso, el alimento que va a ser congelado es sumergido en el líquido.

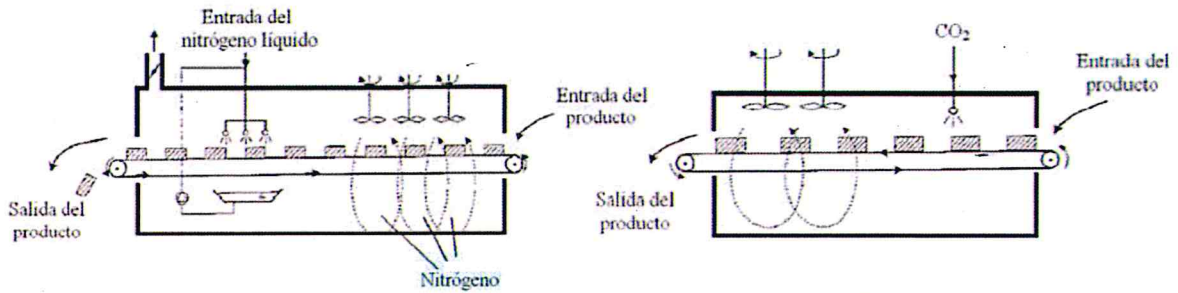
Este tipo de congelación es muy rápida debido a la baja temperatura a la cual se encuentra el líquido y al contacto directo con la superficie del producto.

Hay varios métodos principales para aplicar el líquido que congela el producto:

- **Moldes:** Es usado cuando se quiere congelar productos en forma de cuerpos compactos o pallets. En este caso, los alimentos son congelados a través de unos moldes que van circulando entre dos bandas metálicas paralelas que se rocían con líquido criogénicos.



- **Cintas Transportadas:** los productos se hacen pasar por cintas donde se rocían con un líquido criogénico.



7. Cálculos para la Realización de una Máquina Frigorífica

El diseño de una cámara frigorífica se posee múltiples etapas como la estimación de producto almacenado o la elección de los diversos equipos y materiales que lo componen, desde el aislante hasta el compresor. El objetivo de este trabajo no es enumerar y tratar cada uno de estos pasos, pero a continuación se mostrará una visión general y los cálculos más importantes para el dimensionado de los equipos.

7.1. Densidad de Almacenamiento

Para dimensionar una cámara frigorífica se debe conocer el volumen de la cámara y la cantidad de producto a enfriar.

Los volúmenes de las cámaras dependen de diversos factores:

- Naturaleza del producto.
- Cantidades a almacenar.
- Embalajes utilizados.
- Estanterías.
- Pasillos interiores.

Para determinar este volumen, se tienen dos posibilidades:

- A. Que se especifique en el proyecto. En esta opción se han analizado debidamente cada uno de los factores anteriormente citados.
- B. Que se deba estimar. En este caso, hay una serie de tablas que dan un volumen en función del producto y su cantidad o en función de la cantidad y la temperatura de diseño:

Cámaras de Conservación	
Carne de Cerdo Colgada	300-350 kg/m ³
Frutas	200-250 kg/m ³
Pescado	350-400 kg/m ³
Huevos	300 docenas/m ³

Cámaras de Congelación	
Buey	400-500 kg/m ³
Cordero	400-500 kg/m ³
Cerdo	350-500 kg/m ³

Previsión General
200 kg/m ³ , en recintos con temperatura positiva
300 kg/m ³ , en recintos con temperatura negativa

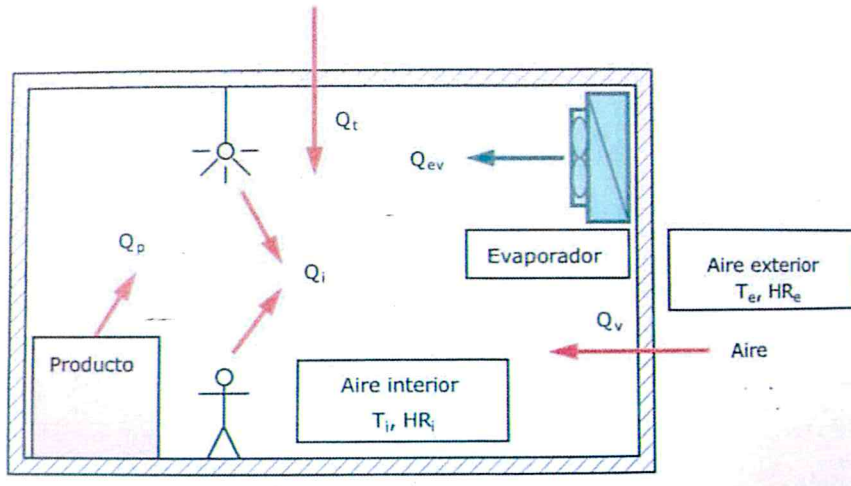
7.2. Cargas Térmicas

Otro aspecto a tener en cuenta para el dimensionado de la cámara frigorífica es la carga térmica de refrigeración, que es el calor que debe extraer la máquina para mantener la temperatura de diseño.

Este calor que se extrae tiene como objetivo:

- Enfriar el producto almacenado en la cámara: \dot{Q}_p

- Contrarrestar las ganancias de calor a través de los cerramientos de la cámara: \dot{Q}_t
- Contrarrestar las ganancias de calor internas: \dot{Q}_i
- Contrarrestar las ganancias de calor debidas a la renovación o infiltración de aire: \dot{Q}_v



Por tanto, la potencia frigorífica total del evaporador de la máquina frigorífica debe ser a suma de los anteriores factores:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_t + \dot{Q}_i + \dot{Q}_v$$

A continuación se describirá cómo se obtienen las diferentes cargas térmicas.

7.2.1. Cargas Debidas al Enfriamiento del Producto

En estas cargas pueden darse dos opciones, que la cámara frigorífica sea de refrigeración o de congelación.

7.2.1.1. Conservación o Refrigeración

Esta carga se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{p(ref)} = c_{pr} \cdot m \cdot (T_p - T_f) \quad (kJ/día)$$

Donde:

- c_{pr} : Calor específico del producto por encima del punto de congelación (kJ/kg·K). Existen tablas donde se muestran este valor en función del producto. Si no se conoce, se puede usar 3.5 kJ/kg·K.
- m : Masa de mercancía que ha de enfriarse (kg/día). Este valor lo debe especificar el cliente o el proyecto. En el caso de no facilitarse, se considera el 10% de la cantidad total almacenada en el recinto.
- T_p : Temperatura del producto al entrar en la cámara (°C). Como normalmente es desconocido, se usa 25°C para productos en general o 15°C para productos refrigerados anteriormente.
- T_f : Temperatura final del enfriamiento (°C), que en este caso es superior a la temperatura de congelación.

7.2.1.2. Congelación

En este caso, debido al cambio de estado que hay de por medio, se comprenden tres etapas:

1. Calcula el frío necesario para disminuir la temperatura de la mercancía desde la entrada hasta la congelación:

$$Q_{p(con1)} = c_{pr} \cdot m \cdot (T_p - T_0) \quad (kJ/día)$$

Los parámetros son los mismos que usados en refrigeración a excepción de:

- T_0 : Temperatura de congelación del producto (°C). Esta se obtiene en tablas en función de cada producto. En el caso de no estar indicada se utilizaría un valor de -2°C.

2. Calcula la energía necesaria para realizar el cambio de estado:

$$Q_{p(con2)} = L \cdot m \quad (kJ/día)$$

Donde:

- L : Calor latente de congelación (kJ/kg). Este valor también se muestra en tablas, y en el caso de ser desconocido se toma el valor de 272 kJ/kg
3. Calcula el frío necesario para disminuir la temperatura del producto desde el punto de congelación a la temperatura deseada. Se obtiene de forma semejante al paso 1:

$$Q_{p(con3)} = c_{pc} \cdot m \cdot (T_0 - T_c) \quad (\text{kJ/día})$$

Donde:

- c_{pc} : Calor específico del producto por debajo del punto de congelación (kJ/kg·K). Existen tablas donde se muestran este valor en función del producto. Si no se conoce, se puede usar 1.9 kJ/kg·K.
- T_c : Temperatura final de congelación (°C), que en este caso es inferior la temperatura de congelación.

En el caso de ser un producto ya congelado pero con una temperatura superior a la de diseño, el calor es el que se extrae para llevar el producto a dicha temperatura.

Con las tres etapas se obtiene la carga debida al producto para una cámara frigorífica de congelación:

$$Q_{p(con)} = Q_{p(con1)} + Q_{p(con2)} + Q_{p(con3)} \quad (\text{kJ/día})$$

7.2.1.3. Calor desprendido por ciertos productos

Para un buen dimensionado se ha de tener en cuenta que ciertos productos generan calor. Este es el caso, por ejemplo, de las frutas y las verduras que continúan con su proceso de maduración en el interior de las cámaras, aportando un calor adicional denominado “calor generado por respiración”.

Hay que tener en cuenta que un producto ya almacenado reduce su metabolismo, mientras que uno que este a temperatura ambiente, su calor generado por respiración será mayor. Por ello, el calor se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_{p(resp)} = L_{resp} \cdot m + 1.675 \cdot M \quad (kJ/día)$$

El primer término corresponde al calor generado por productos recién introducidos en la cámara, mientras que el segundo término es el calor generado por los productos ya almacenado. Los parámetros desconocidos que intervienen en la fórmula son:

- L_{resp} : Calor de respiración del producto a la entrada (kJ/kg). Se obtiene por tablas y si se desconoce se utiliza 9.2 kJ/kg.
- 1.675: Coeficiente de respiración a utilizar para el producto almacenado (kJ/kg).

7.2.1.4. Calor desprendido por el embalaje

Si el producto se almacena en envases, se debe contabilizar el frío empezado en reducir su temperatura. El enfriamiento del embalaje se calcula:

$$Q_{p(emb)} = c_e \cdot m_e \cdot (T_e - T_i) \quad (kJ/día)$$

Donde:

- c_e : Calor específico del embalaje (kJ/kg·K). Existen tablas donde se muestran este valor en función del material (Madera es 2.72 kJ/kg·K)
- m_e : Masa del embalaje (kg). Si se desconoce se considera que es el 5% del producto embalado, es decir, $0.05 \cdot m$.
- T_e : Temperatura del embalaje al entrar en la cámara (°C). Se considera semejante a la del producto.
- T_i : Temperatura final del embalaje (°C), que en este caso es la temperatura en el interior de la cámara.

7.2.2. Ganancias de Calor a través de los Cerramientos

La entrada de calor por paredes, techo y suelo de la cámara es inevitable, pero puede reducirse eficazmente aislando toda la superficie del espacio refrigerado. Cabe destacar que la elección del aislamiento es uno de los aspectos más importantes a la hora de construir una cámara frigorífica.

Este cálculo se realiza para cada superficie por separado y se suman al final.

Las ganancias de calor a través de los cerramientos se obtienen de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_t = A \cdot U \cdot (T_e - T_i) \quad (W)$$

Donde:

- T_e : Temperatura exterior (°C).
- T_i : Temperatura interior (°C), que en este caso es la temperatura en el interior de la cámara.
- A : Área exterior del cerramiento (m²).
- U : Coeficiente global de transmisión de calor (W/m²). Este valor se obtiene de la siguiente fórmula:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}}$$

Donde:

- h_i : Coeficiente de convección interior (W/m²·K).
- h_e : Coeficiente de convección exterior (W/m²·K).
- e_x : Espesor de las distintas capas de cerramiento (m).
- λ_x : Conductividades de las distintas capas del cerramiento (W/m·K)

En la práctica existen casos donde solo se tienen en cuenta la resistencia ofrecida por el aislamiento, por lo que la fórmula se reduciría a:

$$\dot{Q}_t = A \cdot \frac{\lambda_{aislam}}{e_{aislam}} \cdot (T_e - T_i) \quad (W)$$

7.2.3. Ganancias de Calor Internas

7.2.3.1. Calor Aportado por Motores

Este corresponde al calor causado por motores o máquinas dentro de la cámara, como pueden ser los ventiladores del evaporador, que son las cargas de este tipo más comunes, o de las carretillas elevadoras encargadas de transportar la mercancía. La expresión que se aplica es:

$$Q_{i(mot)} = P \cdot \frac{t}{24} \quad (W)$$

Donde:

- P : Potencia de todos los motores (W).
- t : Tiempo de funcionamiento (horas).

7.2.3.2. Calor Aportado por Personas

Este es el calor que aporta el personal que trabaja dentro de la cámara frigorífica.

Dicha carga se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_{i(per)} = \frac{n \cdot q \cdot t}{24} \quad (W)$$

Donde:

- n : Número de personas dentro de la cámara frigorífica.
- t : Tiempo de permanencia del individuo (horas/día).
- q : Calor emitido por individuo y hora (W). Se obtiene de la siguiente expresión ajustada con datos empíricos:

$$q = 270 - 6 \cdot T \quad (W)$$

Donde:

- T : Temperatura en el interior de la cámara (°C).

7.2.3.3. Calor Aportado por Luminarias

La expresión para obtener las cargas de las luminarias es muy parecida a la de los motores eléctricos:

$$Q_{i(lum)} = \frac{f \cdot P \cdot A \cdot t}{24} \quad (W)$$

Donde:

- f : Factor que se ha de tener en cuenta en función de la luminaria usada. En el caso de ser lámparas de descarga se aplicaría un factor de 1.3.
- P : Potencia por metro cuadrado de las luminarias (W/m^2). Si no se tiene este dato se usa $12 W/m^2$.
- A : Superficie de la cámara frigorífica (m^2).
- t : Tiempo de uso (horas). Este debe ser semejante al tiempo que permanece el personal dentro de la cámara, ya que si no hubiera nadie las luces permanecerían apagadas.

7.2.3.4. Aproximación de Calor Aportado por Personas y Luminarias

Como el tiempo en que permanece dentro el personal y las luminarias están encendidas puede variar mucho, se dificulta la obtención de las cargas generadas por estos dos parámetros. Por ello, se hace la siguiente aproximación:

- Cámaras de Refrigeración:

$$Q_{i(per)+i(lum)} = 0.10 \cdot (\dot{Q}_{p(ref)} + \dot{Q}_t + \dot{Q}_v) \quad (W)$$

- Cámaras de Congelación:

$$Q_{i(per)+i(lum)} = 0.05 \cdot (\dot{Q}_{p(con)} + \dot{Q}_t + \dot{Q}_v) \quad (W)$$

7.2.4. Ganancias de Calor debidas a Renovación de Aire

En la cámara frigorífica debe existir ventilación suficiente para sustituir periódicamente el aire viciado por aire fresco. Normalmente esta renovación del aire se realiza con la puerta de la cámara. Esta carga viene definida de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_v = n \cdot V_i \cdot (h_e \cdot \rho_e - h_i \cdot \rho_i) \quad (\text{kJ/día})$$

Donde:

- n : Número de renovaciones de aire por día.
- V_i : Volumen interior de la cámara (m^3).
- h_e : Entalpía del aire exterior (kJ/kg).
- h_i : Entalpía del aire interior (kJ/kg).
- ρ_e : Densidad del aire exterior (kg/m^3).
- ρ_i : Densidad del aire interior (kg/m^3).

7.3. Tiempo de Funcionamiento del Equipo de Refrigeración

El tiempo de funcionamiento del equipo será menor de 24 horas, ya que se tienen en cuenta los periodos de desescarche del evaporador.

Este tiempo va en función del tipo de máquina:

- Cámaras con temperaturas positivas: Son aquellas que trabajan por encima de 1°C , es decir las cámaras refrigerantes. En estas se consideran 16 horas de funcionamiento diario del equipo y 8 horas para el desescarche.

Esto quiere decir que el equipo de refrigeración debe tener suficiente capacidad para obtener en 16 horas de funcionamiento real el equivalente de 24 horas de enfriamiento.

- Cámaras con temperaturas negativas: Son aquellas que trabajan por debajo de 0°C, es decir las cámaras de congelación. En estas se consideran de 18 a 20 horas de funcionamiento.

7.4. Potencia Frigorífica Total

Para las cámaras frigoríficas, como se ha podido apreciar, la carga de enfriamiento total se calcula para un periodo de un día.

Como la capacidad del equipo de refrigeración se expresa en kW, las cargas que estén expresadas en kJ/día deben convertirse a kW. Esto se consigue dividiendo la carga en cuestión por los segundos que tienen las 24 horas del día. Una vez hecho esto se puede obtener \dot{Q}_{ev} en kW.

Esta potencia (kW), que es la que requerirá el evaporador de la cámara frigorífica para llevar los productos a la temperatura deseada, se obtiene de la siguiente manera:

$$P = \frac{24}{t_f} \cdot (\dot{Q}_{ev} + 0.1 \cdot \dot{Q}_{ev})$$

Donde:

- t_f : Tiempo de funcionamiento (horas).
- \dot{Q}_{ev} : Potencia frigorífica total del evaporador (kW)

Se tiene en cuenta un 10% más de \dot{Q}_{ev} para posibles variaciones de carga.