

FRIO POR "CHORRO DE VAPOR" (o por impulsión)

Victorio Tacchi

Investigación privada. La Rioja 57, 1ºP., Of. 1

5000 - CORDOBA.-

RESUMEN:

Existe abundante bibliografía (1,2,3,4,5,) de como aprovechar el calor de desecho, bajo la forma de vapor de agua a una cierta temperatura y presión, para producir frío por medio de sistemas llamados "por chorro de vapor".

Únicamente se ha encontrado (1) (pág.211) una sola propuesta concreta, para producir frío por chorro de vapor, con refrigerante distinto del agua (freones) y en circuito cerrado, sin que se conozca la existencia de pruebas y prototipos tendientes a demostrar su factibilidad y conveniencia.

El presente trabajo se basa en la construcción de un prototipo, funcionante por chorro de vapor-ejector, en circuito cerrado, con refrigerantes distintos del agua, a partir de calor ya sea de desecho o de origen renovable, para la obtención de frío de hasta -15°C , con fuente caliente de alrededor de 80°C y fuente fría para la condensación del refrigerante de 20°C hasta 55°C .

INTRODUCCION:

La máquina para producir frío objeto del presente trabajo pertenece a la categoría de

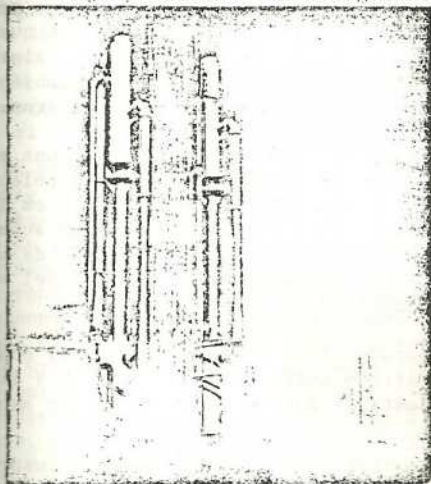


Fig. 12-2. Unidad de chorro de vapor de 600 ton que enfría agua para una fábrica de gemas. (Orubum Manufacturing Co., Inc.)

Fig. 1 Ref. (1) (pág. 204)

las máquinas de frío, por cambio de fase, con compresión aspiración, obtenidas por medio de un ejector-difusor, con aporte de energía bajo la forma de calor. Se diferencia de las soluciones clásicas que se remontan hacia 1930 por el hecho de usar refrigerantes distintos del agua y de que el ciclo se realiza dentro de cámaras herméticas. En las formas empleadas actualmente, el agua es el fluido refrigerante y la evaporación de la misma produce la refrigeración, usándose más comunmente en el enfriamiento moderado de procesos industriales y químicos como ser cristalización de sales, sales alcalinas, magnesio, sal de Glauber etc. o en procesos de concentración de leche, jugo de frutas, enfriamiento en vacío de vegetales, para acondicionamiento de ambientes etc. (ver fig. 1)

Su funcionamiento es como sigue (ver esquema fig. 2): el vapor de impulsión o vapor activo 6, proveniente de una caldera donde se evapora agua, o mejor aún, proveniente de una planta industrial, donde ya ha efectuado un trabajo (vapor de desecho y por lo tanto barato) entra en la tobera convergente-divergente 3, donde la energía de presión se transforma en energía cinética disminuyéndose notablemente la presión y aumentando la velocidad hasta niveles supersónicos. Debido a esta alta velocidad, en la cámara de mezcla 4, se produce un arrastra de vapor 1, proveniente del evaporador. Tanto en este, como en la cámara de mezcla, la presión baja a los niveles obtenidos en el conodivergente del ejector, produciéndose evaporación del agua existente en el evaporador con la consiguiente disminución de

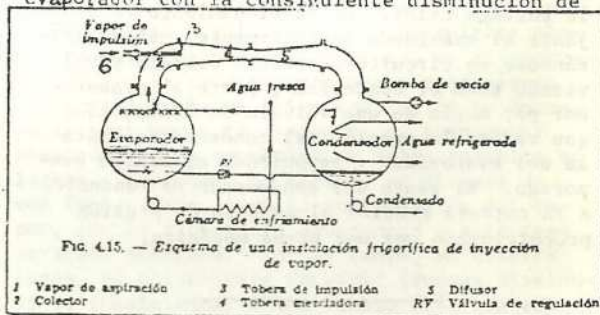


Fig. 2 Ref. (3) (pág. 113)

temperatura de la misma.-

En el punto que se une la cámara de mezcla 4, con el cono difusor 5 (zona llamada garganta); aparece una "onda de choque", que produce una compresión irreversible y donde la velocidad del vapor desciende a velocidades subsónicas. Una nueva compresión se obtiene en el difusor 5, donde se convierte energía cinética en entalpía o energía de presión.

Tenemos entonces el clásico ciclo de aspiración en 3,2 y 1 (presión de baja) y compresión en la garganta 4-5 y en el difusor 5 (presión de alta). Para completar una máquina frigorífica de compresión tenemos el condensador 7, donde el vapor de agua activo y el vapor de agua proveniente del evaporador se condensan, volviendo parte a la caldera y parte al evaporador.

En los equipos de este tipo se alcanzan valores de presión en el evaporador de hasta 6,35 mm de Hg, correspondiente a una temperatura de 4,4°C para el agua que se evapora y presiones de condensación de 50,8 mm de Hg, (temperatura de condensación de 37,8°C), siendo la relación de compresión de estos valores de 8 a 1.

El vapor activo llega al ejector con presiones que pueden ir de 0,7 a 7 kh/cm². En algunos casos, donde es necesario un vacío más elevado, presiones de condensación más altas, o únicamente se dispone de vapor activo a presiones relativamente bajas, se emplean dos o más ejectores en cascada. Para regular la carga de producción de frío se activan o desactivan ejectores ubicados en paralelo.

Las máquinas tienen capacidades que van desde 10.000 kcal/h hasta 4.000.000 kcal/h y se destacan por su bajo costo (la mitad para una instalación pequeña, un tercio para una grande) poco mantenimiento, funcionamiento de fácil control, consumo de energía bajo la forma de calor de desecho (vapor de escape de 1 a 3 kg/cm² de máquinas motrices) y entre las desventajas que se necesita el doble de agua fría para condensar grandes volúmenes de vapor en los condensadores.

En el sistema brevemente propuesto por el prof. WF. Stoecker (1) el fluido refrigerante no es agua sino freón (ver fig. 3). El vapor activo es producido en la caldera, a la cual se le entrega calor. El funcionamiento es semejante al examinado anteriormente, pero realizándose en circuito cerrado y estanco y volviendo todo el condensado, parte al evaporador por medio de una válvula de laminación, que reduce la presión del condensador hasta la del evaporador y reponiendo el fluido evaporado. El resto del condensado es conducido a la caldera gracias al aumento de presión proporcionado por una bomba mecánica.

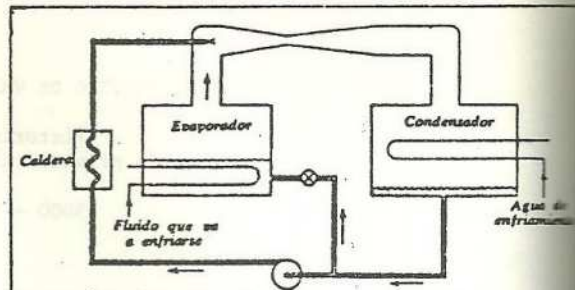


Fig. 12-9. Sistema de refrigeración con ejector usando un refrigerante distinto al vapor de agua.

Fig. 3 Ref.(1) (pág. 211)

DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO:

El prototipo construido según el esquema de la fig.4 para la investigación de la producción de frío "por chorro de vapor" obedece en regla general al esquema de la fig. 3, con la salvedad, que la vuelta del condensado a la caldera se realiza por gravedad, luego de que las presiones en el condensador 2 y la caldera 1 se han igualado con comando manual por medio de las válvulas 3 y 4. El funcionamiento se inicia con la apertura de la válvula 5, que se acciona manualmente cuando se ha alcanzado la presión de ejercicio en la caldera 1.

La caldera que tiene una capacidad volumétrica de 4.400 cm³ recibe el calor de una resistencia eléctrica de 1.100 W, por medio de agua existiendo un termostato regulable, que cortando la corriente, mantiene la temperatura del agua en valores prefijados y que no superan los 85°C. Por simpleza constructiva se ha elegido un funcionamiento periódico y no continuo como sería en el caso de disponer una bomba de accionamiento mecánico para la vuelta del condensado desde el condensador a la caldera. En 6 vemos un depósito donde se va acumulando el fluido líquido a medida que se condensa. El condensador 2 cede calor al medio ambiente aire, previniéndose también la posibilidad de que sea enfriado por agua.

El condensador está construido por una espiral de tubos soldados, con un desarrollo de 20 mts. y un diámetro interno de 2,9 cm lo que da un volumen de 13 litros y una superficie de 1,9 m². El ejector 7 dispone de una aguja regulable para variar la masa del vapor activo inyectado.

El evaporador 8 es un tubo horizontal donde en un extremo entra fluido líquido 9 y la parte opuesta se entrega a la cámara de mezcla 10.

Esta que forma un conjunto con el difusor 17, es intercambiable, para poder ensayar diversos diámetros de la garganta 11. Existen visores y los manovacúómetros 12, para poder controlar el funcionamiento. La regulación del caudal del líquido que llega al evaporador, es

efectuado manualmente por medio de la válvula aguja 13. El conducto 14 sirve para la vuelta del condensado, y el 15 para igualar las presiones de la caldera 1 y el depósito de líquido condensado 6, por medio de respectivas válvulas manuales 3 y 4. El conducto 16 lleva el vapor activo o de impulsión, desde la caldera al ejetor, cuando se abre la válvula 5.

Siempre según, las fig. 4 y 5, el líquido se calienta en la caldera 1 gracias a la resistencia eléctrica, produciéndose vapor a una determinada presión (según fluido y temp.). El vapor llega al ejetor 7, produciéndose en la cámara de mezcla 10, un vacío relativo que produce evaporación del fluido líquido existente en el evaporador 8 y por ende frío. El evaporador está rodeado por un recipiente a cielo abierto, donde hay agua que permite establecer, por diferencia de temperatura y tiempo, tanto el rendimiento, como la temperatura que puede ser alcanzada.-

El vapor activo y el de evaporación, llegan al condensador 2 y una vez licuados, se acumulan en el depósito. 6. Luego de evaporado todo el líquido de la caldera 1, encontramos esa misma cantidad, en el depósito 6. Se procede entonces a abrir las válvulas 3 y 4, pasando presión al depósito, por el conducto 15, mientras baja líquido a la caldera por el conducto 14. Luego se cierran las válvulas 3 y 4, dándose inicio a un nuevo ciclo de funcionamiento.

CONSIDERACIONES SOBRE RENDIMIENTO:

La presión-temperatura del evaporador, es función de la presión del vapor activo (temperatura del fluido en la caldera) y de la presión-temperatura del condensador. También la temperatura de evaporación, es función del gasto de fluido activo que pasa por la tobera convergente-divergente del ejetor de manera que se dispone de un tercer medio para regular la misma, pero la consecuencia es de que a un mayor caudal de vapor activo corresponde un menor aumento del frío obtenido, con respecto al aumento de la energía consumida.

Para un mismo fluido, el rendimiento, como cociente entre las kcal, de frío obtenidas y las kcal entregadas como calor, depende del salto de temperatura (o de presión) entre el evaporador y el condensador. A menor salto mayor rendimiento y viceversa. A temperatura de condensación constante, el rendimiento depende tanto de la temperatura de evaporación que se pretende alcanzar, como de la presión del vapor activo y por lo tanto del nivel de temperatura a la cual se aporta calor a la caldera, y a temperatura constante de la caldera y del condensador, el rendimiento depende del caudal de vapor activo con respecto al caudal del vapor de evaporación. Resumiendo: a menor temperatura de evaporación menor rendimiento; a mayor temperatura de caldera, mayor rendimiento; a mayor temperatura de con-

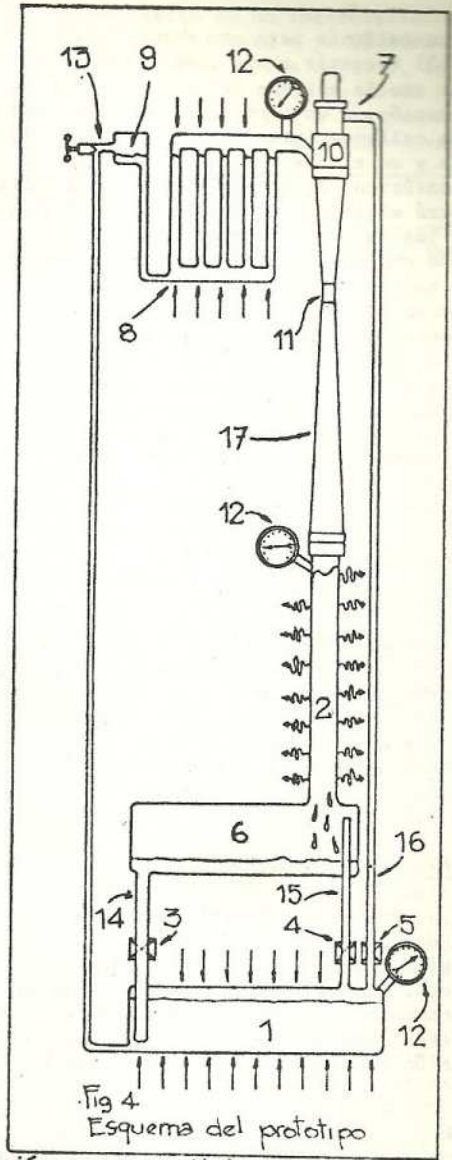


Fig. 4
Esquema del prototipo

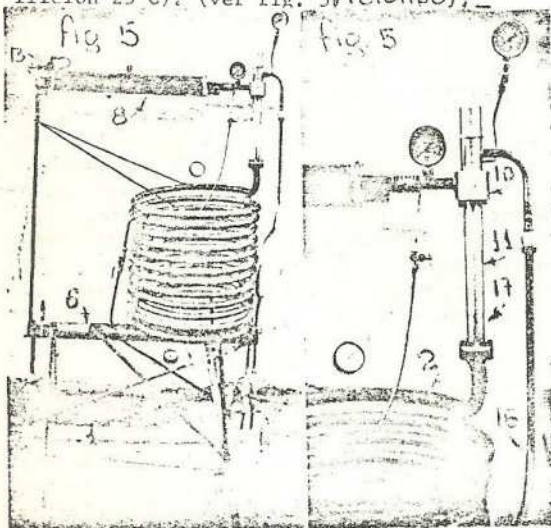
densación, menor rendimiento.

Ahora bien, cuando se recurre a calor de origen renovable, un mayor nivel de temperatura, a la cual se capta dicho calor, influye pesadamente en el rendimiento de captación, de tal manera que siempre es necesario balancear los rendimientos de los distintos componentes de un sistema. Así puede ser conveniente elegir un valor bajo de temperatura, en el aporte de calor a la caldera, con menor rendimiento en la producción de frío, con tal de no encarecer (por menor rendimiento) el componente encargado de la captación de calor (paneles solares). Asimismo, no siempre se dispone de una fuente fría, para la condensación del vapor, con la suficiente abundancia y a la temperatura adecuada. Por lo tanto, en ciertos casos, es conveniente recurrir (aunque disminuya el rendimiento) a una fuente fría tan abundante como el aire atmosférico, o bien donde fuera aconsejable la obtención de calor como subproducto, (.....)

(agua caliente para uso domiciliario o industrial) recurrir a una fuente fría, materializada con la entrega del calor latente de condensación, a un termostanque de acumulación de agua caliente (ver fig. 7). En este último caso y en el caso de entregar calor al aire atmosférico, la temperatura del condensador deberá alcanzar valores de hasta 55°C, para que los intercambiadores respectivos, trabajando con un salto de 5 a 8°C, entreguen calor hasta 50°C (caso del termostanque y del aire en zonas tropicales). Por las mismas razones, la temperatura de aporte de calor a la caldera, deberá contenerse en valores cercanos a los 70-80°. La producción de frío por chorro de vapor de circuito cerrado con fluidos idóneos, aunque a un rendimiento relativamente bajo, permitiría alcanzar más fácilmente, el objetivo de frío para aire acondicionado (temperatura de evaporación de 10°C) y a un costo global inferior a los de una instalación de frío por absorción (con temp. de la fuente caliente de 95 a 130°C. y de la fuente fría de 30-35°C) y por lo tanto podrían ser más convenientes.* Con respecto a los sistemas de frío por chorro de vapor de agua, se puede afirmar que el sistema propuesto es superior, cuando se desee alcanzar temperaturas de frío inferiores a 0°C y en todo caso, cuando no se disponga de una fuente fría abundante para la condensación de 15-20°C y de una fuente caliente (de bajo costo) a 120-140°C.

ENSAYOS DEL PROTOTIPO:

Se ha efectuado solamente una primerísima serie de ensayos tratando de poner a punto la máquina sin efectuarse mediciones de rendimiento. Hasta la fecha fueron efectuados únicamente con Freón 11, atendiendo a la practicidad de uso del mismo (temp. de ebullición 23°C). (ver fig. 5 prototipo).



*El rendimiento de un sistema, es menos importante que el costo inicial de todo el conjunto, cuando la energía que se aporta es inagotable.

Previamente a la carga se procedió al vaciado de aire atmosférico de la máquina con una bomba de vacío, usada para el mantenimiento de heladeras. La resistencia eléctrica se controló por medio de un regulador automático de tipo estático, para que la temperatura de la cámara de agua que envuelve la caldera no superara los 85°C, pero se notó que el diferencial de 5°C, en que se producía el encendido y apagado de la resistencia, daba un desfase en el aporte de calor, con respecto al momento requerido. Con caudal de vapor de inyección mayor, que el producido por la energía aportada, la presión de la caldera eran decrecientes durante cada ciclo, pero se evitaba el corte de energía por el automático. Los valores de temperatura que se pretende alcanzar en esta etapa del desarrollo son: temp. de caldera 80°C; temp. de evaporación 10°C; temp. de condensación 43°C. La relación de compresión, entre evaporador y el condensador, es de 3,19 a 1, habiéndose alcanzado valores de alrededor de 1,4 a 1 pero se creía factible alcanzar los valores propuestos, si se perfecciona el dimensionamiento del eyector, garganta, y difusor, y se use fluido de mayor rendimiento. Las temperaturas obtenidas fueron: temp. de caldera 85°C; temp. de evaporación 12°C y temp. de condensación 21°C correspondiendo a esas temperaturas presiones absolutas de 6,3 a 0,669 y 0,94 kg/cm² respectivamente.

En un rango de temperaturas consideradas no útiles, se alcanzaron los siguientes valores: temp. de caldera 85°C; temp. de evaporación 28°C y temperatura de condensación 42°C, correspondiendo 6,3 1,21 y 1,9 kg/cm² abs. con una relación de compresión de 1,57 a 1.

Las temperaturas no fueron medidas directamente, sino deducidas de las tablas de presión-temperaturas correspondientes al Freón 11 y las presiones se midieron en la caldera, en la garganta del eyector y en el condensador con manovacúmetros controlados uno con otro.

Se cree que los modestos valores medidos, se deben también al tenor húmedo del vapor activo que al recorrer el conducto 16 (fig.4) se condensa en parte, llegando al eyector también como líquido en un determinado porcentaje. Al recorrer el cono divergente del eyector, parte de ese porcentaje se evapora, y aumentando de volumen disminuye el vacío. La solución debería encontrarse sobrecalentando el vapor producido en la caldera, durante el recorrido del conducto 16, aplicando el calor a partir de la parte superior del conducto y llegando luego a la caldera. También se piensa substituir la regulación del gasto de vapor activo actualmente por medio de aguja, por eyectores de diámetro fijo de distintas medidas, para poner a punto, pues se sospecha que la aguja produce un efecto de laminación, disminuyendo inútilmente la presión útil.

*table como puede ser la energía ingresante, que tiene costo nulo. Ing. Raúl Magallanes.

Uno de los defectos comprobados en el prototipo es la superficie insuficiente (0,24m²) de intercambio de calor entre el agua calentada por la resistencia y la caldera.

La superficie del condensador (casi 2m²) parece ser más que suficiente, teniendo debida cuenta que el calor entregado por la resistencia, es aprovechado solamente en parte, por la falta total de aislación, tanto de la caldera como de los demás elementos.

En cuanto a rendimiento presunto se piensa que para los valores de temp. mas arriba indicados, está alrededor del 25%, aunque debe remarcarse que el cálculo teórico del mismo, presenta serias dificultades.

APLICACIONES DIVERSAS:

Para la obtención de frío a más bajas temperaturas -15°C, siempre con temperaturas de condensación elevadas, 50°C y temperaturas de caldera de no más de 80°C, se cree necesario el uso de más de un ejector, según una de las disposiciones indicadas en la fig. 6.

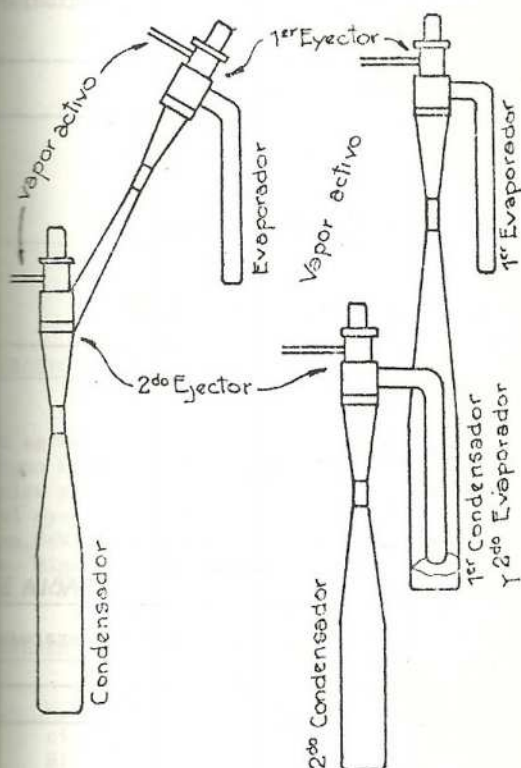


Fig. 6: Sistemas de inyección múltiple en cascada

En el caso de ser conveniente el aprovechamiento de calor o de frío, como subproducto el vapor originado en los paneles solares situados en la cubierta de un edificio (fig. 7), puede a ese nivel, producir frío por "chorro de vapor", descender a un nivel inferior, siempre como vapor, condensarse en un

termotanque por medio de un intercambiador, ceder allí su calor latente y ya líquido, volver a un nivel superior a los paneles, todo gracias a la presión del vapor de donde por un sistema (fig. 8) reingresa a los paneles, todo obtenido sin aporte de energía convencional.

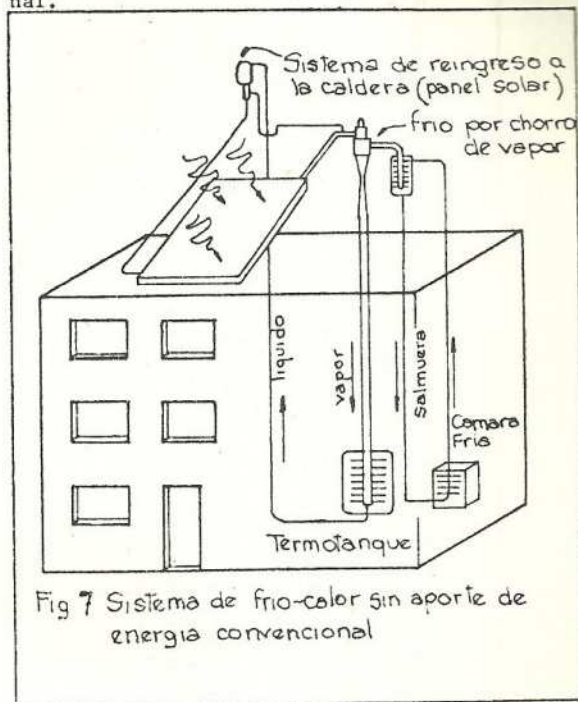


Fig 7 Sistema de frío-color sin aporte de energía convencional

El frío producido en el nivel superior puede ser transportado por una salmuera, hasta el nivel de aprovechamiento, simplemente por efecto de termosifón, volviendo más caliente el evaporador donde se enfriará nuevamente.

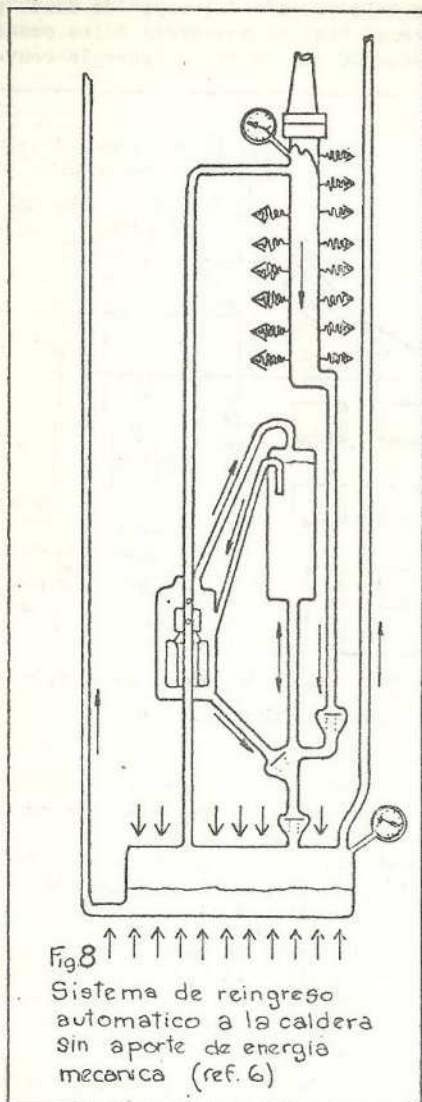
El sistema de reingreso del condensado a una caldera (o panel) está esquematizado en la fig. 8 y una realización del mismo se lo ve en la foto de la figura 9, encontrándose la explicación de su funcionamiento en (6).

La producción de frío por chorro de vapor, puede prestarse ventajosamente en ciertos casos, para el bombeo de calor, desde una fuente fría abundante, hacia un ambiente a calentar. Se cree individualizar esas condiciones favorables en el caso de existir masas de agua relativamente importantes a 15-18°C de temperatura y niveles de radiación suficientes. Ver la Tabla II referente al bombeo de calor.

FLUIDOS FRIGORIFICOS:

Una primera selección de fluidos está dada, según el uso, por las características de inflamabilidad y toxicidad. En este sentido los freones no presentan problemas. El segundo aspecto importante en la selección de fluidos, es la variación del valor de entalpía a entropía constante entre los valores de inyección y los valores correspondientes al evaporador y condensador.

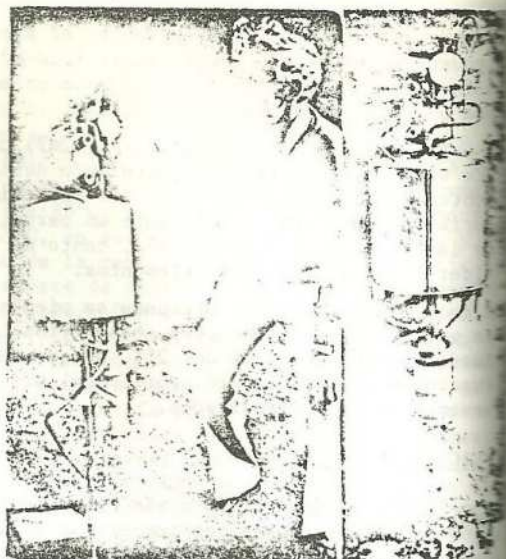
A mayor salto entálpico, mayor es el nivel de energía disponible para la obtención del efecto refrigerante.



Con respecto a este punto el fluido que mayor ventaja ofrece es el amoníaco (NH₃) aparte del agua. Otras características, como ser, la viscosidad, el calor latente de evaporación, el peso específico etc. tienen importancia, pero su evaluación concomitantemente a los otros datos, es dificultosa. Se espera sacar conclusiones concretas, luego de ser experimentados diversos refrigerantes, en el presente o en un posterior prototipo.

También creemos indicativo en este nivel de la investigación, un estudio comparativo de las relaciones de las presiones en las distintas etapas del ciclo, para distintos fluidos, tomando iguales valores de temperatura para la producción de vapor activo, de evaporación y condensación.

Fig. 9



Lo antedicho está consignado en la Tabla I donde se llega a determinar un número índice, que establece un grado de utilización de un fluido con respecto a otros. En la Tabla I se han elegido valores de temp. de 71,1°C. para el vapor activo, de 10°C. para la evaporación y de 43,3°C para la condensación

Temp. °C	Freón 11, P=kg/c2 abs
71,1°	P. iny 4,292 = 6,933 (número < mejor)
10°	P. evap. 0,619
71,1°	P. Iny. 4,292
43,3°	P. cond. 1,975 = 2,17 (número > mejor)
43,3	P. cond. 1,975
10°	P. evap. 0,619 = 3,19 (número < mejor)
	$\frac{6,933}{2,17} = 3,19$ (número < mejor)
	$\frac{2,17}{3,19} = 0,68$ (número > mejor)
	$\frac{3,19}{0,68} = 4,69$ (número índice < mejor)

TABLA I

Para otros fluidos con las mismas temperaturas tenemos:

Fluido	número índice
Freon 12	3,28
Freón 21	4,5
Propano	3,19
NH ₃	3,9
H ₂ O	13,75

De entre estos fluidos y en los rangos de temperatura indicadas, el mejor es el propano, con el número índice menor, seguido por el Freón 12. El peor es el agua, pero es evidente que su uso en este rango de temperaturas no es conveniente. Bastaría llevar la temperatura de inyección del vapor de agua a valores de 133°C (3kg/cm2) para que a iguales temperaturas de evaporación (10°C) y de condensación (43°C) el número índice bajara a 1,53. En el caso del bombeo de calor el número índice, para temp. de inyección de 70°C, de evaporación de 16°C y de condensación de 43°C y para Freón 12 está indicado en la Tabla II:

Temp °C	Freón 12	P _r =kg/cm2 abs.
70°	P.iny. 19,33	= 3,747
16°	p.evap. 5,158	
70°	P.iny. 19,33	= 1,628
43°	P.cond.11,869	
43°	P.cond. 11,869	= 2,301
16°	P.evap. 5,158	
<hr/>		
	$\frac{3,747}{1,628} =$	2,301
	$\frac{1,628}{2,301} =$	0,707
	$\frac{2,301}{0,707} =$	3,252 (número índice)

TABLA II

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece la labor efectuada por el ing. Bruno R. Brocanelli, quien efectuó los cálculos preliminares para el dimensionamiento del eyector-difusor y del Ing. Eduardo Carlos DeVit por el apoyo técnico prestado y al Sr. Miguel A. Venier por la labor efectuada en su taller de tornería.

REFERENCIAS:

- 1.- W.F. Stoecker. Refrigeración y Acondicionamiento de Aire (pág. 202) Mc. Graw-Hill Edit.
- 2.- E. Bonauguri-D. Miari. Técnica del Freddo (pág. 95) Hoepli.-
- 3.- H. Morsel. Vademecun del Frigorista (pág. 112) Edit. Acribia.-
- 4.- W.H. Severns y otros. Energía mediante Vapor, Aire o Gas (pág.461) Ed. Reverte S.A.

- 5.- W. Pohlmann. Manual de Técnica frigorífica (pag. 136 y 338) Edic. Omega S.A.
- 6.- V. Tacchi. Motor de Bombeo de un fluido en estado de vapor (pág. 442) Actas de Asades - 1979.-