

# LUBRICACIÓN DE RODAMIENTO EN BOMBAS DE CIRCULACIÓN DE AGUA DE MAR

**Amauris Gilbert–Hernández**

**Danilo Campos –Duffús**

**Enrique Torres – Tamayo**

## **Resumen**

En el trabajo se realizó una evaluación del método de lubricación adecuado en rodamientos, considerando las particularidades funcionales para un mayor aprovechamiento y eficiencia del lubricante a emplear, así como su correcta selección, para lo cual se trabajó sobre la base de un procedimiento sustentado en métodos gráficos y analíticos, permitiendo establecer el factor de velocidad cuyo resultado recomienda el empleo de aceites en la lubricación del rodamiento axial de rodillos a rótula de la bomba de circulación de agua de mar. La viscosidad mínima necesaria de aproximadamente  $16 \text{ mm}^2/\text{s}$  (16 cSt), dió paso a que se pudiera determinar con el auxilio de los métodos antes mencionados la viscosidad de operación en régimen hidrodinámico del lubricante en el rodamiento, la cual según resultados del análisis debe ser de  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  (68 cSt) a una temperatura de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  normalizado según la clase ISO VG para lubricantes industriales, siendo la cantidad de lubricante a emplear de 16 litros con un período de cambio dentro del rango de los 10 a 12 meses.

**Palabras claves:** lubricación, rodamiento, viscosidad.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Uno de los requisitos más importantes para que las disposiciones de rodamientos cumplan eficazmente su misión es una lubricación correcta. El lubricante separa las superficies metálicas y con ello reduce el rozamiento, conserva las piezas de acero y actúa como una barrera adicional contra la entrada de contaminaciones o impurezas en los rodamientos.

Por cada una de estas razones, la lubricación cumple una función clave en cada aplicación de rodamientos. Un funcionamiento defectuoso de la lubricación provoca habitualmente una avería inmediata de los rodamientos (BDC, 2010).

El lubricante en una disposición de rodamientos, pierde gradualmente sus propiedades de lubricación a causa del trabajo mecánico, el envejecimiento y la acumulación de contaminación. Por tanto, es necesario reponer o renovar la grasa y filtrar y cambiar el aceite a intervalos regulares (FAG, 2003).

De acuerdo con los criterios de varios autores la lubricación más eficiente, es la hidrodinámica. Alcanzada cuando las dos superficies móviles estén completamente separadas por una película de lubricante. Solo que el espesor de la película de aceite depende principalmente de la viscosidad del lubricante, una medida de su espesor o la resistencia a fluir.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Métodos de lubricación**

Tres son los métodos de lubricación que se usan normalmente:

#### **Lubricación con grasa**

Las grasas lubricantes están principalmente compuestas por un aceite base, un espesante y agentes activantes, denominados aditivos. La inmensa mayoría de los rodamientos se lubrican con grasa, alrededor del 90 %.

Las principales ventajas de la lubricación con grasa son: Aplicación muy sencilla, exige menos mantenimiento, efecto adicional de obturación, rodamiento pre engrasado obturado o protegido ,obturación sencilla de las posiciones de rodamiento, gran número de diferentes lubricantes disponibles, posibilidad de engrasar perpetuamente disposiciones de rodamiento.

## **Lubricación con aceite**

La lubricación con aceite se usa generalmente cuando se dispone normalmente de aceite dentro de la maquina respectiva, o en los casos en que son de aplicación condiciones especiales de funcionamiento

Las principales ventajas de la lubricación con aceite son: Mayor estabilidad, menor coeficiente de fricción interna, mayor capacidad de trabajo para altas velocidades y temperaturas, mayor acción de enfriamiento, mayores facilidades en su cambio, posibilidad de regeneración.

## **Lubricación con sólidos y en secos**

En los casos en los que, por diversos motivos, las aplicaciones no permiten el uso de la lubricación con grasa o con aceite, hay otros materiales, incluido algunos metales, que son adecuados para separar las superficies de rozamiento (NKE, 2010).

### **2.2. Selección del método de lubricación**

La decisión de seleccionar el método de lubricación más adecuado que vaya a utilizarse para cada aplicación debe tomarse en la temprana etapa del diseño, ya que ello tiene influencia sobre el diseño de las piezas adyacentes.

El método de lubricación que vaya a utilizarse para una aplicación en especial siempre depende de las condiciones particulares de funcionamiento, incluidas las velocidades de funcionamiento previstas, el rango de la temperatura y el entorno. La capacidad de velocidad de un rodamiento y la capacidad de la lubricación utilizada para alcanzar velocidades específicas resultan importantes.

El denominado factor de velocidad proporciona una ecuación importante para evaluar la capacidad de un lubricante o de un cierto método de lubricación.

$$Fv = n \cdot dm \quad (1)$$

Siendo:

$$dm = \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

Dónde:

$Fv$ : Factor de velocidad; [mm/min].

$n$ : Velocidad de funcionamiento del rodamiento; [ $\text{min}^{-1}$ ].

$dm$ : Diámetro medio del rodamiento; [mm].

$D$ : Diámetro exterior del rodamiento; [mm].

$d$ : Diámetro del agujero del rodamiento; [mm].

**Tabla 1.** Valores típicos de factor de velocidad

Métodos de lubricación	Fv
<b>Lubricación con grasa:</b>	
Grasas estándar para rodamientos	$\leq 500\ 000$
Grasas especiales	$\leq 1\ 000\ 000$
<b>Lubricación con aceite:</b>	
Lubricación por baño de aceite	$\leq 500\ 000$
Lubricación por circulación de aceite	$\leq 750\ 000$
Lubricación por salpicadura de aceite	$\leq 800\ 000$
Lubricación por neblina de aceite	$\leq 1\ 500\ 000$
Lubricación por cantidad mínima (aire/aceite)	$\leq 3\ 000\ 000$

Para factores de velocidad mayores que 1 000 000, la experiencia práctica reviste también gran importancia. Pueden ser necesarios dispositivos especiales como refrigeradores de aceite, bombas adicionales o un sistema independiente de aire comprimido para la lubricación con aceite y aire (Saldaña, 1997).

### 2.3 Selección de la viscosidad del aceite lubricante

Gilbert (2013) plantea que la viscosidad de funcionamiento real de un lubricante viene determinada por los siguientes factores:

- Viscosidad nominal de lubricante
- Tamaño de rodamiento
- Velocidad de funcionamiento
- Temperatura de funcionamiento

Para las mayorías de las aplicaciones se precisa de la viscosidad de funcionamiento de un lubricante en condiciones de trabajo, el procedimiento que se describe a continuación facilita su determinación.

Son necesarios los siguientes pasos:

- 1) Cálculo del diámetro medio del rodamiento.
- 2) Cálculo de la viscosidad mínima requerida.
- 3) Determinación de la viscosidad del funcionamiento real

4) Creación de la relación necesaria entre viscosidad de funcionamiento requerida y actual.

La propiedad antifricción de los aceites lubricantes es muy importante y puede tener un impacto directo en la vida de los rodamientos. La viscosidad mínima requerida del aceite lubricante puede determinarse por dos métodos:

1. Método analítico
2. Método gráfico empleando carta SKF

### Método analítico

$$v_1 = \frac{4500}{\sqrt{Fv}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1000}{n}} \quad (3)$$

Donde:

$v_1$ : Viscosidad mínima necesaria o viscosidad relativa; [mm<sup>2</sup>/s].

### Método gráfico empleando carta SKF

La viscosidad mínima necesaria para asegurar una lubricación adecuada es función del diámetro medio del rodamiento, así como de la velocidad de rotación del árbol conectado. Luego de obtenida la viscosidad mínima necesaria que permita cumplir con la lubricación del rodamiento, se elige un aceite que cumpla dicha característica a la temperatura de funcionamiento.

En la tabla 2 se dan las clases de viscosidad ISO para los aceites lubricantes y los campos de viscosidad pertinente a 40 °C. Luego de haber seleccionado la viscosidad mediante la figura anterior y para los casos donde no existe un lubricante con la característica exacta, se torna imprescindible normalizar dicho valor mediante las clases ISO fijadas.

**Tabla 2.** Clase ISO de viscosidad

<b>Viscosidad cinemática a 40 °C</b>			
mm <sup>2</sup> / s	media	mínima	máxima
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5

**Tabla 2.** Clase ISO de viscosidad. Continuación

ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

## **2.4 Lubricación con aceite**

El requisito de diseño para disposiciones de rodamiento con lubricación por aceite es considerablemente superior al equivalente con grasa.

Para la lubricación se usan generalmente aceites minerales con o sin aditivos, los aceites sintéticos se usan normalmente para aplicaciones especiales. La determinación de la viscosidad necesaria del aceite para la lubricación de un rodamiento, debe completarse siguiendo los procedimientos establecidos por los fabricantes.

## **2.5 Métodos de lubricación con aceite**

Dependiendo de los requisitos de cada aplicación, pueden utilizarse los siguientes métodos de lubricación por aceite.

### **Lubricación por baño de aceite**

Esta es la forma más sencilla. Este método se utiliza habitualmente en los casos en que los aceites lubrican otros componentes de la máquina. Con la lubricación por baño de aceite no es necesario equipo adicional alguno como bombas.

Cuando el rodamiento gira el aceite es transportado tanto a la jaula como por los elementos rodantes y es distribuido por una fuerza centrífuga a todas las zonas del rodamiento que haya que lubricar.

Por otra parte, el constante desplazamiento de aceite por parte del rodamiento provoca rozamiento adicional y de esta forma genera calor. Por ello el nivel máximo de aceite en los casos en que la velocidad supera el 40 % del valor nominal

indicado, no debe ser superior a aproximadamente la mitad del diámetro del elemento rodante más bajo.

### **Lubricación por circulación de aceite**

Con este método el aceite necesario para lubricar los rodamientos se recoge en un colector de lubricante, desde este colector de lubricante el aceite es enviado por bombas y tuberías a las diferentes posiciones de rodamientos.

Este método es muy eficaz cuando la evacuación de calor es necesaria. Tanto el volumen del aceite como el del colector de lubricante deben ajustarse a los requisitos de la evacuación de calor. Si fuera necesario pueden integrarse refrigeradores adicionales en el circuito del aceite.

En cada caso el tamaño del colector de aceite debe de ser suficientemente grande para permitir que las partículas de desgaste presentes en el aceite lubricante se asienten. Antes de que el aceite vuelva por el sistema de lubricación debe ser filtrado para evitar la entrada de cualquier contaminante en los rodamientos.

### **Lubricación por salpicadura de aceite**

Con este método la rociada o salpicadura de aceite procedente de los elementos giratorios inmersos en el aceite se utiliza para la lubricación de los rodamientos.

Para algunas aplicaciones sencillas se utilizan anillos salpicadores que giran sueltos sobre el eje, creando una distribución de aceite sobre los rodamientos dentro de la carcasa. En los casos en que sea necesario, deben incluirse características auxiliares dígase ranuras, conductos y orificios de aceite para garantizar volúmenes satisfactorios. La lubricación eficaz de los rodamientos debe garantizarse en todas las condiciones de funcionamiento.

### **Lubricación por inyección de aceite**

Este método de lubricación resulta adecuado para rodamientos que funcionen a altas velocidades. El método de inyección de aceite proporciona un chorro que, a través de la boquilla, va directamente a los intersticios existentes entre los resaltos del aro exterior, la jaula y el aro interior. La presión del chorro de aceite no obstante, debe ser suficientemente fuerte para penetrar en la turbulencia de aire causada por el rodamiento que gira velozmente. En el caso de los rodamientos mayores, pueden colocarse boquillas adicionales alrededor de la circunferencia del rodamiento.

Debido a los volúmenes relativamente grandes de aceite en circulación, todos los orificios para aceite y tuberías de alimentación deben tener el tamaño correcto.

Debido al preciso sistema de lubricación y a los grandes volúmenes de aceite que circulan, este método normalmente obtiene un excelente rendimiento de funcionamiento y un excelente enfriamiento y control de la temperatura.

### **Lubricación por neblina de aceite**

Este método resulta también adecuado para rodamientos que funcionan a velocidades altas y muy altas pero se necesita un sistema de aire comprimido.

Con la lubricación por neblina el aceite lubricante es vaporizado en diminutas gotas por un atomizador. Luego la mezcla de aire y aceite se introduce en la posición del rodamiento donde el flujo ininterrumpido lubrica y enfría el rodamiento (NKE, 2010).

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Análisis del método de lubricación**

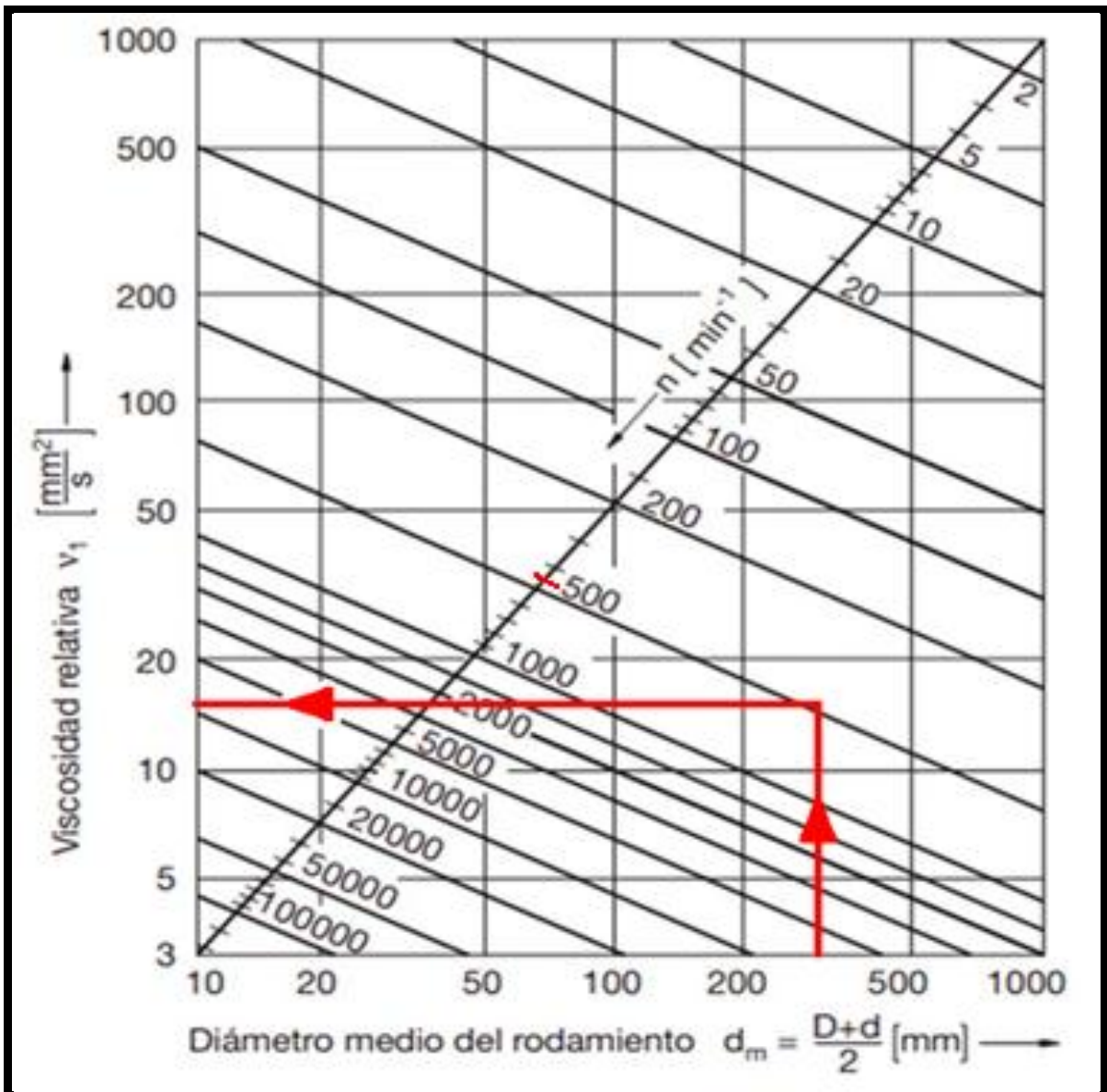
Empleando el procedimiento propuesto anteriormente para la lubricación de rodamientos y aplicado al cojinete de contacto rodante de la bomba de circulación (1VC11) de agua de mar, de la empresa termoeléctrica de Felton; se determinó que el factor de velocidad arroja valor de 142 400 mm/min por lo que se recomienda que se empleen aceites, si se pretende utilizar lubricación líquida.

Para utilizar como método de lubricación aceites, los valores de factor de velocidad proporcionan índices donde debe aplicarse el método de inmersión, en el cual el aceite debe mantenerse a la mitad del elemento rodante como forma de contrarrestar la espuma que se forma al interactuar con la jaula, ya que a su vez esta provoca el aumento acelerado de la temperatura.

### **3.2. Análisis de la viscosidad del aceite lubricante**

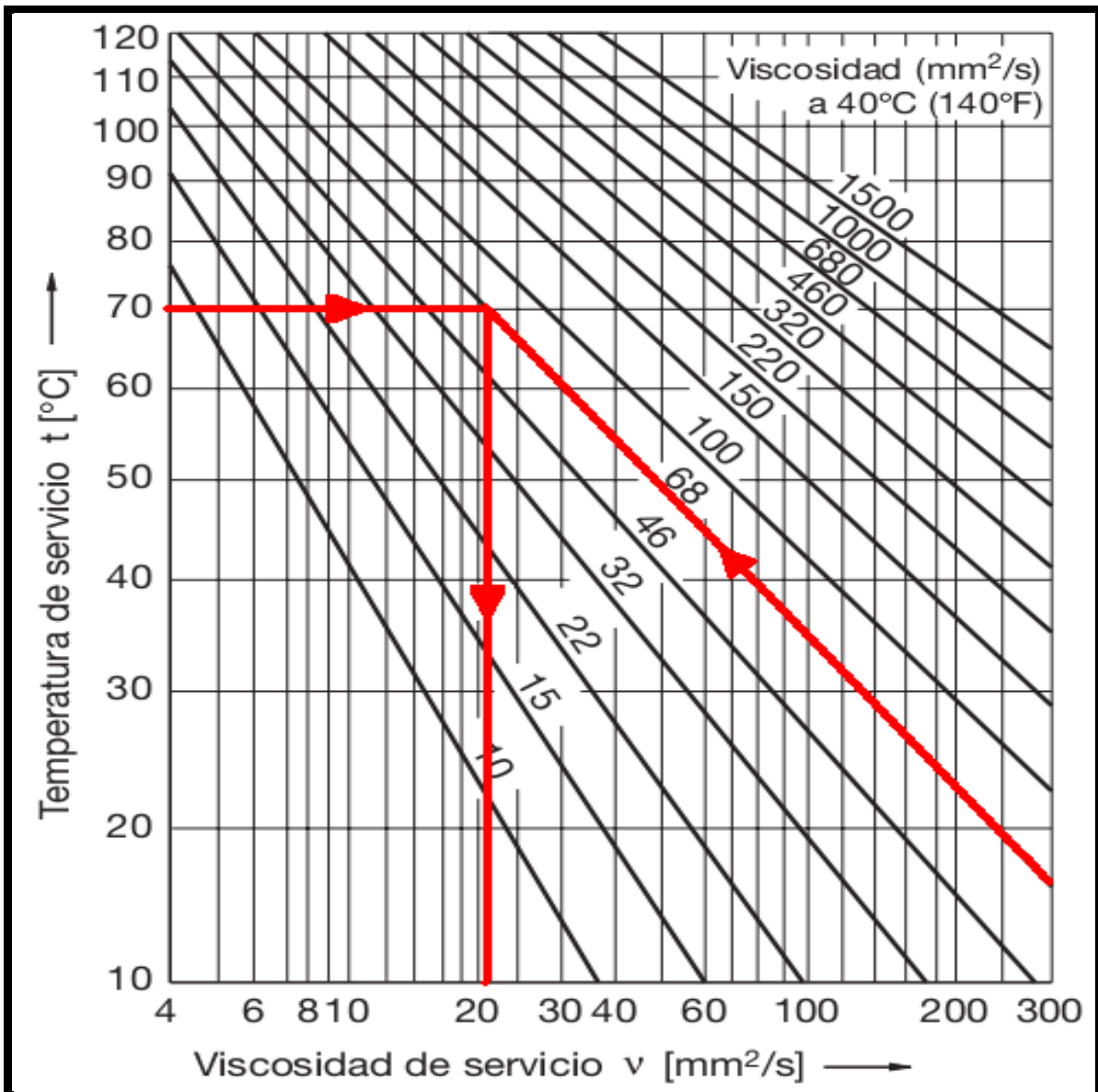
De la práctica se ha demostrado que siempre que exista una película lubricante que separe las impurezas en la zona de contacto entre cuerpo rodante y camino de rodadura del rodamiento, su duración será considerablemente más larga que la obtenida sin una lubricación eficiente.





**Figura 1.** Viscosidad relativa para rodamiento

Para determinar la viscosidad relativa del aceite necesaria para la lubricación de la bomba de circulación se calculó el diámetro medio del rodamiento, siendo en este caso 0,32 m lo cual en conjunto con una velocidad de rotación de  $445 \text{ min}^{-1}$  permitió emplear los métodos existentes. Al aplicar el método gráfico (figura 1) y analítico (ecuación 3) ambos coincidieron reflejando que la viscosidad mínima necesaria para la lubricación del rodamiento es de aproximadamente  $16 \text{ mm}^2/\text{s}$  (16 cSt).



**Figura 2.** Viscosidad nominal para rodamiento de bomba de circulación

Luego de fijada la viscosidad relativa y para temperatura de operación de 70 °C, se determinó empleando la figura 2 la viscosidad de operación del aceite a aplicar para la lubricación del rodamiento axial de rodillos a rótula de la bomba de circulación de agua de mar, arrojando un valor de 59 mm<sup>2</sup>/s; dicho resultado no se corresponde con ninguna de las clases ISO VG de aceites industriales por lo que se normalizó, quedando como viscosidad de operación 68 mm<sup>2</sup>/s, motivo por el que debe seleccionarse un aceite que cumpla esta condición a la temperatura de 40 °C.

Como se observa en la figura 2 un aceite de clase ISO VG de 68 mm<sup>2</sup>/s disminuye su viscosidad hasta los 21 mm<sup>2</sup>/s con un aumento de la temperatura de 70 °C, por lo que la relación entre viscosidades de servicio y relativa arrojó resultados de 1,3; reflejando que no es necesario el empleo de aditivos de extrema presión (EP) por lo

que el lubricante es capaz de soportar sin grandes dificultades la carga a la que está expuesta el rodamiento.

### 3.3. Lubricación por inmersión

Bajo condiciones normales es recomendable atenerse a los periodos de cambio del aceite, tal como se indican en el diagrama de la figura 3, condición previa es que la temperatura del rodamiento no sobrepase los 70 °C y que el grado de suciedad debido a cuerpos extraños y agua sea pequeño.

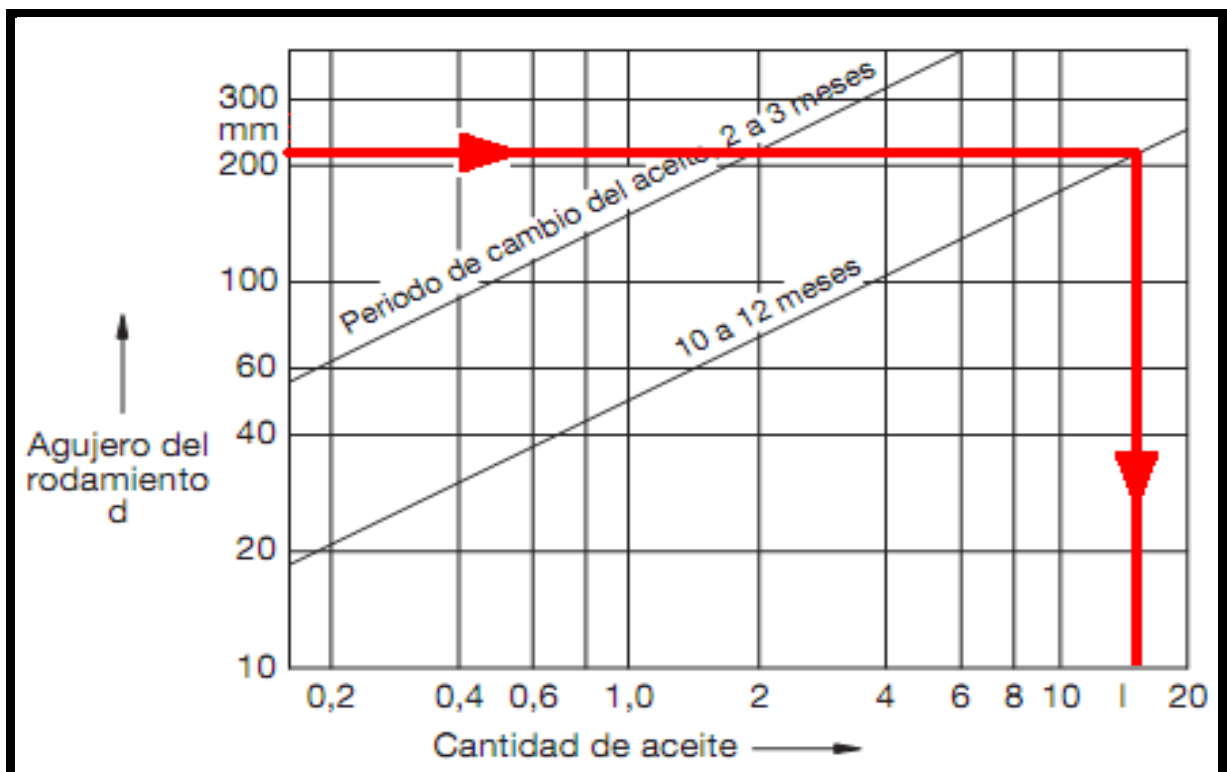


Figura 3. Cantidad de aceite y periodo de cambios

Como puede verse del diagrama, los soportes con pequeñas cantidades de aceite exigen cambios frecuentes, por lo que para lubricar el rodamiento se tomó el periodo más prolongado, dígame entre 10 y 12 meses lo cual refleja que es necesario para la lubricación una cantidad aproximada de aceite de 16 litros, la misma se asemeja con las recomendaciones dadas por el fabricante de emplear 15 litros, siendo posible debido al volumen del dispositivo de almacenamiento del equipo.

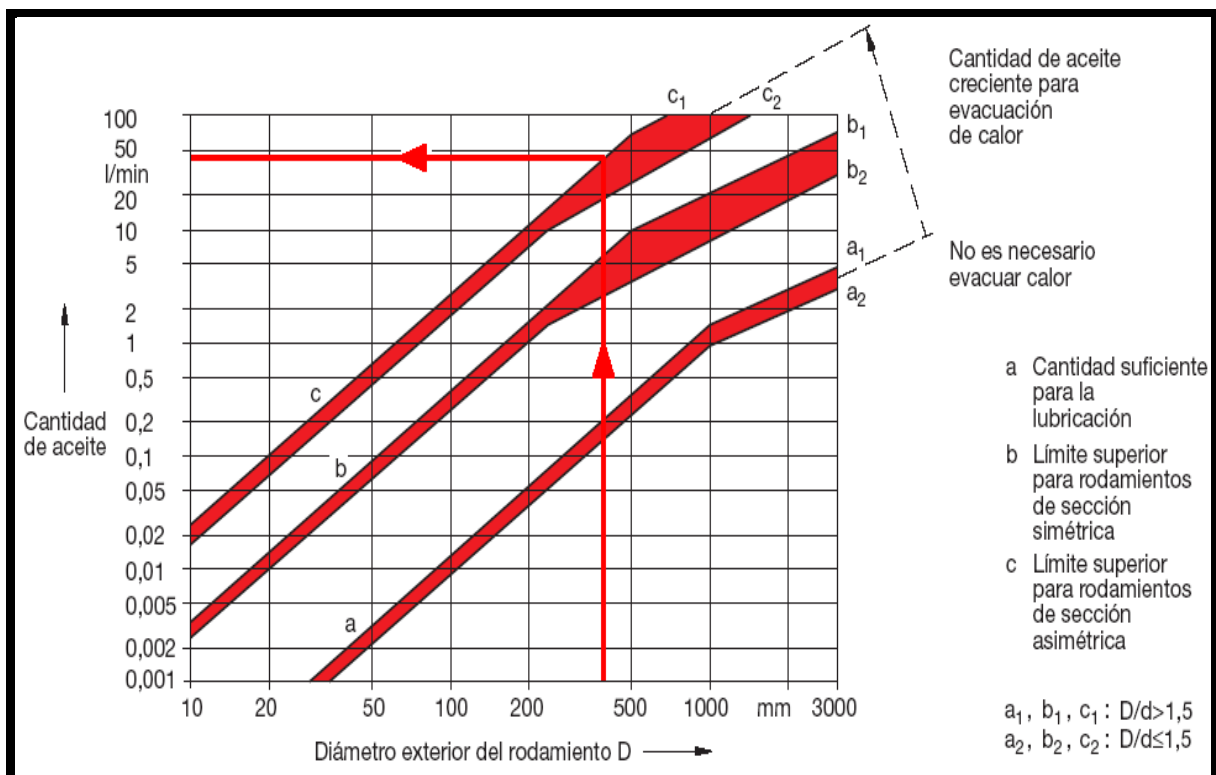
### 3.4. Lubricación por circulación

Aunque las características de velocidad del rodamiento muestra que es posible solucionar los problemas de lubricación mediante el método de inmersión, en el bloque han existido en varias ocasiones señales de alarma y disparo por exceso de

temperatura, por lo que se determinó las particulares que se deben cumplir para la lubricación del rodamiento empleando el método de circulación, lo cual constituye una propuesta de mejora para el equipo.

En la lubricación por circulación de la bomba, el aceite después de pasar a través del rodamiento se lleva a un depósito colector para abastecer nuevamente el rodamiento desde allí, es indispensable prever un filtro para eliminar las partículas de suciedad y desgaste.

Para determinar la cantidad de aceite en circulación para la lubricación del rodamiento fue preciso determinar la relación existente entre los diámetros exterior e interior, siendo en este caso de 1,9 y mostrándose superior a la condición fijada por FAG de 1,5 para la lubricación de rodamientos de sección asimétrica cuando es necesaria la evacuación del calor, por lo que se trabaja en la franja de lubricación C en su límite superior.



**Figura 4.** Cantidades de aceite en la lubricación por circulación

Para la lubricación del rodamiento de la bomba es necesaria una cantidad de aceite pequeña, las cantidades indicadas en el diagrama de la figura 4 son en comparación, relativamente grandes. Estas cantidades de aceite se recomiendan para asegurar que incluso en el caso de una alimentación desfavorable, todas las superficies de contacto queden abastecidas con aceite.

La cantidad de aceite para la lubricar por el método de circulación, conocido el diámetro exterior (0,420 m) y, destacando que el rodamiento es de sección asimétrica. Empleando el diagrama de la figura 4 se determinó que es necesario un flujo de aceite circulante de 43 litros por minutos para una buena lubricación.

### 3.5. Análisis de las mediciones

Al medir la temperatura de servicio tomada del aro no rotante se alcanzaron valores que se mueven en un rango de los 50 a 70 °C, en reiteradas ocasiones el equipo ha dado señales de alarma por altas temperaturas ya que el sistema se encuentra automatizado, siendo esta última la máxima temperatura admisible para los aceites minerales sin que exista una acelerada degradación. El cálculo para la selección de la viscosidad se realizó con esta temperatura, aunque se comprobaron las viscosidades necesarias para otras temperaturas de operación (tabla 3).

**Tabla 3.** Rango de operación del aceite

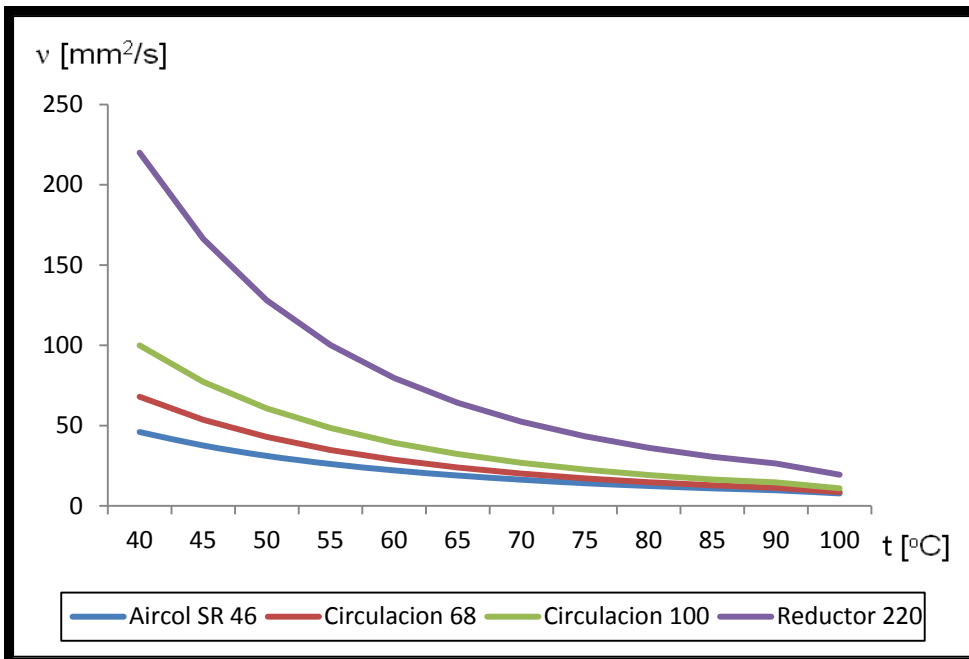
No	Temperatura de servicio	Viscosidad de servicio	Viscosidad normalizada
1	50	24	32
2	55	28	32
3	60	38	46
4	65	44	46
5	70	59	68

Para los aceites disponibles en la empresa se realizó a escala de laboratorio mediciones de viscosidades desde los 40 a los 100 °C espaciadas a 5 grados, en la tabla 4 se exponen los resultados.

**Tabla 4.** Evaluación experimental de aceites

Temperatura	Aceites industriales			
	Aircol SR 46	Circulación 68	Circulación 100	Reductor 220
40	46	68	100	220
45	37,6	53,6	77,2	166,3
50	31,1	42,9	60,7	128
55	26,1	34,8	48,5	100,2
60	22,1	28,7	39,3	79,6
65	18,9	23,9	32,3	64,2
70	15,3	20,1	26,8	52,4
75	14,1	17,1	22,6	43,3
80	12,4	14,7	19,2	36,2
85	10,9	12,8	16,4	30,6
90	9,7	11,2	14,6	26,4
100	7,75	8,68	10,91	19,39

Al aumentar la temperatura se observó que los valores de la viscosidad disminuyeron (figura 5), comportamiento análogo a los resultados obtenidos por la mayoría de los autores, los cuales expresan que los aceites se comportan de manera pseudoplástica.



**Figura 5.** Comportamiento de los aceites evaluados

Para lograr una lubricación hidrodinámica en el rodamiento quedó demostrado que es necesario un aceite industrial con una viscosidad de 68 mm<sup>2</sup>/s, que pueda permanecer por encima de los 16 mm<sup>2</sup>/s al aumentar la temperatura hasta los 70 °C. El aceite Circulación 68, cumple con estas propiedades y se recomienda para lograr una adecuada lubricación en el rodamiento.

Realizando el ajuste del comportamiento de la viscosidad ( $\nu$ ) de este aceite a la ley exponencial, se obtuvo la correlación en función de la temperatura con un coeficiente de correlación múltiple de 0,99. El grado de adecuación del modelo con los datos experimentales se confirma, por lo que la dispersión entre los resultados no es significativa. El resultado obtenido (ecuación 4) permitió establecer el comportamiento de la viscosidad del aceite, a partir de las variaciones de la temperatura.

$$\nu = 74,11 \cdot e^{-0,17 \cdot t} \quad (4)$$

#### **4. CONCLUSIONES**

Según los procedimientos establecidos por las corporaciones líderes; la lubricación de rodamientos independientemente del método de lubricación empleado, es función de las características de operación, así como de las particularidades físicas del rodamiento.

El factor de velocidad arroja valores que se corresponden con los establecidos para la lubricación de rodamientos mediante el método de inmersión, más como se genera cierto calor que no es posible evacuar eficazmente mediante este método, es conveniente que se emplee circulación, donde el flujo de aceite circulante debe ser de aproximadamente 43 litros por minuto.

La duración de la vida útil del rodamiento y la seguridad contra el desgaste es más elevada, cuanto mejor estén separadas las superficies de contacto por una película lubricante suficientemente gruesa. Quedando demostrado que la viscosidad mínima necesaria de aceite para lograr la lubricación hidrodinámica en el rodamiento de la bomba de circulación es de  $16 \text{ mm}^2/\text{s}$ , lo cual se alcanza con un aceite mineral clase ISO VG de  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

#### **5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**BDC International S.A. 2010.** *Seminario de rodamientos. Lubricación y montaje.* La Habana : s.n., 2010.

**FAG. 2003.** *LUBRICACION DE RODAMIENTOS.* Madrid : TECFA®GROUP, 2003.

**Gilbert Hernández, Amauris. 2013.** *Lubricación de cojinetes de rodamiento mediante el empleo de aceites y grasas lubricantes.* Moa : s.n., 2013.

**NKE. 2010.** *NKE BEARINGS. The refreshing alternative.* Austria : s.n., 2010.

**Saldaña, José Antonio. 1997.** *Grasas. Engrase de rodamientos.* Barcelona : s.n., 1997.

**Amauris Gilbert Hernández**  
Ingeniero Mecánico. Profesor Instructor.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

[aghernandez@ismm.edu.cu](mailto:aghernandez@ismm.edu.cu)

**Danilo Campos Duffús**  
Ingeniero Mecánico. Profesor Instructor.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

[dcduffus@ismm.edu.cu](mailto:dcduffus@ismm.edu.cu)

**Enrique Torres Tamayo**  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.  
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba

[etorrest@ismm.edu.cu](mailto:etorrest@ismm.edu.cu)