

BUENAS PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA Refrigeración Industrial

Introducción

La refrigeración se define como cualquier proceso de eliminación de calor. Más específicamente, se define como la rama de la ciencia que trata con los procesos de reducción y mantenimiento de la temperatura de un espacio o material de forma que sea inferior a la de los alrededores.

La refrigeración industrial en nuestro país es principalmente utilizada en:

- La agroindustria para la refrigeración de frutas como la piña, el banano, melón, entre otros.
- Refrigeración de productos en plantas de procesamiento de acuicultura tales como tilapias, camarones, entre otros.
- Refrigeración en plantas de procesamiento de pescado, atunes, sardinas, etc.
- Plantas de procesamiento de productos lácteos.
- Plantas de procesado de bebidas gaseosas, cervezas, o jugos varios.
- Plantas de procesamiento de productos cárnicos.
- La criogénesis o enfriamiento a muy bajas temperaturas empleada para licuar algunos gases, tales como el nitrógeno, argón, entre otros.
- O bien para manutención de productos en cámaras de refrigeración comercial, para escogencia del consumidor final.



Fundamentos Teóricos

La refrigeración es el proceso de remoción de calor o control de temperatura y por consiguiente de humedad relativa, en resumen, dependiendo de los fines, la refrigeración puede hacerse de varias maneras entre ellas están:

- Mediante un fluido que lleva el calor sin cambio de fase ya sea por agua o aire.
- Aprovechando el calor de cambio de fase (calor latente) de un fluido, y esto mediante dos sistemas distintos:
 - Evaporando un fluido (normalmente agua) y disipando el vapor en el ambiente exterior
 - Mediante la evaporación de un fluido en un circuito cerrado y posterior condensación, por medio de una energía externa, para repetir el ciclo (sistemas de refrigeración de espacios)
- Otros métodos mediante una sustancia fría, antiguamente el hielo y hoy en día la criogenia, con nitrógeno líquido o mezcla de sustancias, como sal común y hielo; mediante un par termoeléctrico que genera una diferencia de temperatura.

Para efectos de este fascículo únicamente nos enfocaremos en la refrigeración por circuito cerrado, dicho proceso se basa en el ciclo saturado simple, cuyo análisis se logra mediante el cálculo de sus variables en las cuatro etapas termodinámicas al que está expuesto el refrigerante en el diagrama de presión – entalpía. Este sistema consta básicamente de cuatro equipos básicos que son: el evaporador, el compresor, el condensador y la válvula de expansión.



Ciclo ideal de refrigeración por compresión

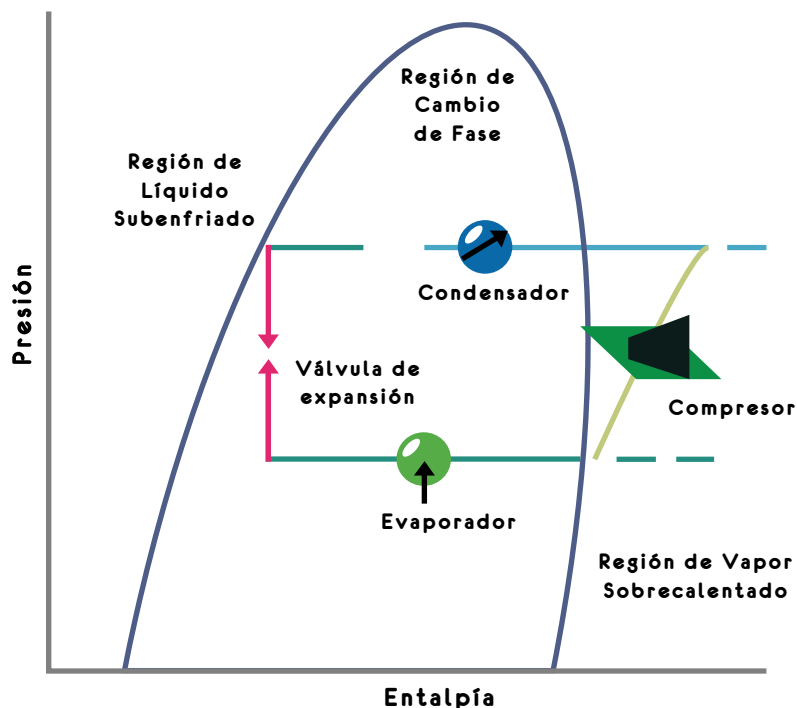
En este ciclo de refrigeración el refrigerante se evapora y se condensa, comprimiéndolo, alternativamente para luego volver a la fase de vapor. Está compuesto por cuatro procesos:

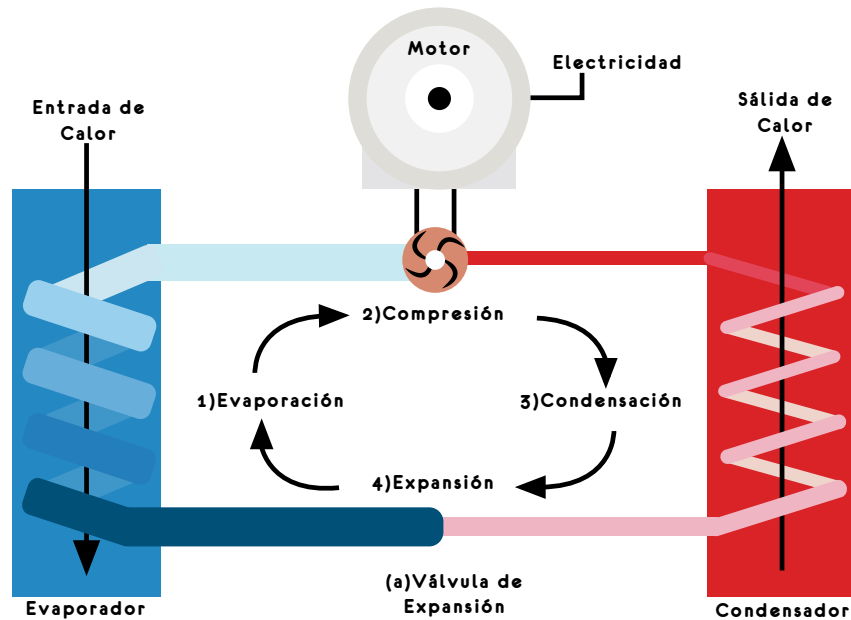
- **Compresión del gas refrigerante:** Durante el proceso de compresión se efectúa trabajo sobre el vapor del refrigerante y se incrementa la energía (entalpía) del vapor en una cantidad que es exactamente igual al trabajo mecánico efectuado sobre el vapor. El compresor abarca diferentes tecnologías aunque los más utilizados son los compresores pistón y los compresores de tornillo los cuales son los más eficientes del mercado nacional.

- **Proceso de condensación:** El gas caliente descargado del compresor es enfriado hasta la temperatura condensante y después condensado. Esto representa el enfriamiento del vapor desde la temperatura de descarga hasta la temperatura condensante a medida que el vapor deja el calor al medio condensante. Las tecnologías del condensador abarcan el de aire forzado, transferencia por agua o evaporativo, este último es el más eficiente.

- **Proceso de expansión:** La expansión sucede cuando en el control del refrigerante la presión del líquido es reducida desde la presión del condensador hasta la presión del evaporador a medida que el líquido pasa a través de la válvula de expansión.

- **Proceso de evaporación:** Absorción de calor a presión constante en un evaporador donde el gas refrigerante se evapora. Es en este proceso donde se produce la refrigeración en el espacio refrigerado.





Resumiendo, el evaporador absorbe el calor del recinto que queremos enfriar, el compresor aumenta la presión del refrigerante para facilitar la condensación posterior y posibilitar la circulación del fluido. La válvula de expansión reduce la presión provocando el enfriamiento del refrigerante.

Refrigerantes

Los refrigerantes son sustancias químicas, líquidas o gaseosas que debido a su formulación presentan excelentes condiciones termodinámicas para absorber y ceder calor de un medio a otro, son utilizados principalmente en sistemas de refrigeración y sistemas aire acondicionado. Su estabilidad les permite soportar cambios de fase que se efectúan durante los ciclos de refrigeración mecánica, necesarios para lograr el efecto refrigerante.

Para el cumplimiento de los acuerdos ambientales internacionales relacionados con el uso de estas sustancias agotadoras de ozono o que impactan sobre el calentamiento global, se está impulsando el uso de los refrigerantes naturales como el CO₂, el amoníaco y los hidrocarburos, los cuales pueden cubrir perfectamente los rangos de aplicación de los sistemas de refrigeración; alta, media, baja y ultra baja temperatura.¹

La eficiencia del ciclo de refrigeración

Se logra mediante el cálculo del Coeficiente de rendimiento (COP), el cual es una expresión que queda definida como la relación del calor absorbido en el espacio refrigerado a la energía térmica equivalente de energía suministrada al compresor, esto decir:

$$\text{COP} = \text{Calor Extraído} / \text{Trabajo realizado por el motor}$$

¹. MINAE, DIGECA, Oficina Técnica del Ozono, 2014

Buenas Prácticas

Las oportunidades de ahorro energético deben estar orientadas directamente a solucionar las causas que provocan un alto consumo, producto de la pérdida de eficiencia del equipo por obsolescencia tecnológica o los malos hábitos en el uso de los equipos, dichas causas pueden ser de diseño e instalación de los equipos o bien en la operación del mismo.

Compresor

- Tener un correcto dimensionamiento del compresor, la capacidad instalada debe ser igual a la capacidad demandada.
- Optimizar las presiones reduciendo las diferencias entre las presiones de succión y condensante.
- Valorar instalar variador de frecuencia así el compresor opera según capacidad demandada.
- Control multi-etapas, es decir instalar compresores en cascada.
- Utilizar preferiblemente compresores de tornillo.
- Aplicar protocolos de mantenimiento.

Condensador

- Tener un correcto dimensionamiento de intercambiadores de calor, en lo posible sobredimensionar el condensador.
- Manejo de capacidad del condensador de acuerdo con lo requerido por el sistema, minimizando la temperatura condensante.
- Control de etapas por ventiladores, la capacidad del condensador se puede manejar por lo menos en 3 etapas.
- Aplicar protocolo de mantenimiento.

Válvula de expansión

- Tener un correcto dimensionamiento de la válvula, un sobredimensionamiento provoca pérdidas.
- Utilizar válvula electrónica, adapta el flujo volumétrico del refrigerante de forma ideal.
- Aplicar protocolo de mantenimiento.

Evaporador

- Utilizar un sistema de descongelamiento automático según capacidad real.
- Aplicar protocolo de mantenimiento
- Control de etapas con ventiladores

Refrigerante

- Selección del refrigerante adecuado y eficiente (sistemas nuevos), por ejemplo la sustitución de los “freones” por R717 en refrigeración puede reducir el requerimiento de potencia hasta un 40% en algunas ocasiones.
- Adecuar la carga del refrigerante al eliminar fugas.

Tubería e aislamiento

- Tener un adecuado diseño de tuberías con el fin de reducir las pérdidas por fricción.
- Tener un adecuado aislamiento térmico en tubería de succión.

Otras recomendaciones

- Tener un control automático de operación inteligente del sistema.
- Contar con protocolos de mantenimiento predictivo..
- Pintar el techo blanco.
- Purgas automáticas en los sistemas que utilicen el R717 (amoníaco) como refrigerante, debido a que las infiltraciones de aire reducen y afectan sus propiedades.

Causas de pérdida de Energía Energética



Caso Práctico

Sistema de refrigeración operando ineficientemente

Una empresa productora de alimentos produce 5.000 kg/h de mermelada de piña, el producto sale de las marmitas a 65 °C y de ahí es enviado a la cámara de congelación que se encuentra a -10 °C con la finalidad de lograr enfriarla en 12 horas y poder enviarla a sus centros de distribución al día siguiente.

La piña en mermelada tiene las siguientes propiedades:

- Calor específico por encima de la congelación 3,68 kJ/kg °C
- Calor específico por debajo de la congelación 1,88 kJ/kg °C
- Punto de congelación de productos 0 °C
- Calor latente de congelamiento 285 kJ/kg

Para el proceso de refrigeración se cuenta con los siguientes compresores:

COMPRESOR	HP	(kW) REFRIGERACIÓN	TONELADAS DE REFRIGERACIÓN
Compresor 1	200	132,26	146,95
Compresor 2	75	55,5	61,67
Compresor 3	125	73	81,11
Compresor 4	125	71,5	79,44
Compresor 5	125	84,67	94,07
Total	650	416,93	463,24

Para efectos de este ejercicio considere que todos los compresores pueden dar 1 Tonelada de Refrigeración (TR) por cada 900 Watts eléctricos. También considere usar el siguiente factor de conversión 1 TR = 12.666,5 kJ/h.

La energía actual anual consumida del sistema de refrigeración es de:

$$\text{Energía Total Anual} = (416.93\text{kW})(12 \text{ h/día})(365 \text{ días/año}) = 1.826.153 \text{ kWh/año.}$$

- Indique si la capacidad instalada podría compensar los requerimientos del producto a almacenar.
- Con la finalidad de ahorrar energía se propone construir una cámara de pre-enfriamiento a fin de bajar la temperatura del producto desde la temperatura de proceso hasta la temperatura ambiente que puede considerarse de 25 °C.
- Para ahorrar aún más se propone llevar el proceso de enfriamiento en tres pasos: primero de la temperatura de proceso a la ambiente, del ambiente a una cámara de fresco a 5 °C y de ahí hasta -5 °C. La razón de subir la temperatura obedece a que con el pre enfriamiento ya no será necesario el ajuste a -10 °C.
- Considere que el sistema tiene un pobre mantenimiento, tuberías con excesiva fricción, y sin aislamiento en la tubería de succión, se quiere mediante prácticas de mantenimiento corregir el problema.

La transferencia de calor del proceso está dado por:

$$Q = m_p C_p \Delta T1 + m_p h_i \lambda + m_p C_p \Delta T2$$

Donde:

m_p : masa de producto

C_p : calor específico del producto

$h_i \lambda$: es el calor latente de congelamiento del producto

$\Delta T1$: es la diferencia de temperatura entre la entrada del producto hasta la temperatura de congelación.

$\Delta T2$: es la diferencia entre temperaturas de congelación y de subenfriamiento.

a) La capacidad de enfriamiento se calcula según la ecuación anterior:

$$Q = 5.000 \text{ Kg/h} [3,68 (65-0) + 285 + 1,88 (0 - (-10))] \times 24/12$$

$$Q = 5.430.000 \text{ kJ/h}$$

Usando el factor de conversión de 1 TR = 12.666,5 kJ/h

$$Q = 428,72 \text{ TR}$$

El sistema sí tiene capacidad para almacenar el producto a la temperatura requerida.

b) La capacidad de enfriamiento se calcula según la ecuación anterior:

$$Q = 5.000 \text{ Kg/h} [3,68 (25-0) + 285 + 1,88 (0 - (-10))] \times 24/12$$

$$Q = 3.958.000 \text{ kJ/h}$$

$$Q = 312,5 \text{ TR}$$

El sistema según como está descrito en el cuadro anterior, tiene una capacidad de 463.24 TR, entonces:

$$\text{AHORRO} = 463,24 \text{ TR} - 312,5 \text{ TR} = 150,74 \text{ TR}$$

$$\text{Potencia Eléctrica} = 150,74 \text{ TR} \times (0,9 \text{ kW/TR}) = 135,67 \text{ kW}$$

$$\text{Energía Anual Ahorrada} = 135,67 \text{ kW} \times 12 \text{ h} \times 365 \text{ días/año}$$

$$\text{kWh} = 594.235 \text{ kWh/año}$$

Al implementar la opción de la cámara de pre-enfriamiento, la capacidad instalada quedaría muy por encima de lo requerido, lo cual genera la posibilidad de no utilizar un compresor, en este caso podría ser el 2, o el 3, o el 4, o el 5. Se sugiere sacar de servicio el compresor No 5 por ser el de mayor potencia, 85 kW.

c) Se tiene lo siguiente: el producto pasa de 65°C a 25°C (cámara de pre- enfriamiento), y de 25°C a 5°C (cámara de fresco), y de 5°C a -5 °C (cámara de congelación)

$$Q_{25-5} = (5.000 \times (25 - 5) \times 3,68 \times 24/12)/12.666,5 = 58 \text{ TR}$$

$$Q_{5-5} = (5.000 \times ((5-0) \times 3,68+285 + 1,88 \times (0-(-5))))24/12/12.666,5$$

$$Q_{5-5} = 247 \text{ TR}$$

$$Q = 58 + 247 = 305 \text{ TR}$$

Por lo tanto, con esta acción el consumo disminuye de 463,24 TR a 305 TR, teniendo un ahorro anual de energía de:

$$\text{Toneladas de enfriamiento ahorradas} = (463,24 - 305) = 158,24 \text{ TR}$$

$$\text{Potencia Eléctrica} = 158,24 \times 0,9 = 142,42 \text{ kW}$$

$$\text{Energía Anual Ahorrada} = 142,42 \times 12 \times 365 = 623.780 \text{ kWh/año}$$

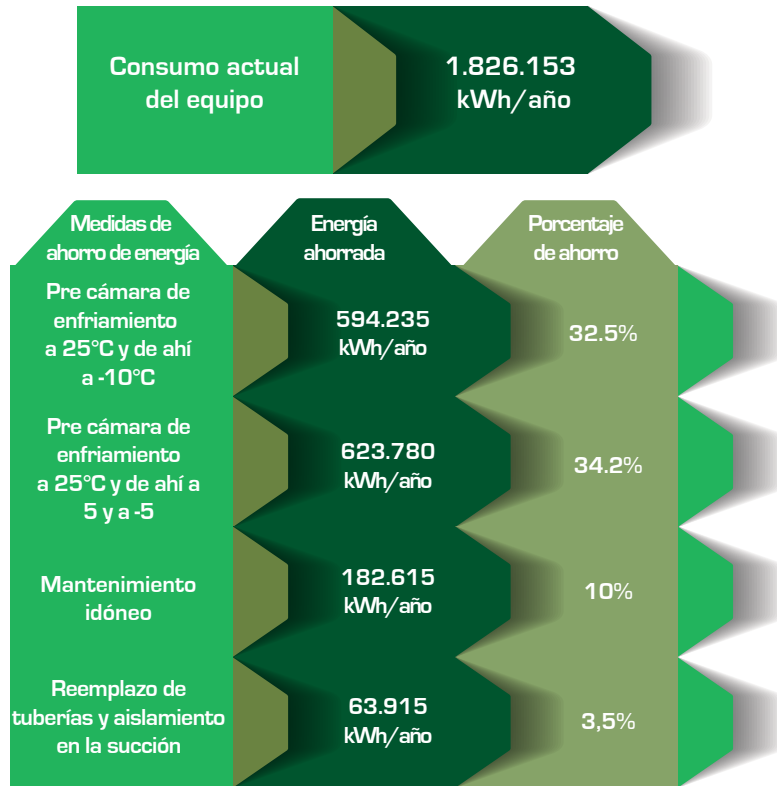
d) Se estima que cualquier equipo de refrigeración que no posea un correcto mantenimiento podría llegar a consumir un 10% más de la potencia nominal requerida, por lo tanto con esa razón podemos concluir que el ahorro de este equipo por un mantenimiento idóneo es de:

$$\text{Ahorro Anual de Energía} = 1.826.153 \times 0,1 = 182.615 \text{ kWh al año}$$

En cuanto a la reducción de fricción por las tuberías se estima una reducción de un 2%, además aplicando el correcto aislamiento de la tubería de succión reduce el consumo en un aproximado de 1,5%, brindando un ahorro de:

$$\text{Ahorro Anual de Energía} = 1.826.153 \times 0,035 = 63.915 \text{ kWh al año}$$

Resumen de ahorros de energía:



El gobierno alemán, por medio de la cooperación alemana Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), apoya la región centroamericana a través de su Programa Energías Renovables y Eficiencia Energética (4E) en mejorar las condiciones marco, así como las capacidades tanto institucionales como personales, para el fomento de las energías renovables, la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático. Es en el marco de este proyecto que la GIZ apoya al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en la elaboración del presente producto informativo, con el fin de promover el uso racional y eficiente de la energía, así como un aprovechamiento estratégico y sostenible de las fuentes renovables de energía disponibles en Costa Rica.

BUENAS PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA Refrigeración Industrial



Contenido elaborado por:
Gerencia Electricidad
UEN Servicio al Cliente
Área Conservación de Energía

Teléfonos
(506) 2000-7460
(506) 2000-5673
(506) 2000-8041

eficienciaenergetica@ice.go.cr

www.grupoice.com