Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez"

Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente

Trabajo de Diploma

Título: Cálculo térmico del preenfriador de agua para el llenado de los moldes de hielo en la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

Autor: Reinier Herrera Pérez.

Tutores: Dra. Margarita Lapido Rodríguez.

Dr. Juan Carlos de Armas.

Consultante: MSc. Milagros Montesinos

Cienfuegos, 2009.

Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución.

Declaración de autoridad.

UNIVERSIDAD CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos, como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando a que el mismo sea utilizado para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, y además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

_____

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esa envergadura, referido a la temática señalada.

_____

Información Científico – Técnica

Firma

_____ _____

Firma de Vicedecano Firma de Tutor

_____

Sistema de Documentación de Proyectos

Aval de los tutores

UNIVERSIDAD CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Por este medio certificamos que:

El Trabajo de Diploma:

Título: Cálculo térmico del preenfriador de agua para el llenado de los moldes de hielo en la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

Del Autor:

Reinier Herrera Pérez.

Cumple con los requisitos necesarios para ser defendido en la fecha propuesta, pues consta de un gran nivel técnico y presenta una estructura, redacción y ortografía adecuadas.

_____

Dra. Margarita Lapido Rodríguez.
Dr. Juan Carlos de Armas.
Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente.

PENSAMIENTO:

"El agua dulce es preciosa, ya que no podemos vivir sin ella. Resulta irremplazable, dado que no tiene sucedáneos. Y es un recurso delicado, pues la actividad humana tiene un profundo impacto en la cantidad y calidad del agua dulce disponible"

Autor: Kofi Annan.

AGRADECIEMIENTOS

Agradezco a:

- Mis padres, fuentes de amor y dedicación en mi vida como estudiante.
- Mi familia, que siempre estuvo a mi lado, dándome el ánimo en mis años de estudiantes.
- Mis tutores por poner a mi disposición su sabiduría, experiencia y ayuda en todo momento, y en especial a la Doctora Margarita Lapido que con su interés e ingenio logró la materialización de este trabajo.
- La Master Milagros Montesinos por haberme ayudado en los cálculos realizados en la tesis.
- Al especialista Rigoberto jefe de mantenimiento de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara por haberme ayudado incansablemente en todo momento.
- Mis amistades que fueron una mano extendida durante estos inolvidables cinco años.
- Mis profesores por poner todo su empeño y haberme brindado todos sus conocimientos.
- Y aquellas personas a las cuales no olvidaré y que significaron mucho en mi vida como universitario.

A todos,

MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

Dedico a:

- A mis tutores que me brindaron las herramientas para llevar a cabo esta investigación.

- A quien me dio la vida, y me ha enseñado a conducirme en ella con todo el amor del mundo, mi estimada madre.

- A mi padre, que también ha sabido guiarme y de quién heredé las fuerzas para seguir adelante sin mirar atrás.

- A mis abuelos que siempre estuvieron a mi lado dándome fuerzas para seguir adelante en mis estudios.

- Todas aquellas personas que han dado un pedacito de sí para contribuir al desarrollo de este trabajo y saben que le estaré agradecido por siempre.

SINTESIS

Nuestro país en el marco de una revolución energética que se encamina a la reducción de los consumos con medidas técnicas y organizativas en el sector industrial tiene como prioridad básica la inclusión de medidas encaminadas al incremento de la eficiencia energética en instalaciones altamente consumidoras de energía.

El presente trabajo de diploma se desarrolla en La Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara fundada en 1978, la cual tiene una capacidad nominal de 920 a 980 toneladas de hielo por mes, esta situación se encuentra limitada por la dificultad de los equipos instalados en la fábrica como es el caso del preenfriador de agua que está fuera de servicio y que limita la producción de la empresa hasta valores de 351 toneladas mensuales de hielo, lo cual es una necesidad de la empresa por lo que solicita el calculo térmico del preenfriador.

Para dar cumplimiento a esta solicitud se acomete una caracterización técnica energética de la planta basada en el levantamiento de las condiciones físicas del lugar disponible, los datos de los equipos instalados en el área y las indicaciones para el enfriamiento del agua según los requerimientos necesarios en función de la capacidad de producción de hielo necesaria para la empresa.

Con los datos obtenidos se calculo el evaporador de amoniaco-agua siguiendo la metodología de diseño térmico de intercambiadores de calor obteniendo un área de 7.39 m^2 y un costo de inversión de 42600 CUC, garantizando una temperatura del agua fría de $3^{o}C$ que se corresponde con los requerimientos establecidos para este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO Pág.

Introducción 1

Antecedentes 1

Justificación del estudio 2

Problema de Investigación 2

Objetivo General 3

Objetivos específicos 3

Hipótesis de la Investigación 3

Diseño Metodológico de la Investigación (opcional) 3

Beneficios esperados 3

Límites del alcance de la investigación 4

Capítulo 1: Estado del arte de las fábricas de hielo. 6

1.1 Clasificación de las fábricas de hielo: 6

1.1.1 Tipos de máquinas de hacer hielo 6

1.1.1.1 Hielo en bloques. 6

1.1.1.2 Hielo en bloques de fabricación rápida. 8

1.1.1.3 Hielo en escamas. 9

1.1.1.4 Hielo en tubos. 11

1.1.1.5 Hielo en placas. 12

1.1.1.6 Hielo fundente. 13

1.1.1.7 Otras máquinas de hacer hielo. 14

1.2 Sistemas de refrigeración de las plantas de hielo 14

1.3 Capacidad de las fábricas de hielo 16

1.4 Fabricación del hielo con agua de mar 19

1.4.1 Fabricación de hielo a bordo 19

1.5 Equipos de fabricación de hielo con energía solar 20

1.6 Sistema básico de refrigeración 21
1.6.1 Tipos de compresores 23
1.6.1.1 Compresores de émbolo o de pistón 24
1.6.1.2 Compresor de émbolo rotativo 24
1.7 Alimentación de Refrigerante 25
1.8 Diferencias del aceite trabajando con freón o amoniaco 25
1.8.1 Capacidad del lubricante 25
1.8.2 Características a bajas temperaturas 26
1.9 Intercambiadores de calor 27
Conclusiones parciales. 28
Capítulo 2: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara. 31
Descripción de la fábrica. 31
2.2 Esquema del proceso 31
2.2.1 Características técnicas del compresor AU – 200: 33
2.3 Proceso tecnológico del hielo en bloque: 35
2.3.1 Especificaciones de los índices de calidad de las materias primas, materiales y componentes: 35
2.3.1.1 Especificaciones de los índices de calidad del producto final: 35
2.3.2 Descripciones de las operaciones tecnológicas: 35
2.3.2.1 Operación #7: Preenfriamiento del agua destinada a la producción. 36
2.3.2.1.1 Objetivo de la operación tecnológica: 36
2.3.2.1.2 Equipos instalados: 36
2.3.2.1.3 Procedimiento de trabajo: 36
2.3.2.2 Operación #8: Llenado de los moldes. 37
2.3.2.2.1 Objetivo de la operación tecnológica: 37
2.3.2.2.2 Equipos instalados: 37
2.3.2.2.3 Procedimiento de trabajo: 37
2.3.2.2.4 Especificaciones principales del objeto final de trabajo: 37
2.3.2.2.5 Requisitos de seguridad: 37

2.3.2.3 Operación 12: Extracción de los bloques de hielo en los moldes: 37
2.3.2.3.1 Objetivo de la operación tecnológica: 37
2.3.2.3.2 Equipos instalados: 38
2.3.2.3.3 Procedimiento de trabajo: 38
2.3.2.3.4 Especificaciones principales del objeto final de trabajo: 38
2.4 Caracterización energética de la empresa: 38
Conclusiones parciales 43
Capítulo 3: Cálculo térmico y evaluación económica del preenfriador de agua. 46
3.1 Metodología para el cálculo del intercambiador de calor. 46
3.2 Cálculo térmico del preenfriador: 47
3.2.1 Consideraciones para el cálculo térmico 47
3.2.2 Cálculo del volumen de agua: 48
3.2.2.1 Cálculo del volumen del tanque: 48
3.2.2.2 Cálculo del volumen total de las tres placas: 48
3.2.2.2.1 Cálculo del volumen de una placa: 49
3.2.2.2.1.1 Cálculo del volumen de las secciones de la placa: 49
3.2.2 Cálculo de la masa de agua en (kg). 50
3.2.3 Cálculo del flujo de agua: 50
3.3 Cálculo de la cantidad de calor transferido: 51
3.3.1 Determinación del calor enfriado por el agua: 51
3.3.2 Determinación del flujo de amoniaco: 51
3.4 Determinación de los coeficientes de Transferencia de Calor: 52
3.4.1 Obtención de los coeficientes de Transferencia de Calor del agua: 52
3.4.2 Cálculo del coeficiente de Transferencia de Calor del amoniaco: 53
3.5 Cálculo del Coeficiente global de Transferencia de Calor: 56
3.6 Cálculo de la Diferencia Media de Temperatura Logarítmica: 57
3.7 Cálculo del Área de Transferencia de Calor: 57
3.7.1 Cálculo de la longitud total del serpentín (L): 57

3.9 Comparación del preenfriador calculado con un equipo que trabaja con convección natural o convección libre. **59**

3.10 Evaluación económica **60**

3.10.1 Metodología para calcular el costo inversión. 60

Conclusiones parciales. **60**

Conclusiones Generales. **63**

Recomendaciones **65**

Referencias Bibliográficas. **67**

Bibliografía.

Anexos.

INTRODUCCIÓN

Introducción

Antecedentes

Las plantas de hielo modernas en régimen continuo están diseñadas para funcionar las 24 horas del día, el sistema de refrigeración, que comprende el compresor, el condensador, los conductos, el equipo de control y la máquina de hielo misma, deberá estar diseñado de manera que sea altamente confiable, con dispositivos de seguridad para cualquier tipo de avería o mal funcionamiento previsibles.

El sistema de refrigeración de una máquina de hacer hielo debería ser normalmente una unidad separada, que pueda mantenerse en buenas condiciones de funcionamiento mediante un sistema de control sencillo. En cambio, una planta centralizada que atienda distintas necesidades de refrigeración requerirá un sistema de control más complejo, sobre todo si las necesidades de refrigeración varían de forma independiente. La mayoría de los refrigerantes comunes, tales como el amoníaco y los hidrocarburos halogenados, que se conocen bajo nombres comerciales como Arctón, Freón e Isceón, se consideran normalmente adecuados para las plantas de hielo.

En las instalaciones de unidades múltiples hay que prestar especial atención a la distribución del refrigerante, a fin de asegurar que cada máquina de hacer hielo cuente en todo momento con una cantidad suficiente. Por ejemplo, los sistemas de circulación por bombeo o por gravedad deben estar dotados de conductos de refrigeración diseñados de manera que las caídas de presión desiguales no generen condiciones de refrigeración diferentes en las distintas máquinas de hacer hielo.

Las plantas de hielo representan un importante consumo energético en el balance de un determinado territorio, por la diversidad equipos altamente consumidores tal es el caso de los compresores y las bombas que se utilizan en todo el proceso productivo.

Nuestro país en el marco de una revolución energética que se encamina a la reducción de los consumos con medidas técnicas y organizativas en el sector industrial tiene como prioridad básica la inclusión de medias encaminadas al incremento de la eficiencia energética en instalaciones altamente consumidoras de energía.

Introducción

El sistema de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara utiliza como refrigerante el amoniaco y tiene una capacidad de 30 a 32 Tn de hielo diaria. La planta incluye un tanque para preenfriamiento de agua entre 5-3 °C con un evaporador de amoniaco. Hoy este tanque no está funcionando, por lo cual la máquina de elaboración del hielo recibe el agua a $30^{\circ}C$, lo cual provoca un aumento del tiempo de elaboración del hielo y por tanto un incremento del consumo de energía de la planta afectando el objeto social de la empresa.

Este trabajo se realizó como parte del Trabajo de Diploma de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cienfuegos y tiene como objetivo calcular un preenfriador que garantice la disminución de la temperatura del agua para la elaboración de hielo utilizando el área disponible y las propiedades del refrigerante que se utiliza.

La fábrica tiene una capacidad nominal entre 920 y 980 toneladas mensuales y hoy produce 637 toneladas de hielo mensuales como promedio por la falta del intercambiador.

Justificación del estudio

El preenfriamiento del agua que suministra los moldes para la formación del hielo reduce el tiempo de su elaboración y reduce el consumo energético de la planta.

La no explotación de este equipo, que aparece en los datos de diseño de la fábrica, afecta la producción de trabajo actual, aspecto que se dificulta en los meses de verano donde aumenta la demanda de hielo.

Esta situación vinculada a la política de nuestro país de incrementar la eficiencia energética justifica la necesidad de realizar el cálculo térmico de un intercambiador de calor que garantice reducir la temperatura del agua de suministro a los moldes reflejándose una reducción del consumo energético de la planta.

Problema de Investigación

La fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara no cuenta hoy con un preenfriador de agua para el llenado de los moldes que reduzca la temperatura de este fluido para la

formación de hielo, lo que garantiza la producción de 30 a 32 toneladas de hielo en un tiempo de 24 horas.

Objetivo General

Realizar el cálculo térmico de un preenfriador que garantice el suministro de agua fría a los moldes de hielo garantizando el objeto social de la fábrica.

Objetivos específicos

1. Efectuar el levantamiento de la situación energética de la fábrica de hielo en lo que respecta al estado físico de la instalación y los consumos energéticos de la fábrica.
2. Calcular un evaporador amoniaco – agua para el preenfriamiento del agua que se envía a los moldes de hielo.
3. Realizar una valoración técnica económica del preenfriador propuesto.
4.

Hipótesis de la Investigación

El diseño de un preenfriador en la línea de fabricación de hielo adaptado a las condiciones físicas reales permitirá reducir la temperatura de agua que se suministra a los moldes con la correspondiente reducción del consumo energético y un aumento de la producción diaria de hielo de la planta.

Diseño Metodológico de la Investigación (opcional)

Basado en el levantamiento de las condiciones físicas del lugar disponible, los datos de los equipos instalados en el área y las indicaciones para el enfriamiento del agua según los requerimientos necesarios en función de la capacidad de producción de hielo necesaria para la empresa, se acomete el calculo térmico del preenfriador siguiendo la metodología de diseño de intercambiadores de calor

Beneficios esperados

La propuesta de un preenfriador que logre el suministro de agua fría a los moldes de hielo para lograr la producción en el tiempo prefijado garantizando el objeto social de la fábrica.

Introducción

Límites del alcance de la investigación

La limitación fundamental de este trabajo es que no existen datos de la fábrica relacionados con el equipo inicial para el enfriamiento de agua.

CAPITULO I

Capítulo I: Estado del arte de las fábricas de hielo.

Capitulo 1: Estado del arte de las fábricas de hielo.

1.1 Clasificación de las fábricas de hielo:

Para clasificar las diferentes fábricas de hielo la única forma sencilla es describiendo el tipo de hielo que producen; tenemos, pues, el hielo en bloques, en escamas, en placas o en tubos, el hielo fundente, etc, según ("El hielo en las pesquerías.," 2009) Otra subclasificación puede basarse en el hecho de que produzcan hielo "seco" subenfriado o hielo "húmedo". Por lo general, el primero se produce mediante un proceso de desprendimiento mecánico del hielo de una superficie de enfriamiento. Casi todas las fábricas de hielo en escamas son ejemplos de este tipo. Por otra parte, el hielo "húmedo" se fabrica normalmente con máquinas que emplean un procedimiento de desescarchado para desprender el hielo. El desescarchado derrite parcialmente el hielo que está en contacto con la superficie de enfriamiento y, a menos que la temperatura se haya reducido bastante por debajo de 0°C (o sea, que el hielo se subenfríe), las superficies permanecen húmedas; los sistemas de hielo en tubos y en placas son ejemplos de este tipo.

En algunas máquinas, el hielo se forma y extrae al mismo tiempo, produciéndose lo que se denomina a veces "hielo fundente", porque contiene mucha más agua no congelada que otras formas de hielo húmedo extraídas mediante el procedimiento de descongelación.

1.1.1 Tipos de máquinas de hacer hielo

1.1.1.1 Hielo en bloques.

La máquina de hielo en bloques tradicional fabrica el hielo en moldes que se sumergen en un tanque con salmuera de cloruro sodio o calcio en circulación. Las dimensiones de los moldes y la temperatura de la salmuera se seleccionan habitualmente de manera que el período de congelación dure entre 8 y 24 horas. La congelación demasiado rápida produce hielo quebradizo. El peso del bloque puede oscilar entre 12 y 150 kg, con arreglo a las necesidades; se considera que el bloque de 150 kg es el mayor que

un hombre puede manipular adecuadamente. Cuanto más grueso sea el bloque de hielo, tanto más largo será el tiempo de congelación. Los bloques de menos de 150 mm de espesor se rompen con facilidad, y es preferible un espesor de 150 a 170 mm para evitar que se quiebren. El tamaño que debe poseer el tanque guarda relación con la producción diaria. Una grúa rodante levanta una fila de moldes y los transporta a un tanque de descongelación situado en un extremo del tanque de congelación, donde los sumerge en agua para que el hielo se desprenda. Los moldes se voltean para que salgan los bloques, se llenan nuevamente de agua dulce y se vuelven a colocar en el tanque de salmuera para un nuevo ciclo (Fig. 1). Este tipo de planta suele exigir una atención continua, por lo que se trabaja con un sistema de turnos; una planta de 100 t/día necesita normalmente entre 10 y 15 trabajadores. Las fábricas de hielo en bloques requieren abundante espacio y mano de obra para manipular el hielo. Este último factor ha impulsado fuertemente el desarrollo de equipo automático moderno para la fabricación de hielo.

El hielo en bloques aún se utiliza y puede ofrecer ventajas con respecto a otras formas de hielo en los países tropicales. El almacenamiento, manipulación y transporte se simplifican si el hielo está en forma de grandes bloques; y la simplificación suele ser imperativa en las pesquerías en pequeña escala y en los sitios relativamente remotos. Con ayuda de un buen triturador de hielo, los bloques pueden reducirse a partículas del tamaño que se desee, pero la uniformidad de tamaño será menor que la que se logra con otros tipos de hielo. En algunas circunstancias, los bloques pueden fragmentarse también machacándolos a mano.

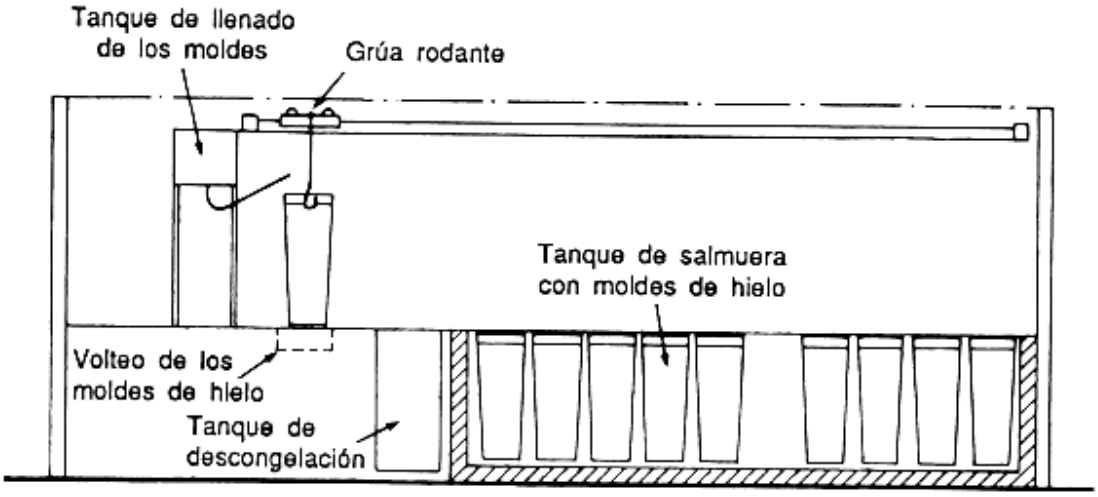


Figura 1.1 Máquina de hacer hielo en bloques.

1.1.1.2 Hielo en bloques de fabricación rápida.

La planta de fabricación rápida de hielo produce bloques en pocas horas, lo que significa que las necesidades de espacio se reducen considerablemente en comparación con las instalaciones tradicionales que fabrican este tipo de hielo. El tamaño de los bloques es variable, pero las medidas típicas son de 25, 50 y 150 kg. En un modelo de máquina, la congelación relativamente rápida se obtiene formando bloques en un tanque de agua, en torno a tubos por los que circula el refrigerante. El espesor efectivo del hielo es mucho menor que el que se obtiene con las máquinas tradicionales. Los tubos están dispuestos de manera que a medida que el hielo se forma se fusiona con el de tubos adyacentes creando un bloque con varios núcleos huecos. Estos bloques se desprenden de los tubos mediante un procedimiento de desescarchado y pueden extraerse automáticamente de la superficie del tanque. Sin embargo, se requiere cierto esfuerzo manual para almacenarlos o para introducirlos en un triturador, si lo que se necesita es hielo machacado. En otro modelo de máquina de hacer hielo rápido, el refrigerante circula por una camisa que rodea cada molde de agua y también por tuberías que pasan por el centro de los mismos. El hielo se forma

entonces simultáneamente en el exterior y en el centro de los moldes. Los bloques se extraen luego por gravedad, después de un desescarchado con gas caliente.

Una ventaja de la máquina de fabricación rápida de hielo en bloques es que se puede detener y poner en marcha en un tiempo relativamente breve, puesto que carece del gran tanque de salmuera que requiere un enfriamiento inicial en las máquinas tradicionales, en las que el sistema de refrigeración suele mantenerse en funcionamiento continuo incluso cuando ha cesado la producción de hielo.

1.1.1.3 Hielo en escamas.

Este tipo de máquina forma hielo de 2 a 3 mm de espesor en la superficie de un cilindro enfriado, y ese hielo se extrae en forma de escamas secas subenfriadas, habitualmente de 100 a 1 000 mm^2 de superficie. En algunos modelos, el cilindro o tambor gira y la cuchilla que rasca el hielo de la superficie externa permanece fija. En otros, la cuchilla gira y saca hielo de la superficie de un tambor fijo, que en este caso tiene la forma de un cilindro de dos paredes. Lo común es que el tambor gire en un plano vertical, pero en algunos modelos la rotación es horizontal. Una clara ventaja del método del tambor giratorio es que tanto las superficies en que se forma el hielo como el mecanismo de extracción están a la vista y el operador puede observar si el equipo está funcionando satisfactoriamente (Fig. 2). La máquina con el tambor fijo tiene la ventaja de que no requiere un obturador rotatorio en los conductos de entrada y salida del refrigerante. Sin embargo, las máquinas modernas cuentan con obturadores de un alto grado de fiabilidad. El hielo que se saca está subenfriado; el grado de subenfriamiento depende de varios factores, principalmente de la temperatura del refrigerante y del tiempo que el hielo permanece expuesto a esa temperatura. La zona de subenfriamiento del tambor está situada inmediatamente delante de la cuchilla, donde no se añade agua durante una parte de la rotación del tambor y el hielo baja de temperatura. Esto asegura que sólo caiga hielo seco subenfriado en el espacio de almacenamiento situado inmediatamente debajo de la cuchilla. La temperatura del refrigerante, el grado de subenfriamiento y la velocidad de rotación del tambor son factores variables en este tipo de máquina e influyen tanto en la capacidad de la misma como en el espesor del hielo

producido. Otros factores, como la temperatura del agua de relleno, también afectan a la capacidad de la máquina. Así pues, las condiciones óptimas de funcionamiento dependerán tanto de las condiciones locales como del espesor del hielo deseado. La temperatura normal del refrigerante en una máquina de hielo en escamas es de -20°C a -25°C, es decir, mucho más baja que en otros tipos de máquinas de hacer hielo. Esta baja temperatura es necesaria para obtener velocidades más altas de formación de hielo, lo que permite que la máquina sea pequeña y compacta. La necesidad adicional de energía ocasionada por el funcionamiento a una menor temperatura queda parcialmente compensada por el hecho de que este método no requiere un desescarchador. De esta manera se elimina la carga de refrigeración adicional en que se incurre con el método de desprender el hielo del tambor. La gama de medidas de este tipo de máquinas abarca ahora unidades con una capacidad desde 0,5 hasta 60 t/24 horas. Sin embargo, en lugar de una sola, a menudo es conveniente utilizar dos o más unidades, lo que permite una mejor organización para funcionar a capacidad reducida y brinda también cierto grado de protección contra averías graves. Este consejo se aplica asimismo a las otras clases de máquinas de hacer hielo automáticas.

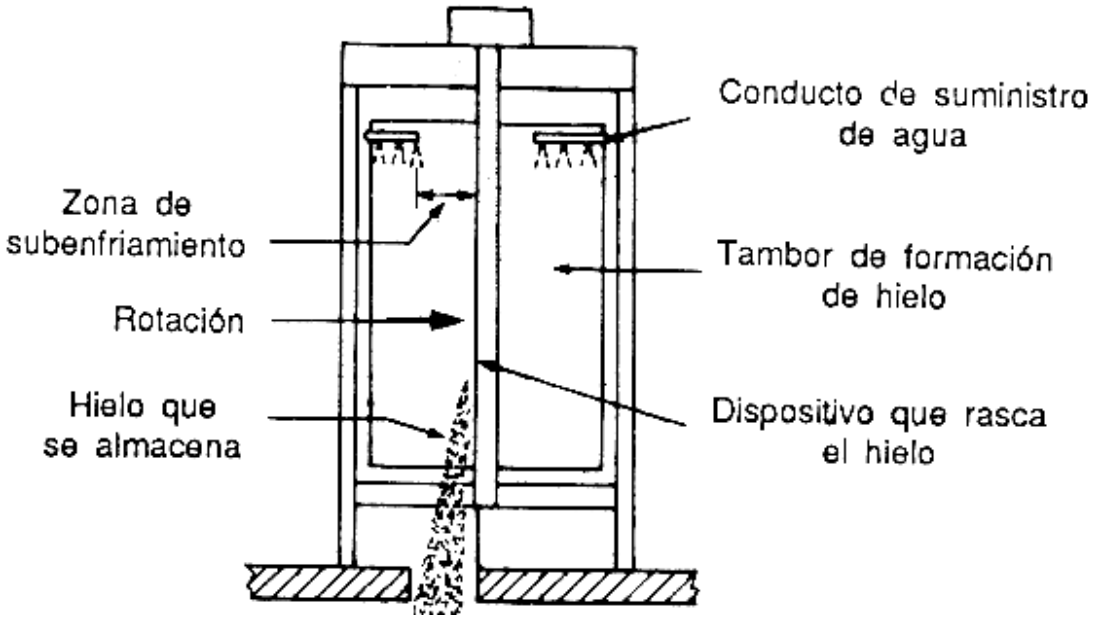


Figura 1.2 Máquina de hacer hielo en escamas.

1.1.1.4 Hielo en tubos.

El hielo en tubos se forma en la superficie interna de unos tubos verticales y tiene la forma de pequeños cilindros huecos de unos 50 × 50 mm, con paredes de 10 a 12 mm de espesor. La disposición de una planta de hielo en tubos es semejante a la de un condensador acorazado y tubular, con agua dentro de los tubos y el refrigerante afuera, en el espacio circundante. La máquina funciona automáticamente según un ciclo de tiempo y los tubos de hielo se desprenden mediante un proceso de desescarchado con gas caliente. A medida que el hielo sale del tubo, una cuchilla lo corta en trozos de la longitud adecuada, normalmente de 50 mm, pero esta dimensión es ajustable (Fig. 3). El transporte del hielo a la zona de almacenamiento suele ser automático, por lo cual, al igual que en las plantas de hielo en escamas, las operaciones de recogida y almacenamiento no requieren ningún esfuerzo manual ni la presencia de un operador.

El hielo en tubos se almacena normalmente en la forma en que se recoge, pero el tamaño de las partículas es más bien grande e inadecuado para el enfriamiento del pescado. Por lo tanto, el sistema de descarga de la planta comprende un triturador de hielo que se puede ajustar para obtener partículas del tamaño que convenga al cliente. La temperatura común de funcionamiento de este tipo de planta oscila entre -8°C y -10°C. El hielo no está siempre subenfriado cuando llega al almacén, pero generalmente es posible mantenerlo a -5°C, ya que el tamaño y la forma de las partículas permiten desmenuzar fácilmente el hielo para su descarga.

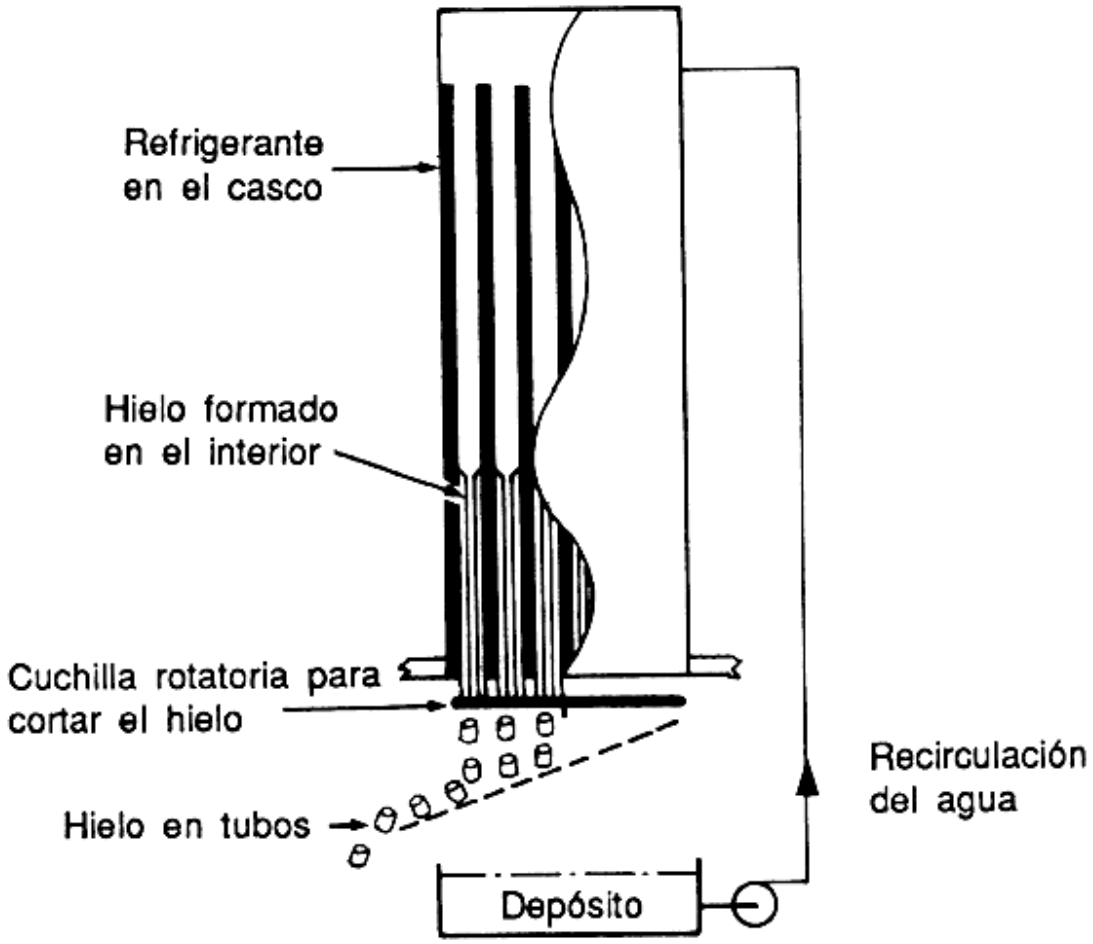


Figura 1.3 Máquina de hacer hielo en tubos.

1.1.1.5 Hielo en placas.

El hielo en placas se forma en una de las caras de una placa vertical refrigerada y se desprende haciendo circular agua por la otra cara para desescarcharlo. Otros sistemas forman hielo en ambas superficies y utilizan un procedimiento de desescarchado interno. Una máquina de hacer hielo comprende múltiples placas, que con frecuencia son unidades autónomas situadas encima de la maquinaria de refrigeración. El espesor óptimo del hielo suele ser de 10 a 12 mm y el tamaño de las partículas es variable. Un triturador de hielo rompe las placas en trozos del tamaño adecuado para su almacenamiento y uso (Fig.1.4). El agua para el desescarchado debe calentarse si su temperatura es inferior a 25°C aproximadamente; por debajo de este valor el período de

desescarchado es demasiado largo y provoca una pérdida de capacidad y un aumento del costo. Esta máquina, al igual que la de hielo en tubos, funciona según un ciclo de tiempo automatizado; el hielo es transportado a la zona de almacenamiento, o bien, cuando es posible colocar la máquina directamente sobre el espacio de almacenamiento, la recogida se efectúa por gravedad.

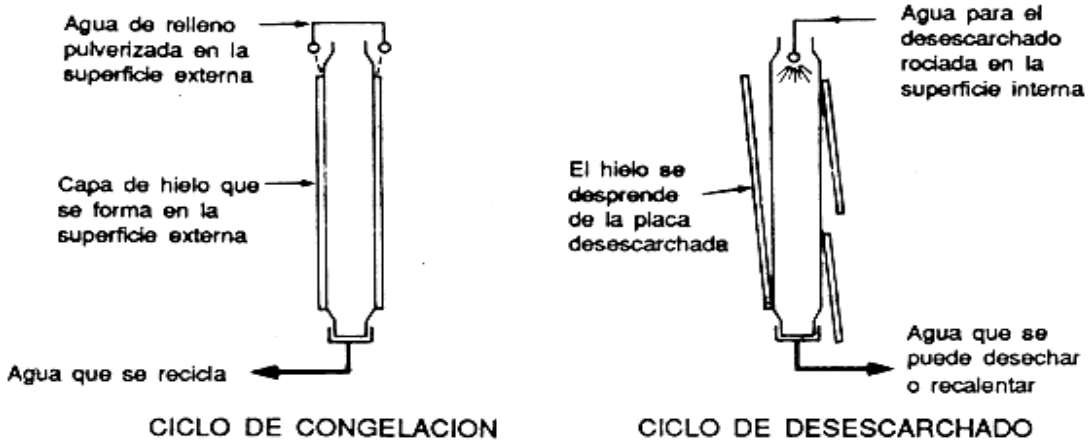


Figura 1.4 Máquina de hacer hielo en placas.

1.1.1.6 Hielo fundente.

La unidad de enfriamiento que fabrica hielo fundente se denomina permutador térmico de superficie rascada. Consiste en tubos concéntricos entre los cuales fluye el refrigerante; el agua se halla en el tubo interno, cuya superficie interna se rasca utilizando, por ejemplo, un tornillo rotatorio. Los pequeños cristales de hielo que se forman en la superficie del tubo se raspan y se mezclan con agua no congelada. Esto produce una pasta de hielo y agua, que puede contener hasta un 30 por ciento de agua, en términos de peso. Esta mezcla puede bombearse, o bien, previa eliminación de la mayor parte del agua en un separador mecánico, utilizarse como una forma de hielo seco.

1.1.1.7 Otras máquinas de hacer hielo.

Hay varias máquinas para hacer hielo que funcionan con sistemas distintos de los que se han descrito aquí, pero normalmente tienen una capacidad que no supera algunos cientos de kilogramos de hielo por día, y su principal aplicación es en la venta al detalle y en los servicios de restauración.

1.2 Sistemas de refrigeración de las plantas de hielo

Las plantas de hielo modernas en régimen continuo están diseñadas para funcionar las 24 horas del día, casi siempre sin personal de vigilancia. Por consiguiente, el sistema de refrigeración, que comprende el compresor, el condensador, los conductos, el equipo de control y la máquina de hielo misma, deberá estar diseñado de manera que sea altamente confiable, con dispositivos de seguridad para cualquier tipo de avería o mal funcionamiento previsibles. La mayoría de los fabricantes de máquinas de hacer hielo especifican el sistema de refrigeración que debe utilizarse, pero, inevitablemente, las necesidades particulares imponen modificaciones y ocurre que técnicos de instalación no directamente vinculados con el fabricante de la máquina diseñen sus propios sistemas. El comprador deberá, pues, cerciorarse de que el sistema instalado sea apropiado para el funcionamiento automático sin personal, aparte del mantenimiento y los controles de rutina, y el sistema de control deberá cubrir todas las eventualidades, con dispositivos de autoprotección que permitan reanudar rápidamente las operaciones en cuanto se haya reparado una avería.

El sistema de refrigeración de una máquina de hacer hielo debería ser normalmente una unidad separada, que pueda mantenerse en buenas condiciones de funcionamiento mediante un sistema de control sencillo. En cambio, una planta centralizada que atienda distintas necesidades de refrigeración requerirá un sistema de control más complejo, sobre todo si las necesidades de refrigeración varían de forma independiente. Las unidades centralizadas suelen tener unos costos de capital más bajos, pero cualquier deficiencia en su funcionamiento, en comparación con las unidades individuales, puede originar pérdidas de ingresos en otras esferas, por

ejemplo por el deterioro de la calidad en los almacenes refrigerados o en los congeladores y cámaras frigoríficas asociados. Estas pérdidas pueden contrarrestar el ahorro en gastos de capital.

La mayoría de los refrigerantes comunes, tales como el amoníaco y los hidrocarburos halogenados, que se conocen bajo nombres comerciales como Arctón, Freón e Isceón, se consideran normalmente adecuados para las plantas de hielo. La mayor parte de las máquinas de hacer hielo pueden funcionar con cualquiera de ellos. Los nombres comerciales de los refrigerantes se utilizan todavía ampliamente, pero es más correcto denominarlos según el sistema de numeración acordado internacionalmente. Así, el amoníaco se conoce como R717, y los hidrocarburos halogenados más comunes como R12, R22 y R502. En algunos casos, la elección del refrigerante dependerá de la disponibilidad local y del costo. Sin embargo, hay muchos otros factores complejos que deben considerarse a la hora de seleccionar un refrigerante; de hecho, la elección del refrigerante, del tipo de compresor y del sistema de refrigeración debería dejarse en manos de un técnico competente. El fabricante de la planta de hielo, que conoce las necesidades particulares de su propia máquina, también estará en condiciones de ayudar; por lo tanto, el comprador potencial debería facilitarle toda la información posible acerca del proyecto.

Decisiones a nivel mundial han adoptado hacer desaparecer progresivamente la mayor parte de los hidrocarburos halogenados más utilizados, los refrigerantes a base de clorofluorocarburos (CFC), a causa de la preocupación que suscita el hecho de que contribuyen considerablemente a destruir la capa de ozono de la atmósfera terrestre. Por consiguiente, antes de tomar una decisión con respecto a un refrigerante, convendrá determinar el estado en que se encuentren los programas nacionales de reducción progresiva y disponibilidad de refrigerantes.

En las instalaciones de unidades múltiples hay que prestar especial atención a la distribución del refrigerante, a fin de asegurar que cada máquina de hacer hielo cuente en todo momento con una cantidad suficiente. Por ejemplo, los sistemas de circulación por bombeo o por gravedad deben estar dotados de conductos de refrigeración

diseñados de manera que las caídas de presión desiguales no generen condiciones de refrigeración diferentes en las distintas máquinas de hacer hielo.

En todos los sistemas de refrigeración el colector del compresor contiene aceite que puede llegar a introducirse en la máquina de hacer hielo y ensuciar la parte refrigerante de las superficies de enfriamiento, reduciendo así la capacidad de la máquina. Los sistemas de refrigeración están dotados de separadores de aceite para reducir al mínimo este peligro, pero también es necesario asegurarse de que haya un buen retorno de aceite desde la máquina de hacer hielo, a fin de evitar su acumulación en la mezcla. Esta función suele estar incorporada en el diseño de la unidad, pero en algunas modelos es preciso seguir las instrucciones del fabricante para eliminar el aceite de la máquina a intervalos frecuentes.

1.3 Capacidad de las fábricas de hielo

Varios factores influyen en la capacidad de una máquina de hacer hielo y del equipo de refrigeración asociado. Los cuadros que aparecen a continuación ponen de manifiesto las consecuencias de las variaciones de algunas condiciones de funcionamiento en lo tocante a la capacidad de fabricación de hielo.

Temperatura	Capacidad	Capacidad relativa
(°C)	(t/24 h)	%
-30	17,5	100
-25	16,0	91
-20	13,5	77
-15	10,7	61
-12	8,9	51

Tabla 1.1 Variación de la capacidad de fabricación de hielo según la temperatura del refrigerante en una pequeña planta de hielo en escamas.

Temperatura del agua de relleno	Capacidad de la planta de hielo	Capacidad relativa
(°C)	(t/24 h)	%
0	43,0	100
5	41,8	97
10	40,4	94
15	39,2	91
20	38,0	88
25	36,8	85
30	35,7	83
35	34,5	80

Tabla 1.2 Variación de la capacidad de una máquina de hacer hielo según la temperatura del agua.

La relación que se observa en la Tabla 1. 2 se aplica a casi todos los tipos de fábricas de hielo e indica claramente que la mayor temperatura del agua de relleno en las zonas tropicales reduce en un grado considerable la capacidad de los equipos. El preenfriamiento del agua de 35°C a 3°C aumenta la capacidad de una planta en un 20 por ciento aproximadamente. Cuando las temperaturas del agua de alimentación son particularmente altas, conviene considerar la posibilidad de instalar una unidad de refrigeración separada, que enfriará previamente el agua de manera más eficiente que la máquina de hacer hielo, pudiendo aumentar, por lo tanto, la rentabilidad de la fábrica.

Temperatura de condensación	Temperatura de evaporación (°C)			
(°C)	-10	-15	-20	-25
20	100	79	61	48
25	94	75	59	45
30	83	66	51	39
40	73	57	43	32

Tabla 1.3 Variación de la capacidad relativa de un equipo de refrigeración según las condiciones de funcionamiento

En la Tabla 1.3 figuran valores comparativos de la capacidad de un compresor de refrigeración en una serie de condiciones que pueden registrarse en las fábricas de hielo. Mientras más baja sea la temperatura del enfriador (evaporación) y más alta la de condensación, menor será la capacidad de un grupo refrigerante. La temperatura del enfriador suele fijarse con arreglo a los requisitos de la máquina y puede modificarse sólo muy poco, mientras que la del condensador depende casi enteramente de la localidad y de las condiciones climáticas reinantes. Por consiguiente, para producir una determinada cantidad de hielo se requerirá un compresor más grande en un país cálido que en uno de clima templado.

De las Tablas 1.1, 1.2, 1.3 se desprende que la máquina de hacer hielo y el equipo refrigerador debe adecuarse mutuamente para obtener la capacidad de producción de hielo necesaria en las condiciones de funcionamiento apropiadas.

Por lo tanto, es posible que las capacidades más altas de fabricación de hielo que aparecen en las tablas 1.1 y 1.2 sólo puedan alcanzarse si se aumenta el tamaño del equipo refrigerador asociado hasta obtener la capacidad de refrigeración adecuada.

Capítulo I: Estado del arte de las fábricas de hielo.

1.4 Fabricación del hielo con agua de mar

Si el agua de mar se somete a congelación lenta, se forman primero cristales de hielo de agua dulce. La solución completa no se congela hasta que la temperatura haya descendido a -22°C, que es el punto eutéctico. (El punto eutéctico es una constante física de una mezcla de sustancias dadas.) A velocidades de congelación más altas, los cristales de hielo contendrán sal desde el comienzo mismo, pero esta sal emigrará finalmente a la superficie externa y se separará durante el almacenamiento. Puesto que los cristales constan principalmente de agua dulce, el líquido residual contendrá una concentración cada vez mayor de sal a medida que se reduzca la temperatura.

La estructura especial del hielo de agua de mar le confiere propiedades diferentes de las del hielo de agua dulce. Es bastante blando y flexible y, a las temperaturas normales de subenfriamiento del hielo, de -5°C a -10°C, no mantiene la forma de escamas; en efecto, a -5°C el hielo de agua de mar tiene un aspecto más bien húmedo. Por este motivo, este tipo de hielo se produce comúnmente a temperaturas más bajas que el de agua dulce, debiendo efectuarse a menudo un ajuste en la máquina de hacer hielo. Por lo demás, la instalación requerida es básicamente la misma. Se han experimentado también ciertas dificultades con el transporte neumático del hielo de agua de mar. Aun si está subenfriado, el transportador eleva la temperatura lo suficiente como para que el hielo se ponga blando, pegajoso y difícil de mover.

1.4.1 Fabricación de hielo a bordo

Varios equipos de fabricación de hielo pueden funcionar a bordo de una embarcación con unas pocas modificaciones en el diseño, pudiendo alimentarse ya sea con agua dulce o con agua de mar. Muchos buques que elaboran su captura en la mar están dotados de máquinas de hacer hielo para enfriar el pescado durante la elaboración. Puesto que a menudo permanecen en la mar por muchos meses consecutivos, sería poco racional que transportaran hielo producido en tierra. Algunos buques pesqueros están equipados con instalaciones para fabricar hielo debido a que en la localidad en que operan no sería rentable tener una planta permanente en la costa, por ejemplo

porque el tipo de pesquería hace que la demanda de hielo sea sólo estacional. Otros pesqueros cuentan con sus propias instalaciones de hielo porque les es difícil conseguir un suministro regular en los puertos sin incurrir en retrasos inaceptables. Sin embargo, los factores que hay que considerar antes de tomar una decisión de este tipo son múltiples. El equipo de fabricación de hielo ocupa un espacio valioso en la embarcación, y además se requiere espacio para almacenar el hielo, ya que una instalación capaz de producir el hielo requerido en los momentos de máxima captura sin contar con una reserva reguladora sería excesivamente grande. El suministro de energía necesario también es considerable y, si no se dispone de suficiente energía a bordo, se requerirá espacio para instalar un generador adicional. La energía necesaria para producir 6 toneladas de hielo en 24 horas una cantidad adecuada para un buque que efectúe viajes semanales es del orden de 30 a 35 kW. Habrá, pues, que comparar el verdadero costo de la fabricación de hielo en la mar con el costo de su adquisición en tierra. Pero incluso si la comparación resulta desfavorable, el costo de los retrasos ocasionados por la espera del hielo en los puertos puede inducir al armador a instalar una planta a bordo. Antes de tomar una decisión hay que examinar, pues, los factores económicos y el problema de la continuidad del suministro, teniendo en cuenta también la necesidad de evitar el agua de mar contaminada.

1.5 Equipos de fabricación de hielo con energía solar

En las zonas que carecen de comunicación directa con una fuente de energía para accionar una planta refrigeradora, se puede utilizar la energía solar conjuntamente con un equipo de refrigeración por absorción para fabricar el hielo necesario para una actividad en pequeña escala.

El equipo de refrigeración accionado por energía solar consiste en una unidad autónoma, que sólo necesita un suministro adecuado de agua para fabricar hielo. El modelo disponible en la actualidad fabrica hielo en bloques de 10 kg aproximadamente. El módulo estándar produce 200 kg de hielo en 24 horas, pero también existen módulos de hasta 1 000 kg en 24 horas. La producción depende obviamente del número de horas de luz solar diaria y de su intensidad; por este motivo, la instalación incluye un

espacio de almacenamiento aislado, que permite contar con una reserva para compensar las fluctuaciones diarias. Afortunadamente, a diferencia de otros sistemas de refrigeración, esta unidad es más eficiente y productiva justamente cuando las condiciones ambientales hacen que sean necesarias mayores cantidades de hielo.

Puesto que no tiene partes móviles, el equipo no necesita más mantenimiento que una limpieza semanal. (“El hielo en las pesquerías.,” 2009)

1.6 Sistema básico de refrigeración

La función básica de un sistema de refrigeración es extraer calor del elemento a refrigerar. Este calor es absorbido por el refrigerante en su paso de fase líquida a gaseosa. En estado saturado, el refrigerante tiene mayor capacidad de extraer calor. Para lograr esto se dispone de un sistema que puede resumirse en: compresor, condensador, colector, válvula de expansión y evaporador.

Compresor.

Se considera el corazón del sistema de refrigeración, su función fundamental consiste en succionar el vapor refrigerante en condiciones de baja presión y baja temperatura desde el evaporador y elevar sus parámetros hasta condiciones de condensación. Este constituye el elemento fundamental de demanda de energía eléctrica dentro del ciclo.

Condensador.

Intercambiador de calor situado en el lado alta presión del sistema cuya función fundamental consiste en rechazar el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador, en las tuberías y en el compresor. Los condensadores pueden utilizar como medio de enfriamiento el aire exterior o el agua.

Dispositivos de expansión.

Tienen como función fundamental, la expansión del refrigerante con la consiguiente reducción de presión y por lo tanto de temperatura desde la correspondiente presión de condensación hasta la presión y temperatura de evaporación. Divide el lado de alta del

sistema del lado de baja. El proceso de estrangulación que ocurre en este elemento se realiza a entalpía constante.

Se utilizan diferentes tipos de dispositivos de expansión los sistemas de refrigeración, dentro de ellos los más usados son: los tubos capilares en sistemas de cargas constantes, y las válvulas de expansión termostáticas en sistemas de cargas variables.

El refrigerante entra a este dispositivo en estado líquido con condiciones de alta presión y mediana temperatura después de haber cedido calor en el condensador, sale del dispositivo de expansión a baja presión y baja temperatura, como mezcla bifásica, con una proporción aproximada de 75% de líquido y 25 % de vapor según el diseño y condiciones de funcionamiento.

Evaporador.

Intercambiador de calor situado en el lado de baja del sistema en el cual ocurre el proceso de refrigeración, lo cual consiste en la absorción de calor proveniente del objeto de la refrigeración. El líquido proveniente del dispositivo de expansión entra al evaporador, absorbe calor de sus alrededores y sale en forma de vapor refrigerante a bajas presiones, condiciones a las cuales es succionado por el compresor. El líquido refrigerante cambia de fase en el interior del evaporador al mismo tiempo que se realiza el proceso de enfriamiento.

El evaporador es el lugar de la instalación donde se produce el intercambio térmico entre el refrigerante y el medio a enfriar.

En las fabricas de hielo cuando las temperaturas del agua de alimentación son particularmente altas, conviene considerar la posibilidad de instalar el evaporador en un preenfriador que disminuye la temperatura del agua que se envía a los moldes, lo que garantiza que la máquina de hacer hielo sea mas eficiente, aumentando la producción de hielo, por lo tanto mejora la rentabilidad de la fábrica.

Según (Witman Johnson Tomczyk, 1999) en el diseño de evaporadores se busca un funcionamiento eficiente para reducir la caída de presión dentro de los tubos del evaporador, el interior de estos tubos pueden ser pulidos y además hay que tener en cuenta la resistencia de ambos fluidos para la construcción del equipo.

En los evaporadores pequeños la resistencia térmica es baja, en el caso de los tubos en U (serpentines) el flujo del refrigerante provoca una alta resistencia, algunos autores consideran que cuando el evaporador es corto en forma de U es común colocar circuitos en paralelo tal y como se muestra en la Fig 1.5. (Witman Johnson Tomczyk, 1999)

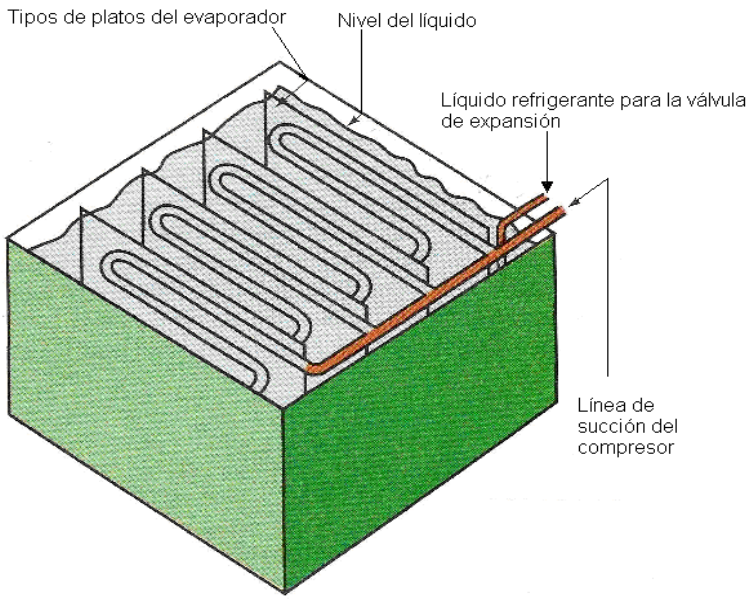


Fig. 1.5 Evaporador de amoniaco.

1.6.1 Tipos de compresores

Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de construcción.

Se distinguen dos tipos básicos de compresores:

El primero trabaja según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen. Se utiliza en el compresor de émbolo (oscilante o rotativo).

El otro trabaja según el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).

1.6.1.1 Compresores de émbolo o de pistón

Compresor de émbolo oscilante. Este es el tipo de compresor más difundido actualmente. Es apropiado para comprimir a baja, media o alta presión. Su campo de trabajo se extiende desde unos 1 .100 kPa (1 bar) a varios miles de kPa (bar).

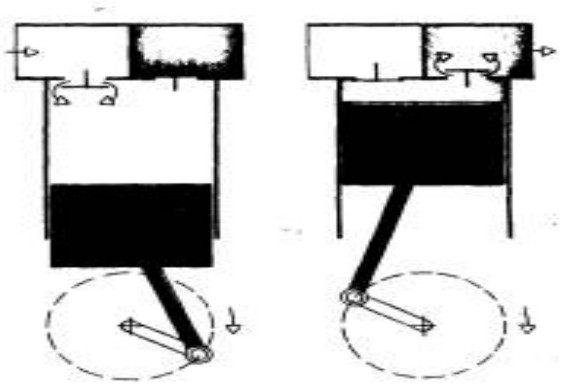


Figura 1.6 Compresor de émbolo oscilante.

Es el compresor mas difundido a nivel industrial, dada su capacidad de trabajar en cualquier rango de presión. Normalmente, se fabrican de una etapa hasta presiones de 5 bar, de dos etapas para presiones de 5 a 10 bar y para presiones mayores, 3 o mas etapas.

1.6.1.2 Compresor de émbolo rotativo

Consiste en un émbolo que está animado de un movimiento rotatorio. El aire es comprimido por la continua reducción del volumen en un recinto hermético.

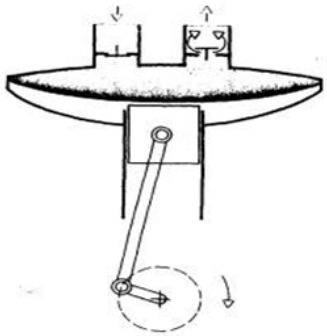


Fig 1.7 Compresor de Diafragma (Membrana).

Capítulo I: Estado del arte de las fábricas de hielo.

En las fabricas de hielo se utilizan compresores de de amoniaco, vertical, de bloque cárter, sin crucetas, de corriente directa, con enfriamiento de agua en los cilindros, en forma de V (90^{o})**.** El compresor tiene válvula de seguridad que deja pasar los vapores de amoniaco del espacio de descarga al espacio de succión a una diferencia en las presiones mayor de $16kg/cm^2$ y En la línea de descarga de la bomba de aceite hay una válvula de paso regulada para una presión de aceite de $(2kg/cm^2)$. Al aumentar la presión en la tubería principal de aceite, ella deja pasar en el cárter una parte del aceite de descarga.

1.7 Alimentación de Refrigerante

Se utilizan tres métodos de alimentación:

•Expansión Directa;
•Evaporador Inundado;
•Recirculación de Líquido.

1.8 Diferencias del aceite trabajando con freón o amoniaco

Según ("Los beneficios de un aceite que demuestran su aplicación en compresores fríos a amoniaco.") existen marcadas diferencias en el comportamiento del lubricante dependiendo del tipo de refrigerante que comprima el sistema. Entre las más importantes podemos mencionar:

1.8.1 Capacidad del lubricante

Una de las principales funciones del lubricante es evitar el desgaste del compresor. En los sistemas de refrigeración que trabajan con freón esto no es crítico, pues dicho gas tiene capacidad lubricante (Clorofluorocarbono). El freón en sí se comporta como una efectiva sustancia antidesgaste que ayuda al lubricante a proteger las piezas móviles del compresor.

En el caso de los sistemas con amoniaco la situación es diferente, pues el amoniaco no tiene ninguna capacidad lubricante y por el contrario promueve el desgaste.

Es importante también tener en cuenta que la formación de espuma reduce la capacidad de lubricidad. En el caso de los sistemas con freón esto no es un problema, pues el aceite es miscible con el refrigerante. Sin embargo en los sistemas con amoniaco, el aceite al no ser miscible con el refrigerante debe considerar los problemas de formación de espuma.

1.8.2 Características a bajas temperaturas

En el lado de baja temperatura del sistema de refrigeración el aceite no debe solidificarse o formar depósitos de cera que puedan obstruir la válvula de expansión, además de que los depósitos en el evaporador reducen considerablemente la eficiencia del sistema.

El aceite tradicional (nafténico) a -30ºC tiene una viscosidad de 109,000 cSt, mientras la tecnología de American Ammonia Refrigeration Oil adquiere una viscosidad de 29,500 cSt a la misma temperatura. ¿Cuál puede circular mejor? Es claro que el aceite tradicional causa un exceso de trabajo, menor flujo, menos lubricación, mayor consumo de energía y más problemas.

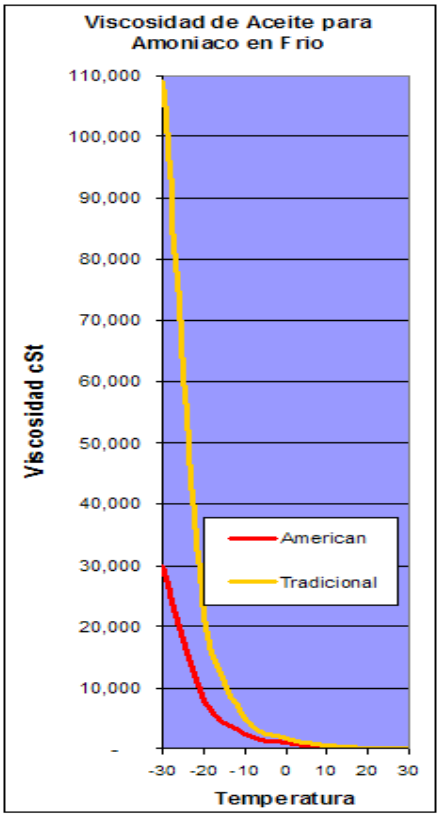


Fig. 1.8 Viscosidad del aceite para el amoniaco en frío.

En los sistemas de refrigeración que trabajan con freón el desempeño del aceite se mide a través de su Floc Point (Punto de Floculación), temperatura a la cual 10 % del aceite mezclado con Freón R-12 forma ceras. En los sistemas con amoniaco este parámetro no es representativo, pues existe una pobre miscibilidad entre el aceite y el refrigerante. En este caso, para medir el desempeño del aceite se utiliza su punto de fluidez, el que debe ser lo suficientemente bajo como para evitar la perjudicial formación de ceras. (“Los beneficios de un aceite que demuestran su aplicación en compresores fríos a amoniaco.”)

1.9 Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor es un dispositivo que facilita la transferencia de calor de una corriente de fluido a otra a diferentes temperaturas, en la actualidad en la mayoría de las industrias así como en diversas instalaciones de servicio se realizan procesos de

intercambio de calor de ahí la importancia del conocimiento de su forma de funcionamiento y de la metodología de cálculos asociados a los mismos.

Los procesos de producción de energía, refrigeración, calefacción y acondicionamiento de aire, el funcionamiento de casi todos los vehículos, entre otros dependen de diversos tipos de intercambiadores de calor, su diseño ha experimentado un gran desarrollo.

Los intercambiadores de calor se clasifican atendiendo al principio de operación en:

- Equipos de superficies: son los fluidos que intercambian calor, están separados por una pared o superficie.
- Equipos de contacto directo: introduce una resistencia a la transferencia de calor.

Dentro de los equipos de superficies de acuerdo a la forma en que trabajan se encuentran:

- Los equipos recuperativos: ambos fluidos fluyen simultáneamente y mantienen su posición con respecto a la superficie.
- Los equipos regenerativos: se hace circular el fluido caliente, la temperatura superficial aumentada y al cabo de cierto tiempo se pone a circular el fluido frío, es al que la superficie le cede el calor.

Conclusiones parciales.

1. En la revisión bibliográfica se describen diferentes tipos de fábricas de hielo de acuerdo al tipo de hielo que producen tales como**:** hielo en bloques, en escamas, en placas o en tubos y hielo fundente, de esta forma se clasifican los diferentes tipos de fábricas dependiendo del tipo de hielo que produce.
2. Las máquinas de hielo en bloques tradicionales producen alrededor de 100 toneladas de hielo/día necesitando solamente entre 10 y 15 trabajadores, las máquinas de hielo en escamas poseen una capacidad de 0.5 hasta 60 toneladas de hielo/día, además existen otras máquinas para hacer hielo que tienen una capacidad que no supera algunos cientos de kilogramos de hielo por día.
3. El equipo de refrigeración accionado por energía solar consiste en una unidad autónoma, que sólo necesita un suministro adecuado de agua para fabricar hielo.

El módulo estándar produce 200 kg de hielo en 24 horas, pero también existen módulos de hasta 1 000 kg en 24 horas.

CAPITULO II

Capítulo II: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

Capítulo 2: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

Descripción de la fábrica.

La Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara se fundó en 1978, reconocida por el ministro de la industria alimenticia (MINAL) y ha obtenido la condición de vanguardia nacional, se ha caracterizado por ser la única fábrica que no ha dejado de producir a lo largo de todos estos años, por lo que ha sido sometida a transformaciones como por ejemplo:

- Sustitución de la torre de enfriamiento debido a su mal estado físico.
- Sustituidas las bombas de la fábrica por otras de más eficiencia y más calidad.
- Instalación de filtros en los tanques de producción para evitar que las partículas de maderas provenientes de las tapas de estos tanques de producción se obstruyeran en las propelas del agitador de salmuera.
- Construcción de un laboratorio con el fin de analizar todo tipo de agentes que contribuyen directamente con la producción.
- Fabricación del comedor de la fábrica con la ayuda mutua de los trabajadores ya que antes no se contaba con esta instalación.
- La fábrica ha mantenido una desatacada trayectoria obteniendo condecoraciones del sindicato y la Central de Trabajadores de Cuba, su colectivo ha dado apoyo a otras provincias, por ejemplo cuando comenzó la batalla de ideas llevada a cabo por nuestro comandante en jefe en nuestro país le brindó apoyo un año a las provincias de Ciudad Habana, Villa Clara y Ciego de Ávila.

2.2 Esquema del proceso

El siguiente esquema especifica el proceso productivo de la fábrica.

Capítulo II: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

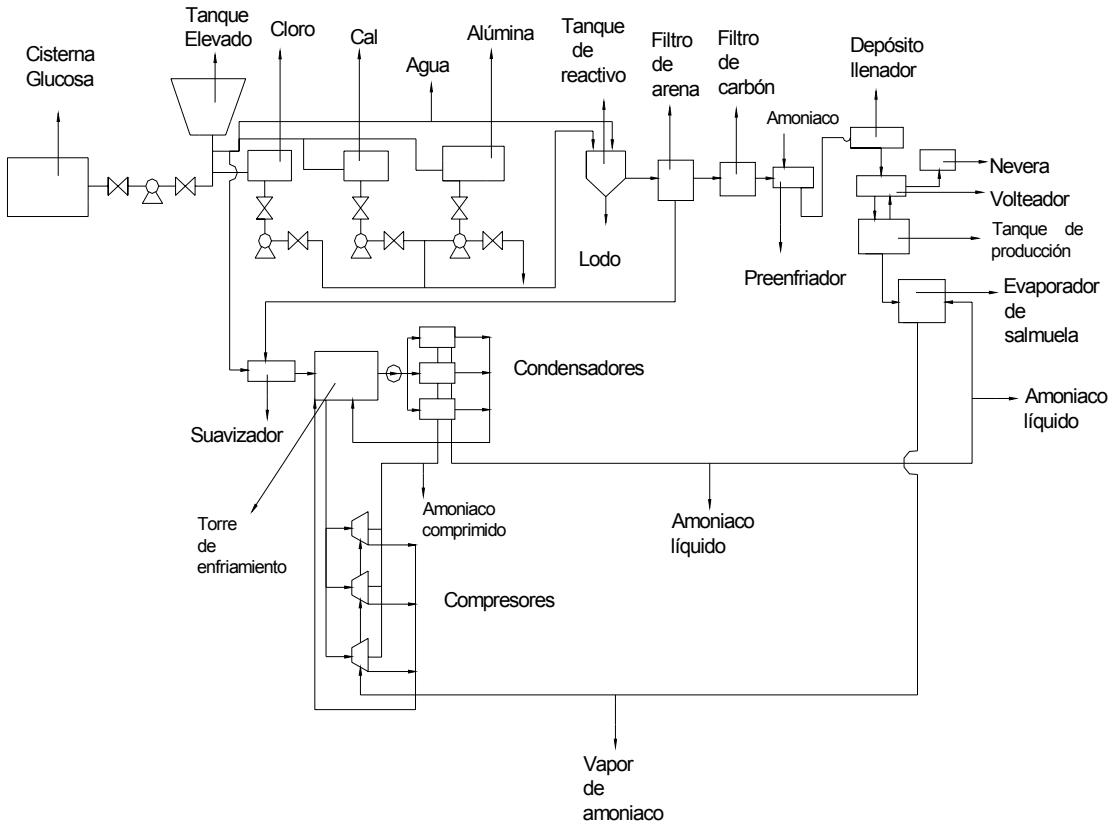


Fig. 2.1 Diagrama del proceso productivo de la fábrica de hielo.

- El proceso de elaboración del hielo en la Fábrica Ernesto Ché Guevara cuenta con dos circuitos principales, un primer circuito de refrigeración encargado de enfriar una solución salina para el enfriamiento del agua en los moldes, y un segundo circuito encargado de preenfriar el agua de llenado a los moldes para aminorar el tiempo de elaboración del hielo, este último circuito es el objeto de estudio de este trabajo dado que por problemas técnicos esta fuera de funcionamiento.
- El sistema de refrigeración de la planta consta de una sala de compresores, un sistema de condensadores, una torre de enfriamiento y la planta de enfriamiento de agua, a continuación se detallan las características técnicas del equipamiento de la fábrica:

- Los compresores son los encargados de comprimir y transportar los gases de amoniaco hacia los condensadores.
- El sistema de enfriamiento de agua es el encargado de transportar el agua fría a los moldes de hielo.
- La planta de tratamiento de agua es la encargada de darle tratamiento al agua tratada como a la suavizada, (el agua tratada es la que se utiliza para hacer el hielo y el agua suavizada se utiliza para la torre de enfriamiento).
- La nevera de almacenamiento está facultada para almacenar el hielo a la temperatura de conservación o sea $4^{o}C$, la cual posee serpentines en la parte superior de la nevera (techo) que trabajan con amoniaco.

2.2.1 Características técnicas del compresor AU – 200:

- Tipo de compresor: frigorífico, de amoniaco, vertical, de bloque cárter, sin crucetas, de corriente directa, con enfriamiento de agua en los cilindros, en forma de V (90^{o}).
- Producción de frío 150 000 kilo – calorías / h a $t_0 = -15^{o}C$ y $t_f = 30^{o}C$.
- Potencia consumida efectiva en estas condiciones (50 kilovatios).
- Diámetro de los cilindros (150 mm).
- Marcha del pistón (130 mm).
- Números de cilindros (4).
- Revoluciones (720 rpm).
- Gasto de agua enfriadora $(1.5m^3/h)$.
- Gasto de aceite $(200gramos/h)$.
- Peso del compresor (1500 kg).
- Diámetro de la tubería de succión (100 mm).
- Diámetro de la tubería de descarga (80 mm).

Las válvulas de succión y de descarga son automáticas.

La válvula de succión forma el fondo del pistón.

En los alojamientos del bloque – cárter en juego deslizante están montados casquillos de cilindros que pueden cambiarse.

El prensaestopas del cigüeñal es de muelle, bilateral, con pareja de aceite – grafito en rozamiento.

La válvula de succión, el filtro de los vapores y el filtro para la primera limpieza del aceite están puestos en el bloque – cárter.

La válvula de descarga está montada en el colector fundido exterior.

El compresor tiene válvula de seguridad que deja pasar los vapores de amoniaco del espacio de descarga al espacio de succión a una diferencia en las presiones mayor de $16kg/cm^2$.

Para el arranque facilitado, el compresor tiene línea de by – pass que une los dos espacios.

Para controlar la presión del aceite están montados también dos manómetros, uno señala la presión en la tubería principal de aceite y el otro en el cárter.

El compresor está completado con instrumentos de seguridad automática:

- Presostato combinado que desconecta el motor eléctrico cuando aumente la presión de condensación sobre la admisible o cuando la presión de evaporación sea inferior a la admisible.
- Presostato diferencial que desconecta el motor eléctrico al bajar la diferencia entre las presiones del aceite en la tubería principal de aceite y el cárter debajo de la admisible.

En la línea de descarga de la bomba de aceite hay una válvula de paso regulada para una presión de aceite de $\left(2kg/cm^2\right)$. Al aumentar la presión en la tubería principal de aceite, ella deja pasar en el cárter una parte del aceite de descarga.

Capítulo II: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

La norma NRIAL 0.41 Industria de Bebidas, Licores y Hielo que se utiliza en la empresa establece el proceso tecnológico de elaboración del producto de hielo en bloque:

2.3 Proceso tecnológico del hielo en bloque:

2.3.1 Especificaciones de los índices de calidad de las materias primas, materiales y componentes:

Nombre	Índice de calidad
Hipoclorito de sodio	conc. 30%mín. de cloro activo
Hipoclorito de calcio	conc. 60%mín. de cloro activo
Sulfato de aluminio	De 15 a 22% de Al_2O_3.
Cloruro de sodio	98% mín.de (NaOH) y (NaCl)
Hidrato de calcio	Conc. De 85 a 99%de CaOH
Hidróxido de sodio	98.9% NaOH.
Agua potable	Según NC 93 – 02.

2.3.1.1 Especificaciones de los índices de calidad del producto final:

Según lo establecido en la norma NRIAL 0.41 Industria de Bebidas, Licores y Hielo. Especificaciones de calidad.

2.3.2 Descripciones de las operaciones tecnológicas:

Operación #1: Preparación de la solución de Hipoclorito de Sodio o Calcio.

Operación #2: Preparación de la solución de Hidrato de Calcio.

Operación #3: Preparación de la solución de óxido de aluminio.

Operación #4: Tratamiento de agua. (Reacción química).

Operación #5: Filtración por arena.

Operación #6: Purificación por carbón activado.

Operación #7: Preenfriamiento del agua.

Operación #8: Llenado de los moldes.

Operación #9: Preparación o ajuste de la salmuera.

Operación #10: Suavizamiento del agua.

Operación #11: Congelación.

Operación #12: Extracción de hielo de los moldes.

Por la importancia que tiene para el presente trabajo se exponen a continuación las operaciones relacionadas con el mismo:

2.3.2.1 Operación #7: Preenfriamiento del agua destinada a la producción.

2.3.2.1.1 OBJETIVO DE LA OPERACIÓN TECNOLÓGICA:

Preenfriamiento del agua hasta 3 ^{0}C para favorecer el proceso de congelación disminuyendo el tiempo en que esto ocurre.

2.3.2.1.2 EQUIPOS INSTALADOS:

Manómetro de deformación elástica de 600 kPa con precisión de 2.5. Presión de trabajo de 40 a 50 kPa.

Termómetro de 0 a 5 ^{0}C .

2.3.2.1.3 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO:

El agua proveniente del filtro de carbón es preenfriada para posteriormente pasar a los moldes.

2.3.2.2 Operación #8: Llenado de los moldes.

2.3.2.2.1 OBJETIVO DE LA OPERACIÓN TECNOLÓGICA:

Llenado de los moldes con el agua destinada a la producción.

2.3.2.2.2 EQUIPOS INSTALADOS:

Dispositivo para llenar de tipo UP – 21 – 136.

Bomba.

2.3.2.2.3 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO:

Mediante una grúa puente que se mueve sobre la vía de rieles se trasladan los moldes de hielo hasta las duchas o dispositivos.

2.3.2.2.4 ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DEL OBJETO FINAL DE TRABAJO:

Moldes con 136.36 a 140.9 Kg de agua.

2.3.2.2.5 REQUISITOS DE SEGURIDAD:

Debe tomarse extrema precaución al llenar los mismos, el obrero que realice dicha función debe permanecer durante la operación alejado a una distancia prudencial para evitar accidentes.

Evite el derrame excesivo de agua mientras se maneja el dispositivo manual de la grúa para la traslación de los moldes hasta el tanque de salmuera, no se debe hablar ni desviar la atención hacia cuestiones ajenas.

2.3.2.3 Operación 12: Extracción de los bloques de hielo en los moldes:

2.3.2.3.1 OBJETIVO DE LA OPERACIÓN TECNOLÓGICA:

Extraer los bloques de hielo en los moldes.

2.3.2.3.2 EQUIPOS INSTALADOS:

Recipiente de descongelación o tanque de despegue.

Volteador.

Termómetro de vidrio de 0 a 30^{0}C.

2.3.2.3.3 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO:

Con la ayuda de la grúa se introducen los moldes en el recipiente de descongelación, el cual contiene agua. Una vez despegados los moldes del hielo se extraen mediante el volteador.

2.3.2.3.4 ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DEL OBJETO FINAL DE TRABAJO:

El producto cumplirá lo establecido en la norma NRIAL 041 ‘’Hielo’’. Especificaciones de calidad.

2.4 Caracterización energética de la empresa:

La EMBER realiza un control mensual de los consumos energéticos y la producción de hielo de la fábrica, en estudios realizados por el energético de la empresa provincial en los años 2007 – 2008 se obtiene los siguientes resultados.

Capítulo II: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

Año	Mes	Consumo E.E. (MWh)	Producción de hielo. (Toneladas)	Indice de consumo. (MWh)/(Toneladas)
2007	ENE	91,68	714	0,128
	MAR	83,52	662	0,126
	AGO	102,24	1012	0,101
	SEP	94,56	816	0,116
	OCT	110,88	847	0,131
	NOV	80,64	562	0,144
	DIC	86,40	822	0,105
2008	ENE	89,00	539	0,165
	MAR	75,05	700	0,107
	ABRIL	82,29	708	0,116
	MAYO	81,82	613	0,133

Tabla 2.1 Datos sobre el consumo de energía eléctrica, la producción de hielo e índice de Consumo en algunos meses de los años 2007 – 2008.

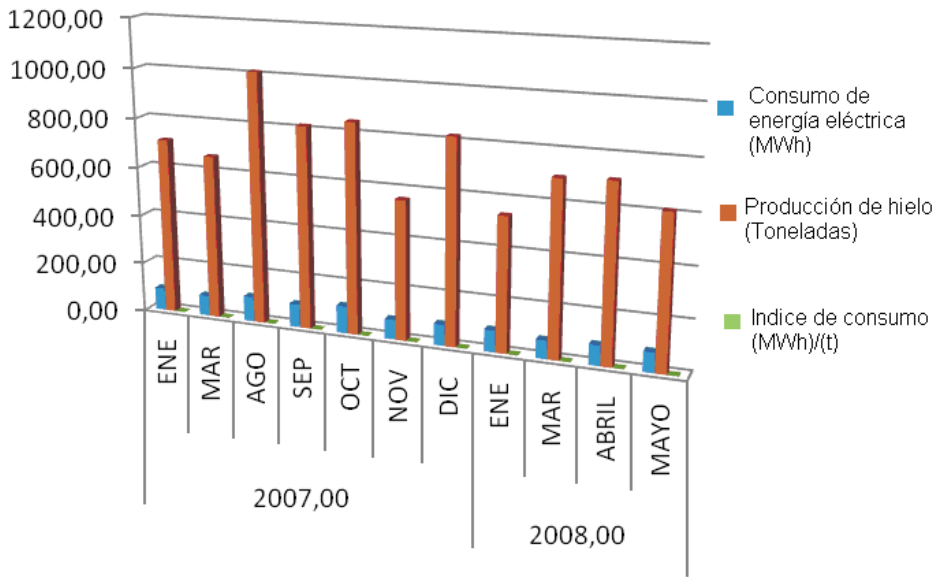


Fig 2.2 Comportamiento del consumo de energía, la producción de hielo e índice de consumo en meses representativos del 2007 y 2008.

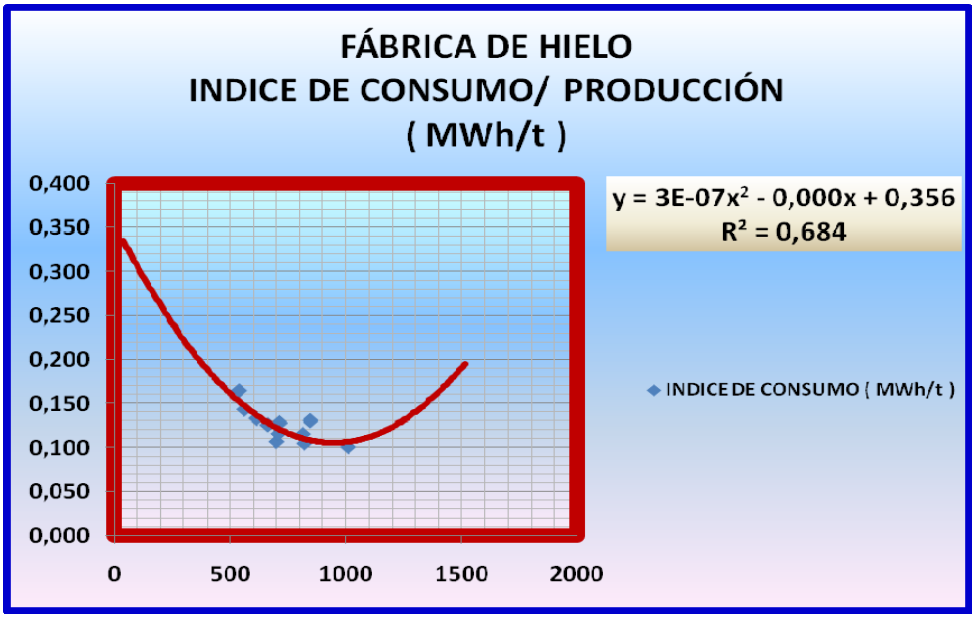


Fig 2.3 Análisis del índice de consumo contra producción.

Se puede concluir del gráfico:

- El factor de correlación es inferior a 0.75 lo que no define buena confiabilidad.
- Para lograr los resultados más eficientes la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara debe sólo ser operada en un rango de producción de 920 a 980 toneladas de hielo mensuales.
- El promedio de producción de la Fábrica es de 637.57 toneladas de hielo mensuales.

Con el objetivo de valorar la distribución de los consumos energéticos y la producción de hielo en el año 2008 y en dos meses del año 2009 se elaboraron los gráficos de barra que a continuación se exponen:

AÑO	Meses	Consumo de E.E (MWh)	Producción de hielo (Ton.)
2008	1	89,00	539
	2	0	0
	3	75,05	700
	4	82,29	708
	5	81,82	613
	6	89,6	801
	7	17,54	688,5
	8	91,95	648,74
	9	109,19	351
	10	77,41	290
	11	0	0

	12	30,05	407,5
2009	1	13,73	406
	2	56,78	425,87

Tabla 2.2 Datos sobre el consumo de la energía eléctrica y la producción de hielo en el año 2008 y en algunos meses del año 2009.

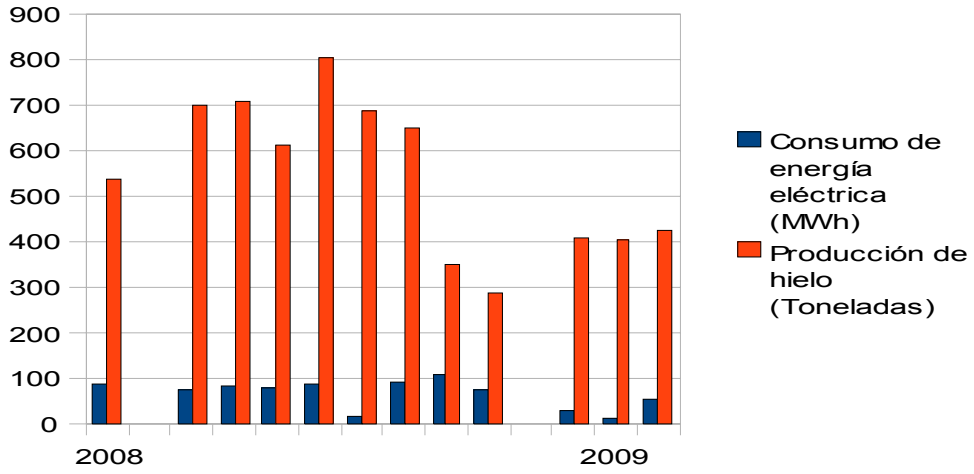


Fig 2.4 Comportamiento del consumo de la energía eléctrica y la producción de hielo en el año 2008 y en algunos meses del año 2009.

Resultados de la caracterización

La empresa solicita realizar el preenfriamiento de agua que no existe actualmente ya que se encuentra dentro del diseño de la planta tal y como se explica en la Norma NRIAL 0.41 Industria de Bebidas, Licores y Hielo, esta solicitud fue demostrada por los aspectos que se detectaron en el presente diploma.

El levantamiento de la fábrica demuestra que desde el punto de vista físico las condiciones no son adecuadas a pesar de las remodelaciones que ha realizado dicha institución. En el (Anexo 4) se encuentran fotos de algunos de los equipos que

componen dicha fábrica , entre los aspectos que se detectaron se demuestra que no se encuentra instalado el preenfriador de agua, el cual logra disminuir la temperatura de 35°C a 3°C que aparece en los datos de la fábrica y su empleo a nivel internacional en estas fábricas aumenta la capacidad de una planta en un 20 por ciento aproximadamente, esto se corrobora con los altos consumos energéticos que tiene la fábrica y se corresponden con bajos niveles de producción presentando como promedio 637.57 toneladas de hielo como promedio del 2007 al 2008 y en el presente año la producción de hielo se ha reducido a un promedio de 415 toneladas de hielo muy por debajo de las establecidas para lograr los índices de consumo adecuados de la fábrica.

Los resultados del levantamiento realizado confirman la necesidad de acometer el cálculo de un intercambiador de calor para garantizar el preenfriamiento del agua hasta 3 °C antes de ser enviados a los moldes con la consiguiente reducción de los consumos energéticos de la empresa, en el capítulo 3 se expone la metodología que se utilizará en el cálculo térmico del equipo.

Conclusiones parciales

1. La Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara con el preenfriamiento del agua a 3°C tiene una capacidad de 30 toneladas de hielo por día mientras que otras fábricas de hielo con el preenfriamiento del agua a 3°C tienen una capacidad de 42 toneladas de hielo por día.

2. En el año 2007 y los primeros 5 meses del año 2008 se produjo un consumo promedio de energía eléctrica de 88.9 MWh y una producción de la fábrica de 637 toneladas de hielo, en el año 2008 y los dos primeros meses del año 2009 hubo un consumo promedio en la fábrica de 67,8 MWh con una producción promedio de 548.2 toneladas de hielo.

Capítulo II: Caracterización de la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara.

3. Se demuestra la necesidad de la empresa de proceder al calculo de un preenfriador de agua hasta 3 °C para ser enviados a los moldes con el objetivo de incrementar la producción de la fábrica y lograr la consiguiente reducción de los consumos energéticos de la empresa.

CAPITULO III

Capítulo III: Cálculo térmico y evaluación económica del preenfriador de agua.

Capitulo 3: Cálculo térmico y evaluación económica del preenfriador de agua.

3.1 Metodología para el cálculo térmico del intercambiador de calor.

A continuación se detallan los pasos necesarios por la metodología de cálculo estudiada en clases para el diseño del intercambiador de calor.

- Definir los flujos másicos (m_1, m_2), temperaturas (t_1', t_1'') así como los calores específicos o calor latente (Cp_1, Cp_2) y presiones de trabajo de los fluidos calientes y fríos.
- Determinar las cargas térmicas. $(Q_1 y Q_2)$

  $$Q_1 = Q_2 + \Delta Q$$

- Resumir las propiedades de los fluidos generalmente a la temperatura media. (ρ, u, μ, P_r)
- Decidir si el intercambiador de calor se va a poner horizontal o vertical y especificar diámetro, longitud y material de los tubos.
- Decidir la posición de los fluidos por los tubos, por la coraza y si se van a poner en paralelo o contracorriente.
- Calcular el valor de diferencia media de temperatura logarítmica.

  (ΔT_{MLDT})

- Buscar un valor recomendado del coeficiente global de transferencia de calor (U) y calcular un área aproximada.

  Valores recomendados de U.

- Calcular los coeficientes de transferencia de calor $h_1 y\ h_2$, velocidades en los tubos y en la coraza, además de calcular $R_e, \overline{N_u}, \bar{h}$.
- Calcular el área de transferencia de calor, la longitud y el número de tubos del equipo.
- Comprobación del área de transferencia de calor.

Capítulo III: Cálculo térmico y evaluación económica del preenfriador de agua.

3.2 Cálculo térmico del preenfriador:

Basado en el levantamiento de las condiciones físicas del lugar disponible, los datos de los equipos instalados en el área y las indicaciones para el enfriamiento del agua según los requerimientos necesarios en función de la capacidad de producción de hielo necesaria para la empresa, se acomete el calculo del preenfriador siguiendo la metodología que se explica en el epígrafe anterior.

3.2.1 Consideraciones para el diseño.

Datos sobre el preenfriador:

$T_{ent\ agua} = 30\ ^0C$

$T_{sal\ agua} = 3\ ^0C$

Tiempo de permanencia del agua en el preenfriador: (45 minutos).

Diámetros del serpentín:

$d_{ext\ serp} = 32\,mm$

$d_{int\ serp} = 24\ mm$

Espesor del serpentín: (4 mm)

Material del serpentín: (acero sin costura).

Datos de los equipos instalados

Flujo que maneja la bomba a la salida del preenfriador: (7.5 L/s).

Presión de succión: ($1.5\ kg/cm^2$).

Presión de descarga: ($13.5\ kg/cm^2$).

Dimensiones del tanque del preenfriador:

Largo – (4.19 m)

Ancho – (1.26 m)

Profundo – (1.10 m)

3.2.2 Cálculo del volumen de agua:

Para obtener el volumen de agua que se va a enfriar se calcula el volumen del tanque y se le resta el volumen total del serpentín.

Volumen del tanque:

$$V_{agua} = V_{tanque} - V_{T.Placa} \quad \textbf{(Ec 3.1)}$$

$$V_{agua} = 5.8m^3 - 0.081m^3$$

$$V_{agua} = 5.72m^3$$

3.2.2.1 Cálculo del volumen del tanque:

$$V_{tanque} = a \times b \times c \quad \textbf{(Ec 3.2)}$$

$$V_{tanque} = 4.19m \times 1.26m \times 1.10m$$

$$V_{tanque} = 5.8m^3$$

Siendo: a -- largo

b -- ancho

c -- profundidad

3.2.2.2 Cálculo del volumen total de las tres placas:

El volumen de la placa que se calculó anteriormente lo multiplico por tres ya que son las tres placas que van a subdividir en cuatro secciones el tanque.

$$V_{T.Placa} = V_{placa} \times 3 \quad \textbf{(Ec 3.3)}$$

$$V_{T.Placa} = 0.027m^3 \times 3$$

$$V_{T.Placa} = 0.081m^3$$

3.2.2.2.1 Cálculo del volumen de una placa:

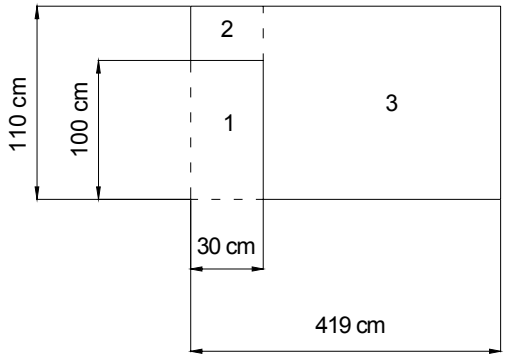


Fig. 3.1 Vista lateral de la placa.

La placa se subdividió en tres secciones para saber el volumen que ocupa la placa en el tanque de agua.

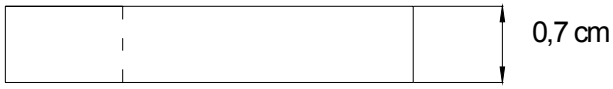


Fig. 3.2 Vista superior de la placa.

Dentro del tanque de agua se encuentran tres placas de iguales dimensiones y están ubicadas a la misma distancia unas de otras.

$$V_{placa} = (V_2 + V_3) - V_1 \qquad \textbf{(Ec 3.4)}$$

$$V_{placa} = (0.00021m^3 + 0.029m^3) - 0.0021m^3$$

$$V_{placa} = 0.027m^3$$

3.2.2.2.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LAS SECCIONES DE LA PLACA:

$$V_1 = a \times b \times c \qquad \textbf{(Ec 3.5)}$$

$$V_1 = 1m \times 0.007m \times 0.3m$$

$$V_1 = 0.0021m^3$$

$$V_2 = a \times b \times c$$

$V_2 = 0.1\text{m} \times 0.007\text{m} \times 0.3\text{m}$

$V_2 = 0.00021\text{m}^3$

$V_3 = a \times b \times c$

$V_3 = 1.10\text{m} \times 3.89\text{m} \times 0.007\text{m}$

$V_3 = 0.029\text{m}^3$

3.2.2 Cálculo de la masa de agua en (kg).

Se consideran los cálculos con el volumen de agua antes calculado en la (Ec 3.1).

$$m = V_{agua} \times \rho_{agua} \qquad \textbf{(Ec 3.6)}$$

$m = 5.72\text{m}^3 \times 994.9\text{kg}/\text{m}^3$

$m = 5740\text{kg} = 5.7\text{Toneladas}$

El valor que se obtuvo de la masa de agua fue considerando el volumen de agua del tanque en su total capacidad, para los siguientes cálculos se considera la mitad del volumen de agua la masa sería 2800kg.

3.2.3 Cálculo del flujo de agua:

Considerando la mitad del volumen de agua en el tanque del preenfriador se hicieron los siguientes cálculos:

Cálculo del flujo de agua para un tiempo de 45 minutos, éste es el tiempo que el agua va a estar recirculando por el tanque hasta alcanzar una temperatura final o de salida de 3^oC para una masa de $2800kg$.

$$\dot{m}_{agua} = \frac{m}{45\,\text{min}} \qquad \textbf{(Ec 3.7)}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{2800\text{kg}}{2700\text{seg}}$$

$\dot{m}_{agua} = 1.037 kg/s$

3.3 Cálculo de la cantidad de calor transferido:

3.3.1 Determinación del calor enfriado por el agua:

En la tabla A.6 (Propiedades del agua a $30^{o}C$), tomada del libro de texto ''Fundamentals Of. Heat and Mass Transfer''. Tomo 3, página 846.

$C_p = 4.178 kJ/kg^{o}C$

$$Q_{agua} = \dot{m}_{agua} \times Cp \times \Delta T \quad \textbf{(Ec 3.8)}$$

$Q_{agua} = 1.037 kg/s \times 4.178 kJ/kg^{o}C \times (30^{o}C - 3^{o}C)$

$Q_{agua} = 116.9 kJ/s = 116.9 kW$

3.3.2 Determinación del flujo de amoniaco:

Igualando las expresiones de balance se determina el flujo de amoniaco utilizando las ecuaciones de balance de calor:

$$Q_{abs} = Q_{rech} \quad \textbf{(Ec 3.10)}$$

Donde

$$Q_{abs} = \dot{m}_{amoniaco} \times r \quad \textbf{(Ec3.11)}$$

$\dot{m}_{amoniaco} \rightarrow$ Flujo de amoniaco.

$r \rightarrow$ Calor de cambio de fase.

El calor de cambio de fase se busca en la tabla 3.3 (Propiedad del líquido y vapor saturado para R-717, amoniaco con:

$$P_{abs} = P_{succión} + P_{atm} \quad \textbf{(Ec 3.12)}$$

$P_{abs} = 1.5 kg/cm^2 + 1.033 kg/cm^2$

$P_{abs} = 2.533kg/cm^2 = 248.4kPa = 2.45atm$

Y se obtiene:

$t_{sat} = -14^oC$

$h_g = 1444.34kJ/kg$

$h_L = 136.43kJ/kg$

$r = h_g - h_L$

$r = 1444.34kJ/kg - 136.43kJ/kg$

$r = 1307.9kJ/kg$

Despejando la ecuación 3.11 se obtiene:

$$\overset{o}{m}_{amon} = \frac{Q_{abs}}{r} = \frac{116.9kJ/s}{1307.9kJ/kg}$$

$\overset{o}{m}_{amon} = 0.089kg/s$

3.4 Obtención de los coeficientes de transferencia de calor:

3.4.1 Obtención de los coeficientes de transferencia de calor del agua:

Para obtener el Coeficiente de Transferencia de Calor del agua (h_{agua}) fue necesario revisar la tabla 1.1 página 8, Tomo 1 del texto (Fundamentals of Heat and Mass Transfer) Incropera, se proponen los siguientes valores de (h_{agua}):

	$h(W/m^2 \cdot K)$
Convección libre	
(Líquidos)	(50 – 1000)
Convección forzada	
(Líquidos)	(50 – 20000)

En la tabla 1.4 página 23 del libro de texto (Transferencia de Calor) del autor A.F.Mills se recomiendan los siguientes valores de (h_{agua}) :

Convección libre	$h\left(W/m^2 \cdot K\right)$
Agua	(15 – 100)
Convección forzada	
Agua	(50 – 10000)

Considerando que la recirculación del agua mediante una bomba crea cierta turbulencia, tomando en consideración los criterios de técnicos de refrigeración sobre la longitud del tubo, se estimaron para los cálculos un $h_{agua} = 800 W/m^2 \cdot K$.

La literatura consultada por los autores Kern, Cegel afirman que los coeficientes de Transferencia de Calor en tanques o canaletas son difíciles de evaluar, no existen arreglos convencionales y solo hay pocos datos para este tipo de equipo.

Teniendo en cuenta los criterios revisados se decidió asumir el coeficiente de transferencia de calor para el agua.

3.4.2 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del amoniaco:

Según (P.G.Romankov., K.F.Pávlov., & A.A.Noskov., 1981) en el libro de texto (Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química) página 191, cuyo autores son K.F.Pávlov, P.G.Romankov y A.A.Noskov, se obtienen las ecuaciones para el cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor para amoniaco o sea emisión calorífica en caso de ebullición de los líquidos.

$$h_{amoniaco} = \alpha = b \times \left(\frac{\lambda^2}{v \times \sigma \times T_{eb}} \right)^{1/3} \times q^{2/3} \qquad \textbf{(Ec 3.13)}$$

Donde:

$b \rightarrow$ Es un coeficiente adimensional que depende solamente de la relación entre las densidades del líquido y del vapor.

$\lambda \rightarrow$ Conductividad térmica.

$v \rightarrow$ Volumen específico.

$\sigma \rightarrow$ Tensión superficial.

$T_{ebullición} \rightarrow$ Temperatura de ebullición.

$q \rightarrow$ Carga térmica específica.

$$b = 0.075 \times \left[1 + 10 \times \left(\frac{\rho_{líquido}}{\rho_{vapor}} - 1 \right)^{-2/3} \right] \qquad \textbf{(Ec 3.14)}$$

$\rho_{líquido} \rightarrow$ Densidad del líquido.

$\rho_{vapor} \rightarrow$ Densidad del vapor.

$v_{líquido} \rightarrow$ Viscosidad del líquido.

$v_{vapor} \rightarrow$ Viscosidad del vapor. (P.G.Romankov. et al., 1981)

Las propiedades del líquido y vapor saturados para el R- 717, amoniaco, se determinaron en la tabla ubicada en el Anexo 3. (Propiedades de los refrigerantes)

$$v_{líquido} = 1.5214 m^3/kg$$

$$v_{vapor} = 0.4881 m^3/kg$$

$$\rho_{líquido} = \frac{1}{v_{líquido}} = \frac{1}{0.15214 m^3/kg}$$

$$\rho_{líquido} = 6.57 kg/m^3$$

$$\rho_{vapor} = \frac{1}{v_{vapor}} = \frac{1}{0.4881 m^3/kg}$$

$$\rho_{vapor} = 2.04 kg/m^3$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente en la ecuación 3.14 se adquiere:

$$b = 0.075 \times \left[1 + 10 \times \left(\frac{6.57 kg/m^3}{2.04 kg/m^3} - 1 \right)^{-2/3} \right]$$

$$b = 0.518$$

Capítulo III: Cálculo térmico y evaluación económica del preenfriador de agua.

En el texto (Fundamentals of Heat and Mass Transfer) en la tabla A.4 página 839 Tomo 3, con la temperatura de saturación del amoniaco que es $t_{sat} = 259K \approx 300K$ se obtiene la conductividad térmica y la viscosidad del amoniaco:

$\lambda = 24.7 \times 10^{-3} W/m \cdot K$

$v = 14.7 \times 10^{-6} m^2/s$

$\sigma = 65.3 \times 10^{-3} N/m$

$T_{ebullición} = -14^{o}C = 259K$

La carga térmica específica se obtiene de la siguiente forma:

Por la ecuación de balance de calor:

$Q_{amoniaco} = Q_{agua}$

Entonces la cantidad de calor del agua es $Q_{agua} = 116.9kW$

$Q_{agua} = 116900W$

Como la carga térmica específica está dada en W/m^2 se divide la cantidad de calor entre el área de la sección transversal.

$A = \pi \times d_{int} \times L$ **(Ec 3.15)**

Donde $L = 3.39m \rightarrow$ longitud del serpentín y $d_{int} \rightarrow$ diámetro interior del tubo del serpentín.

$A = 3.14 \times 0.024m \times 3.39m$

$A = 0.25m^2$

$$q = \frac{Q_{amoniaco}}{A} = \frac{116900W}{0.25m^2}$$ **(Ec 3.16)**

$q = 467600W/m^2$

Sustituyendo de la ecuación 3.13 se logra:

$$h_{amoniaco} = \alpha = 0.518 \times \left[\frac{\left(24.7 \times 10^{-3}\right)^{1/3}}{14.7 \times 10^{-6} \times 65.3 \times 10^{-3} \times 259} \right] \times \left[467600\right]^{2/3}$$

$$h_{amoniaco} = \alpha = 3575.6 W/m^2 \cdot K$$

3.5 Cálculo del coeficiente global de Transferencia de Calor:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{agua}} + \frac{\lambda}{K} + \frac{1}{h_{amoniaco}} + R_{incrustación}} \qquad \textbf{(Ec 3.17)}$$

Donde:

$h_{agua} \rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor del agua: $\left(800 W/m^2 \cdot K\right)$

$\lambda \rightarrow$ Espesor del tubo: $\left(4mm\right)$

$K \rightarrow$ Conductividad térmica del acero sin costura: $\left(52 W/m \cdot K\right)$ ya que la conductividad térmica del material oscila entre $\left(47 - 58 W/m \cdot K\right)$.

$h_{amoniaco} \rightarrow$ Coeficiente de Transferencia de Calor del amoniaco.

$R_{inc} \rightarrow$ Resistencia a la incrustación para líquidos refrigerantes en este caso para amoniaco: $\left(0.0002 m^2 \cdot K/W\right)$, L/T página 585 Tomo 3 del Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Con este valor de resistencia a la incrustación se garantiza un área de reserva por las incrustaciones por algas, dureza del agua, etc.

Sustituyendo los datos en la ecuación 3.17 se adquiere:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{800 W/m^2 \cdot K} + \frac{0.004m}{52 W/m \cdot K} + \frac{1}{5529.7 W/m^2 \cdot K} + 0.0002 m^2 \cdot K/W}$$

$$U = 556.7 W/m^2 \cdot K$$

3.6 Cálculo de la Diferencia Media de Temperatura Logarítmica:

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = \frac{t_1' - t_1''}{\ln \frac{t_{sat} - t_1'}{t_{sat} - t_1''}} \qquad \textbf{(Ec 3.18)}$$

$t_1' \rightarrow$ Temperatura de entrada del fluido caliente.

$t_1'' \rightarrow$ Temperatura de salida del fluido caliente.

$t_{sat} \rightarrow$ Temperatura de saturación del fluido frío (amoniaco).

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = \frac{30^oC - 3^oC}{\ln \frac{-14^oC - 30^oC}{-14^oC - 3^oC}}$$

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = 28.4^oC$$

3.7 Cálculo del área de transferencia de calor:

$$Q = U \times A \times \bar{\Delta T}_{MLDT} \qquad \textbf{(Ec 3.19)}$$

Despejando de la ecuación 3.19 se obtiene:

$$A = \frac{Q}{U \times \Delta T_{MLDT}}$$

$$A = \frac{116.9 \times 10^3 W}{556.7 W/m^2 \cdot K \times 28.4K}$$

$$A = 7.39 m^2$$

3.7.1 Cálculo de la longitud total del serpentín (L):

$$A_T = A_g = \pi \times d_{ext} \times L \qquad \textbf{(Ec 3.20)}$$

$$L = \frac{A_g}{\pi \times d_{ext}} = \frac{7.39 m^2}{3.14 \times 0.032 m}$$

$$L = 73.5 m$$

Explicación de la estructura del serpentín dentro del tanque del preenfriador.

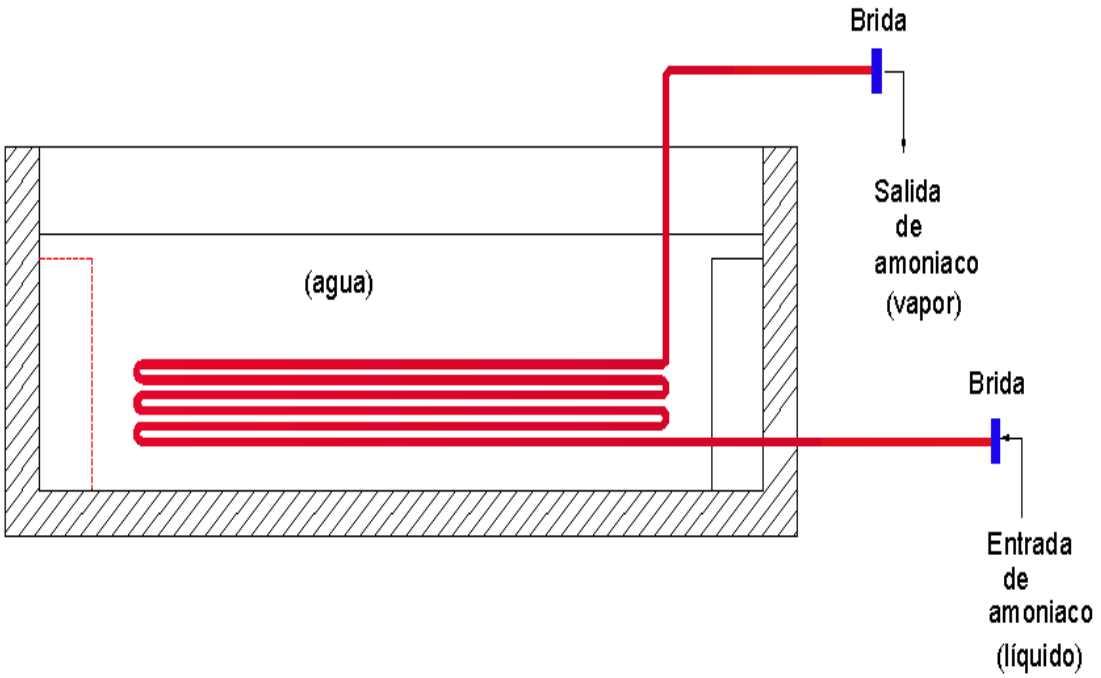


Fig.3.3 Vista lateral del preenfriador de agua.

En la vista lateral del preenfriador de agua de la Fábrica de Hielo se observa como está estructurado y distribuido el serpentín en esa área, además de las planchas que separan al volumen de agua localizado en el tanque en cuatro secciones; el amoniaco líquido se incorpora por la parte inferior del evaporador ejerciendo toda su función y culminando su trayectoria en la parte superior en forma de vapor; en el lado izquierdo se localiza unas líneas discontinuas de color rojo que indican que la plancha posee una abertura, al igual que en el lado derecho se percibe una línea continua de color negro, todas estas aberturas en las planchas cumplen un objetivo, que el agua transite por todas las secciones del tanque del preenfriador cuando se encuentre en recirculación intercambiando aún más con el amoniaco (calor – frío) antes de que se extraiga mediante una bomba hacia los moldes de llenado.

El serpentín se encuentra ubicado en el tanque a 200 mm de la parte inferior del tanque, posee un diámetro exterior de 32 mm con 4 mm de espesor (8 mm en total) del

tubo y por ende 24 mm de diámetro exterior, éste implemento dista de 74 m de longitud total distribuyéndose en las cuatros secciones del tanque de agua, en cada sección del tanque se localizan 18.5 m de longitud lo que equivale a 6 vueltas con una distancia de 3 m, posee además un radio de curvatura de 50 mm y por ende 100 mm de diámetro, esta es la altura que va a obtener cada vuelta del serpentín; en las entradas y las salidas del serpentín se localizan las bridas y mediante uniones atornilladas se acoplan a un Manifold, éste es el encargado de distribuir el amoniaco en las cuatros secciones de los serpentines.

En el anexo 2 se encuentra ubicada una vista superficial del preenfriador de agua con una explicación detallada sobre éste.

3.9 Comparación del preenfriador calculado con un equipo que trabaja con convección natural o convección libre.

Para acometer el cálculo del preenfriador, se realizó un cálculo inicial teniendo como criterio que el tanque no tenía recirculación, para lo cual la condición del agua era estancada, esto requirió realizar el cálculo para Convección libre que se expone en el Anexo 1.

Expresiones	Convección libre.	Convección forzada.
h_{agua}	$15.75\left(W/m^2\cdot K\right)$	$800\left(W/m^2\cdot K\right)$
$h_{amoniaco}$	$3575.6\left(W/m^2\cdot K\right)$	$3575.6\left(W/m^2\cdot K\right)$
U	$15.39\left(W/m^2\cdot K\right)$	$556.7\left(W/m^2\cdot K\right)$
A	$267.4\,m^2$	$7.39\ m^2$

Tabla 3.1 Comparación de los resultados obtenidos en los cálculos realizados por la metodología.

1. En el Anexo 1 se expone el cálculo del preenfriador con el criterio de un equipo sin recirculación de agua fría (Líquido estancado), donde se demuestra que para esa

condición, Convección libre, se requiere un equipo de $267.4\,m^2$ que no es posible ubicar en el área física disponible para instalar este equipo debido a los bajos coeficientes que se obtiene para este régimen de transferencia de calor.

2**.** El equipo que se diseña para convección forzada se adecua al área disponible y garantiza el enfriamiento del agua para suministrar a los moldes con una temperatura de 3^oC.

3.10 Evaluación económica

3.10.1 Metodología para calcular el costo inversión.

En la dirección http://www.matche.com/EquipCost/Exchanger.htm después de haber encontrado la página se selecciona Costos de Equipos y a continuación se especifica el tipo de equipo (Intercambiador de Calor), posteriormente se localiza el Costo del Intercambiador de Calor pero éste presenta varias incógnitas como son:

- Tipo de Intercambiador de Calor: (Evaporador de tubos horizontales).
- Especificación del área de Transferencia de Calor: $(7.39\,m^2 \approx 80\,ft^2)$.
- Tipo de material del Intercambiador de Calor: (Acero al carbono).
- Puntualización de la presión interna, esta es la que se encuentra ubicada por dentro de los tubos: $(146\,kPa \approx 21.2PSI)$ y como el valor mínimo del PSI que aparece en el rango es 150 PSI se escoge éste ya que el dado es 21.2 PSI.
- Luego aparece automáticamente el costo del equipo en el 2007 US $: 42600.

  F.O.B.Gulf COSAT U.S.A. (F.O.B.Gulf Coast U.S.A.)

Conclusiones parciales.

1. Los cálculos realizados en este capítulo demuestran que existe una gran diferencia entre los valores obtenidos por la metodología asumiendo que el fluido se encuentra en estanco (convección libre) y la condición final diseñada con recirculación (convección forzada), en la cuál se destaca la diferencia del área de transferencia de calor que representa un 97.24% mayor en el estanco (convección libre) con respecto a la convección forzada (recirculación) ya que el área de transferencia en el convección libre es 267,4 m^2 y el área en convección forzada es 7.39 m^2**.**

2. El evaporador que se calcula para el trabajo del preenfriador se adecua a las características físicas disponibles y los principales valores obtenidos son:

- Temperatura de en salida del agua – $(3^{o}C)$
- Flujo de agua -- $(1.037kg/s)$
- Flujo de amoniaco -- $(0.089kg/s)$
- Calor transferido en el equipo -- $(116.9kW)$
- Área de transferencia -- $(7.39m^2)$
- Longitud del serpentín -- $(73.5m)$

CONCLUSIONES

Conclusiones.

Conclusiones Generales.

1. La Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara en sus dos últimos años (2008 – 2009) ha entregado una producción de hielo promedio de 548 toneladas/mes valores muy por debajo de los alcanzados históricamente de 950 toneladas de hielo/mes y con altos consumos energéticos que se incrementan hasta un promedio de 67,8 MWh, resultando consumos muy altos en los meses de verano.

2. La caracterización técnica y energética de la fábrica demuestra que se necesita recuperar la instalación del preenfriador de agua para disminuir su temperatura hasta 3^0 C a partir de los equipos disponibles en operación y las características físicas del local, por lo que se propone calcular un evaporador de amoniaco.

3. El evaporador de amoniaco calculado, sumergido en un tanque de agua en recirculación, garantiza un flujo de 0.089 kg/s hasta una temperatura de 3^0 C en un tiempo de 45 minutos con las características siguientes:

Tipo de intercambiador: En U (Serpentín)

Área de transferencia $\rightarrow 7.39 m^2$

Longitud de los tubos $\rightarrow 73.5 m$

4. El calculo térmico del preenfriador cumple con las restricciones físicas del tanque de almacenamiento de agua y las condiciones de temperaturas establecidas para el suministro de agua a los moldes de hielo, ya que es factible el área disponible para colocar el serpentín del evaporador en forma de 4 secciones paralelas que garantizan la reducción de la caída de presión tal y como se recomienda en la literatura especializada.

5. El costo de inversión del equipo es de 42600 CUC.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

1. Garantizar la hermeticidad del tanque del preenfriador para reducir las perdidas de transferencia de calor al medio.

2 Automatizar el sistema de control del preenfriador para garantizar los valores de temperatura del agua fría.

3. Realizar pruebas a escala de planta piloto para conocer el valor real del coeficiente de transferencia de calor del agua que se obtiene y definir la longitud exacta de los tubos.

4. Sugerir un proyecto mecánico que garantice los cálculos del serpentín.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias Bibliográficas.

El hielo en las pesquerías. . (2009, May). Retrieved from http://www.fao.org/docrep/003/t0713s/T0713s05.htm.

F.O.B.Gulf Coast U.S.A. Costo de inversión de los equipos de Transferencia de Calor. . Retrieved from http://www.matche.com/EquipCost/Exchanger.htm.

Los beneficios de un aceite que demuestran su aplicación en compresores fríos a amoniaco. . Retrieved from http://www.widman.biz/Seleccion/Amoniaco-sel/amoniaco-sel.html.

P.G.Romankov., K.F.Pávlov., & A.A.Noskov. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química.* (p. 611). Moscú: MIR.

Witman Johnson Tomczyk. (1999). *Refrigeration Air Conditioning Technology* (4th ed.). Delmar Thomson Learning.

Yunus A. Cengel. (2005). *Transferencia de Calor.* (2nd ed.). México: Mc Grau - Hill.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.

A.F.Mills. *Transferencia de Calor*.

El hielo en las pesquerías. . (2009, May). Retrieved from http://www.fao.org/docrep/003/t0713s/T0713s05.htm.

F.O.B.Gulf Coast U.S.A. Costo de inversión de los equipos de Transferencia de Calor. . Retrieved from http://www.matche.com/EquipCost/Exchanger.htm.

Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Vols. 1-3, Vol. 1).

Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* (Vols. 1-3, Vol. 2).

Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* (Vols. 1-3, Vol. 3).

Ing.A.Blanco. , & Ing.Omar Herrera. (1985). *Equipos de Transferencia de Calor.* (p. 343). La Habana: ISPJAE.

J.P.Holman. (1998). *Transferencia de Calor.* (octava (primera en español).). España: Concepción Fernández Madrid.

Los beneficios de un aceite que demuestran su aplicación en compresores fríos a amoniaco. . Retrieved from http://www.widman.biz/Seleccion/Amoniaco-sel/amoniaco-sel.html.

P.G.Romankov., K.F.Pávlov., & A.A.Noskov. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química.* (p. 611). Moscú: MIR.

Witman Johnson Tomczyk. (1999). *Refrigeration Air Conditioning Technology* (4th ed.). Delmar Thomson Learning.

Yunus A. Cengel. (2005). *Transferencia de Calor.* (2nd ed.). México: Mc Grau - Hill.

ANEXOS.

Anexos.

Anexo 1

Cálculo térmico del preenfriador:

Basado en consideraciones del trabajo precedente de un preenfriador de agua en la empresa se acometió el cálculo con el criterio de un equipo sin recirculación del agua fría (Líquido estancado).

1. Cálculo del flujo de agua:

Considerando la mitad del volumen de agua en el tanque del preenfriador se hicieron los siguientes cálculos:

Cálculo del flujo de agua para un tiempo de 45 minutos, éste es el tiempo que el agua va a estar en el tanque hasta alcanzar una temperatura final o de salida de $3^{o}C$ para una masa de $2800kg$.

$$\overset{o}{m}_{agua} = \frac{m}{45\min}$$

$$\overset{o}{m}_{agua} = \frac{2800kg}{2700seg}$$

$$\overset{o}{m}_{agua} = 1.037kg/s$$

2 Cálculo de la cantidad de calor transferido:

$$Q_{agua} = \overset{o}{m}_{agua} \times Cp \times \Delta T$$

$$Q_{agua} = 1.037kg/s \times 4.178kJ/kg^{o}C \times \left(30^{o}C - 3^{o}C\right)$$

$$Q_{agua} = 116.9kJ/S = 116.9kW$$

En la tabla A.6 (Propiedades del agua a $30^{o}C$) fue tomada del libro de texto ‘’Fundamentals of Heat and Mass Transfer’’. Tomo 3, página 846.

$$C_p = 4.178kJ/kg^{o}C$$

Por la ecuación de balance de calor:

$$Q_{abs} = Q_{rech}$$

Las Q representan pérdidas de calor.

$$Q_{abs} = \overset{o}{m}_{amoniaco} \times r$$

$r \rightarrow$ Calor de cambio de fase.

Para encontrar el calor de cambio de fase se localiza el anexo 3 que contiene la tabla de propiedad del líquido y vapor saturado para R-717, amoniaco y entro con:

$$P_{abs} = P_{succión} + P_{atm}$$

$$P_{abs} = 1.5kg/cm^2 + 1.033kg/cm^2$$

$$P_{abs} = 2.533kg/cm^2 = 248.4kPa = 2.45atm$$

Y se obtiene:

$$t_{sat} = -14^oC$$

$$h_g = 1444.34kJ/kg$$

$$h_L = 136.43kJ/kg$$

$$r = h_g - h_L$$

$$r = 1444.34kJ/kg - 136.43kJ/kg$$

$$r = 1307.9kJ/kg$$

$$\overset{o}{m}_{amon} = \frac{Q_{abs}}{r} = \frac{116.9kJ/s}{1307.9kJ/kg}$$

$$\overset{o}{m}_{amon} = 0.089kg/s$$

2.1 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor del agua:

Anexos

El cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor del agua se obtiene por convección libre o convección natural ya que el fluido se encuentra en estanco y las expresiones utilizadas son las siguientes:

Cálculo del Rayleigh:

$$R_a = G_r \times P_r = \frac{g \times \beta \times (T_1 - T_2) \times L_c^{\ 3}}{\nu} \times P_r$$

$T_1 \rightarrow$ Temperatura de entrada del fluido.

$T_2 \rightarrow$ Temperatura de salida del fluido.

$L_c \rightarrow$ Distancia entre la superficie caliente y fría.

$g \rightarrow$ Gravedad.

$\nu \rightarrow$ Viscosidad.

$P_r \rightarrow$ Prandtl.

$\beta \rightarrow$ Coeficiente de expansión volumétrica.

Calculando la temperatura promedio del agua se obtienen las siguientes propiedades de volumen específico y Prandtl obtenidas en el Krasnoshikov:

$$T_{promedio} = \frac{T_{ent} + T_{salida}}{2} = \frac{30^{\circ}C + 3^{\circ}C}{2}$$

$$T_{promedio} = 16.5^{\circ}C$$

$$T_{promedio} = 16.5^{\circ}C + 273K = 289K$$

$$\nu = 1.006 \times 10^{-6} m^3 / kg$$

$$P_r = 7.56$$

$$\beta = \frac{1}{T_{promedio}} = \frac{1}{289K}$$

$$\beta = 0.00346K^{-1}$$

$$R_a = \frac{9.81 \times 0.00346 \times \left(30^{\circ}C - 3^{\circ}C\right) \times \left(1.10\right)^3}{1.006 \times 10^{-6}} \times 7.56$$

$$R_a = 8.533 \times 10^6$$

Cálculo del Nusselt:

La expresión del Nusselt que se utiliza a continuación está dada para la emisión calorífica en caso de movimiento libre (durante la convección natural) y se utiliza para la emisión calorífica por fuera de los tubos horizontales, la expresión es la 4.40 Página 187 del libro de texto (Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química) cuyo autores son K.F.Pavlov, P.G.Romankov y A.A.Noskov.

$$Nu = 0.5 \times \left(G_r \times P_r\right)^{0.25} \times \left(\frac{P_r}{\mathrm{Pr}_{pared}}\right)^{0.25}$$

El Prandtl de la pared se obtiene mediante la temperatura de la pared que se calcula de la siguiente forma:

$$T_{pared} = \frac{T_{promedio_{agua}} + T_{saturación}}{2} = \frac{16.5^{\circ}C + \left(-14^{\circ}C\right)}{2}$$

$$T_{pared} = 1.25^{\circ}C$$

$$T_{pared} = 1.25^{\circ}C + 273K = 274.25K \approx 275K$$

En la tabla A.6 (Propiedades del agua) página 846 del libro de texto “Fundamentals of Heat and Mass Transfer’’ Tomo 3 se entra con la temperatura de la pared y se obtiene el número Prandtl que es el de la pared:

$$\mathrm{Pr}_{pared} = 12.22$$

$$Nu = 0.5 \times \left(8.533 \times 10^6\right)^{0.25} \times \left(\frac{7.56}{12.22}\right)^{0.25}$$

$$Nu = 23.943$$

En la tabla A.6 (Propiedades del agua) página 846 del libro de texto “Fundamentals of Heat and Mass Transfer’’ Tomo 3 se entra con la temperatura promedio del agua $(289K \approx 290K)$ y se obtiene la conductividad térmica:

$$k = 598 \times 10^{-3} W/m \cdot K$$

$$h_{agua} = \frac{Nu \times k}{L}$$

$$h_{agua} = \frac{23.943 \times 598 \times 10^{-3}}{1.10}$$

$$h_{agua} = 15.75 W/m^2 \cdot K$$

2.2 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor para amoniaco:

En el libro de texto (Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química) página 191, cuyo autores son K.F.Pávlov, P.G.Romankov y A.A.Noskov, se encuentran las ecuaciones para el cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor para amoniaco o sea emisión calorífica en caso de ebullición de los líquidos.

$$h_{amoniaco} = \alpha = b \times \left(\frac{\lambda^2}{\nu \times \sigma \times T_{eb}} \right)^{1/3} \times q^{2/3}$$

Donde:

$b \rightarrow$ Es un coeficiente adimensional que depende solamente de la relación entre las densidades del líquido y del vapor.

$\lambda \rightarrow$ Conductividad térmica.

$\nu \rightarrow$ Volumen específico.

$\sigma \rightarrow$ Tensión superficial.

$T_{ebullición} \rightarrow$ Temperatura de ebullición.

$q \rightarrow$ Carga térmica específica.

$$b = 0.075 \times \left[1 + 10 \times \left(\frac{\rho_{líquido}}{\rho_{vapor}} - 1 \right)^{-2/3} \right]$$

$\rho_{líquido} \rightarrow$ Densidad del líquido.

$\rho_{vapor} \rightarrow$ Densidad del vapor.

$\nu_{líquido} \rightarrow$ Viscosidad del líquido.

$\nu_{vapor} \rightarrow$ Viscosidad del vapor.

En el anexo 3 se muestra la tabla propiedades del líquido y vapor saturado para el R-717 (amoniaco).

$$\nu_{líquido} = 1.5214 m^3 / kg$$

$$\nu_{vapor} = 0.4881 m^3 / kg$$

$$\rho_{líquido} = \frac{1}{\nu_{líquido}} = \frac{1}{0.15214 m^3 / kg}$$

$$\rho_{líquido} = 6.57 kg / m^3$$

$$\rho_{vapor} = \frac{1}{\nu_{vapor}} = \frac{1}{0.4881 m^3 / kg}$$

$$\rho_{vapor} = 2.04 kg / m^3$$

$$b = 0.075 \times \left[1 + 10 \times \left(\frac{6.57 kg / m^3}{2.04 kg / m^3} - 1 \right)^{-2/3} \right]$$

$$b = 0.518$$

En el libro de texto básico (Fundamentals of Heat and Mass Transfer) en la tabla A.4 página 839 Tomo 3, entro con la temperatura de saturación del amoniaco que es $t_{sat} = 259K \approx 300K$ y se obtiene la conductividad térmica además de la viscosidad del amoniaco:

$$\lambda = 24.7 \times 10^{-3} W / m \cdot K$$

$\nu = 14.7 \times 10^{-6} m^2 / s$

$\sigma = 65.3 \times 10^{-3} N / m$

$T_{ebullición} = -14^{o} C = 259K$

La carga térmica específica se obtiene de la siguiente forma:

Por la ecuación de balance de calor:

$Q_{amoniaco} = Q_{agua}$ Entonces la cantidad de calor del agua es $Q_{agua} = 116.9kW$

$Q_{agua} = 116900W$

Como la carga térmica específica está dada en W / m^2 se divide la cantidad de calor entre el área de la sección transversal.

$A = \pi \times d_{\text{int}} \times L$

Donde $L = 3.39m \rightarrow$ longitud del serpentín y $d_{\text{int}} \rightarrow$ diámetro interior del tubo del serpentín.

$A = 3.14 \times 0.024m \times 3.39m$

$A = 0.25m^2$

$$q = \frac{Q_{amoniaco}}{A} = \frac{116900W}{0.25m^2}$$

$q = 467600W / m^2$

$$h_{amoniaco} = \alpha = 0.518 \times \left[\frac{\left(24.7 \times 10^{-3}\right)^{1/3}}{14.7 \times 10^{-6} \times 65.3 \times 10^{-3} \times 259} \right] \times \left[467600\right]^{2/3}$$

$h_{amoniaco} = \alpha = 3575.6W / m^2 \cdot k$

3 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{agua}} + \frac{\lambda}{K} + \frac{1}{h_{amoniaco}} + R_{incrustación}}$$

Donde:

$h_{agua} \rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor del agua: $\left(800W/m^2 \cdot K\right)$

$\lambda \rightarrow$ Espesor del tubo: $\left(4mm\right)$

$K \rightarrow$ Conductividad térmica del acero sin costura: $\left(52W/m \cdot K\right)$ ya que la conductividad térmica del material oscila entre $\left(47-58W/m \cdot K\right)$.

$h_{amoniaco} \rightarrow$ Coeficiente de Transferencia de Calor del amoniaco.

$R_{inc} \rightarrow$ Resistencia a la incrustación para líquidos refrigerantes en este caso para amoniaco: $\left(0.0002m^2 \cdot K/W\right)$, L/T página 585 Tomo 3 del Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Con este valor de resistencia a la incrustación se garantiza un área de reserva por las incrustaciones por algas, dureza del agua, etc.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{15.75W/m^2 \cdot K} + \frac{0.004m}{52W/m \cdot K} + \frac{1}{3575.6W/m^2 \cdot K} + 0.0002m^2 \cdot K/W}$$

$$U = 15.39W/m^2 \cdot K$$

4 Cálculo de la Diferencia Media de Temperatura Logarítmica:

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = \frac{t_1' - t_1''}{\ln \frac{t_{sat} - t_1'}{t_{sat} - t_1''}}$$

$t_1' \rightarrow$ Temperatura de entrada del fluido caliente.

$t_1'' \rightarrow$ Temperatura de salida del fluido caliente.

$t_{sat} \rightarrow$ Temperatura de saturación del fluido frío (amoniaco).

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = \frac{30^oC - 3^oC}{\ln \frac{-14^oC - 30^oC}{-14^oC - 3^oC}}$$

$$\bar{\Delta T}_{MLDT} = 28.4^oC$$

5 Cálculo del Área de Transferencia de Calor:

$$Q = U \times A \times \bar{\Delta T}_{MLDT}$$

$$Q = U \times A \times \Delta T_{MLDT}$$

$$A = \frac{Q}{U \times \Delta T_{MLDT}}$$

$$A = \frac{116.9 \times 10^3 W}{15.39 W/m^2 \cdot K \times 28.4 K}$$

$$A = 267.4 m^2$$

6 Cálculo de la longitud total del serpentín (L):

$$A_T = A_g = \pi \times d_{ext} \times L$$

$$L = \frac{A_g}{\pi \times d_{ext}} = \frac{267.4 m^2}{3.14 \times 0.032 m}$$

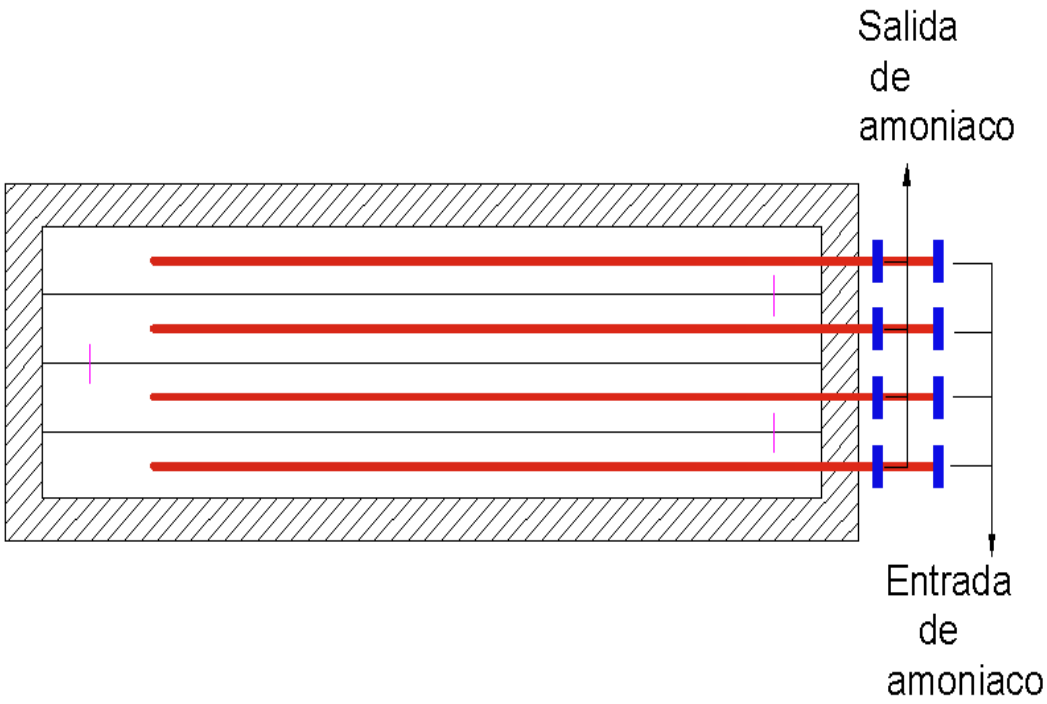
$$L = 2661.2 m$$

Como se puede observar el área de transferencia de calor al igual que la longitud total del serpentín resultan valores ilógicos para estas condiciones del problema.

Anexos

Anexo 2

Vista superior del preenfriador de agua (serpentín).



Como se puede observar en esta figura se refleja una vista superior del preenfriador de agua en la Fábrica de Hielo Ernesto Ché Guevara de Pueblo Griffo, lo que se encuentra subrayado en el borde del tanque es la pared, también se encuentran ubicadas en la figura tres planchas que dividen el tanque en cuatro secciones, estas poseen una línea lila que indica un corte en cada plancha, cada sección cuenta con un serpentín por separado y están ubicados en el tanque del preenfriador con color rojo, se localizan además en esta figura unas piezas de color azul que se denominan bridas (por aquí entra y sale el amoniaco), estas van acopladas a otras bridas de iguales dimensiones que a su vez estarán junto a una pieza llamada (manifold) y es la encargada de distribuir el amoniaco en los cuatros serpentines que se localizan en la figura.

Anexos

Anexo 3

Tabla : Propiedades del líquido y vapor saturados para el R-717

R-717, NH3, Amoniaco

t (°C)	P (kPa)	v_l (m^3/kg)	v_g (m^3/kg)	h_l (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	s_l (kJ/kg·K)	s_g (kJ/kg·K)
-50	40.85	1.4242	2.62482	-23.77	1391.02	0.0981	6.4382
-48	45.92	1.429	2.35264	-14.99	1394.34	0.1372	6.3967
-46	51.51	1.434	2.11333	-6.2	1397.63	0.176	6.3562
-44	57.64	1.4389	1.90242	2.6	1400.87	0.2146	6.3166
-42	64.36	1.444	1.71612	11.42	1404.08	0.2529	6.2778
-40	71.71	1.4491	1.55117	20.25	1407.25	0.2909	6.2398
-38	79.73	1.4542	1.4048	29.1	1410.38	0.3286	6.2026
-36	88.47	1.4594	1.27465	37.97	1413.46	0.3661	6.1662
-34	97.97	1.4647	1.15868	46.84	1416.51	0.4033	6.1305
-32	108.28	1.4701	1.05513	55.74	1419.5	0.4403	6.0956
-30	119.46	1.4755	0.96249	64.64	1422.46	0.477	6.0613
-28	131.54	1.481	0.87945	73.57	1425.36	0.5135	6.0277
-26	144.6	1.4865	0.80488	82.5	1428.22	0.5497	5.9947
-24	158.67	1.4921	0.73779	91.45	1431.04	0.5857	5.9623
-22	173.82	1.4978	0.67733	100.42	1433.8	0.6214	5.9305
-20	190.11	1.5036	0.62274	109.4	1436.51	0.657	5.8994
-18	207.6	1.5094	0.57338	118.39	1439.17	0.6923	5.8687
-16	226.34	1.5154	0.52866	127.4	1441.78	0.7273	5.8386
-14	246.41	1.5214	0.4881	136.43	1444.34	0.7622	5.8091
-12	267.85	1.5275	0.45123	145.46	1446.84	0.7968	5.78
-10	290.75	1.5336	0.41769	154.52	1449.29	0.8312	5.7514
-8	315.17	1.5399	0.38712	163.58	1451.68	0.8653	5.7233
-6	341.17	1.5463	0.35921	172.66	1454.01	0.8993	5.6957
-4	368.83	1.5527	0.33371	181.76	1456.29	0.9331	5.6685
-2	398.22	1.5593	0.31037	190.87	1458.51	0.9666	5.6417
0	429.41	1.5659	0.28898	200	1460.66	1	5.6153
2	462.48	1.5727	0.26935	209.14	1462.76	1.0332	5.5893
4	497.5	1.5795	0.25131	218.3	1464.8	1.0661	5.5637
6	534.54	1.5865	0.23471	227.47	1466.77	1.0989	5.5384
8	573.7	1.5936	0.21943	236.67	1468.68	1.1315	5.5135
10	615.04	1.6008	0.20533	245.87	1470.52	1.1639	5.489
12	658.64	1.6081	0.19232	255.1	1472.3	1.1961	5.4647
14	704.59	1.6155	0.18029	264.34	1474.02	1.2281	5.4408
16	752.98	1.6231	0.16916	273.6	1475.66	1.26	5.4172
18	803.88	1.6308	0.15885	282.89	1477.24	1.2917	5.3939
20	857.38	1.6386	0.14929	292.19	1478.74	1.3232	5.3708
22	913.56	1.6466	0.14041	301.51	1480.17	1.3546	5.3481
24	972.52	1.6547	0.13216	310.86	1481.53	1.3859	5.3255
26	1034.34	1.663	0.12449	320.23	1482.82	1.4169	5.3033
28	1099.11	1.6714	0.11734	329.62	1484.03	1.4479	5.2812
30	1166.93	1.68	0.11069	339.04	1485.16	1.4787	5.2594
32	1237.88	1.6888	0.10447	348.48	1486.21	1.5093	5.2377
34	1312.06	1.6978	0.09867	357.96	1487.19	1.5398	5.2163
36	1389.55	1.7069	0.09327	367.33	1488.09	1.5699	5.1952
38	1470.47	1.7162	0.0882	376.86	1488.89	1.6002	5.1741
40	1554.89	1.7257	0.08345	386.43	1489.61	1.6303	5.1532
42	1642.93	1.7355	0.079	396.02	1490.25	1.6604	5.1325
44	1734.67	1.7454	0.07483	405.66	1490.79	1.6904	5.1119
46	1830.22	1.7556	0.07092	415.34	1491.23	1.7203	5.0914
48	1929.68	1.766	0.06724	425.06	1491.59	1.7501	5.0711
50	2033.14	1.7767	0.06378	434.82	1491.84	1.7798	5.0508
52	2140.72	1.7876	0.06053	444.63	1491.99	1.8095	5.0307
54	2252.52	1.7988	0.05747	454.5	1492.04	1.8391	5.0106
56	2368.64	1.8103	0.05458	464.42	1491.98	1.8687	4.9906
58	2489.19	1.8221	0.05186	474.39	1491.81	1.8983	4.9707
60	2614.27	1.8343	0.04929	484.43	1491.52	1.9278	4.9508
62	2744.01	1.8467	0.04687	494.54	1491.12	1.9573	4.9309

64	2878.5	1.8595	0.04458	504.71	1490.58	1.9869	4.911
66	3017.86	1.8727	0.04241	514.96	1489.93	2.0164	4.8911
68	3162.22	1.8863	0.04036	525.29	1489.13	2.046	4.8713
70	3311.68	1.9003	0.03841	535.71	1488.2	2.0756	4.8513

Fuente: R.Döring. Klima+Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978.

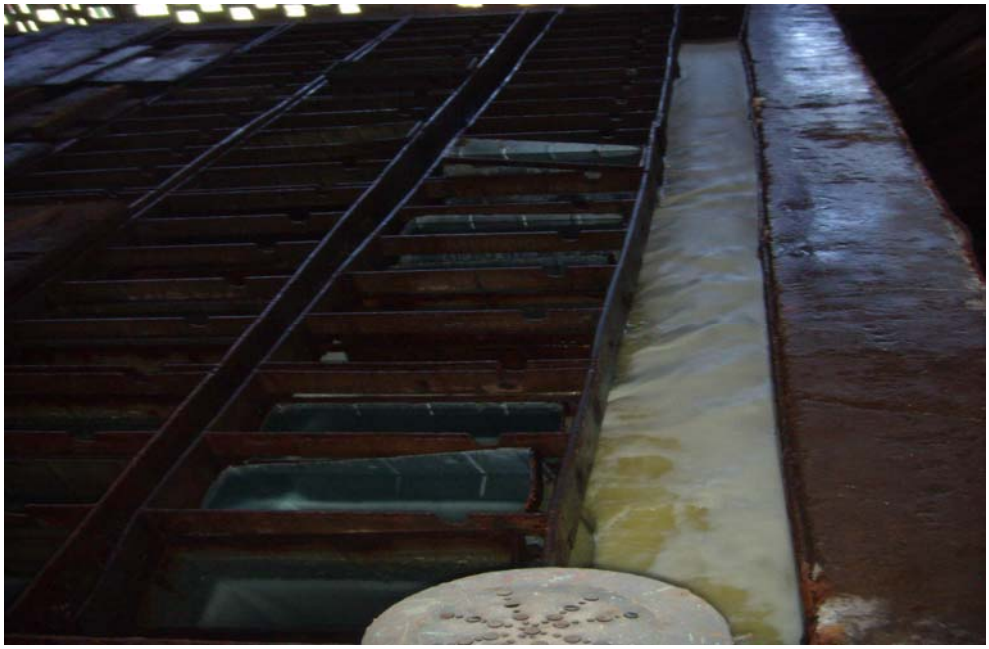
Anexos

Anexo 4 Fotos de la instalación

1. Foto del tanque donde se ubicará el serpentín.

2. Foto de las bombas que transportan el agua de salida del tanque del preenfriador hacia los moldes de llenado de agua.

3. Foto del separador de líquido: (Entrada del vapor de amoniaco).



4. Foto de los moldes en la piscina de salmuera.

5. Foto de la grúa transportadora y el sistema de llenado de moldes.

6. Foto de los bloques de hielo en la nevera.

7. Sistema de enfriamiento de la nevera.