

3. Revisión Bibliográfica

3.1 Situación Actual

*E*s importante conocer tanto el proceso de producción de los quesos, como las condiciones en las que se opera actualmente ya que es el punto de partida para implementar mejoras. Así mismo, las condiciones en las que trabaje el equipo se verán fuertemente influenciadas por el efecto que tiene el medio ambiente sobre cada componente.

3.1.1 Condiciones Presentes

El rancho Las Cañadas, además de ser un centro de investigación, procesa productos orgánicos tanto agrícolas como lácteos y sus derivados. Se vende leche fresca, mantequilla, yogurt, crema, quesos frescos y maduros. Los quesos maduros que se producen son tipo Manchego, Botanero, Chihuahua y Port Salut.

El proceso de producción de los quesos consta de diversos pasos. Después de pasteurizar la leche, se le aplican una serie de cambios drásticos de temperatura en los cuales se mide la acidez. Una vez que se alcanza el pH deseado, se agrega cuajo y los cultivos respectivos para cada tipo de queso y se deja reposar. Se corta y se mueve hasta llegar a cierto pH nuevamente. El suero es separado y utilizado para enriquecer la composta. Después de exprimir el queso se pesan 500 gramos aproximadamente y se colocan en mantas dentro de los moldes. Se prensan las piezas y se colocan sobre láminas de ventilación en refrigeradores a temperaturas entre 4 y 6°C. Las piezas se secan de tres días a una semana, volteándolas diario para que el secado sea homogéneo. Finalmente se empacan al alto vacío y se llevan a las tiendas de distribución.

Existen diferentes requerimientos energéticos y de refrigeración al producir derivados de la leche. La cámara fría que se propone cubrirá las funciones de un cuarto de secado-maduración. La producción promedio de quesos se muestra en la **tabla 3.I**. En total se tienen 240 piezas aproximadamente almacenadas en cualquier momento, debido a la maduración semanal necesaria. Actualmente dicho almacenaje se hace en el pueblo vecino de Huatusco de Chicuellar, en un local rentado en donde se localiza el taller debido a que el rancho no cuenta con suministro de energía eléctrica y para mantener los refrigeradores funcionando se necesitaría un generador de electricidad de diesel.

Tabla 3.I Producción

PRODUCTOS	No. de pzas almacenadas por semana	Peso prom por pieza (gr)	Peso total (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm³)
Queso Chihuahua	80	400	32	11	4	380.13
Queso Manchego	80	400	32	11	4	380.13
Queso Botanero	40	400	16	11	4	380.13
Queso PortSalut	40	300	12	11	3	285.10
TOTAL	240		92			1425.50

Inicialmente, toda la producción de lácteos se hacía dentro del rancho, pero la producción estaba limitada por no contar con sistemas de refrigeración. Entonces se decidió rentar un local en Huatusco. Por conveniencia del rancho, han decidido que el taller debería localizarse dentro de la propiedad. Así ya no habría que incurrir en gastos de transporte de la materia prima desde la ordeña hasta el taller. De esta forma, tampoco se pagaría la renta del local, ni por la energía que consumen los refrigeradores actuales ya que forzosamente deben ser sistemas que utilicen energías alternas. Además tendrían un espacio diseñado a sus necesidades específicas. El diseño de la distribución propuesta para la cámara de refrigeración se describe en el capítulo 4.2 y un esquema del sistema se encuentra en el Anexo A.

3.1.2 Entorno

Las Cañadas se encuentra en la latitud norte $19^{\circ} 09'$ y longitud oeste $96^{\circ} 58'$ por lo que se tiene un clima subtropical perennifolio al encontrarse a 1300 msn. El terreno es muy accidentado ya que forma parte de la Sierra Madre Oriental. Por esto mismo, prácticamente todo el terreno tiene fuerte pendiente e importantes desniveles. Tiene abundante vegetación que varía desde encinos hasta helechos, pastizales y pinos.

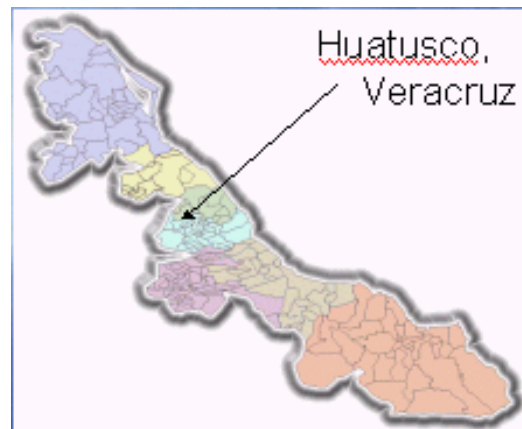
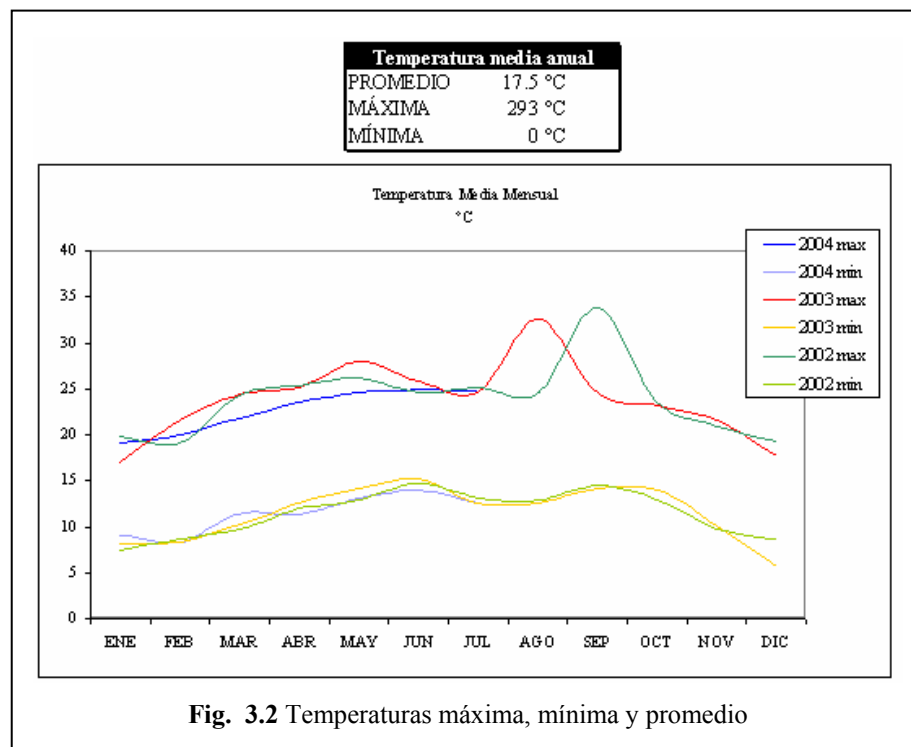
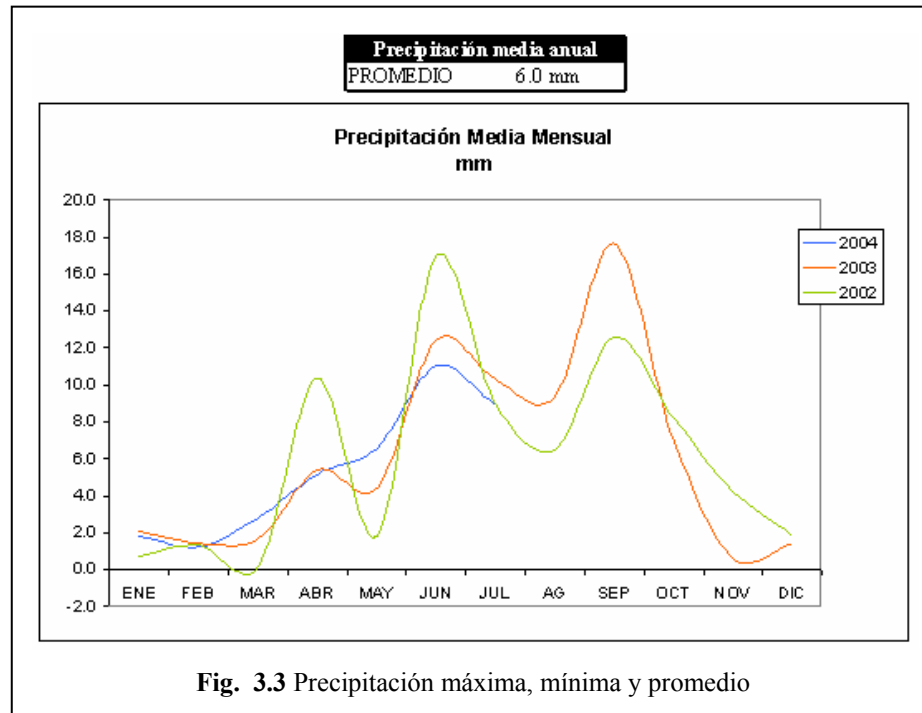


Fig. 3.1 Localización del rancho

También es importante conocer el climaⁱ del lugar ya que son las condiciones con las que operará el cuarto frío propuesto. En los datos climatológicos de las **figuras 3.2 y 3.3**, se puede observar que la temperatura máxima alcanzada en los tres últimos años fue de 29.3 °C mientras que se ha mantenido un promedio de 17.5 °C. Por otra parte, todo el año hay importante precipitación y por lo tanto alta humedad relativa; el máximo obtenido fue de 18 mm, siendo los meses más húmedos de junio a septiembre.



ⁱ Los datos se tomaron de la estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Golfo Centro en la Jefatura de Proyecto de Hidrometeorología, localizada en la Universidad Autónoma de Chapingo que colinda con Las Cañadas.



3.1.3 Propiedades de los quesos

Para no alterar las propiedades de los quesos, es importante mantener las condiciones actuales en las cuales se maduran. Éstas varían mucho dependiendo del tipo, contenido de grasa, humedad, etc. Los rangos recomendados⁽⁴²⁾ para quesos maduros son entre 0 y 10 °C ya que, según el tiempo de almacenamiento, se puede formar una capa gruesa cuyo sabor y textura hace que cambien las propiedades del producto. Otra condición que se debe controlar es la humedad del cuarto de maduración, la cual se propone entre 40 y 90% de humedad relativa (HR)⁽⁴²⁾. Actualmente, los quesos tipo Manchego, Chihuahua y Botaneroⁱⁱ tienen un tiempo de maduración de cuatro a siete días, en los cuales deben conservarse bajo condiciones controladas.

ⁱⁱ El queso Botanero es queso tipo Manchego mezclado con chile seco

El secado se lleva a cabo dentro de refrigeradores a temperaturas menores a 6°C y se debe mantener el ambiente con una HR de 40% mientras se maduran. Ya empacados, se almacenan en las tiendas en refrigeradores convencionales a la misma temperatura y la humedad relativa no es relevante al estar envasados al vacío. En el cuarto de secado, dichas condiciones se mantendrán para no alterar las propiedades, sabores y texturas de los productos que se refrigerarán.

3.2 Sistemas de Refrigeración

Se han estudiado y desarrollado muchos sistemas de refrigeración a lo largo del tiempo. En este capítulo se hace una breve recopilación de los acontecimientos que precedieron a los refrigeradores que conocemos hoy en día. De los distintos equipos que existen, se discutirán tres de los más relevantes para esta investigación. Como punto de partida se tomó el sistema de compresión de vapor que es el más comúnmente utilizado en la actualidad. Por otro lado, hay dos sistemas importantes que no necesariamente utilizan energía eléctrica como fuente de alimentación por lo que son de gran interés para el proyecto. Uno es la refrigeración por absorción, que si bien, no se trata de tecnología nueva, se ha indagado de manera significativa dado el principio de funcionamiento que se menciona en este capítulo. El otro es la refrigeración magnética que se trata de investigaciones relativamente recientes sobre distintos principios térmicos útiles para el enfriamiento de cuerpos.

3.2.1 Antecedentes históricos

En Francia, en época de Napoleón, sólo las clases altas podían almacenar carne con hielo por lo que era necesario algún método de preservación más accesible y surgió la refrigeración mecánica. En 1748 se hizo el primer intento de enfriamiento mecánico usando la evaporación del éter al vacío⁽⁶⁾. Fueron creciendo las industrias, y era cada vez más necesario un sistema de refrigeración, por lo que a partir de 1850 hubieron grandes avances mundialmente: surge el sistema Twinning para hacer hielo; aparece el amoníaco como refrigerante, aumentando la eficiencia y la confiabilidad; 1859, Ferdinand Carré crea el sistema reciprocante. Posteriormente, Nyce construye su primer cuarto frío usando charolas de enfriamiento seguido por Dr. Howard que, en 1869, comienza los diseños para sistemas que puedan ser utilizados en las zonas semi-tropicales usando hielo salado.⁽²⁶⁾

Hasta 1930 se continuaba usando el enfriamiento con hielo y sal para almacenar productos lácteos, vegetales y frutas; pero se necesitaban temperaturas aún menores, por ejemplo para helados y mantequilla. Además los primeros refrigerantes eran, en ocasiones, venenosos o explosivos, y necesitaban compresores grandes por lo que las plantas eran voluminosasⁱ. Fue difícil el desarrollo de estos sistemas debido a que la transferencia de calor de un cuerpo frío a uno más caliente es imposible de manera espontánea por lo que es necesario aplicar energía.⁽⁵⁾

ⁱ Debido a que numerosos hombres han intervenido en el desarrollo de la refrigeración, aquí sólo se mencionan algunos pero la lista completa se puede encontrar en el Manual de la Asociación Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

En la refrigeración mecánica existen dos ciclos principalmente. Uno que necesita de un compresor, Ciclo de Compresión de vapor, y el otro que trabaja con el principio de cambios de temperatura y presión como resultado de la aplicación de calor, o Ciclo de Absorción. Recientemente se han estudiado otros métodos de enfriamiento menos contaminantes, uno de ellos es la refrigeración magnética. Los tres sistemas se describirán brevemente en las siguientes secciones.

3.2.2 Sistema convencional de compresión de vapor

El ciclo de compresión de vapor ideal funciona como un ciclo de Carnot inverso. Está compuesto por los siguientes elementos: compresor, intercambiador de calor (serpentín) interno y externo, válvula de expansión y fluido refrigerante.

Como se observa en la **figura 3.4**, el líquido refrigerante circula por la tubería y los distintos equipos en los cuales el fluido, por medio de diferentes cambios de estado, regresa al punto inicial formando un ciclo. Antes de la válvula de expansión, el refrigerante se encuentra en estado líquido a una presión y temperatura relativamente altas. Al pasar por una restricción en la válvula, pierde presión suficiente para que una porción se convierta en gas. Dicho cambio requiere

de energía, la cual es tomada del espacio refrigerado. En una segunda etapa, el refrigerante fluye al evaporador donde se realiza la transferencia de calor del aire hacia el refrigerante. Éste ebulle y sale del evaporador en estado

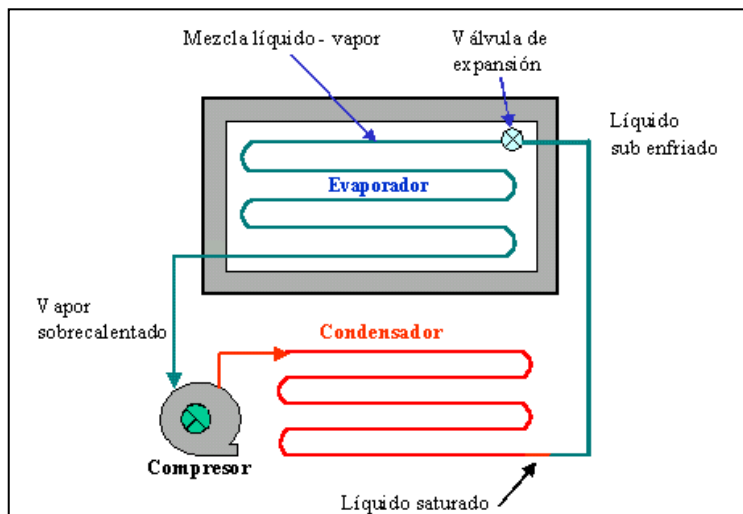


Fig. 3.4 Sistema por compresión de vapor

gaseoso. Para la tercera etapa, se encuentra a presión y temperatura baja, por lo que se deben obtener las condiciones iniciales (líquido a presión alta). Con el compresor, el gas recupera la presión necesaria y como efecto secundario se calienta. Para devolverlo a su estado líquido es necesario remover calor, por lo que se necesita un condensador, en el cual otro fluido absorbe la energía y devuelve al refrigerante su temperatura inicial.

3.2.3 Sistema por absorción

La principal diferencia entre la refrigeración por absorción y la de compresión de vapor es que la primera no requiere de un compresor, la energía que usa es en forma de calor, por lo que se disminuye el ruido, vibración y peso. Éste es sustituido por un tanque de absorción en el cual se mezclan dos sustancias. Algunos gases son absorbidos por otras sustancias, por ejemplo la sal de mesa absorbe agua, del mismo modo que el bromuro de litio (LiBr) y el amoníaco (NH_3). Los tipos de sistemas por absorción varían por las sustancias que son absorbidas. Existen principalmente dos tipos de refrigeradores por absorción: los que usan compuestos absorbentes sólidos (Faraday) y otros en que el absorbente es líquido (Electrolux).

El principio de absorción fue descubierto por Michael Faraday en 1824. Su objetivo inicial era licuar ciertos gases que se creían sólo existían en forma de vapor. Entre ellos se encontraba el amoníaco. Faraday sabía que el cloruro de plata (AgCl) tenía la propiedad de absorber grandes cantidades de vapor de amoníaco. Expuso el polvo de AgCl al amoníaco gaseoso y cuando ya había absorbido la mayor cantidad posible, selló el compuesto en un tubo de ensayo en forma de V invertida.

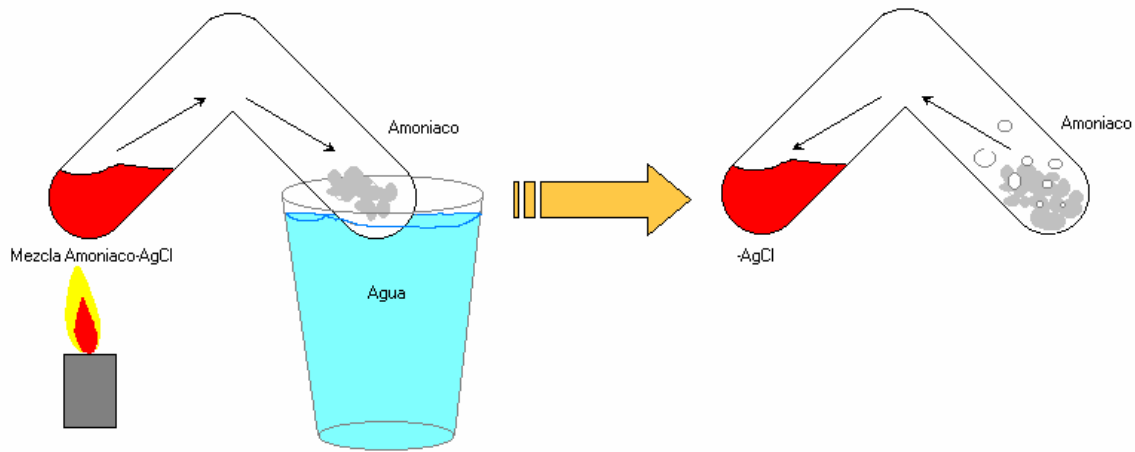
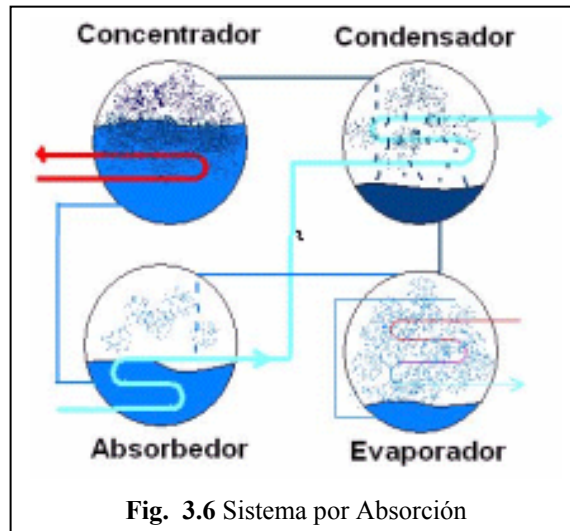


Fig. 3.5 Experimento de M. Faraday

Como se ilustra en la **figura 3.5**, al aplicar calor al extremo que contenía la mezcla de amoníaco-cloruro de plata y sumergir el otro extremo en agua para enfriarlo, el calor liberaba el amoníaco y se formaban gotas de éste en el extremo frío. Faraday continuó el calentamiento hasta obtener suficiente amoníaco líquido. Una vez obtenido el líquido, eliminó la fuente de calor y observó lo que ocurría. Unos cuantos momentos después, se dio cuenta de algo fuera de lo común. El amoníaco líquido, en lugar de permanecer líquido comenzó a burbujear violentamente ya que volvía a su estado gaseoso y éste a su vez era reabsorbido por el AgCl. Al tocar el extremo del amoníaco líquido, se dio cuenta de que éste se enfriaba. El amoníaco, al cambiar de líquido a vapor, extraía calor.

Utilizando este principio, se diseñó el sistema de refrigeración por absorción. El sistema consta de cuatro etapas que ocurren en distintos equipos: evaporador, concentrador, absorbedor y condensador. De manera general, en la **figura 3.6** se describe el proceso.



En el evaporador, por la parte superior, se dispersa el refrigerante. Éste se evapora parcialmente por haber baja presión y absorbe calor proveniente del refrigerante en el serpentín. Éste cambia parcialmente de estado, no todo se evapora, así que es recirculado por una bomba hacia el aspensor. Para evitar la acumulación de vapor, el absorbedor a presión y temperatura baja, por medio de una sustancia absorbente, retira parte del vapor convirtiéndolo en líquido concentrado. Este proceso es exotérmico por lo que se libera el calor ya sea en agua de enfriamiento o al exterior.

La solución se va diluyendo al absorber el vapor, por lo que es bombeada al concentrador, o también llamado generador, donde es calentado para que parte del agua absorbida se evapore. La solución concentrada se devuelve al absorbedor. El vapor del refrigerante se lleva a una cuarta etapa, el condensador, donde cambia a estado líquido y se libera calor. Posteriormente es regresado al evaporador por una válvula de expansión cambiando de estado. Por otro lado la solución diluida, separada en el generador, fluye de regreso al absorbedor después de pasar por una

válvula de expansión cambiando nuevamente el estado. Se requiere de una cantidad despreciable de trabajo mecánico para operar la bomba.ⁱⁱ

Como se puede observar, el refrigerante es alternadamente absorbido y liberado por el absorbente. Es esencial que los componentes de la mezcla binaria tengan puntos de evaporación suficientemente distintos. El absorbente debe evaporarse a temperaturas muy altas y absorber el refrigerante fácil e intensamente en un rango amplio y a bajas temperaturas y presiones. Por otro lado, el refrigerante debe evaporarse del absorbente a presiones y temperaturas altas. Las mezclas binarias más utilizadas son amoníaco-agua y bromuro de litio-agua.

3.2.4 Refrigeración magnética

En los últimos años se han hecho fuertes investigaciones alrededor de la refrigeración magnética la cual, en vez de utilizar refrigerantes que dañen la capa de ozono y compresores que consumen energía, utilizan agua y metales. El sistema de enfriamiento funciona por medio de imanes que operan a temperatura ambiente y se muestra en la **figura 3.7**.

Se ha demostrado que el metal de gadolinio se calienta al ser expuesto a un campo magnético y al retirarlo se enfría. El diseño consiste en un disco que contiene segmentos de polvo de gadolinio y un imán permanente. El disco pasa por una abertura en el imán donde se concentra el campo magnético. Por efecto magneto-calórico, el gadolinio se calienta al entrar al campo magnético; este calor se retira con agua. Al salir del campo, el material se enfría como resultado del mismo efecto magneto-calórico. Una segunda corriente de agua es enfriada y posteriormente circulada por los serpentines de un refrigerador.⁽³⁸⁾ Karl A.

ⁱⁱ El ciclo está descrito de manera general para mezclas binarias

Gshneider y Carl B. Zimm construyeron una unidad de refrigeración magnética pero los imanes que utilizaba eran superconductores suministrados por energía eléctrica, por lo que era impráctico para usos domésticos.⁽⁴³⁾ Las investigaciones posteriores sustituyeron el superconductor con un imán permanente lo que redujo considerablemente el tamaño del equipo.

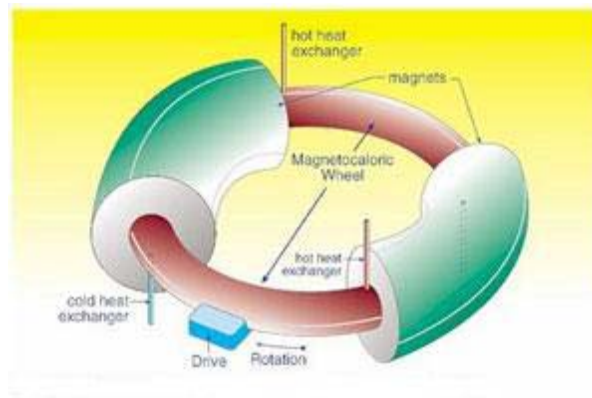


Fig. 3.7 Refrigeración magnética. Fuente:
<http://www.external.ameslab.gov/news/release/01magneticrefrig.htm>

El resultado es un mecanismo compacto que no produce ruido ni vibraciones, que no utiliza gases destructores de la capa de ozono y no requiere de aplicación de energía más que para los motores que hacen girar el disco. Estos avances son grandes, pero es necesario realizar más experimentos e investigaciones para poder explotar las capacidades de este método de refrigeración.

3.2.5 Comparación, ventajas y desventajas

Los sistemas por compresión tienen un diseño compacto en sus elementos, además de ser relativamente fáciles de mantener. Tienen un alto coeficiente de desempeño, son confiables y seguros. La gran desventaja es que el compresor requiere de trabajo, que difícilmente se puede obtener por medios distintos a la

energía eléctrica. Si se utilizara la energía solar por medio de celdas fotovoltaicas, se necesitaría de una inversión muy alta debido a que éstas aún están muy encarecidas. Por otro lado la refrigeración magnética está apenas desarrollándose en prototipos y requiere de más investigaciones para lograr su aplicación en industrias actuales.

Por su parte, aunque son más complejos, los sistemas de absorción se vuelven económicamente atractivos cuando existe una fuente gratuita o barata de energía térmica en un rango de temperaturas de 100 a 200°C, como sería la energía geotérmica, la solar y la cogeneración de desechos, así como también el gas natural.⁽⁴⁾

Tanto los sistemas de compresión de vapor como los de absorción logran la remoción de calor por medio de la evaporación de un refrigerante a presiones bajas y la liberación del calor por medio de la condensación del mismo a una presión más alta. La manera de realizar el cambio de presión hace la diferencia fundamental entre los sistemas. El ciclo de compresión emplea un compresor mecánico, mientras que el sistema de absorción logra el enfriamiento por medio de un fluido secundario (absorbente). Por lo mismo, el requerimiento energético del ciclo de compresión es mucho mayor al del sistema de absorción. En el sistema de absorción, la energía puede ser suministrada por medio de colectores solares, combustión de biogásⁱⁱⁱ, o bien cogeneración de residuos. Es por esto que, para aplicaciones donde el suministro de energía eléctrica es limitado, como son zonas rurales, el sistema de refrigeración por absorción es más atractivo.

En cuanto al coeficiente de desempeño, COP por sus siglas en inglés, de ambos sistemas, es difícil hacer una comparación directa. Para hacer un paralelo más realista se debe considerar la eficiencia térmica de la planta de poder de donde se obtuvo la electricidad para un sistema de compresión mecánica. También

ⁱⁱⁱ Biogás: combinación de metano y bióxido de carbono producido en los procesos de fermentación de productos orgánicos como puede ser en una composta, biodigestor, etc.

deben incluirse las pérdidas del compresor. De este modo se ha demostrado que el sistema de compresión es ligeramente superior, termodinámicamente, al sistema de absorción. ⁽²⁵⁾

Independientemente del COP, los sistemas por absorción tienen algunas ventajas prácticas sobre la compresión mecánica. Tienen menor desgaste y por lo tanto requiere de menos mantenimiento. La selección entre un sistema por absorción y uno por compresión está fuertemente determinada por factores económicos. El SRA es económicamente atractivo cuando los costos de electricidad son altos o las facilidades no son adecuadas para un compresor. ⁽⁴⁾

En la **tabla 3.II** se muestra un cuadro en el cual se hace una comparación general de los tres sistemas de refrigeración.

Tabla 3.II Comparación de Sistemas

	Compresión	Absorción	Magnética
Entrada de energía	Compresión de refrigerante	Regeneración del refrigerante	Motor para girar disco
Libera calor	Condensador	Condensador	Aplicación campo magnético
Diferencia	Compresor	Absorbedor y Generador	Disco de gadolinio
Absorbe calor	Evaporador	Evaporador	Retirar campo magnético
Refrigerante	R-134a	LiBr - agua amoníaco - agua	Agua

3.3 Equipos Necesarios

*L*os elementos necesarios en un sistema de refrigeración por absorción serán brevemente descritos en esta sección para que posteriormente se detalle el diseño preliminar de cada uno. Con esta corta explicación se pretende caracterizar de manera general la tarea que deberá desempeñar cada uno de los dispositivos que se requieren. Algunos de los equipos son intercambiadores de calor, por lo que, para escoger entre los distintos tipos que existen, se utilizó la tabla 10-1 (Selection Guide Heat Exchanger Types, pg 9, volumen 3) de la segunda edición del libro “Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants”, Ludwig.

3.3.1 Evaporador

Este equipo es un intercambiador de calor en el cual el refrigerante cambia de fase y enfría los productos a refrigerar. Los evaporadores para refrigeración

pueden ser clasificados de acuerdo al método de alimentación como expansión directa o por inundación. En el primer caso, la salida del evaporador es un vapor ligeramente sobrecalentado que se alimenta en cantidades pequeñas para asegurar la vaporización completa al final del equipo. En el caso del evaporador por inundación, la cantidad de refrigerante excede la cantidad evaporada. La decisión depende del diseño. Un evaporador de expansión directa generalmente se utiliza en sistemas pequeños con diseños compactos y requiere de equipo de control de flujo con una válvula de termoexpansión o un tubo capilar.

Debido a que se requiere un nivel relativamente alto de transferencia de calor, Ludwig recomienda el uso de un intercambiador abierto de tubos, ya sean lisos o aletados para una mayor transferencia. Este no requiere de coraza como se muestra en la **figura 3.8**, únicamente de los tubos aletados y el coeficiente de transferencia es relativamente bajo si se utiliza convección natural, pero puede ser mejorado con un flujo forzado de aire a través de los tubos. En este caso no se considerará el uso de flujo forzado ya que los ventiladores implicarían un mayor requerimiento energético.

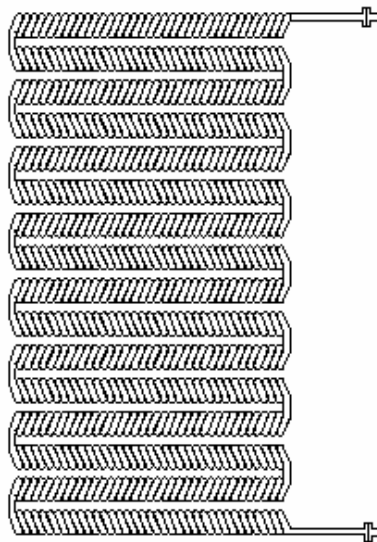


Fig. 3.8 Serpentín

3.3.2 Tanque de absorción

Este dispositivo tiene como objetivo poner en contacto dos corrientes para fusionarlas. Este proceso se conduce por medio de un tanque de mezclado. Como ya se mencionó en el capítulo 3.4 Fluidos de trabajo, el amoniaco se disuelve fácilmente en agua, y esta reacción ocurre exotérmicamente. La alimentación de la corriente rica en amoniaco debe de realizarse por la parte baja del tanque mientras que la solución pobre de amoniaco es alimentada por la parte superior (**figura 3.9**). Esto es para evitar que el amoniaco escape en forma de gas sin disolverse en la solución pobre.

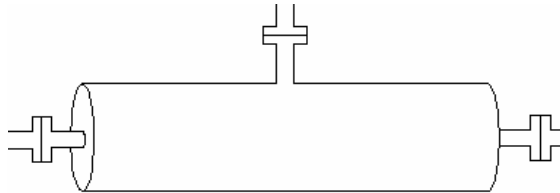


Fig. 3.9 Tanque de absorción

3.3.3 Generador

En este componente se aplica la energía térmica para reestablecer la concentración de la solución al hacer ebullición al amoniaco y recuperar el agua. Para lograr una separación eficiente es necesario utilizar una columna de rectificación o generador (**figura 3.10**). Éste consta de una serie de platos perforados o un empaque que se utiliza para separar los componentes de una mezcla entre las fases líquido y vapor. Generalmente la destilación se utiliza cuando todos los

componentes de la mezcla a separar son relativamente volátiles, por ejemplo soluciones de amoníaco, alcohol etílico, etc. La columna consiste en una estructura cilíndrica dividida en secciones por una serie de platos perforados que permiten el flujo ascendente de vapor. El flujo líquido gotea a través de cada plato descendiendo por un vertedero y un rebosadero al plato inferior. El vapor procedente del plato más alto pasa a un condensador, y el líquido resultante va a un acumulador, donde se retira parte como producto o destilado y otra porción se bombea a la parte superior de la columna como reflujo. El líquido de la parte inferior de la columna se transforma a la fase vapor utilizando un intercambiador. El líquido procedente de la columna sale como producto de los fondos o residuo y la mayor parte del componente volátil vuelve a la columna en forma de vapor.

La energía térmica que se utilizará en el generador es proporcionada principalmente por un quemador de metano. Los biodigestores, a partir de residuos orgánicos, producen un gas de baja energía o biogas. Esta biomasa es el material derivado de los organismos, esto quiere decir que del excremento del ganado puede obtenerse el biogas utilizando un digestor. El uso de un colector solar puede auxiliar instalarse de manera auxiliar para precalentamiento.

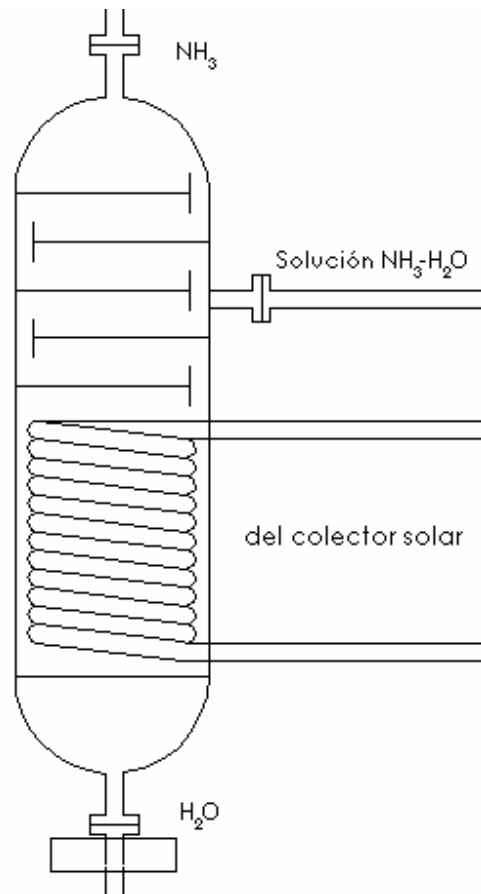


Fig. 3.10 Generador

3.3.4 Condensador

De manera similar al evaporador, se trata de un elemento en el cual el vapor de amoníaco que se obtuvo del generador se condensa por medio de un intercambiador de calor, pasa a la válvula de expansión y posteriormente se descarga en el evaporador. Así mismo, de acuerdo a la tabla 10-1, Ludwig, se recomienda un intercambiador de tubos aletados (**figura 3.11**) expuesto al medio ambiente para retirar el calor con el flujo natural de aire.

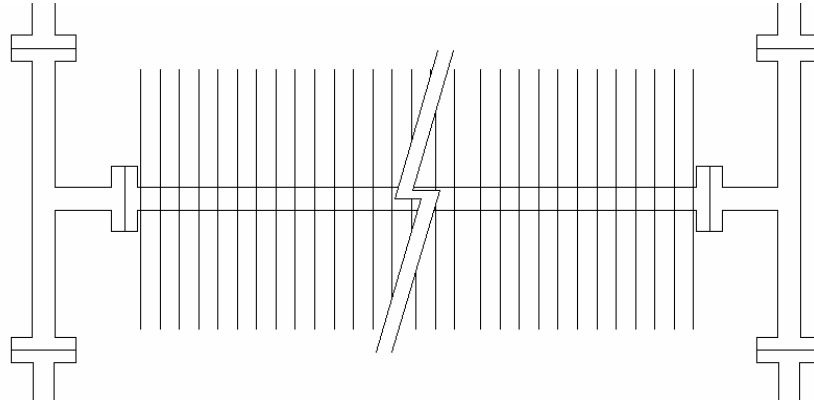


Fig. 3.11 Tubos aletados

3.3.5 Intercambiador de calor

Por cuestiones de eficiencia, se requiere de intercambiadores entre el condensador y el evaporador así como también entre el generador y el absorbedor. Para realizar la transferencia de calor se puede emplear un intercambiador de tubo en U esquematizado en la **figura 3.12**, ya que se trata de un equipo sencillo que realiza transferencias de calor altas si se utilizan baffles para aumentar la turbulencia en la corriente de la coraza.

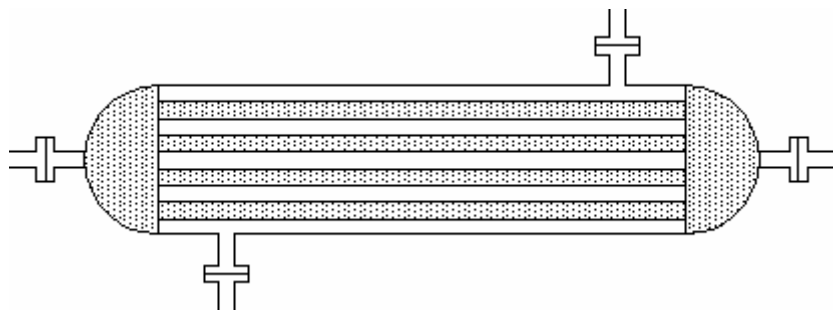


Fig. 3.12 Intercambiador de tubo en U

3.3.6 Colector solar

Los colectores solares son sistemas pasivos en los cuales un intercambiador de calor utiliza la radiación solar para calentar un fluido de trabajo. Para el calentamiento y enfriamiento se recomienda el uso de colectores planos y de tubos al vacío⁽¹⁹⁾. Debido a que el sistema requiere de temperaturas cercanas a 130°C, se necesitaría de un colector de tubos al vacío, pero se trata de un diseño muy complejo y costoso. Por otra parte, el uso de un colector plano (**figura 3.12**), si bien no alcanza las temperaturas que requiere el sistema, puede ser utilizado como un precalentamiento.

En el caso del rancho Las Cañadas, ya se han instalado biodigestores por lo que se tiene producción de metano de baja calidad o biogas que no se utiliza actualmente. Es por esto que se propone que el principal suministro de energía térmica sea por medio del biogas y que éste calentamiento sea auxiliado por colectores solares. Para el caso de otros ranchos en zonas rurales, la instalación de biodigestores es sencilla y de muy bajo costo.

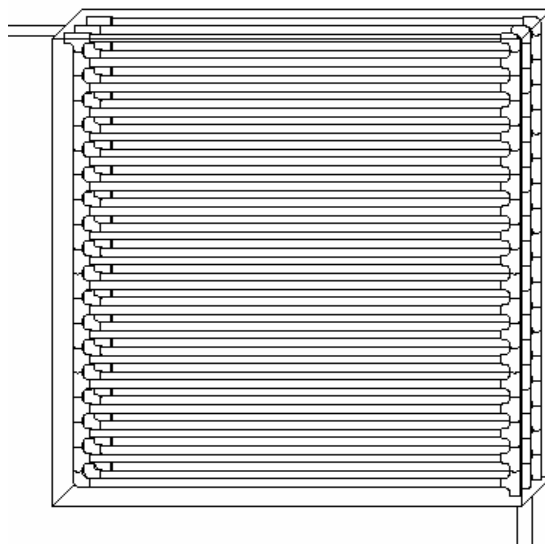


Fig. 3.13 Colector Solar

2.3.7 Controles

Cualquier mecanismo o aparato utilizado para arrancar, detener, ajustar, proteger o monitorear la operación es un equipo de control. El evaporador requiere como mínimo de un control de la alimentación del refrigerante. El manejo del flujo se realiza por medio de niveles, válvulas y bombas. Del mismo modo, se necesita regular el flujo de biogas en el quemador del generador para obtener la temperatura determinada. Así mismo es necesario el monitoreo de presión y temperatura en la diferentes etapas del sistema, no sólo para determinar la eficiencia y las condiciones de operación después de cada etapa, sino también por cuestiones de seguridad.

3.4 Fluido de Trabajo

*L*os sistemas de refrigeración necesitan usar un fluido como medio de transporte del calor, esto se logra al evaporar un refrigerante líquido en un evaporador y liberando el calor en el condensador por medio de un cambio de estado. Existen ciertas características que debe tener el refrigerante: no ser venenoso, explosivo, corrosivo ni flamable; poder detectar fácilmente las fugas; funcionar a bajas temperaturas (punto de ebullición bajo); ser un gas estable; y tener diferencia mínima entre presión de vaporización y de condensación⁽¹⁾. Los sistemas por absorción comercialmente disponibles existen principalmente en dos configuraciones: agua-LiBr y NH₃-agua.

3.4.1 Agua-Bromuro de Litio

El bromuro de litio, también conocido como monobromuro de litio, es un sólido cristalino ligeramente beige altamente higroscópico, esto quiere decir que

fácilmente absorbe agua. Esta misma propiedad hace que pueda ocasionar quemaduras severas debido a la deshidratación.

Se utiliza principalmente en aplicaciones para acondicionamiento de aire. El agua es el refrigerante que retira el calor del medio y el LiBr es el absorbente. La principal ventaja de esta mezcla es que el LiBr no es volátil por lo que en el generador se obtiene agua pura. Esto elimina la necesidad de una columna de rectificación que aumente la pureza del refrigerante. La mayor limitante de esta mezcla es el punto de congelamiento del agua, ya que será la temperatura del refrigerante y por lo tanto restringe la temperatura de operación.

3.4.2 Amoniaco-agua

El vapor de amoniaco es un gas incoloro con un fuerte olor. Puede ser detectado en el aire a concentraciones de 46.6 ppm. Al ser altamente irritante a las membranas mucosas y ojos, la mezcla no debe ser usada para acondicionamiento de aire, hospitales, etc. El límite de exposición es de 0.2%.⁽⁵⁾

Esta mezcla tiene muchas de las ventajas que se buscan en el refrigerante ideal, y por esta razón es tan comúnmente usado. Es químicamente estable y, si no se tienen fugas, una carga original permanecerá en buenas condiciones indefinidamente. Una de sus ventajas es su gran efecto de refrigeración. Es altamente volátil y no se quema a temperaturas atmosféricas a menos de ser expuesto a una flama. Se debe tener extremo cuidado al utilizar amoniaco como refrigerante, ya que al mezclarse con aire en concentraciones de 16-26% y ser comprimido, se forma una mezcla explosiva. No es miscible con aceite y corroe cinc, cobre y aleaciones de los mismos, pero tanto el acero como el hierro y aluminio son resistentes.

A presión y temperatura ambiente, un litro de agua puede disolver 700 litros (0.5 kg de gas amoníaco). Esta propiedad lo hace conveniente para usarse en sistemas de refrigeración por absorción que requieran temperaturas menores a 0°C a modo que el amoníaco sea refrigerante y el agua actúa como absorbente. De este modo se elimina el problema de congelamiento que se presenta con la solución $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ y se pueden alcanzar temperaturas extremadamente bajas por el bajo punto de congelamiento del amoníaco.

3.4.3 Selección de la mezcla

El sistema de bromuro de litio es el más sencillo. Algunas de las ventajas que presenta la mezcla $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$, es que el generador de este sistema opera satisfactoriamente con temperaturas de 90°C y tiene un coeficiente de desempeño comparativamente alto. Adicionalmente, no requiere de una columna de rectificación ya que al evaporar el agua de la mezcla, ésta se obtiene pura por que la sal de LiBr permanece en estado sólido. Pero la gran desventaja es que el evaporador no puede operar a temperaturas por debajo de 0°C .

Por su parte, el generador del sistema con amoníaco requiere de temperaturas más altas (120 a 150°C) por lo que el suministro de energía térmica es mayor que el de un sistema con LiBr . Para asegurar que no pase vapor de agua al evaporador se necesita de una columna de rectificación. Esto a su vez se convierte en una ventaja ya que, al asegurar que circula amoníaco puro por la tubería, es factible alcanzar temperaturas por debajo de 0°C ya que no existe agua que pudiera congelarse.

Por lo tanto, para aplicaciones que necesiten temperaturas de refrigeración superiores a los 0°C , utilizan bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para alcanzar temperaturas menores, es necesario ocupar amoníaco

como refrigerante y agua como absorbente. Para el caso de la refrigeración a 4°C, se recomienda un diferencial de temperaturas entre el cuarto frío y el refrigerante de 10 a 15°C, por lo que el refrigerante estará entre -5 y -11°C. Esto nos hace forzoso el uso de la mezcla NH₃-H₂O.

El diagrama termodinámico de la mezcla binaria de amoníaco-agua que serán necesarios se encuentra en el **anexo B** así como también la hoja de seguridad en el **anexo C**.

3.5 Aislamiento

Como se mencionó en el capítulo 3.2 Sistemas de Refrigeración, en tiempos precedentes al desarrollo tecnológico moderno, las comunidades acostumbraban conservar sus alimentos en cuevas subterráneas. El almacenamiento subterráneo ha existido desde que existe el razonamiento humano. Dónde existiera una caverna en una montaña o dónde hubiera hielo por unos cuantos meses cada año, las cuevas, ya sean naturales o hechas por el hombre, eran usadas para conservar comida por medio del frío. Pero dichas cavernas se ubicaban en lugares donde la temperatura ambiente también es muy baja por lo que no era muy común que hubiera asentamientos humanos.

Últimamente se ha retomado este procedimiento⁽²⁶⁾. Existen almacenes enterrados que cuentan con sistemas de refrigeración con amoníaco, pero además

necesitan ser deshumidificados para que el sistema funcione de manera satisfactoria¹.

El aislamiento, en un principio estaba hecho de estratos de roca, paja o pastura seca, tierra, barro, humus y arena. Con el tiempo se fueron desarrollando distintos métodos de aislamiento. Este depende del tipo de transferencia de calor que se esté anulando, puede ser de tres maneras: radiación, conducción y convección. En los almacenes subterráneos solo atiende la conducción. Los materiales cuya densidad sea alta, como metales o materiales sólidos y pesados, tienen mayor conductividad a comparación de aquellos que sean menos densos, fibra de vidrio, corcho, etc. Por lo mismo, los materiales porosos o con burbujas de aire y paredes fibrosas son excelentes aislantes.

Un buen aislante debe de tener las siguientes características: baja conductividad; manejo sencillo; resistencia a la descomposición natural, deterioro y absorción de olores; ser muy ligero; capacidad de mantener su volumen; resistencia a la humedad; e inflamable. Se recomienda el uso de aislantes inorgánicos o plásticos que sean no-higroscópicos, es decir, que no absorban agua. Los aislantes orgánicos higroscópicos funcionan con cierta humedad y grueso del aislante. Los aislantes reflectivos deben tener un mínimo de reflectividad del 95% en ambas caras.

El papel de los materiales aislantes es fundamental en el proceso, ya que depende de éste la eficiencia que tendrá el ciclo de refrigeración al mantener, o no, las condiciones deseadas dentro del cuarto de secado. Existen distintos materiales que se utilizan comúnmente, pero es importante considerar la disponibilidad de estos en las zonas rurales ya que forman parte importante del costo total del equipo. Otra cualidad que debe reunir todo material aislante es que tenga un

¹ Cabe destacar que los procesos de deshumidificación están estrechamente relacionados con técnicas de purificación de aire. Ambos son procedimientos muy complejos que no se detallarán en este trabajo.

coeficiente de conductividad térmica tan bajo como sea posible y que lo conserve a través del tiempo.

Se define como coeficiente de conductividad k a la cantidad de calor que pasa durante cierto tiempo determinado espesor dada el área de cierto material cuando el diferencial de temperaturas entre las caras de éste es de 1°C . Es decir, determina el poder de transmisión de calor a través de un cuerpo. La cantidad de calor que atraviesa un material de área A , está expresado por la **ecuación 3.1**:

$$Q = U A (T_1 - T_2) \quad \text{Ec. 3.1}$$

siendo U el coeficiente de transmisión de calor del aislante. Si está compuesto de una serie de materiales distintos, se calcula del siguiente modo:

$$1/U = 1/h_1 + x_1/k_1 + x_2/k_2 + \dots + x_n/k_n + 1/h_2 \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde a es el coeficiente de cambio de calor de los distintos materiales, x son los espesores y k los coeficientes de conductividad térmica. Si a un muro determinado, de coeficiente de transmisión de calor U , añadimos un espesor e de un aislante de coeficiente de conductibilidad k_1 , obtenemos una nueva pared compuesta, cuyo coeficiente de transmisión de calor U_1 se calcula con la **ecuación 3.3**:

$$1/U_1 = 1/U + e_1/k_1 \quad \text{Ec. 3.3}$$

3.5.1 Materiales y sus propiedades

A continuación, se discutirán distintos materiales que se utilizan comúnmente en la construcción y que son recomendados como aislantes por sus distintas propiedades y características.

3.5.1.1 Corcho y sus derivados

Se trata de un material natural que proviene de la corteza del árbol alcornoque. Está formado por células tubulares llenas de aire aglomeradas con sustancias resinosas. Los desperdicios de la industria corchotaponera se reducen a aserrín para posteriormente esterilizarse a 150°C con el fin de evitar el desarrollo de hongos o microorganismos. Debido a sus propiedades aislantes, ligereza y coste moderado ha permitido su empleo en forma de corcho aglomerado. Cabe destacar las siguientes propiedades:

- Densidad de 150 a 260 kg/m³
- Resistencia a la compresión de 12 a 18 kg/cm²
- Resistencia a la flexión de 4 a 8 kg/cm²
- Coeficiente de conductividad térmica 0.032

Los aglomerados de corcho se emplean para el aislamiento del calor, frío y sonido. El corcho aglomerado negro se emplea en cámaras frigoríficas para lo que se recomiendan espesores de 75 y 150 mm (peso en kg/m³ 9.75 a 19.50).⁽¹⁹⁾

3.5.1.2 Fibra de Vidrio

Estas fibras se obtienen del vidrio por diversos procesos, ya sea estiramiento mecánico o por centrifugación. Las características de este material son las siguientes:

- Composición estable y homogéneo
- No absorbe agua
- Incombustible
- No se pudre
- De fácil colocación
- Ligero

Se puede encontrar en distintas presentaciones: paneles rígidos, fieltros con soporte de papel o soporte de tela metálica, velos, etc. Sus aplicaciones son muy numerosas, pero se utiliza principalmente para el aislamiento de terrazas y cubiertas.

3.5.1.3 Paneles de yeso y de fibra de madera

Los paneles prefabricados de yeso, lana mineral y papel metalizado que difícilmente se deforman, inflaman o son afectados por cambios de temperatura bruscos. Pueden desmontarse fácilmente, facilitando reparaciones o modificaciones.

Por otra parte, los paneles de madera están constituidos esencialmente por fibras químicamente impregnadas y adheridas con cemento bajo presión controlada. Se forman numerosos huecos a manera de celdas de aire por lo que adquiere propiedades aislantes además de hacerlo un material ligero.

3.5.1.4 Espumas plástica aislante

Se conforma de resina de urea formaldehído d endurecimiento en frío. Tiene un coeficiente de conductividad de 0.022 a 0.24 kcal/h/m/°C por lo que está dentro del grupo con mayor poder aislante. Los paneles con alma de poliuretano y los de poliestireno son resistentes tanto a temperaturas bajas como a la flexión, vibración, humedad y muchos agentes químicos.

3.5.1.5 Ladrillos y hormigones

El coeficiente térmico esta directamente afectado por la densidad, y ésta a su vez viene en función del aire ocluido por lo que entre menos

denso, se trata de un mejor aislante. Son muy variadas las aplicaciones, generalmente se emplean en conducciones para acondicionamiento de aire, cámaras frigoríficas, sótanos, etc.

3.5.2 Aislamiento en la construcción

La humedad está ligada íntimamente con el aislamiento que se debe de emplear por lo que es necesario evitar que sea permeable al agua. El agua que sube por capilaridad en los muros proveniente del subsuelo obliga a la construcción de cimientos de piedra compacta con el menor poder absorbente posible. En construcciones subterráneas, es necesario, además del aislamiento horizontal, un aislamiento vertical de los muros. El uso de pavimento sirve como medio de transmisión de frío al estar en contacto directo con la tierra.