

# Compresores Recalentados

## ¿Es hoy día el más serio de los problemas del campo?

Por Dave Demma, Ingeniero de Aplicación de Supermercados, Sporlan Division de Parker Hannifin.

Hace más de 20 años un boletín de aplicación titulado "Recalentamiento de Compresores: El Problema Más Serio de Campo de Hoy" fue publicado por uno de los fabricantes de compresores más importantes. A primera vista, puede parecer que el recalentamiento de compresores no sería un factor importante en las tantas fallas de compresores de refrigeración en un día cualquiera. Una inspección más profunda, sin embargo, revelaría que muchos de los compresores que sufren fallas mecánicas/eléctricas tienen como origen el recalentamiento.

¿Por qué el recalentamiento tiene un efecto tan devastador en un compresor? La respuesta tiene que ver con dos aspectos:

- 1. Pérdida de la película de lubricación:** Los aceites/lubricantes de refrigeración han sido altamente mejorados en un esfuerzo para elevar la temperatura a la cual ocurre una descomposición química. Como tales, son vulnerables de perder la película de lubricación necesaria para prevenir el contacto de metal a metal entre los muñones y cojinetes/casquillos o los anillos de los pistones y los cilindros, antes de llegar a la temperatura en donde comienza la descomposición. Con aceite mineral esto ocurrirá aproximadamente entre 155°C y 165°C/310°F y 330°F. Cuando se alcancen estas temperaturas, la probabilidad de que ocurra un desgaste extremo entre el pistón y los anillos es inminente.
- 2. Descomposición química:** Esto sucede a temperaturas elevadas, y se acelera en la presencia de otros contaminantes tales como el aire o agua. Diez (10) es un número importante de recordar, ya que la velocidad de una reacción química se dobla con cada 10°C/18°F de incremento de temperatura.\* Por ejemplo, una reacción química que tomaría 10 años en completarse a 38°C/100°F, solamente tomaría 5 años para completarse a 48°C/118°F. A 58°C/136°F se completaría en 2-1/2 años y así sucesivamente. El proceso por el cual el refrigerante y/o aceite se descompone químicamente puede ocurrir en cuestión de segundos si han habido suficientes 10°C/18°F de incrementos de temperatura.

El aceite mineral comenzará a descomponerse a aproximadamente 177°C/350°F (Aceite POE a 204°C/400°F). Al aumentar la temperatura por encima de estos límites, el aceite comienza a polimerizarse. En simple español, esto quiere decir que las moléculas que constituyen la composición de los aceites comenzarán a convertirse en moléculas grandes y más grandes. Primero, el aceite se transforma en un aceite grueso de color negro, luego en barro y finalmente en un polvo sólido.

La presencia de aceite descompuesto en un sistema de refrigeración tiene muchos efectos negativos. Barro y partículas sólidas pueden obstruir el filtro de malla en el cárter del compresor o los pasadizos de lubricación en el cigüeñal. Cualquiera de estas condiciones tendrán consecuencias devastadoras: pérdida de lubricación y finalmente, la falla de los cojinetes/casquillos.

\* Ecuación Arrhenius

Depósitos producto de la descomposición del aceite pueden también adherirse a las superficies internas del sistema de refrigeración. Las paredes internas de las tuberías, compresor y dispositivos de control están todos expuestos a este problema. Mientras que esto causaría que las VET se atasquen/obstruyan y restricciones a los pasadizos de lubricación, el aceite descompuesto en las paredes internas de las tuberías pudiera mantenerse intacto sin causar daños durante años. (Figura 1).

Al convertir un sistema tal como este de R-22/aceite mineral a R-404A/aceite POE despertará el aceite descompuesto como a un gigante dormido. Con la propiedad solvente del aceite POE, su presencia en el sistema literalmente limpiará estos depósitos de las paredes internas y los pondrá nuevamente en circulación. Se debe esperar tener problemas con contaminantes luego de realizar un cambio de refrigerante en donde el aceite mineral ha sido reemplazado por aceite POE: el aceite nuevo agregado al compresor lo más seguro que tenga una coloración oscura a la mañana siguiente, y probablemente unas cuantas VETs se obstruirán. Varios cambios de filtro-secador/aceite y filtros/aceite serán necesarios antes de resolver el problema. Aunque sea molesto, es simplemente una consecuencia natural de las excesivas temperaturas de descarga causando la descomposición del aceite, y debido a las propiedades solventes del POE, son puestas nuevamente en circulación.

**Figura 1** – Depósitos producto de la descomposición del aceite en las paredes internas de las tuberías del sistema



Ahora, veamos un escenario de la vida real en donde se aprecia que tan destructivas pueden ser las temperaturas de descarga excesivas. La mayoría de los técnicos han escuchado un compresor operando con lo que llamaríamos el síndrome de "una perforación neumática dentro del cilindro". Es el resultado de un desgaste excesivo del agujero/hueco del pasador del pistón en la biela (Figura 2). El juego adicional permite que el pasador golpee los dos extremos del agujero/hueco. Adicionalmente, el pistón puede pegar contra la parte inferior del plato de válvulas al final de cada ciclo de compresión.

Ahora, aquí está lo terrible... esta falla mecánica fue el resultado de temperaturas de descarga excesivas. Cuando

**Figura 2** – Un agujero/hueco del pasador del pistón de la biela desgastado



se arrancó este sistema, el instalador estaba contra el tiempo y se le olvidó ajustar las válvulas de expansión (VET). Como resultado el recalentamiento alto a la salida del evaporador se tradujo en todavía un mayor recalentamiento de succión en la entrada del compresor. Por cada .6°C/1°F de aumento en la temperatura de succión, se verá un aumento aproximado de .6°C/1°F en la temperatura de descarga.

Si nos adelantamos un año. Este sistema está sufriendo de una falta de mantenimiento en la forma de un condensador sucio (Figura 3). La consecuencia es una temperatura de descarga mayor. De acuerdo a investigaciones de la EPA, la transferencia de calor de un serpentín con una escasa capa de 1mm (.042") de suciedad en la superficie resultará en hasta una pérdida de capacidad de transferencia de calor del 21%.\*

**Figura 3** – Condensador Sucio



Una temperatura de succión alta (VETs alimentando poco) junto con una temperatura de descarga mayor (condensador sucio) resultan en un sistema operando con una excesiva temperatura de descarga, condición que es propicia para que el aceite se descomponga. Después de un periodo cualquiera de tiempo, el color café claro y limpio del aceite cambiará a negro y grueso. Una parte de la descomposición del aceite se depositará en los platos de válvulas (Figura 4), evitando que las lengüetas de las válvulas sellen apropiadamente.

Claramente, los depósitos de la descomposición del aceite son consecuencia de las altas temperaturas de descarga.

\*Contratistas – Septiembre 2003

**Figura 4** – Plato de válvulas con depósitos de la descomposición del aceite



Veamos cuales son todas las implicaciones. Empezaremos con una explicación de como se lubrican los pasadores de los pistones y sus casquillos/cojinetes.

Hay un pequeño depósito de aceite (orificio) en la parte superior del extremo del pasador del pistón en la biela (Figura 5). Su función es simplemente acumular aceite de la neblina de aceite que hay en el cárter. El aceite luego es suministrado al agujero del pasador del pistón en la biela por medio de una ranura de aceite, centrada en el casquillo del pasador del pistón. En el caso como este, de una biela de aluminio, el agujero del pasador del pistón con maquinado de alta precisión (con la ranura del aceite) sirve también como casquillo del pasador del pistón.

Como se muestra en la Figura 6, cuando el pistón está en su recorrido descendente (succión), el punto de contacto creado por el recorrido del pistón es entre la parte superior del pasador del pistón y el agujero del pasador. Esto permite que el espacio se transfiera a la parte inferior del pasador del pistón/agujero. Aceite proveniente de la ranura del agujero del pasador del pistón fluirá dentro del espacio entre estas dos partes metálicas en movimiento, creando una película de lubricación. De esta manera es como la mitad inferior del pasador del pistón y casquillo se lubrican.

Cuando el pistón está en su recorrido ascendente (compresión), el punto de contacto creado por el recorrido del pistón cambia a la parte inferior del pasador del pistón y el agujero del pasador. Esto permite que el espacio cambie a la parte superior del pasador del pistón y el agujero. El aceite que se ha acumulado en el depósito puede fluir dentro de este espacio, lubricando la parte superior del pasador del pistón y el casquillo.

Es imperativo que el punto de contacto entre el pasador del pistón y el agujero continúe cambiando de arriba a abajo, ya que permite que el espacio también cambie. Sin cambios en el espacio, la habilidad de lubricar la parte superior e inferior del pasador del pistón y casquillos estaría en peligro.

Esto es cuando el plato de válvulas en la Figura 4 entra en juego. Luego que el vapor comprimido sale del cilindro, las lengüetas de descarga deben asentarse herméticamente, evitando cualquier fuga dentro del cilindro.

**Figura 5 – Agujero del pasador del pistón de la biela**



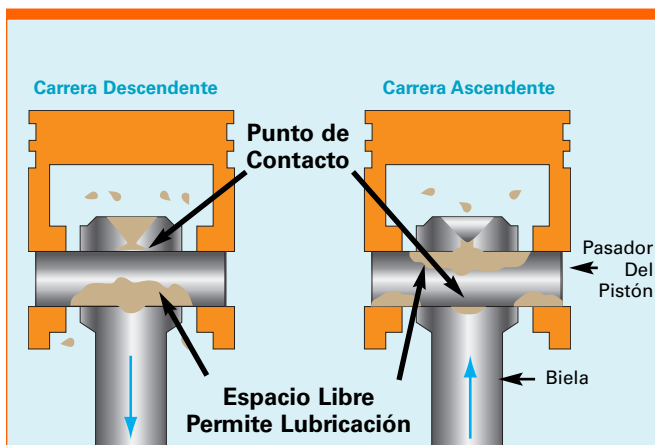
Desafortunadamente, los depósitos de la descomposición del aceite previenen esto, permitiendo que vapores con alta presión entren de nuevo al cilindro durante la carrera descendente (succión). No solamente esto le roba capacidad de bombeo al compresor, sino que además mantiene una alta presión en la parte superior del pistón durante todo el tiempo. Esto es lo que al final causa que el agujero del pasador del pistón se desgaste.

Una constante alta presión en la parte superior del pistón evita que el espacio libre del pasador del pistón cambie, manteniendo el punto de contacto en la parte inferior del pasador del pistón/agujero (Figura 6). Debido a esto, la sección inferior del pasador del pistón/agujero no recibe lubricación, y como resultado el contacto metal con metal causa un patrón anormal de desgaste al agujero del pasador del pistón.

Esto es ciertamente una falla mecánica. Una revisión de los pasos que llevaron a esta falla revelará que sus raíces están en temperaturas de descarga excesivas.

1. Alta temperatura del vapor de succión, resultante de VETs alimentando poco. Una temperatura de succión más alta aumenta la temperatura de descarga.
2. Un condensador sucio aumenta la temperatura de condensación (y presión), resultando en temperaturas de descarga aún mayores. Se han excedido las temperaturas aceptables, causando que el aceite se descomponga.

**Figura 6 – Lubricación normal del Pasador del Pistón/Agujero**



3. Los productos de la descomposición del aceite se depositan en las lengüetas de las válvulas, evitando que se asienten. El vapor de descarga ahora puede fugarse dentro del cilindro durante la carrera de succión del pistón.
4. La constante alta presión ejercida sobre la cabeza del pistón evita que el espacio libre entre el pasador del pistón/agujero cambie. La sección inferior del pasador del pistón/agujero se convierte en el punto de contacto constante durante la carrera ascendente y descendente del pistón, evitando así, que el pasador del pistón/agujero se lubrique completamente.
5. Después de un período de tiempo, el contacto metal con metal causa un desgaste anormal al aluminio (material más suave) del agujero del pasador del pistón, resultando en un agujero alargado.

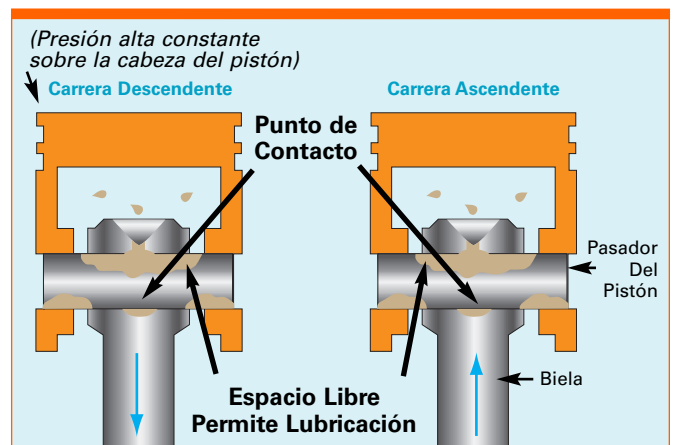
El mantener las temperaturas de descarga normales hubiera extendido la vida del compresor y reducido su consumo eléctrico.

Antes de implementar medidas preventivas uno debe, como primer paso, saber que causó las temperaturas de descarga excesivas. Mientras podemos atribuirlo a varias fuentes, cuatro son las causas principales que llevan a temperaturas de descarga excesivas:

1. **Recalentamiento de Succión Alto:** Una de las ineficiencias integrales del ciclo de vapor-compresión es el calor agregado al refrigerante entre la salida del evaporador y la descarga del compresor. Una gran cantidad de esto puede atribuirse al proceso de compresión. Mientras que la cantidad de calor agregada variará dependiendo del refrigerante y las condiciones del sistema, este “calor de compresión” no puede ser eliminado por ningún procedimiento. Es inherente al proceso de compresión.

El proceso de la compresión de alguna manera sigue la línea de entropía constante en el diagrama P-H (Figura 8). Las líneas de entropía constante se extienden en un ángulo desde la línea de vapor saturado, y se hace menos vertical con cada línea siguiente (o incremento de valor).

**Figura 7 – Pérdida de lubricación a la sección inferior del pasador del pistón/agujero**





De manera que, entre mayor sea el valor de la línea de entropía constante, mayor será la distancia horizontal entre dos puntos de presión dados. Es esta distancia horizontal que representa el aumento en el contenido de calor del refrigerante en Btu/lb. La entropía de un vapor aumentará en la medida en que aumente su temperatura. Por consiguiente, es la temperatura del vapor (que es parcialmente influida por la cantidad de recalentamiento de succión) que determinará la línea de entropía constante a la cual sigue el proceso de compresión. Las leyes de física en este escenario nunca cambian: A una temperatura del vapor de succión mayor entrando al compresor (resultando en una entropía mayor), mayor será el calor de compresión.

Por ejemplo, el sistema en la Figura 8 representa un sistema de baja temperatura con R-22 operando a una temperatura de succión saturada (TSS) de -20°F/-30°C y 100°F/38°C de temperatura de condensación saturada (TCS), con un compresor abierto. La temperatura del vapor de refrigerante a la salida del evaporador es de -15°F/-25°C (5° de recalentamiento). La línea de color naranja refleja 40° de recalentamiento a la entrada del compresor, y el calor de compresión (CDC) es de 27 Bru/lb. La temperatura de descarga es de 215°F/62°C.

El sistema en la Figura 9 representa un sistema con las mismas condiciones de operación, utilizando un compresor hermético con enfriamiento de succión. El vapor de

succión más fresco debe ahora viajar a través del embobinado tibio del motor, experimentando aproximadamente un aumento de 80°F/44°C en el proceso. La temperatura del vapor entrando a los cilindros es de 100°F/38°C (un recalentamiento de 120°F/68°C). La temperatura de descarga resultante es de 295°F/146°C.

Nótese que la temperatura de succión del sistema en la Figura 9 era 80°F/44°C mayor que la del sistema en la Figura 8. Esto se tradujo en aumento de 80°F/44°C en la temperatura de descarga.

Por cada 1°F/0.6°C de aumento en la temperatura de succión, se puede esperar un aumento aproximado de 1°F/0.6°C en la temperatura de descarga. Básicamente, cualquier condición del sistema que cause un aumento en la temperatura de succión resultará en un aumento casi igual en la temperatura de descarga.

Algunas de las condiciones más comunes de un sistema que causan aumentos en la temperatura de succión son:

- A. Un ajuste de Recalentamiento alto. Esto se debe siempre revisar al arranque y ajustarse a las especificaciones del fabricante del equipo. La VET del sistema no está diseñada para regular la temperatura del vapor de refrigerante a la entrada del compresor. Al permitir que la VET del sistema opere en condiciones

Figura 8 – Diagrama de Presión-Entalpía para un Compresor Abierto

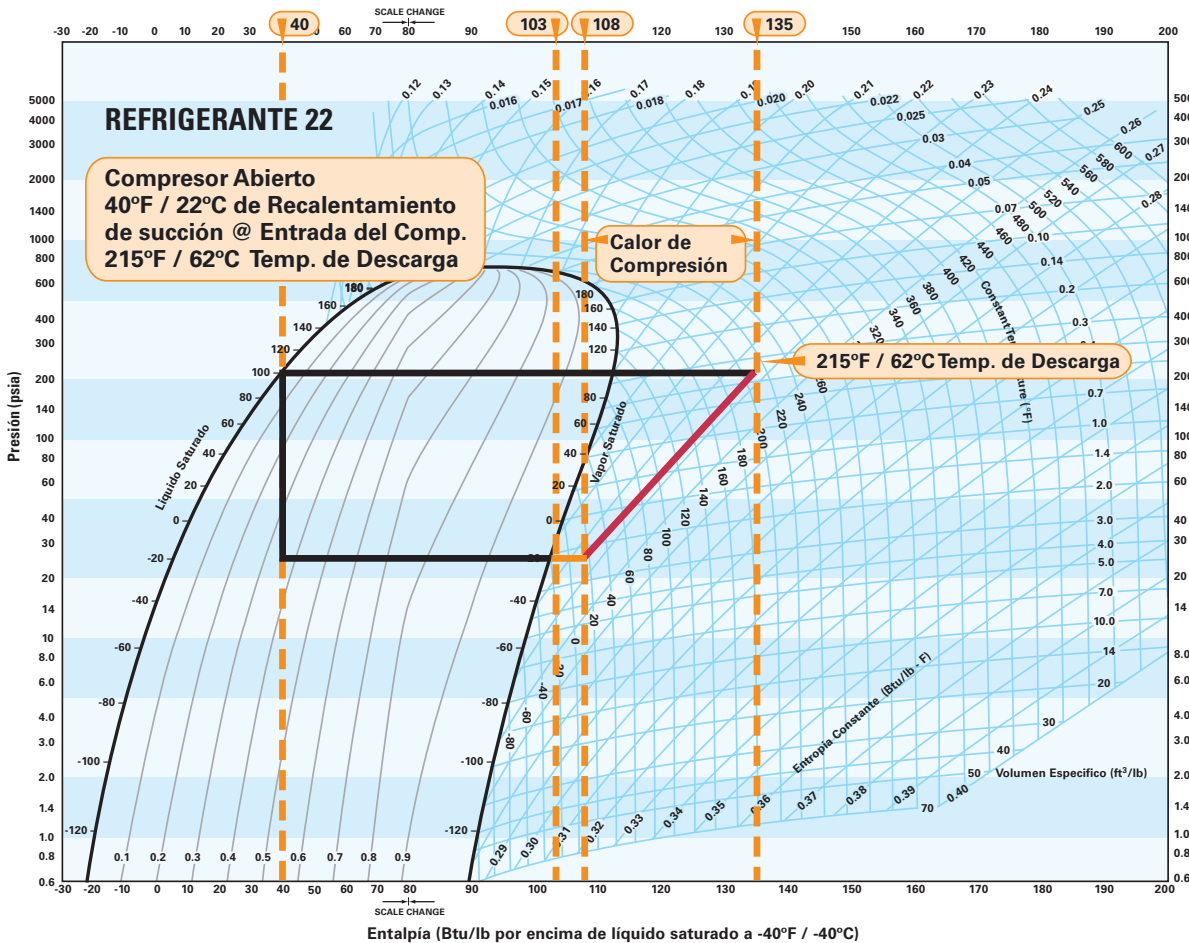
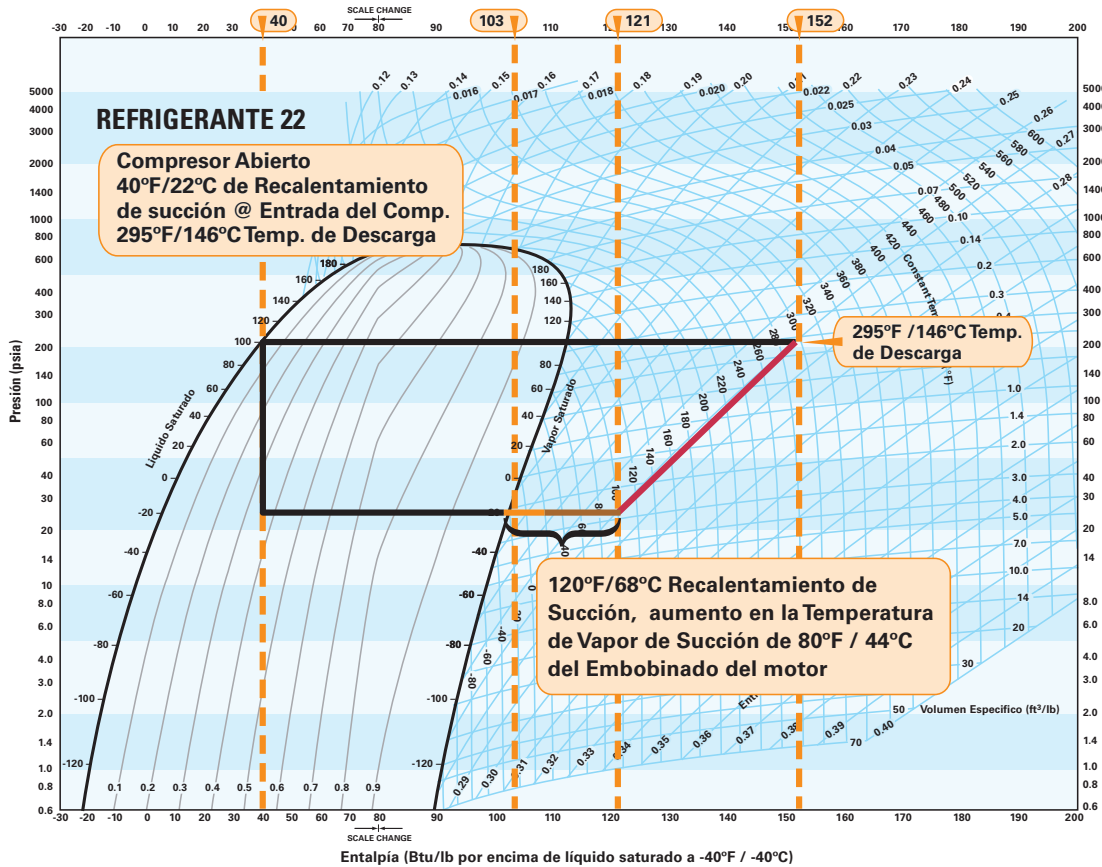


Figura 9 – Diagrama de Presión-Entalpía de un Compresor Hermético con Enfriamiento de Succión



de retorno de líquido para asegurar una adecuada temperatura del vapor a la entrada del compresor, es peligroso (potencial daño al compresor) e ineficiente (el refrigerar la línea de succión conlleva a gastos operativos, y no tiene efecto alguno en la temperatura del producto). Al ajustarse apropiadamente, la VET del sistema mantendrá una temperatura de succión menor a la entrada del compresor sin sacrificar la vida del mismo y la eficiencia del sistema.

- B. Aislamiento deficiente o faltante (Figura 10). Puede haber la tentación de usar un aislamiento más barato con pared de 3/8" de espesor. Esto debe evitarse. En tramos largos de tubería o en casos en donde la tubería de succión pasa por el ático, se recomienda aislamiento con un espesor de pared de 1/2" ó 1".
- C. Intercambiadores de calor líquido – succión. Esta es una situación clásica “robarle a Pedro para pagarle a Pablo”. El vapor de succión frío sub-enfría el líquido, lo cual asegurará una alimentación libre de vapor a la VET. Lo hace, pero a expensas de una temperatura más alta del vapor de succión. No solo esto resulta en temperaturas de descarga más altas, sino que también estas temperaturas del vapor de succión más altas reducen la eficiencia del compresor. Esto cancela cualquier ganancia de eficiencia del líquido sub-enfriado.

2. **Insuficiente Capacidad del Condensador:** En raras ocasiones esto puede ser resultado de un condensador

sub-dimensionado. Sin embargo, por cada condensador sub-dimensionado en servicio, probablemente miles más les falta mantenimiento. En la medida en que las aletas del condensador se le acumulen suciedad, la restricción en el flujo de aire pondrá en peligro la capacidad de diseño del condensador.

La Figura 11 muestra el sistema mencionado anteriormente, pero con un condensador sucio. La temperatura de condensación ha aumentado de 100°F/38°C a 120°F/49°C y la temperatura de descarga resultante ha aumentado a 320°F/160°C.

La Figura 3 muestra un ejemplo de esta condición; es un compresor esperando fallar. Tristemente esto es fácilmente... y completamente... evitable.

Figura 10 – Aislamiento Faltante en Línea de Succión



Figura 11 – Ciclo Típico con un Condensador Sucio

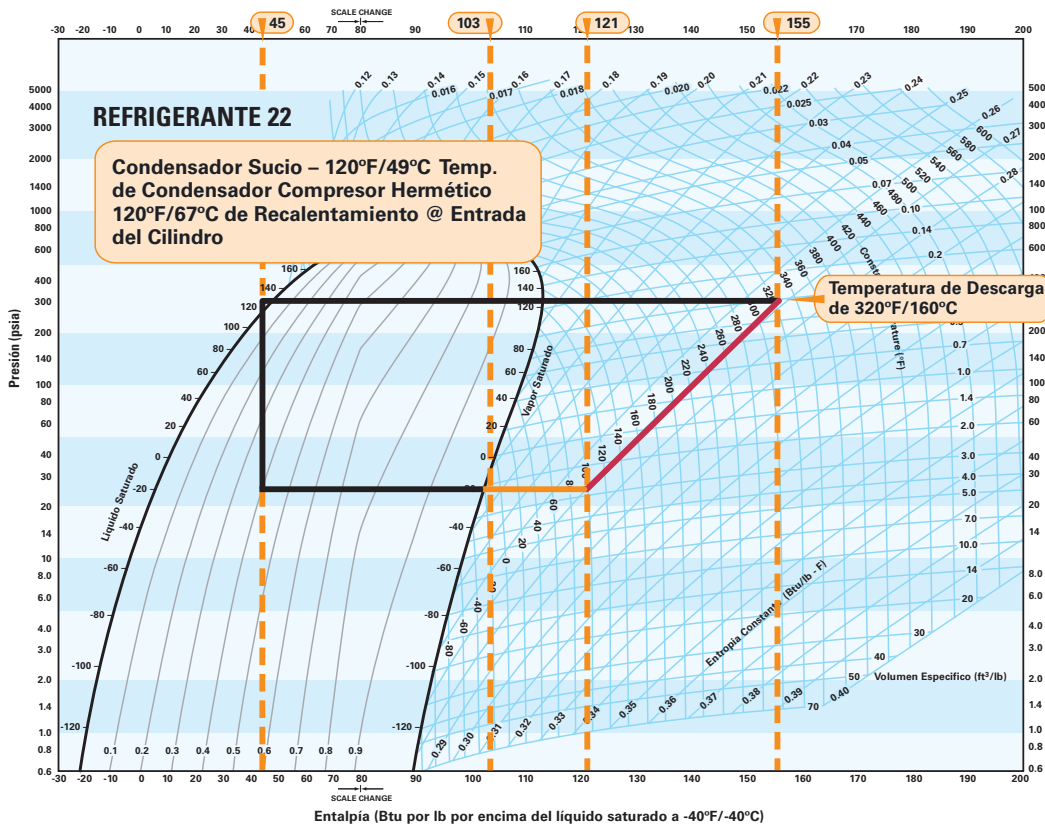


Figura 12 – Ciclo Típico Con Condensador Sucio y Presión de Succión Menor

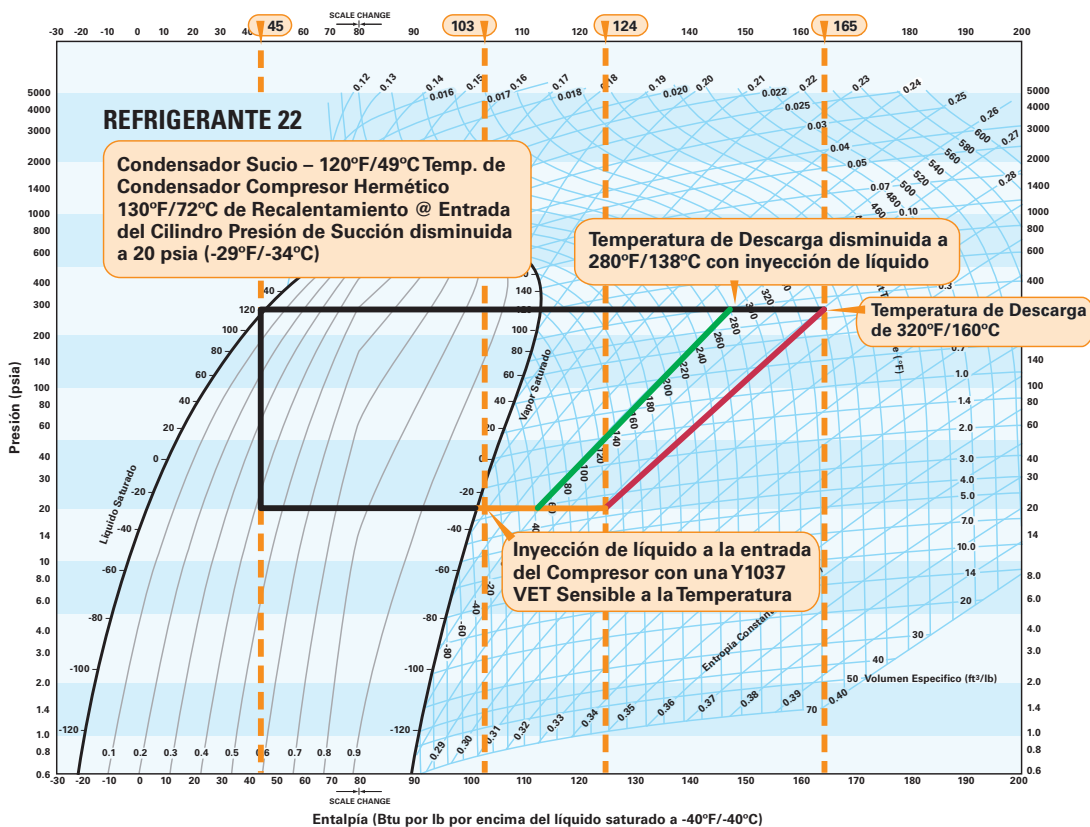
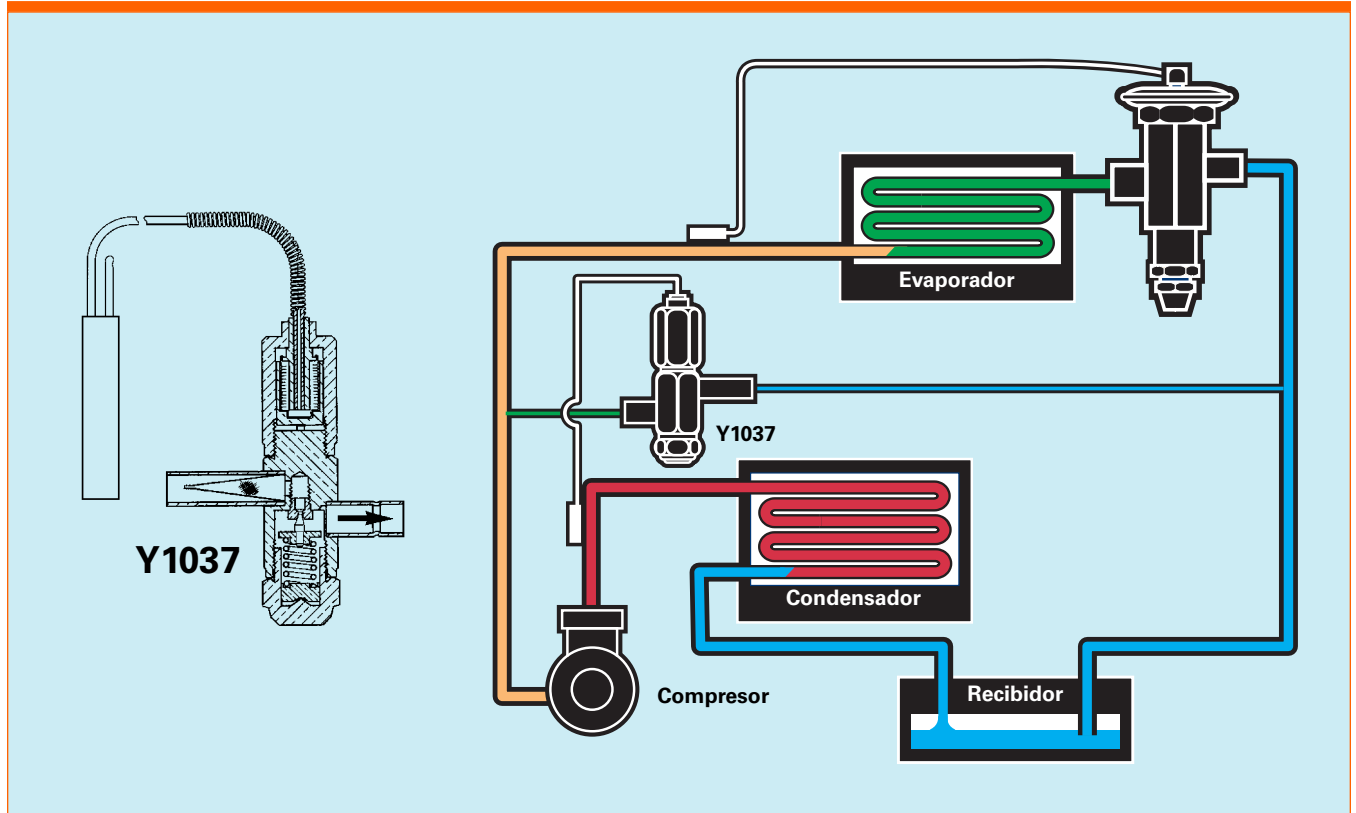


Figura 13 – Válvula de Expansión Sensible a la Temperatura Sporlan Y1037



**3. Disminuyendo la Presión de Succión:** Como indicamos anteriormente, el proceso de compresión más o menos sigue la línea de entropía constante en el diagrama de Presión-Entalpía.

Con una presión de descarga constante, cuando el proceso de compresión comienza en una línea de entropía de un valor mayor, la temperatura de descarga resultante es más alta. Hay dos maneras en que el proceso de compresión puede iniciarse en una línea de entropía constante mayor: una temperatura de succión mayor o una presión de succión menor. El sistema en la Figura 12 está operando a una presión de succión menor; se ha disminuido de 10 psig a 5.5 psig, mientras que la temperatura de condensación se mantiene en 120°F/49°C. El resultado es una temperatura de descarga más alta; 365°F/185°C. Es importante que el sistema opere con la succión más alta posible.

**4. Tipo de Refrigerante:** Se utilizan muchos criterios al seleccionar el refrigerante para una aplicación dada: costo, disponibilidad, desempeño y beneficios ambientales. Cuando el R-502 se sumó a la lista de las especies en extinción, y reemplazos adecuados para aplicaciones de refrigeración fueron necesarios, pareció lógico enlistar el R-22 como un reemplazo. Se había estado utilizando en aplicaciones de refrigeración antes que se desarrollara el R-502 en la década de los '60.

Uno debe preguntarse, “Si el R-22 era un buen refrigerante para aplicaciones de refrigeración, ¿por qué se desarrolló el R-502?” La respuesta es que el R-22 tiene algunas limitaciones como un refrigerante para

“refrigeración”, particularmente en aplicaciones de baja temperatura. Está expuesto a una relación de compresión mayor, la cual ejerce estrés en las superficies de los cojinetes/casquillos y por ende, el proceso de compresión es menos eficiente. Esto puede superarse utilizando un proceso de compresión de dos-etapas; ya sea un compresor de dos-etapas o dos compresores separados que compriman el vapor en dos etapas.

De mayor importancia, es que en aplicaciones de baja temperatura, el R-22 tiene el potencial para crear devastadoras altas temperaturas de descarga. Si el sistema está operando de acuerdo al diseño... considerando que el condensador fue seleccionado adecuadamente y está limpio, el recalentamiento de la VET está ajustado correctamente, la línea de succión está bien aislada, y la presión de succión está al valor más alto posible, el sistema todavía operará con temperaturas de descarga altas. Esto es simplemente debido a las propiedades y características físicas del R-22.

Debido a esta limitación, si se escoge el R-22 como un refrigerante para baja temperatura, algo debe hacerse para “neutralizar” su problema de altas temperaturas de descarga. Un abanico para enfriar el cuerpo del compresor es un buen comienzo, ya que puede reducir la temperatura de descarga, quizás unos 15-25 grado F (8 – 14 grados C).

La “solución” real sería atacar el problema a la entrada del compresor. Recuerde que por cada 1°F/0.6°C de cambio en la temperatura de succión, habrá un cambio equivalente aproximado de 1°F/0.6°C de cambio en la temperatura de



descarga. Esto puede ser tanto un aumento como una reducción. Al saber esto, parece ser sencillo controlar la temperatura de descarga controlando la temperatura de succión. De aquí nace la válvula de inyección de líquido.

La Figura 13 muestra la aplicación de la válvula de inyección de líquido; Válvula de Expansión Sensible a la Temperatura Sporlan Y-1037. Su función es bastante sencilla: monitorear la temperatura de descarga del compresor por medio de un bulbo sensor. Cuando la temperatura de descarga excede el ajuste de la Y-1037, esta inyecta una mezcla de líquido y vapor saturado dentro de la línea de succión. Esto reducirá la temperatura del vapor de succión, lo cual a su vez, reduce la temperatura de descarga. Al saber que la temperatura en donde está localizado el bulbo sensor es 50-75°F/28-42°C menor que la temperatura real de descarga, el técnico puede fácilmente seleccionar una Y-1037 con un ajuste de temperatura basado en la máxima temperatura de descarga deseada. Si el punto deseado para que la Y-1037 comience a inyectar líquido es una temperatura de descarga de 280°F/138°C, entonces el ajuste de la Y-1037 será de 205°F (280-75)/96°C (138-42). El sistema en la Figura 12 ilustra el beneficio de la inyección de líquido.

La Y-1037 responde a la temperatura solamente. No hay conexión de equalizador y la presión no influye en su operación. El bulbo sensor deberá sujetarse fijamente 6" (15 cm) alejado de la válvula de servicio de descarga del compresor para un control preciso. Se recomienda aislar el bulbo para evitar que las temperaturas ambientales influyan en la temperatura del bulbo. La conexión de entrada de la Y-1037 debe ser conectada a una fuente de refrigerante líquido libre de vapor; la conexión de salida debe ser conectada a la línea de succión 12"-18" (5-7 cm) alejada de la válvula de servicio de succión del compresor. Dado que la Y-1037 tiene la habilidad de cerrar

completamente, una válvula solenoide adicional, normalmente no se requiere.

La inyección de líquido puede usarse para reducir excesivas temperaturas de descarga en procesos de compresión de una sola etapa o para controlar la temperatura entre las etapas en un proceso de compresión de doble etapa.

Conclusión: Tal como se estableció hace dos décadas, el recalentamiento de compresores ES hoy día, el problema de campo más serio que hay. Muchos de los problemas y fallas de compresores pueden ser directamente relacionados con temperaturas de descarga altas.

Varias causas de esta condición existen y muchas pueden solucionarse con un diagnóstico apropiado y acción correspondiente. Los condensadores deben limpiarse según sea necesario para mantenerlos operando a su capacidad de diseño. La temperatura del vapor de succión debe mantenerse dentro de los límites aceptables ajustando la VET del sistema correctamente y aislando la línea de succión debidamente. No se debe permitir que los compresores operen a presiones de succión anormalmente bajas, ya que esto llevará a temperaturas de descarga más altas.

Con algunos refrigerantes y aplicaciones, se requiere de métodos adicionales para aliviar las altas temperaturas de descarga. Esto puede lograrse hasta cierto grado con un abanico que enfríe el cuerpo del compresor. Para controlar este problema completamente, una Válvula de Expansión Sensible a la Temperatura de Sporlan, la cual monitorea la temperatura de descarga, puede usarse. Inyectando líquido/vapor saturado dentro de la línea de succión reducirá la temperatura del vapor recalentado, y a su vez reducirá las temperaturas de descarga excesivas.



Sporlan Division  
Parker Hannifin Corporation  
206 Lange Drive  
Washington, MO 63090  
636-239-1111 • FAX 636-239-9130  
www.sporlan.com