



Capítulo I

Marco Teórico



INTRODUCCION

En la antigüedad se requería de grandes esfuerzos colectivos para lograr el confort respecto a la temperatura del ambiente de algunas minorías, las cuales siempre resultaban siendo las personas con poder, en cada cultura hubo anécdotas de ingenio para hacer que sus reyes, faraones o emperadores gozaran de la máxima comodidad según sus posibilidades.

Los faraones egipcios fueron quienes gozaron de los primeros intentos de aire acondicionado, haciendo que sus esclavos trasladaran por las noches grandes cantidades de piedras enfriadas por el clima extremo del desierto para refrescar sus habitaciones por las mañanas.

Para que Moctezuma tuviera pescado fresco traído desde la costa, tenía súbditos que hacían grandes recorridos con relevos todos los días, porque el pescado se descomponía de un día a otro por las altas temperaturas.

Con el paso de los siglos las poblaciones fueron creciendo de manera considerable y con ello la demanda de alimentos, se comenzó a requerir de la capacidad de almacenarlos y prolongar el tiempo que se podían guardar sin que estos se descompusieran. Desde nuestros antepasados se ha sabido que las bajas temperaturas permiten que esto pueda lograrse, pero sabemos que este factor es controlado por las condiciones climáticas. Imposible de manipular hace algunos siglos.

En la primera parte de este proyecto se narra la historia de Federic Tudor a quien se señala como el primer comerciante a gran escala del hielo únicamente transportándolo desde lugares fríos. Al mismo tiempo del éxito de este negocio se fue creando el mercado para este producto que hasta hoy en día prevalece y satisfaciendo la necesidad de permitir el almacenamiento de alimentos.

Para inducir una baja temperatura y producir hielo se requiere del equipo adecuado que aporte el trabajo mecánico necesario para hacer descender la temperatura interior de un recipiente o un espacio aislado. Esto es lo que se hace en las fábricas de hielo para poderlo producir.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la primera parte de este proyecto se realizaron los cálculos térmicos correspondientes para la construcción de una fábrica de hielo, estos resultados serán utilizados y complementados en este proyecto, para el correcto funcionamiento y optimización de dicha fabrica, mediante la distribución e instalación de los equipos involucrados en el proceso de producción.

Se integra además el cálculo del aislamiento necesario para las tuberías, la elección de dicho material y su método de aplicación.



JUSTIFICACION

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, con más de medio millón de habitantes que dan lugar a una gran demanda de alimentos, y diversos productos que requieren del hielo para su conservación, hace bastante factible la construcción y operación de diversas fábricas de hielo. Las existentes actualmente no logran cubrir en su totalidad la demanda en todas las zonas. La principal demanda de este producto son los comercios establecidos en los mercados, restaurantes y cierto número de consumidores eventuales que se encuentran distribuidos en toda la ciudad.

La empresa “Hielo y Refrigeración de Chiapas” que está instalada en Terán (zona poniente) intenta satisfacer esta demanda. Para cubrir un mayor mercado, ha puesto en marcha una nueva fábrica, que por el momento solo cuenta con una bodega de almacenamiento de hielo.

OBJETIVO GENERAL

- Complementar y analizar los cálculos de la fábrica de hielo “Hielo y Refrigeración de Chiapas” así como la puesta en marcha.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Bitácora y mediciones de los equipos
- Cálculo de aislante para las tuberías
- Cálculo y diseño del evaporador
- Cálculo y diseño del cuarto frío.

HIPOTESIS

Los sistemas de refrigeración por compresión utilizados en la fabricación de hielo emplean cuatro elementos principales: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. En el evaporador, como su nombre lo indica el refrigerante (amoníaco NH_3) se evapora y absorbe calor del espacio que está enfriando que en este caso es la salmuera de cloruro de calcio (CaCl_2) la cual está en contacto directo con los moldes que contienen el agua utilizada para la producción de hielo. A continuación, el vapor pasa a un compresor movido por un motor que incrementa su presión, lo que aumenta su temperatura (entrega trabajo al sistema).

El gas sobrecalentado a alta presión se transforma posteriormente en líquido en un condensador refrigerado por aire o agua.



Posteriormente, el líquido pasa por una válvula de expansión, donde su presión y temperatura se reducen hasta alcanzar las condiciones que existen en el evaporador. De esta forma es como el refrigerante (NH_3) absorbe el calor extraído de la salmuera para lograr una baja temperatura en el tanque donde se enfrían los moldes para producir el hielo.

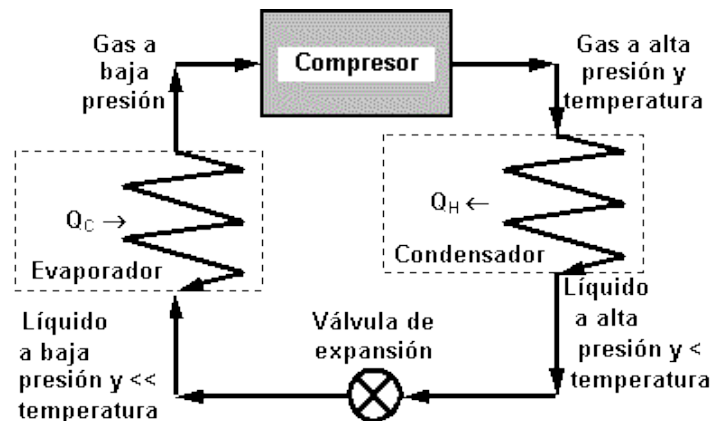


Fig. 1.1) Descripción del funcionamiento del sistema de refrigeración

Se pretende demostrar que el cálculo exacto de los elementos del sistema y la utilización de los conceptos de ingeniería darán como resultado el diseño de una fábrica de hielos con un funcionamiento óptimo y con una producción máxima.

PROBLEMAS A RESOLVER

- Cálculo de cargas térmicas del cuarto frigorífico.
- Elección de material aislante para las tuberías que transportan el refrigerante (NH_3).
- Diseño y construcción de un método para realizar el aislamiento de las tuberías.
- Cálculo y diseño del evaporador para la producción de hielo.
- Optimización de los diversos equipos que intervienen en la producción.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

La intención de este proyecto es utilizar todos los aspectos ingenieriles que se necesitan para el diseño de la planta para un funcionamiento óptimo y con una producción eficiente. Para esto se requiere la medición, análisis y evaluación del rendimiento de los equipos, el control adecuado de la temperatura del medio en el que se produce el hielo y el aprovechamiento máximo del espacio de la obra civil.



Limitaciones

Los resultados obtenidos en los cálculos serán aproximaciones tan precisas como lo permitan las ecuaciones utilizadas en el cálculo debido a que muchos datos de entrada son supuestos o aproximados porque presentan dificultad para ser medidos o porque depende de la precisión de los instrumentos de medición.

Algunos datos utilizados para los cálculos serán tomados de tablas, manuales, gráficas o textos a los que haremos referencia, y de no contar con alguno de los anteriores se consideraran los conocimientos empíricos que serán reforzados con expresiones matemáticas.

Los valores obtenidos teóricamente serán utilizados como referencia, debido a que el equipo de producción es de medio uso, y se espera optimizarlos mediante instalación, mantenimiento y calibración adecuada, para conseguir los valores de funcionamiento previstos.

FUNDAMENTO TEORICO

Para entender el procedimiento y funcionamiento de la producción del frío tenemos que tomar en cuenta y comprender los postulados hechos a lo largo de la historia por los científicos y tecnólogos que han dado partida a la materia en cuestión.

CICLO CARNOT

Una máquina térmica que realiza este ciclo se denomina máquina de Carnot. Trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura y cede un calor Q_2 a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. El rendimiento viene definido, como en todo ciclo, por:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.1)$$

Y como se verá adelante, es mayor que cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse. Entonces la máquina absorbe calor de la fuente fría y cede calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría se denomina máquina frigorífica, y si es aportar calor a la fuente caliente bomba de calor.

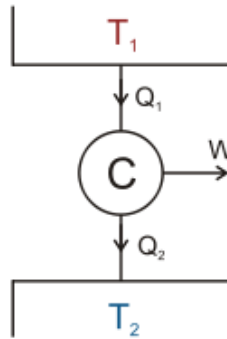


Fig. 1.2) Esquema de una máquina de Carnot

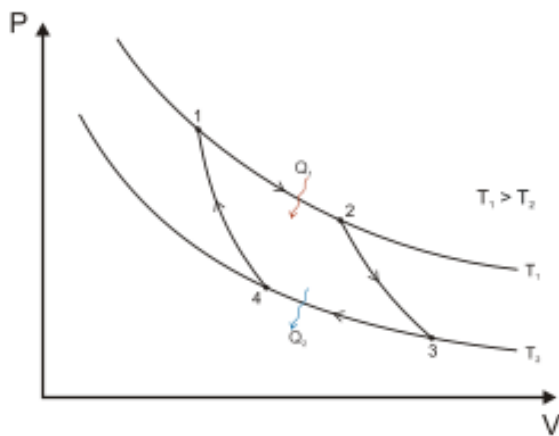


Fig. 1.3) Diagrama del ciclo de Carnot en función de la presión y el volumen

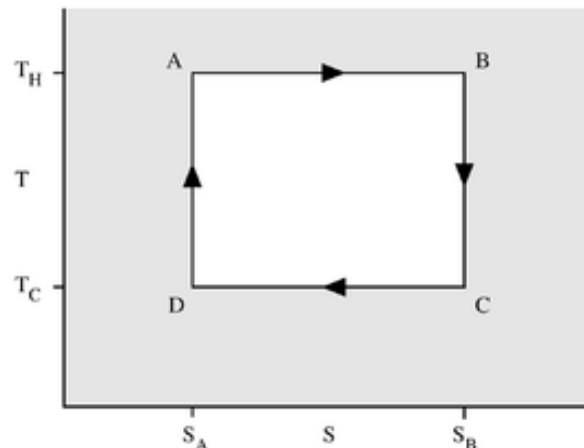


Fig. 1.4) Diagrama del ciclo de Carnot en función de la temperatura y la entropía

El ciclo de Carnot consta de cuatro etapas: dos procesos isotérmicos (a temperatura constante) y dos adiabáticos (aislados térmicamente). Las aplicaciones del Primer principio de la termodinámica están escritas acorde con el Criterio de signos termodinámico.

- a) Expansión isotérmica: (proceso 1→2 en el diagrama) Se parte de una situación en que el gas se encuentra al mínimo volumen del ciclo y a temperatura T_1 de la fuente caliente. En este estado se transfiere calor al cilindro desde la fuente de temperatura T_1 , haciendo que el gas se expanda. Al expandirse, el gas tiende a enfriarse, pero absorbe calor de T_1 y mantiene su temperatura constante. Al tratarse de un gas ideal, al no cambiar la temperatura tampoco lo hace su energía interna, y despreciando los cambios en la energía potencial y la cinética, a partir de la *1ª ley de la termodinámica* vemos que todo el calor transferido es convertido en trabajo:

$$Q_{12} > 0 ; U_{12} = 0 \Rightarrow 0 = U_{12} = Q_{12} - W_{12} \Rightarrow W_{12} = Q_{12} \Rightarrow W_{12} > 0 \quad (1.2)$$

Desde el punto de vista de la entropía, ésta aumenta en este proceso: por definición, una variación de entropía viene dada por el cociente entre el calor transferido y la temperatura de la fuente en un proceso reversible:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev} \quad (1.3)$$

Como el proceso es efectivamente reversible, la entropía aumentará:

$$S_{12} = \frac{Q_{12}}{T_1} > 0 \quad (1.4)$$

- b) Expansión adiabática: (2→3) La expansión isotérmica termina en un punto tal que el resto de la expansión pueda realizarse sin intercambio de calor. A partir de aquí el sistema se aísla térmicamente, con lo que no hay transferencia de calor con el exterior. Esta expansión adiabática hace que el gas se enfríe hasta alcanzar exactamente la temperatura T_2 en el momento en que el gas alcanza su volumen máximo. Al enfriarse disminuye su energía interna, con lo que utilizando un razonamiento análogo al anterior proceso:

$$Q_{23} = 0; U_{23} < 0 \Rightarrow 0 = U_{23} = -W_{23} \Rightarrow W_{23} > 0 \quad (1.5)$$

Esta vez, al no haber transferencia de calor, la entropía se mantiene constante:

$$S_{23} = 0 \quad (1.6)$$

- c) Compresión isotérmica: (3→4) Se pone en contacto con el sistema la fuente de calor de temperatura T_2 y el gas comienza a comprimirse, pero no aumenta su temperatura porque va cediendo calor a la fuente fría. Al no cambiar la temperatura tampoco lo hace la energía interna, y la cesión de calor implica que hay que hacer un trabajo sobre el sistema:

$$Q_{34} < 0; U_{34} = 0 \Rightarrow 0 = U_{34} = Q_{34} - W_{34} \Rightarrow W_{34} = Q_{34} \Rightarrow W_{34} < 0 \quad (1.7)$$

Al ser el calor negativo, la entropía disminuye:

$$S_{34} = \frac{Q_{34}}{T_2} < 0 \quad (1.8)$$



d) Compresión adiabática: (4→1) Aislado térmicamente, el sistema evoluciona comprimiéndose y aumentando su temperatura hasta el estado inicial. La energía interna aumenta y el calor es nulo, habiendo que comunicar un trabajo al sistema:

$$Q_{41} = 0 ; U_{41} < 0 \Rightarrow 0 = U_{41} = -W_{41} \Rightarrow W_{41} < 0 \quad (1.9)$$

Al ser un proceso adiabático, no hay transferencia de calor, por lo tanto la entropía no varía:

$$S_{41} = 0 \quad (1.10)$$

TRABAJO DEL CICLO

Por convención de signos, un signo negativo significa que el trabajo es realizado sobre el sistema. Con este convenio de signos, el trabajo obtenido deberá ser negativo. Tal como está definido, y despreciando los cambios en energía mecánica, a partir de la primera ley:

$$dU = \delta Q - \delta W \Rightarrow \delta W = \delta Q - dU \Rightarrow W = \oint \delta Q - dU \quad (1.11)$$

Como dU (diferencial de la energía interna) es una diferencial exacta, el valor de U es el mismo al inicio y al final del ciclo, y es independiente del camino, por lo tanto la integral de dU vale cero, con lo que queda:

$$W = \oint \delta Q = \int_1^2 T_1 dS + \int_3^4 T_2 dS = T_1(S_B - S_A) + T_2(S_A - S_B) = (T_1 - T_2)(S_B - S_A) > 0 \quad (1.12)$$

Por lo tanto, en el ciclo el sistema ha realizado un trabajo sobre el exterior.

REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN

La refrigeración por compresión consiste en forzar mecánicamente la circulación de un fluido en un circuito cerrado creando zonas de alta y baja presión con el propósito de que el fluido absorba calor en un lugar y lo disipe en el otro.



Fig. 1.5) Compresor industrial para refrigerante R22

MÁQUINA FRIGORÍFICA DE EXPANSIÓN DIRECTA

Una máquina frigorífica por compresión tiene por cometido desplazar energía térmica entre dos puntos. La más sencilla de ellas es la refrigeración por compresión mecánica de expansión directa de una etapa.

La refrigeración por compresión se logra evaporando un fluido refrigerante a través de un dispositivo de expansión dentro de un intercambiador de calor, conocido como evaporador, el cual permite una transferencia térmica con su entorno. Al evaporarse el fluido líquido cambia su estado a vapor. Durante el cambio de estado el refrigerante en estado de vapor absorbe energía térmica del medio en contacto con el evaporador, bien sea este medio gaseoso o líquido. Luego de este intercambio energético, un compresor mecánico se encarga de aumentar la presión del vapor para poder condensarlo dentro de otro intercambiador de calor conocido como condensador. Ya que este aumento de presión además produce un aumento en su temperatura, para lograr el cambio de estado del fluido refrigerante es necesario enfriarlo al interior del condensador; esto suele hacerse por medio de aire y/o agua. De esta manera, el refrigerante en estado líquido, puede evaporarse nuevamente a través de la válvula de expansión y repetir el ciclo de refrigeración por compresión.

Es así como la máquina frigorífica de refrigeración por compresión desplaza la energía entre dos medios; creando zonas de alta y baja presión confinadas en intercambiadores de calor, mientras estos procesos de intercambio de energía se suceden cuando el fluido refrigerante se encuentra en procesos de cambio de estado; de líquido a vapor, y viceversa.



REFRIGERANTES

Un fluido refrigerante debe tener buenas propiedades termodinámicas, no ser corrosivo y debe ser seguro. Dichas propiedades son un punto de ebullición debajo de la temperatura deseada, un alto calor de vaporización, una densidad moderada en su forma líquida y una relativamente alta densidad en su forma gaseosa. Dado que el punto de ebullición y la densidad gaseosa son afectadas por la presión, los refrigerantes deben ser diseñados para una aplicación en particular eligiendo la presión en la que operarán.

Las propiedades corrosivas deben ser compatibles con los materiales usados para el compresor, tubos, evaporador y condensador. Las consideraciones sobre seguridad incluyen la toxicidad e inflamabilidad.

Existen varios tipos de refrigerantes según su composición química.

- CFC: Clorofluorocarbonados
- HCFC: Hidroclorofluorocarbonados
- HFC: Hidrofluorocarbonados
- HC: Hidrocarburos (alcanos y alquenos)
- NH₃: Amoniac
- CO₂: Dióxido de Carbono

El refrigerante más usado en la fabricación de hielo es el amoniac, por cumplir con las características termodinámicas requeridas y ser más eficiente en comparación a otros fluidos. Entre sus ventajas ambientales destacan que no destruye la capa de ozono, y no contribuye al calentamiento global.

Es también menos costoso aproximadamente entre un 10 y un 20% menos para instalar que otros sistemas, su eficiencia es entre 3 y 10 % superior a otros refrigerantes, por lo tanto un sistema con amoniac tiene un menor consumo eléctrico. Y en cuanto a la seguridad el olor característico de este fluido permite detectar cuando existe alguna fuga y no es explosivo.

A continuación se presenta una tabla que señala las características principales de los refrigerantes usados comercialmente en la producción de hielo.

NOMBRE y FORMULA Peso Molecular	RANGO de Temp (°F) Evap. – Cond.	Presión Succión psia	Presión Desc. psia	P_g/P_D	Con vapor seco y saturado por TON			Vol. Esp. V_g	Refrigeración Btu/lb.
					Flujo Masa	Despl.	Potencia		
					lb./min.	= cfm	HP	$V_g = ft^3/lb.$	
Amoniaco NH_3 17.03	5 - 86	34.27	169.2	4.94	0.421	3.44	0.99	8.150	565
	20- 100	48.81	211.9	4.40	0.421	2.49	0.94	5.910	553
	40- 100	73.32	211.9	2.89	0.427	1.70	0.65	3.971	536
R134a CFH_2CF_3 102.03	5 - 86	23.77	111.8	4.99	2.21	4.14	0.687	1.9327	90.2
	20- 100	33.13	138.99	4.19	2.28	3.21	0.693	1.409	87.7
	40- 100	49.77	138.99	2.79	2.37	2.25	0.570	0.9523	84.1
R-12 CCl_2F_2 120.93	5 - 86	26.51	107.9	4.07	3.916	5.82	1.00	1.458	68.20
	20- 100	35.75	131.6	3.68	4.054	4.54	0.97	1.0988	66.52
	40- 100	57.68	131.6	2.55	3.88	3.07	0.67	0.7735	64.163
R-22 $CHClF_2$ 86.4	5 - 86	43.02	174.5	4.06	2.986	3.65	1.03	1.2434	93.206
	20- 100	57.08	212.6	3.67	3.023	2.83	0.99	0.9363	90.545
	40- 100	83.72	212.6	2.54	2.936	1.93	0.68	0.6575	86.72
R-502 R22 + R115 111.6	5 - 86	50.68	189.5	3.74	2.90	2.38	0.748	0.8247	68.86
	20- 100	67.14	229.1	3.14	3.01	1.89	0.674	0.6283	66.50
	40- 100	94.90	229.1	2.42	3.17	1.42	0.500	0.4466	63.09
R404A R134a,R143, R125 97.60	5 - 86	53.12	206.00	3.88	2.58	2.27	0.72	0.8803	77.5
	20- 100	70.81	250.4	3.54	2.67	1.77	0.68	0.6637	74.80
	40- 100	100.9	250.4	2.48	2.83	1.32	0.61	0.4647	70.7

Tabla 1.1) Propiedades de refrigerantes comerciales

FABRICACIÓN DE HIELO

La fabricación de hielo se realiza según las necesidades para que se requiera, los tipos de hielo más producidos son:

- Hielo en bloques
- En escamas
- En placas
- En tubos
- El hielo fundente

Los casos que nos interesan son el hielo en bloques y en tubos ya que son los que se producen en la fábrica de Hielo y Refrigeración de Chiapas.



Hielo en Bloques

La producción del hielo en bloques se realiza con unos moldes en baño de salmuera (cloruro de calcio), que está contenida en un tanque de enfriamiento a una temperatura aproximada de -10 °C. El hielo, al ser extraído del molde, es almacenado en un cuarto frigorífico para su posterior distribución.

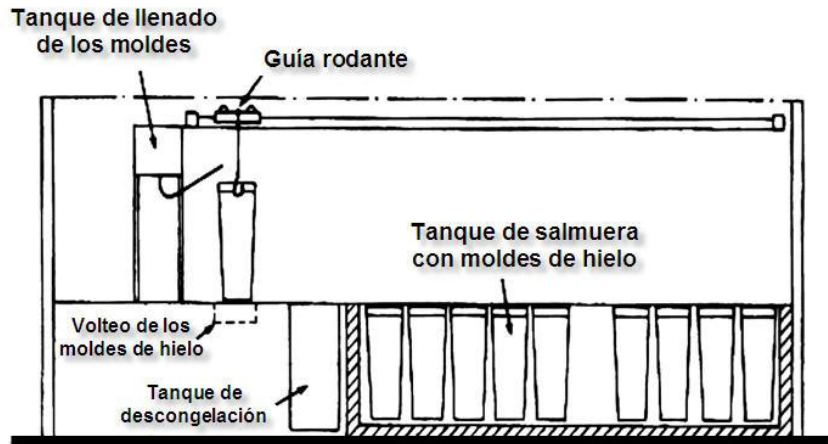


Fig. 1.6) Máquina de hacer hielo en bloques

El periodo de congelación oscila entre 8 y 24 horas, ya que una rápida congelación produce un hielo demasiado quebradizo, el peso del molde puede variar entre 12 y 150 kg. En la siguiente tabla se muestra la relación entre el tiempo de congelación y el espesor de hielo producido.

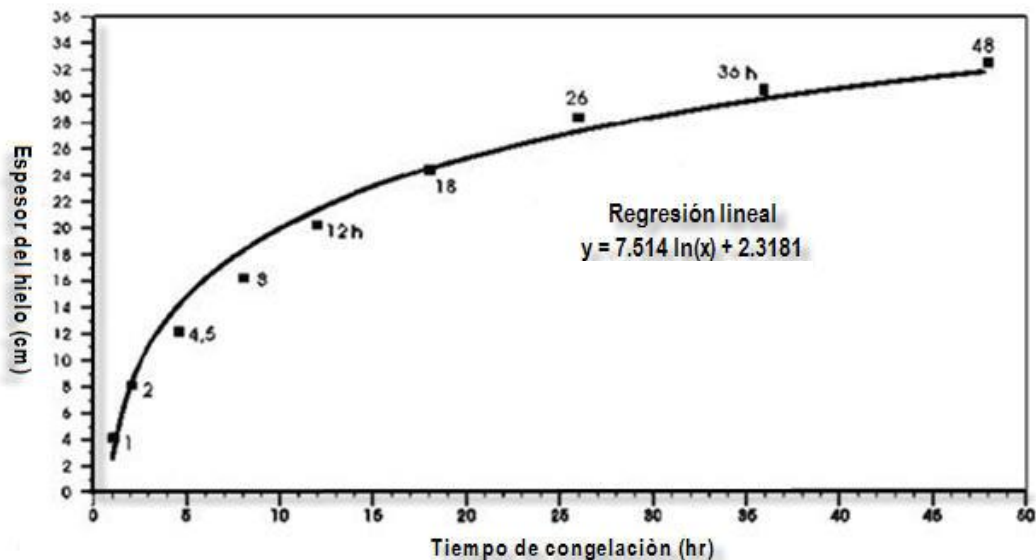


Fig. 1.7) Relación entre el grosor del hielo producido y el tiempo de congelación necesario en una máquina típica tradicional de hielo de agua dulce en bloques



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 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 descarchado 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.

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.

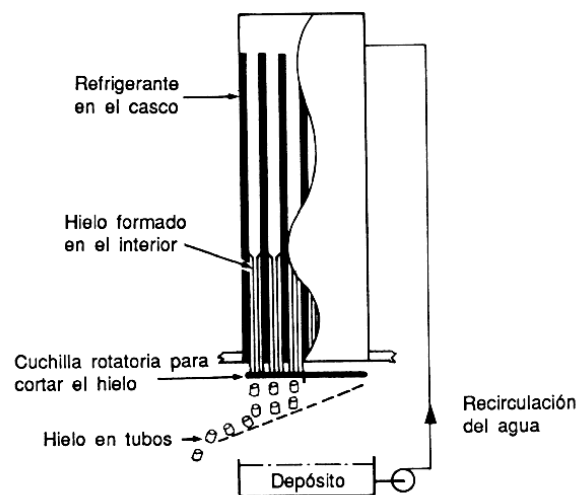


Fig. 1.8) Máquina de hacer hielo en tubos

CAPACIDAD DE LAS FÁBRICAS DE HIELO

Hay varios factores que 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 que concierne a la capacidad de fabricación de hielo.



Temperatura del agua de relleno (°C)	Capacidad relativa %
0	100
5	97
10	94
15	91
20	88
25	85
30	83
35	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 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 pre-enfriamiento del agua de 35°C a 5°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 (°C)	Temperatura de evaporación (°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.