

BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA, HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES, Y UNA ELECCION ADECUADA DEL LUBRICANTE PARA UNA MAYOR EFICIENCIA.

Manuel MUÑOZ-ALONSO^{1*}, Joe KARNAZ², Liz DIXON¹, Jun LIU³.

1: Shrieve Products International Ltd. Kent, ME19 4YU UK, mmunoz@shrieve.com

2: Shrieve Chemical Products, LLC, The Woodlands, 77380 (TX), USA, jkarnaz@shrieve.com

3: Shrieve Chemical (Shanghai) Ltd, 3F, Bldg 2, JuXin HI-TECH PARK, No. 188 Ping Fu Road, Xuhui District Shanghai, CHINA, 200231

Resumen: *Lo que encontramos dentro de un circuito frigorífico es una mezcla de lubricante con algún refrigerante disuelto, que cambia las propiedades originales del lubricante. En refrigeración y aire acondicionado los parámetros de funcionamiento son bien conocidos, pero para bombas de calor (HP), y aún más para bombas de calor de alta temperatura (HTHP, por sus siglas en inglés), es necesario una nueva evaluación de las condiciones de lubricación en el compresor. Describiremos los parámetros que influyen para poder cubrir las necesidades de lubricación del compresor, proporcionando una viscosidad de trabajo suficiente para proteger las partes móviles de rozamientos y fricción, manteniendo así mismo una separación efectiva entre los lados de alta y baja presión del circuito. La química del refrigerante y el lubricante, su influencia en la mutua solubilidad y miscibilidad, determinan la viscosidad de trabajo. El papel de los hidrocarburos y el comportamiento del par lubricante-refrigerante se describirán en compresores alternativos y de tornillo. Todas las explicaciones se ilustrarán con ejemplos prácticos de productos y condiciones de trabajo reales.*

Palabras clave: Bomba de calor, Refrigerantes Naturales, Hidrocarburos, Lubricante, Dilución.

1.- INTRODUCCIÓN.

Una bomba de calor (HP) por compresión de vapor tiene todos los elementos de cualquier equipo de refrigeración o aire acondicionado: evaporador, condensador, compresor, y una válvula de expansión. En este caso, optimizado para suministro de calor. El compresor necesita lubricante por dos razones principales: Una es mantener siempre una capa de lubricante entre las partes móviles, a fin de reducir la fricción y evitar desgastes. La otra es mantener una separación entre los sectores de alta y baja presión en los compresores de desplazamiento positivo.

Debido al movimiento y la circulación del refrigerante, cierta cantidad de lubricante es expulsada por la descarga del compresor al circuito, el cual ha de estar diseñado para recuperar este aceite: bien con un separador de aceite, bien por retorno con refrigerante por la aspiración del compresor, o bien ambos.

Un compresor lubricado tendrá aceite en las válvulas de descarga. Cuanto más alta sea la temperatura a alcanzar en el condensador, mayor la temperatura de descarga. Dependiendo del lubricante usado, su resistencia térmica tiene un límite. En cualquier caso, la vida útil del lubricante se reduce cuanto mayor es la temperatura de descarga. En este trabajo se desarrollarán los conceptos a considerar en la selección del lubricante según las condiciones de trabajo, con refrigerantes naturales.

2.- INFLUENCIA DE LOS FLUIDOS A EMPLEAR: REFRIGERANTES NATURALES.

Estos refrigerantes no tienen problemas medioambientales, estando excluidos de regulaciones como la F-Gas y el Protocolo de Montreal. Sin embargo, cada uno tiene sus problemas peculiares, por lo que su aplicación en campo ha de hacerse con precaución y profesionalidad.

Tenemos los siguientes:

- R-717. Amoníaco. Tóxico e inflamable. Muy reactivo con algunos materiales.
- R-744. Dióxido de carbono. Muy bajo punto crítico, operación transcítica en muchas situaciones. Su alta presión de trabajo requiere una adecuada resistencia mecánica de la instalación frigorífica.
- R-718. Agua. Baja presión de vapor, requiere compresores de gran desplazamiento volumétrico.
- **Hidrocarburos (HCs):** R-290, R-600, R-600a, R-601, R-601a. Son altamente inflamables, por lo que habrá que tener las medidas adecuadas tanto en la instalación como en la operación de los equipos. En este trabajo nos referiremos a este grupo.

3.- LA QUÍMICA DEL REFRIGERANTE, SOLUBILIDAD, Y SU INFLUENCIA EN LA VISCOSIDAD DE TRABAJO DEL LUBRICANTE (LUBRICIDAD).

La propiedad más importante de un lubricante es su viscosidad, que puede ser definida como resistencia a fluir. Cuanto mayor sea su viscosidad, más gruesa la capa de lubricante que permanecerá en las superficies bañadas por él. Un lubricante seleccionado adecuadamente, mantendrá en todas las condiciones de trabajo una capa entre las partes móviles de un espesor mínimo suficiente para prevenir rozamientos y reducir la fricción.

Este lubricante debe tener suficiente estabilidad térmica y química para soportar las condiciones existentes dentro de un circuito frigorífico, y tendrá también siempre una cierta cantidad de gas refrigerante disuelto, dependiendo de la afinidad mutua (gas-lubricante), la temperatura y la presión.

Hay dos propiedades que condicionan la viscosidad final de trabajo dentro de un circuito frigorífico, y deben tenerse en consideración cuando se selecciona un par lubricante-refrigerante.

Solubilidad.

La solubilidad se refiere a la cantidad de gas disuelto dentro de un lubricante en unas condiciones específicas (temperatura (T) y presión (P)). Cuanto más gas esté disuelto en el lubricante, menor será la viscosidad final resultante.

- Afinidad Química. Sustancias de polaridad similar tienen una mayor afinidad, y por tanto una mayor solubilidad mutua. Los hidrocarburos son sustancias apolares, por lo que tendrán mayor afinidad por lubricantes basados en hidrocarburos, también apolares (Lubricante mineral, MO; Polialfaolefinas, PAO; Aquilbencenos, AB). La dilución del lubricante puede ser importante, la reducción de viscosidad igualmente importante, y aún más importante la cantidad de refrigerante secuestrado

permanentemente dentro del lubricante, sin participar en la capacidad frigorífica. Si hay una limitación de carga para ese tipo de circuito, este último punto es muy importante.

- Presión de trabajo: Cuanto mayor sea la presión, mayor cantidad de gas disuelto en el lubricante.
- Temperatura: En este caso, el efecto es opuesto al de la presión. Cuanto más alta sea la temperatura, menor dilución.

En la Tabla 1 podemos ver cómo estos parámetros afectan a la viscosidad final de trabajo en un lubricante diluido por refrigerante. Progiline RL WS 100 (PAG) es más polar que el Progiline RL WI 100 (también PAG). Cuando miramos a los cambios de presión y temperatura, en cada uno vemos cómo la solubilidad se reduce al aumentar la temperatura a presión constante. Y la solubilidad aumenta a presiones más altas, a temperatura constante.

Tabla 1: Efecto de la afinidad del lubricante, presión y temperatura, en la solubilidad y viscosidad final en atmósfera de propano.

P Bar a \ T °C	30	50	30	50	
	53.7	37.15	85	50	cSt
4.06	4.9	3.2	3	2.2	% gas en lub.
	12.3		35		cSt
8.36	15.8		10		% gas en lub.
	Progiline RL WI 100		Progiline LPG WS 100		

Miscibilidad.

Por miscibilidad entendemos la capacidad de dos líquidos para mezclarse permaneciendo en una sola fase líquida. Se llaman inmiscibles si aparecen dos fases líquidas. Es muy importante comprender el comportamiento del par lubricante-refrigerante usado cuando se diseña un circuito frigorífico.

En la miscibilidad influyen la naturaleza química de las sustancias implicadas, la temperatura, y la proporción relativa de cada una.

Los criterios de selección del lubricante dependen de las características del circuito (parámetros de funcionamiento), el tipo de compresor, y el refrigerante. Se puede seleccionar un lubricante miscible en un amplio rango de temperaturas, a fin de mejorar la circulación de aceite a través del circuito para tener buscando un adecuado retorno de aceite al compresor. Pero también se emplean lubricantes inmiscibles con el refrigerante, y la instalación se diseña expreso para trabajar así: Es el caso de amoníaco con lubricantes hidrocarburos: en estado líquido forman dos fases, donde la mayor densidad del lubricante facilita la recuperación desde el fondo de los depósitos (evaporador inundado, condensador, depósito de líquido).

4.- REFRIGERANTES HIDROCARBUROS (HC) Y SU PAPEL EN BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA (HTHP).

La gran afinidad de los refrigerantes HC con lubricantes también hidrocarburos (MO, PAO, AB) puede ser positiva para un buen retorno de aceite, pero la cantidad de gas disuelto en el lubricante puede reducir mucho la viscosidad resultante. Ese gas disuelto está secuestrado permanentemente del circuito, restando capacidad frigorífica, lo que puede comprometer las prestaciones si el circuito tiene un límite máximo de carga.

Mirando otros tipos de lubricantes, podríamos considerar los Poli-OI-Ésteres (POE), empleados comúnmente con otros tipos de refrigerantes (HFC), pero esto no soluciona el problema de la dilución del lubricante. La solubilidad de los HCs en lubricantes POE es incluso mayor que en los lubricantes hidrocarburos.

Compararemos aquí dos tipos de Poli-Alquil-Glicoles (PAG) con diferente grado de afinidad con los HCs. Esta química permite cierto grado de flexibilidad cuando se formula el lubricante, haciendo el polímero final insoluble en agua (WI, más cercano o afín a los HCs, pero menos que los lubricantes hidrocarburos) o soluble en agua (WS, menos afín con los HCs). La mayor polaridad de este último reduce la afinidad por los HCs a un nivel suficiente para operar con una menor dilución por el refrigerante, sin llegar a ser totalmente inmiscible.

Depósito o reservorio de aceite en el lado de baja presión del circuito.

Los compresores alternativos y scroll tienen el aceite en el sector de baja presión del circuito, el cárter, cuyas condiciones (Presión, Temperatura) definen la viscosidad de trabajo. El lubricante llega a las partes móviles por chapoteo o mediante una bomba de engrase que aspira del fondo del cárter. Dependiendo del modelo y fabricante, hay siempre una viscosidad mínima requerida que garantice la protección de las partes móviles.

Por razones operativas suele haber también una viscosidad máxima.

Tabla 2. Efecto del cambio de grado de viscosidad en lubricantes (SST: Temperatura Saturada de Aspiración).

Refrigerante: R-290			Zerol 150T/ISO VG 32		Zerol 350T/ISO VG 68		Zerol RFL-68EP	
SST (°C)	P sat Bar a	Cárter, °C	Viscosidad cSt	% gas en lub.	Viscosidad cSt	% gas en lub.	Viscosidad cSt	% gas en lub.
-25	2.03	30	19	4	30	4	62.3	2.3
-5	4.06	30	9	9	12	9	37	5.1
20	8.36	30	1.75	25	1.5	30	8.3	16.9
30	10.79	40	1.25	30	<1	>30	6	18.1
40	13.69	50	<1	>30	<1	>30	4.7	19

La Tabla 2 muestra cómo un lubricante que es útil en refrigeración resulta inadecuado conforme la temperatura de evaporación aumenta. Un valor típico para la viscosidad mínima de trabajo en el cárter de un compresor alternativo es entre 12 y 15 cSt (centiStokes), dependiendo del modelo y marca de compresor. Usaremos este mínimo como ejemplo. Los dos primeros lubricantes de la Tabla 2 son Alquibencenos (AB), ISO VG (Grado ISO de Viscosidad) 32 y 68. A bajas temperaturas de evaporación el VG32 es suficiente. Cuando aumentamos dicha temperatura y por tanto, también la presión en el cárter, se disuelve más gas en el lubricante. En el VG32 la cantidad de gas disuelto se dobla. Para -5 °C SST necesitamos incrementar la viscosidad nominal a 68 porque la viscosidad de trabajo ha descendido por debajo del mínimo imprescindible.

Considerando aplicaciones de HP, estos lubricantes no podemos emplearlos aquí. El efecto de la presión en la dilución puede verse claramente en la tabla. Además, debe mantenerse una temperatura de cárter superior al menos en 10 °C a la de saturación, a fin de evitar condensación de refrigerante. Cuanto más alta sea la temperatura de cárter, junto con una mayor dilución por la presión también más alta, nos lleva a una viscosidad de trabajo por debajo del mínimo.

Un cambio en la química empleada en el lubricante, seleccionando uno con algo de polaridad, mejorará la viscosidad en el cárter.

El tercer lubricante de la tabla 2 es un WI PAG, insoluble en agua. Algo polar y todavía insoluble en agua, es menos miscible con el propano que el AB. La dilución es aproximadamente la mitad. Lo cual, combinado con un índice de viscosidad mayor¹, nos da valores superiores de viscosidad disponible en el cárter, pero aún insuficientes para aplicaciones de bomba de calor (valores SST positivos).

Si además de cambiar la química del lubricante, aumentamos el grado de viscosidad, es posible llegar a valores que nos permitan operar el compresor en condiciones de bomba de calor.

Tabla 3. Efecto combinado de una química diferente y un mayor grado de viscosidad en el lubricante.

Refrigerante: R-290			Zerol RFL-68EP		Progiline RL WI 100		Progiline LPG-WS 100	
SST (°C)	P sat Bar a	Cárter, °C	Viscosidad cSt	% gas en lub.	Viscosidad cSt	% gas en lub.	Viscosidad cSt	% gas en lub.
-25	2.03	30	62.3	2.3	88.0	2.3	115	1.25
-5	4.06	30	37	5.1	53.7	4.9	85	3
20	8.36	30	8.3	16.9	12.3	15.8	35	10
30	10.79	40	6	18.1	8.6	16.9	25	11
40	13.69	50	4.7	19	6.4	17.8	16	12

Todos los lubricantes en la Tabla 3 son PAG. Los dos primeros son tipo WI con diferente grado de viscosidad. El incremento de grado resulta en una viscosidad en el límite de aplicación para RL WI 100 a 20 °C SST, pero aplicable comparada con el lubricante ISO VG68. Se ha obtenido alguna ventaja con la misma dilución, pero aumentando la viscosidad nominal. Esto no es una solución definitiva: Si nuestra HP necesita trabajar con una fuente de calor de mayor temperatura, estamos de nuevo por debajo del límite admisible de viscosidad. ¿Aumentamos de nuevo el grado del lubricante?

El tercer lubricante en la tabla es un PAG tipo WS (soluble en agua). La solubilidad máxima para refrigerantes HC en este lubricante está entre el 12 y el 17%, dependiendo del grado y el refrigerante. Reducimos la afinidad un paso más, sin llegar a ser totalmente inmisible.

La dilución ahora es mucho más baja comparada con los lubricantes anteriores, e incluso a 40 °C SST con 50 °C en el cárter la viscosidad disponible es superior al mínimo imprescindible.

¹ El Índice de Viscosidad (VI) es un parámetro que mide cuánto cae la viscosidad con la temperatura. Cuanto mayor sea el VI, menor reducción de la viscosidad al aumentar la temperatura.

Depósito de lubricante en el lado de alta presión del circuito.

En las instalaciones equipadas con compresores de tornillo, el depósito de aceite está en el lado de alta del circuito. Hay muchas configuraciones posibles: con o sin separador externo de aceite, enfriador de aceite, depósito colector, todo incluido dentro del propio compresor... Usaremos como ejemplo un circuito con separador externo y enfriador de aceite antes de inyectar el lubricante de nuevo en aspiración.

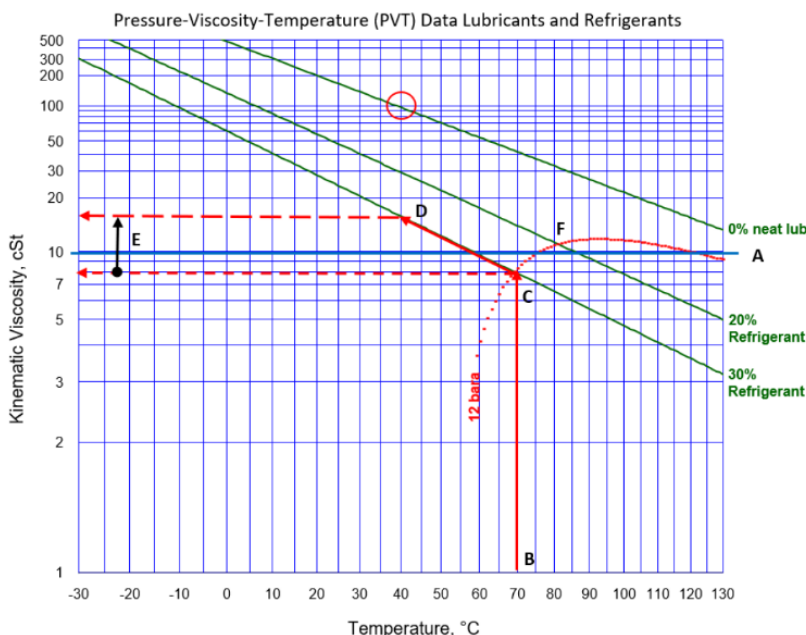


Figura 1. Ejemplo de manipulación de la viscosidad del lubricante operando con un compresor de tornillo [2].

La Figura 1 ayudará a comprender el proceso seguido por la mezcla aceite + refrigerante. La dilución del aceite queda fijada por las condiciones del separador (punto C en la figura). Una vez fuera del separador y en el enfriador de aceite, al no haber gas para aumentar la dilución, el lubricante con el gas ya disuelto se enfría a **composición constante**, siguiendo la línea C-D. Una vez enfriado el lubricante se inyecta en el lado de aspiración del compresor con una viscosidad mayor, la del punto D.

Si se aísla el separador para mantenerlo más caliente, o se aumenta la temperatura de descarga 10 °C (por ejemplo), el punto de descarga es F, tras seguir 10 °C más por la isóbara de descarga. Encontramos entonces que la dilución se ha reducido un 10% más, y es aquí donde empieza ahora la refrigeración del aceite a composición constante. Si bajamos 30 °C su temperatura, como en el caso anterior, la viscosidad en la inyección será más alta que en el punto D.

Los principios que regían el comportamiento lubricante-refrigerante, ya tratados en el capítulo de los compresores alternativos (afinidad mutua, viscosidad real de trabajo...) siguen siendo válidos aquí. Compararemos las prestaciones de dos tipos diferentes de PAG. Los ciclos frigoríficos considerados están descritos en la Tabla 4, de aplicación en bombas de calor para obtención de ACS.

Tabla 4. Ciclo de trabajo para una bomba de calor y refrigerantes seleccionados. (SST: Temperatura Saturada de Aspiración. SSP: Presión Saturada de Aspiración SH: Recalentamiento. DT: Temperatura de Descarga. SCT: Temperatura Saturada de Condensación. SCP: Presión Saturada de Condensación).

Refrigerante	SST (°C)	SSP (Bar a)	SH (K)	DT (°C)	SCT (°C)	SCP (Bar a)
R-290	-10	3.45	20	120	85	34.36
R-600	-10	0.70	20	100	85	11.26

Tabla 5. R-290 y R-600 en compresor de tornillo. Condición del lubricante.

Lubricante	Descarga: 34.36 Bar a/ 120 °C			Descarga: 11.26 Bar a/ 100 °C		
	R-290 - Descarga (34.36 Bar a/ 120 °C)		Enfriado a 50 °C Viscosidad cSt	R-600 - Descarga (11.26 Bar a/ 100 °C)		Enfriado a 50 °C Viscosidad cSt
	Viscosidad cSt	Dilución (% gas en lub.)		Viscosidad cSt	Dilución (% gas en lub.)	
Zerol RFL-68EP	2.7	12.5	8	2.65	20	<6
Zerol RFL-150X	5.5	12	20			
Progiline LPG-WS 100	5.5	9.5	20	6.24	12.2	18

En la Tabla 5 hay un resumen de prestaciones de varios lubricantes e hidrocarburos en los ciclos descritos en Tabla 4. En general, un compresor de tornillo necesita una viscosidad de trabajo de 10 a 15 cSt, muy dependiente del modelo, marca y condiciones de trabajo. Usaremos estos valores en los ejemplos para comparar prestaciones de lubricantes.

Cuando se intenta emplear Zerol RFL-68EP, encontramos que las condiciones de trabajo lo hacen inadecuado en esta aplicación. Podemos entonces mirar a un mayor grado de viscosidad en la misma serie, y vemos que el RFL-150X proporciona una viscosidad en la inyección de 20 cSt, adecuada para las necesidades de este compresor. Los dos lubricantes tienen el mismo nivel de dilución.

El tercer lubricante de la tabla es un WS PAG, que entrega también 20 cSt en la inyección, pero en este caso estamos considerando un grado ISO VG 100 en vez de los 150 del anterior. La dilución también es un 20% menor que el precedente, lo que significa un 20% menos de refrigerante “secuestrado”.

Cuando consideramos el R-600 (Tabla 5), notamos la mayor solubilidad de este refrigerante comparado con el R-290. La dilución es mayor a presiones mucho más bajas. Una vez más, reduciendo la afinidad del lubricante por el refrigerante, no necesitamos incrementar mucho el grado de viscosidad para tener unos valores de trabajo adecuados.

El efecto de la alta solubilidad del refrigerante ha sido minimizado manipulando la química del lubricante para reducir la afinidad mutua, pero sin llegar al punto de ser totalmente inmiscible ni forzar el rediseño del circuito o sus parámetros de operación.

5.- CONCLUSIONES.

La necesidad creciente de bombas de calor hoy día ha llevado a la industria frigorífica a territorios desconocidos: temperaturas y presiones nunca alcanzadas anteriormente, y equipos trabajando fuera de los límites habituales.

Aunque los compresores y refrigerantes puedan trabajar en esas exigentes condiciones, el Talón de Aquiles del compresor es la resistencia térmica y química del lubricante, siempre que sea capaz, en esas condiciones extremas, de mantener la viscosidad apropiada para proteger las partes móviles y mantener la separación entre los circuitos de alta y baja presión.

Comprendiendo la interacción lubricante-refrigerante, documentándola adecuadamente con diagramas PVT (Presión – Viscosidad -Temperatura), podremos afrontar muchos de los requerimientos necesarios para reutilizar la gran cantidad de calor residual, o calor de baja calidad, que hasta ayer se perdía.

Los procedimientos descritos en este trabajo ayudarán a los técnicos frigoríficos a enfrentar los desafíos que se nos planteen, encontrando soluciones técnicamente avanzadas para poner las bombas de calor a trabajar aprovechando todas las oportunidades.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Seeton, CJ, Karnaz, J, 2016. Thermodynamic and Transport Properties of Lubricant and Refrigerant Mixtures. Oil Management in Compressors and Their Systems. Purdue University Short Course. July 10th, 2016.
- [2] J. Karnaz, 2021. Lubricant Options for Screw Compressors Using Alternative Refrigerants. 12th International Conference on Compressors and their Systems 2021. Industry Talks 2 – Materials and Lubrication.
- [3] M. Muñoz-Alonso, L. Dixon, C.J. Seeton, J. Karnaz. The role of miscible PAG lubricants in ammonia refrigeration systems reduction and compactness. 9th IIR Conference: Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies, Ohrid, 2021.
- [4] Seeton, C.J. Viscosity-temperature correlation for liquids. Tribology Letters, 2006, 22(1), 67-78.
- [5] J. Karnaz, M. Muñoz-Alonso. Expanding Lubricant Options for Natural Refrigerants – What are the Limitations?. 15th IIR-Gustav Lorentzen conference on Natural Refrigerants. June 13-15 2022. Trondheim, Norway