

Evaluación de un Enfriador de Estado Sólido para Aplicarlo en el Subenfriamiento de Refrigerante

Oscar José Pineda

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, D.F., México, jposcarmx@hotmail.com

Ignacio Carvajal Mariscal

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, D.F., México, icarvajal@ipn.mx

Juan Abugaber Francis

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, D.F., México, jaf1427@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación experimental que se realizó a un enfriador de estado sólido del tipo líquido-gas. La intención es instalarlo a la salida del condensador para subenfriar el refrigerante en un sistema de refrigeración por compresión de vapor con capacidad de una tonelada de refrigeración. Los resultados experimentales muestran que el enfriador de estado sólido es capaz de proporcionar un subenfriamiento del refrigerante de hasta 8 °C, lo que conduce a un incremento del efecto refrigerante del sistema de refrigeración. Sin embargo, al considerar el alto consumo de energía eléctrica del enfriador de estado sólido esto provoca una disminución del coeficiente de operación, COP, del sistema de refrigeración. Por lo tanto, por el momento su aplicación queda limitada a sistemas que necesiten operar con un valor máximo del COP independientemente del aumento de la temperatura ambiente.

Palabras clave: estado sólido, subenfriamiento, sistema de refrigeración, coeficiente de operación

ABSTRACT

The results of the experimental evaluation conducted to a solid state cooler of the liquid-gas type, are presented in this paper. The intent is to install it at the condenser outlet to subcool the refrigerant in a vapor compression refrigeration system of one ton of capacity. Experimental results show that the solid state cooler is capable of providing a subcooling of 8 °C to the refrigerant, leading to an increased cooling effect of the refrigeration system. However, when considering the high electric power consumption of the solid state cooler this would cause a decrease in the coefficient of performance, COP, of the refrigeration system. Therefore, at the moment its application is limited to systems that need to operate with a maximum value of the COP regardless of the increment of ambient temperature.

Key words: solid state, subcooling, refrigeration system, coefficient of performance

1. INTRODUCCIÓN

La refrigeración es el proceso de extracción de calor, para realizarlo existen diversos procedimientos que permiten su obtención, siendo el sistema más utilizado el de compresión de vapor. Actualmente se pretende buscar mejoras para incrementar la eficiencia en el ciclo de refrigeración por compresión y reducir el consumo de energía, dado que hoy en día es un tema de gran importancia.

El parámetro que tiene mayor influencia en un sistema de refrigeración es la temperatura ambiente pues no sólo es la que se tiene que abatir sino que también influye en las condiciones de operación del condensador. El objeto del condensador en el sistema de refrigeración es remover calor del vapor de refrigerante que sale del compresor, de

manera que el refrigerante se condense a su estado líquido. El condensador es un intercambiador de calor, en el cual el calor se transfiere del refrigerante a un medio de enfriamiento, por ejemplo, al aire ambiente en los equipos domésticos.

El refrigerante siempre sale del compresor a una temperatura superior a su temperatura de saturación (de condensación); esto es, se halla sobrecalentado. En la primera parte del condensador tiene lugar la remoción del calor sensible (el vapor se enfría hasta su temperatura de saturación). A continuación, la remoción adicional de calor condensa gradualmente al refrigerante (se remueve el calor latente).

El tamaño del condensador puede ser justamente el adecuado para que el refrigerante salga del condensador como un líquido saturado a su temperatura de condensación. Sin embargo en la mayoría de los casos, la superficie de transferencia de calor es suficiente para que el refrigerante líquido se subenfrie por debajo de su temperatura de saturación, antes de salir del condensador.

Mientras mayor sea el subenfriamiento del líquido mayor será el efecto refrigerante. En la figura 1 se muestra el ciclo de refrigeración convencional comparado con otro en el cual el líquido es subenfriado antes de que llegue a la válvula de control del refrigerante. Con los puntos 1, 2, 3 y 4 se designa al ciclo convencional, mientras que los puntos 1', 2', 3 y 4 describen el ciclo con subenfriamiento.

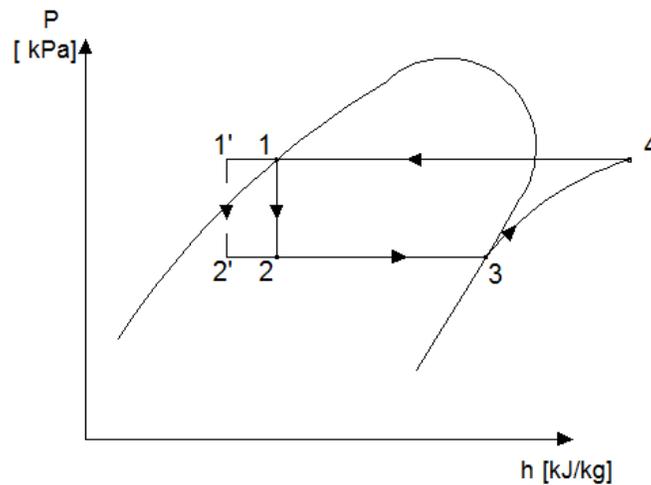


Figura 1: Efecto del subenfriamiento en el ciclo de refrigeración

Existen varias formas de lograr un mayor subenfriamiento del líquido, se pueden considerar pequeños equipos de refrigeración y equipos de intercambio de calor adicionales que pueden ser enfriados por agua o aire (Selbas et al., 2006). En este contexto, actualmente han adquirido importancia los enfriadores de estado sólido, basados en módulos termoeléctricos, que pueden funcionar como intercambiadores de calor de baja capacidad. Su principal ventaja sobre otros intercambiadores de calor es que se puede controlar el subenfriamiento de manera simple regulando la corriente suministrada a los módulos termoeléctricos.

Recientemente, varios investigadores han investigado de manera experimental la posibilidad de instalar enfriadores de estado sólido para subenfriar el refrigerante en sistemas de refrigeración de distintas capacidades y refrigerantes (Benouali et al, 2000; Bolaji, 2010; José-Pineda, 2011; Rosca et al., 2007; Schoenfeld et al., 2008). Sin embargo, en la mayor parte de los casos no se ha incluido el consumo de energía del enfriador en el cálculo del COP del sistema de refrigeración, lo que conduce a una sobreapreciación de la aplicación de estos dispositivos.

De lo anteriormente mencionado, es entonces la motivación de este trabajo hacer una evaluación experimental de un enfriador de estado sólido para conocer su capacidad de subenfriar refrigerante, con la intención de aplicarlo a un sistema de refrigeración por compresión de vapor de una tonelada de refrigeración. En el cálculo del COP se incluirá el consumo de energía del enfriador de estado sólido.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En esta investigación se utilizaron dos instalaciones experimentales: la primera para estudiar el comportamiento del sistema de refrigeración donde se podría implementar el subenfriamiento y la segunda para evaluar el comportamiento del enfriador de estado sólido.

El sistema de refrigeración utilizado es un Banco Entrenador de Refrigeración Industrial con una capacidad de una tonelada de refrigeración, cuyo fluido de trabajo es el refrigerante M049Plus. El Banco cuenta con tres diferentes válvulas (expansión, automática y tubo capilar) para un evaporador y para el segundo evaporador trabaja con una válvula de expansión, para este caso de estudio se trabajó únicamente con dos válvulas de expansión, una para cada evaporador. Este equipo tiene la posibilidad de poder variar la velocidad del ventilador que suministra el aire al condensador, con lo cual se pueden simular las condiciones en que opera el condensador durante el año. En la investigación experimental se ensayaron tres porcentajes del aire de enfriamiento hacia el condensador: 25, 50 y 100 %. El banco de pruebas se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Banco de pruebas para refrigeración por compresión de vapor

La segunda instalación experimental se compone de un enfriador de estado sólido, con su fuente de alimentación, y de un sistema hidráulico con capacidad para calentamiento de agua. Se optó por esta opción ya que el enfriador de estado sólido opera a valores limitados de presión, hasta 205 kPa, por eso es que no se pudo instalar directamente a la salida del condensador del sistema de refrigeración.

En la Figura 3 se puede observar el enfriador de estado sólido en base a módulos termoelectricos conectado para realizar las pruebas experimentales.

El enfriador de estado sólido es de la marca TE Technology Inc, modelo LC200, posee ocho módulos termoelectricos conectados en paralelo que forman una superficie de intercambio de calor de 0.034 m^2 por cada cara. La cara fría de los módulos termoelectricos enfría agua en un serpentín, mientras que el calor de la cara caliente es disipado al medio ambiente por un sistema de aletas de aluminio y un ventilador que utiliza una tensión de 24 V de corriente directa a 1 A. El enfriador de estado sólido funciona con una tensión eléctrica típica de 24 V de corriente directa a 14.1 A y con una tensión eléctrica máxima de 24 V de corriente directa a 17.3 A. Utiliza una fuente de alimentación modelo PS-24-20 del mismo fabricante.

El agua que circula por el enfriador de líquidos proviene de un depósito cilíndrico vertical de 0.7 m de diámetro y 2.0 m de altura, por medio de una bomba centrífuga de 0.186 kW. También esta interconectado a un deposito (caldera) que tiene un banco de resistencias eléctricas para calentar el agua, la cual es movida por una bomba centrífuga de 1.49 kW. Se pueden alcanzar temperaturas de hasta $90 \text{ }^\circ\text{C}$, sin embargo para las pruebas experimentales se limitó al intervalo de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ que es el valor que se tiene a la salida del condensador. El

enfriador de líquidos está unido a la tubería de suministro con una manguera flexible. Se cuenta con una válvula de globo para variar el caudal de entrada que se mide por medio de un rotámetro, con un alcance de 1 a 20 litros por minuto y una resolución de 1 litro por minuto, colocado antes de la entrada del enfriador.



Figura 3: Banco de pruebas del enfriador de estado sólido donde se simularon las condiciones a la salida del condensador

Los termopares que se utilizaron para medir la temperatura del agua a la entrada y a la salida del enfriador de estado sólido son del tipo J (-40 °C a +750 °C y una sensibilidad de ~52 μV/°C). Los termopares se conectaron a un escáner modelo 92000 marca Cole-Parmer de 12 canales con una resolución de 0.1 °C.

Las pruebas preliminares mostraron que el enfriador de estado sólido es capaz de proporcionar un subenfriamiento de hasta 8 °C. Por lo tanto, para esta investigación experimental se eligieron dos valores de subenfriamiento, 5 y 8 °C.

Los cálculos de los principales parámetros del sistema de refrigeración se realizaron de la forma convencional que contempla la ASHRAE, es por eso que no se presentan aquí ya que el objetivo del trabajo es evaluar el comportamiento del enfriador de estado sólido.

El calor disipado por el agua en el enfriador de estado sólido se calculó con la ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{agua}} = \dot{m}_{\text{agua}} \times C_{p,\text{agua}} \times (T_{\text{ent}} - T_{\text{sal}}) \tag{1}$$

Debido a que se utilizó agua en lugar de refrigerante en el enfriador de estado sólido, se calculó el flujo másico equivalente de refrigerante con la ecuación:

$$\dot{m}'_{\text{ref eq}} = \frac{\dot{Q}_{\text{agua}}}{h_{e,\text{ref}} - h_{s,\text{ref}}} \tag{2}$$

El valor de la entalpía del líquido subenfriado considerando el flujo másico equivalente de refrigerante:

$$h'_3 = h_3 - \frac{\dot{Q}_{\text{agua}}}{\dot{m}'_{\text{ref eq}}} \tag{3}$$

El coeficiente de operación, COP, del sistema de refrigeración con subenfriamiento se calculó:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_c} = \frac{\dot{m}_{\text{ref med}}(h_1 - h_3)}{\dot{W}_c} \quad (4)$$

El equivalente del trabajo mecánico del enfriador de estado sólido se calculó con la ecuación:

$$\dot{W}_{\text{EES}} = VI \quad (5)$$

El COP real se calculó considerando el equivalente del trabajo mecánico del enfriador:

$$\text{COP}_{\text{real}} = \frac{\dot{m}_{\text{ref med}}(h_1 - h_3)}{\dot{W}_c + \dot{W}_{\text{EES}}} \quad (6)$$

Donde:

\dot{Q}_{agua} = Calor disipado por el agua en el enfriador de estado sólido (kW)

\dot{Q}_c = Calor que se absorbe en el evaporador (kW)

\dot{m}_{agua} = Flujo másico del agua a través del enfriador de estado sólido (kg/s)

$\dot{m}_{\text{ref eq}}$ = Flujo másico equivalente del refrigerante calculado para el enfriador de estado sólido (kg/s)

$\dot{m}_{\text{ref med}}$ = Flujo másico de refrigerante medido en el sistema de refrigeración (kg/s)

$C_{p,\text{agua}}$ = Calor específico del agua (kJ/kg·K)

T_{ent} = Temperatura del agua a la entrada al enfriador de estado sólido (°C)

T_{sal} = Temperatura del agua a la salida del enfriador de estado sólido (°C)

$h_{e,\text{ref}}$ = Entalpía del refrigerante a la temperatura de entrada del enfriador de estado sólido (kJ/kg)

$h_{s,\text{ref}}$ = Entalpía del refrigerante a la temperatura de salida del enfriador de estado sólido (kJ/kg)

h_1 = Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador (kJ/kg)

h_3 = Entalpía del punto de subenfriamiento (kJ/kg)

\dot{W}_{EES} = Equivalente del trabajo mecánico del enfriador de estado sólido (W)

\dot{W}_c = Trabajo mecánico del compresor (W)

V = Tensión eléctrica medida en el enfriador de estado sólido (V)

I = Corriente eléctrica medida en el enfriador de estado sólido (A)

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra la influencia del efecto de subenfriamiento, para los valores de 5 y 8 °C, sobre el efecto refrigerante; para comparación se muestran los valores del efecto refrigerante del ciclo normal sin subenfriamiento. Se puede notar que el efecto refrigerante para un subenfriamiento de 5 °C se incrementa 4.7%, y 7.3% para el caso de 8 °C, con respecto al obtenido en el sistema de refrigeración sin subenfriamiento. Otro aspecto a destacar, es que en porcentaje el aumento del efecto refrigerante es prácticamente el mismo no importando la cantidad de aire de enfriamiento hacia el condensador.

Por lo tanto, al implementar el subenfriamiento con la misma potencia del compresor se obtiene un mayor efecto refrigerante lo que como consecuencia incrementa el COP del sistema de refrigeración. Una ventaja adicional del subenfriamiento es que reduce la posibilidad de que tenga lugar una vaporización súbita del refrigerante líquido en la línea de líquido antes de llegar al dispositivo de control de flujo.

Tabla 1: Influencia del subenfriamiento sobre el efecto refrigerante

Parámetro	Sin subenfriamiento	Con 5 °C de subenfriamiento	Con 8 °C de subenfriamiento
25 % del aire de enfriamiento hacia el condensador			
Efecto refrigerante (kJ/kg)	141.84	148.95	153.25
50 % del aire de enfriamiento hacia el condensador			
Efecto refrigerante (kJ/kg)	144.67	151.80	156.00
100 % del aire de enfriamiento hacia el condensador			
Efecto refrigerante (kJ/kg)	145.72	152.84	157.04

Tabla 2: Valores del COP para 5 °C de subenfriamiento

Ciclo de refrigeración	COP	COP _{real}
25 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.52	--
Con subenfriamiento	4.75	3.06
50 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.71	--
Con subenfriamiento	4.94	3.14
100 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.83	--
Con subenfriamiento	5.06	3.20

Tabla 3: Valores del COP para 8 °C de subenfriamiento

Ciclo de refrigeración	COP _{teórico}	COP _{real}
25 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.52	--
Con subenfriamiento	4.89	3.14
50 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.71	--
Con subenfriamiento	5.08	3.23
100 % del aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.83	--
Con subenfriamiento	5.2	3.28

El COP se calcula con la ecuación (4) como es convencional para un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Sin embargo, para obtener el valor real del COP del sistema de refrigeración, es decir, que incluye el consumo de energía del enfriador de estado sólido, se debe calcular con la ecuación (6).

Las Tablas 2 y 3 muestran los resultados del coeficiente de operación COP (ecuación 4), es decir, sin considerar el consumo de energía del enfriador de estado sólido, para un subenfriamiento de 5 y 8°C, respectivamente. Además, en estas tablas se incluye el valor del coeficiente de operación real (COP_{real}) considerando el consumo de energía del enfriador de estado sólido (ecuación 6).

Se puede ver la influencia que tiene el consumo de energía por parte del enfriador de estado sólido, el COP del sistema de refrigeración se reduce un 35% en promedio. Es quizá esta la razón por lo que hasta la fecha no se

implementen enfriadores de estado sólido a los sistemas de refrigeración por compresión de vapor comerciales. Es de esperar que en el futuro la tecnología de los módulos termoeléctricos avance incrementando la eficiencia de los mismos, esto conducirá a su aplicación y en el subenfriamiento de refrigerante. Mientras tanto, su aplicación queda restringida a sistemas de refrigeración que requieran operar con un valor constante del COP independientemente de la variación de la temperatura ambiente.

4. CONCLUSIONES

Se evaluó experimentalmente el rendimiento de un enfriador de estado sólido para su aplicación en el subenfriamiento de refrigerante en un sistema de refrigeración por compresión de vapor. A partir del análisis de los resultados experimentales se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- El alto consumo de energía eléctrica por parte del enfriador de estado sólido conduce a una reducción del COP del sistema de refrigeración donde se instale.
- Debido a lo anterior, en este momento no es conveniente, desde el punto de vista del ahorro de energía, instalar un enfriador de estado sólido en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.
- Su aplicación en el subenfriamiento de refrigerante queda limitada a sistemas de refrigeración que requieran operar con el COP máximo independientemente del aumento de la temperatura ambiente.

REFERENCIAS

- Benouali, J., Chang, Y. S., Clodic, D. (2000). "Analysis of the Sub-Cooling on Refrigerating Systems Using R-410A or R-404A", *Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, Purdue University, USA, pp. 63-70.
- Bolaji, B. O. (2010). "Effects of Sub-Cooling on the Performance of R12 Alternatives in a Domestic Refrigeration System". *Thammasat International Journal of Science & Techlogy*, Vol. 15, No. 1, pp 12-19.
- José-Pineda, O. (2011). "Estudio experimental del incremento de eficiencia en un sistema de refrigeración al integrar un módulo termoeléctrico", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Rosca, R., Tenu, I., Carlescu, P., Rakpsi, E., Manolache, Gh. (2007). "Assessment of the Subcooling Capabilities of a Thermoelectric Device in a Vapour Compression Refrigeration System". *Lucrari Stiintifice seria Agronomie*, Vol. 51, pp 224-229.
- Selbas, R., Kızılkán, O., Sencan, A. (2006). "Thermoeconomic Optimization of Subcooled and Superheated Vapor Compression Refrigeration Cycle". *Energy*, Vol. 31, No. 12, pp 2108-2128.
- Schoenfeld, J., Muehlbauer, J., Hwang, Y., Radermacher R. (2008). "Integration of a Thermoelectric Sub cooler Into a Carbon Dioxide Transcritical Vapour Compression Cycle Refrigeration System", *Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, Purdue University, USA, pp. 1-7.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.