

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Tesis presentada en opción al título de

Ingeniero mecánico

**PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE
ACEITES EN RODAMIENTOS POR EL MÉTODO DE
CIRCULACIÓN**

Autor: Rolando Mario Cobas García

Tutores: Prof. Asist., Ing. Amauris Gilbert Hernández, Ms.C.

Prof. Aux., Lic. Rolando Cobas Abad, Ms.C.

MOA, 2017

Pensamiento

Niégate a suponer y pensar que eres menos de lo que realmente eres o que no puedes lograr grandes objetivos. Muchos logros meritorios y grandes hechos históricos fueron conseguidos por personas comunes y corrientes que se esforzaron, que tenían confianza, que activaron y potenciaron su capacidad creativa, que eran conscientes de todo el potencial que tenían en su interior, perseveraron y lo lograron.

Henry Ford

AGRADECIMIENTOS

- ❖ **A Dios**, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.
- ❖ **A la Revolución Cubana y nuestro Comandante en Jefe** por darme la posibilidad de formarme como un profesional capaz y competente.
- ❖ **A mi madre** por darme la vida, quererme mucho, creer en mí, por siempre apoyarme y estar en los momentos buenos y malos de mi vida.
- ❖ **A mi padre** por educarme, enseñarme, prepararme para la vida. Brindarme todo su apoyo incondicional, incluso cuando la vida me mostraba su cara oscura, por además darme la posibilidad de creer en mí aun cuando las circunstancias me hacían dudar del triunfo.
- ❖ **A mi tutor**, su tiempo, paciencia, paciencia y comprensión, por ser además un buen amigo.
- ❖ **A mi primo querido**, Tony por guiarme y muchas veces educarme.
- ❖ **A mi grandísima y maravillosa familia.**
- ❖ **A los maestros** de todas mis enseñanzas, principalmente a esos que fueron profesores y maestros; Gervis, Betsy, Leidis, Olga, Oris, Amauris, y Arlenis.
- ❖ **A mis amigos** Lianet, Arley, Adolis, Barsaga, Eulay, Tere, Adrian, Keily, Yenia por ser más que amigos ser mis hermanos.
- ❖ **A mis vecinos de barrio, conocidos de viajes, Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.**

DEDICATORIA

❖ **A mi madre** por darme la vida, quererme mucho, creer en mí, por siempre apoyarme y estar en los momentos buenos y malos de mi vida.

❖ **A mi padre** por educarme, enseñarme, prepararme para la vida. Brindarme todo su apoyo incondicional, incluso cuando la vida me mostraba su cara oscura, por además darme la posibilidad de creer en mí aun cuando las circunstancias me hacían dudar del triunfo.

❖ **A mis hermanos** mi linda Nana y Riki por a pesar de la distancia siempre estar juntos.

❖ **A mi maravillosa novia** Gisselle, sus padres y hermana por aceptarme en su familia como uno más y darme su apoyo incondicional.

❖ **A mis abuelos maternos** por quererme como si fuera un hijo y dedicarme tanto tiempo de su vida. Por estar ahí para mis antojos y mis pedidos. Por ayudarme hacer una mejor persona de buenos sentimientos y conductas muy sanas.

❖ **A mis abuelos paternos** por su comprensión por su amor, por cuidarme de lo malo y enseñarme las buenas costumbres de sus épocas.

❖ **A mis tías preciosas** Lili, Maritaza, Margot, Mamín, Irene y Fella por amarme, quererme, darme felicidad cariño, comprensión. Por resolver mis problemas sin importar que tan grande fueran.

❖ **A todos mis tíos queridos** Wilian, Jorge, Luis, Raúl y Enrique por sus buenos consejos, sus fascinantes historias, cuentos, por estar ahí en mis momentos de desesperos y darme siempre su mano amiga.

❖ **A mis primos** Tony, Luima, Enriquito, Mario, Alejandro, Lisbeth, Lianet, Liena, Lieska, Yoni, Enmanuel, Wilmer y la Gaviota por permitir ser parte de su mundo compartir con alegría en todos mis momentos buenos y siempre ser un solo piquete a pesar de la diferencia de edades, por aprender de ellos, como mismo aprendieron de mí.

❖ **A Yadira y su maravilloso hijo Dieguito** por todas las cosas que hemos pasado juntos como una gran familia junto a su excelente padre mi hermano del alma Tony.

Síntesis

En el trabajo se desarrolló un procedimiento que posibilita la selección de las clases de aceites alternativos para la lubricación de rodamientos, por el método de circulación. Se realizó una revisión bibliográfica que permitió conocer el estado actual de las investigaciones relacionadas con la lubricación de los rodamientos por el citado método. El análisis permitió la elaboración de un algoritmo matemático que posibilita la selección de las clases de aceites recomendados y las clases aceites alternativos, tomando como base fundamental, el criterio de la relación de viscosidad. Se aplicó el estudio a los rodamientos 7216 y NN 3020 localizados en la caja de avance del torno 16k20 en el taller de mantenimiento de la Empresa Productora del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara en el municipio de Moa. Para estos rodamientos se determinó las clases de aceites que garantizan la correcta lubricación para las 22 velocidades de funcionamiento del husillo de la caja de avance, proponiéndose los aceites alternativos ISO VG 100 y ISO VG 150, con índice de viscosidad 95, para la correcta lubricación de ambos tipos de rodamientos.

Abstract

In the work developed a procedure that makes possible the selection of the classes of alternative oils for the lubrication of bearings, by the circulation method. A bibliographic review was carried out that allowed to know the current state of the investigations related to the lubrication of the bearings by the mentioned method. The analysis allowed the elaboration of a mathematical algorithm that allows the selection of the recommended oils classes and the alternative oils classes, based on the criterion of the viscosity ratio. The study was applied to the bearings 7216 and NN 3020 located in the advance box of the 16k20 winch in the maintenance workshop of the Company Producer of Nickel Commander Ernesto Che Guevara in the municipality of Moa. For these bearings, the classes of oils that ensure correct lubrication for the 22 speeds of the feed case spindle were determined, with the alternative oils ISO VG 100 and ISO VG 150, with viscosity index 95 being proposed for correct lubrication Of both types of bearings.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LA SELECCIÓN DE LUBRICANTES PARA RODAMIENTOS	5
1.1. Introducción	5
1.2. Rodamientos	5
1.2.1. Tipos de rodamientos	5
1.2.2. Nomenclatura de rodamientos radiales	7
1.3. Longevidad de los rodamientos	8
1.4. Designación de los rodamientos	9
1.5. Trabajos relacionados con la lubricación de rodamientos	11
1.6. Regímenes de lubricación	13
1.7. Métodos de lubricación	16
1.8. Sistemas de lubricación con aceites	17
1.9. Relación de viscosidad y propiedades de los aceites lubricantes	19
1.10. Criterios de selección del sistema de lubricación	21
1.11. Criterios de selección de aceites para rodamientos	22
1.12. Conclusiones parciales	22
2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LAS CLASES DE ACEITES ALTERNATIVOS PARA RODAMIENTOS	24
2.1. Introducción	24
2.2. Selección del método de lubricación	24
2.3. Selección de la viscosidad del aceite lubricante	25
2.3.1. Método analítico para determinar la viscosidad mínima necesaria	26
2.3.2. Método gráfico para determinar la viscosidad requerida	27
2.4. Grados ISO de aceites lubricantes	27
2.5. Relación de viscosidad	29
2.6. Curva de viscosidad del aceite	29
Viscosidad del aceite a 100 °C	30
2.7. Sistemas de circulación de aceite	31

2.8. Breve descripción del Torno 16K20	32
2.9. Técnicas experimentadas realizadas	34
2.10. Algoritmo para la selección de las clases de aceites alternativos	35
2.11. Conclusiones parciales	37
3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE ACEITES ALTERNATIVOS PARA RODAMIENTOS	38
3.1. Introducción	38
3.2. Caracterización de los rodamientos del husillo del torno 16k20	38
3.3. Velocidad máxima recomendada para rodamientos 7216 y NN 3020	39
3.4. Medición de la temperatura en el torno	40
3.5. Cantidad de lubricante en el sistema de circulación de aceite	43
3.6. Cálculo de la viscosidad necesaria y grado de viscosidad ISO	45
3.7. Viscosidad real de funcionamiento	48
3.8. Cálculo de la relación de viscosidad	50
3.9. Grados ISO alternativos para índice de viscosidad 95, 120, 160 y 240.	51
3.10. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio	60
3.11. Análisis económico	61
3.12. Análisis ambiental	61
3.13. Conclusiones del capítulo	62
CONCLUSIONES GENERALES	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería mecánica algunos elementos de máquinas se destacan por su amplio uso, tal es el caso de los cojinetes de rodamientos (García, 2007). Término que al igual que cojinete de contacto rodante, cojinete antifricción, cojinete de rodamiento o simplemente rodamiento, se emplean para describir la clase de cojinete en la cual se transfiere la carga, mediante elementos que experimentan contacto rodante. Estos elementos se fabrican para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje puras o una combinación de ellas (Budynas y Keith, 2008).

En el estudio de las máquinas es importante elegir correctamente el tipo de rodamiento a utilizar, ya que hay factores que los hacen más adecuados según sus condiciones de trabajo. Los factores que influyen en la elección del tipo de rodamiento son principalmente la temperatura de trabajo, la velocidad, los tipos de fuerzas que soportan (radial, axial o la combinación de ellas).

El rodamiento es el apoyo más empleado en todo tipo de máquinas por los elementos rotativos que lo componen, debido a ventajas como: pequeño par de arranque, reducida fricción en un amplio rango de velocidades, bajo consumo de energía y de lubricante, largos intervalos de mantenimiento, facilidad de montaje y desmontaje y gran variedad de dimensiones estandarizadas.

En la actualidad existen varios tipos de rodamientos, atendiendo a su forma y aplicación. Estos pueden ser encontrados tanto en máquinas industriales, como en los mecanismos más complejos de transmisión de carga. En las industrias del Níquel de nuestro territorio existen un gran número de talleres de maquinado que responden al mantenimiento y recuperación de piezas para la sostenibilidad de la producción de níquel y otros derivados en nuestro país, un ejemplo de esto es la existencia del torno 16k20 que desempeña un rol importante en el mantenimiento y recuperación de las más diversas piezas encontrada en la industrias niquelífera. En dicho torno se encuentran gran variedad de rodamientos, tanto de sección simétrica como de sección asimétrica. Para esta investigación se seleccionó el rodamiento 7216 de sección asimétrica, y el NN 3020 de sección simétrico, ambos localizados en el husillo (caja de avance) del torno 16k20 en la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa.

Estos rodamientos poseen una vida útil precalculada, aunque a menudo pocos logran alcanzarla. Esto se debe a factores tales como: la magnitud de las cargas, la dirección de las cargas, la velocidad de giro, las deformaciones del eje, la desalineación, así como la temperatura de operación y la limpieza de los mismos y no menos importante es la calidad y el tipo de aceite para su lubricación.

Es por ello que la correcta lubricación de los rodamientos permite el alcance de su vida útil según el diseño y que garanticen la disponibilidad del equipo. Todo esto reduce considerablemente el costo de mantenimiento. Lo ante expuesto evidencia la importancia que el personal técnico y operario deben conocer para seleccionar correctamente el aceite o la grasa, partiendo de las recomendaciones del fabricante, o si estas no se conocen, seleccionar el lubricante correcto partiendo de los parámetros de diseño del mecanismo como cargas, velocidades, temperaturas y factores del medio ambiente.

Situación Problemática

En el taller de mantenimiento perteneciente a la Empresa Ernesto Che Guevara, se encuentra el torno 16k20 de fabricación soviética, con fecha de construcción 1978 según catálogo, encargado del maquinado y recuperación de piezas que inciden directamente en la producción del níquel. Las entrevistas realizadas al especialista de lubricación y los operarios del torno 16k20, revelaron que el lubricante recomendado por el fabricante escasea continuamente en el mercado nacional, por lo que el desconocimiento de la existencia de otros aceites alternativos lo lleva a utilizar aceites que no cumplen con la normas indicadas por el fabricante. Este y otros elementos indican la necesidad de buscar clases de aceites alternativos, que sustituyan el recomendado y garanticen la longevidad de los rodamientos y consecuentemente la vida útil del equipo repercutiendo así en el ahorro considerable para la economía de nuestro país. Esto evidencia una problemática importante en el proceso de mantenimiento de dichas máquinas y que constituye nuestro problema científico.

Problema de la investigación

La necesidad de seleccionar las clases de aceites alternativos, para el mantenimiento y correcto funcionamiento de los rodamientos en el husillo del torno 16k20 del taller de mantenimiento de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objeto de estudio

Rodamiento 7216 y NN 3020 que se localizan en la caja de avance del torno 16k20.

Campo de acción

Selección de la clase de aceites alternativos para la lubricación de los rodamientos 7216 y NN 3020 según el criterio de relación de viscosidad.

Objetivo general

Proponer un procedimiento para la selección de la clase de aceites alternativos para la lubricación de los rodamientos del husillo de la caja de avance del torno 16k20, por el método de circulación.

Hipótesis

Si se establece un procedimiento que determine la viscosidad mínima necesaria del lubricante, que contemple la característica geométrica del rodamiento, la velocidad de funcionamiento, la temperatura de trabajo y se identifica el método de lubricación empleado; entonces es posible seleccionar la clase de aceites alternativos para sustituir el aceite recomendado por el fabricante, logrando incrementar la vida útil de los rodamientos.

Objetivos específicos

- A. Determinar el grado de viscosidad ISO recomendado para la lubricación de rodamientos.
- B. Caracterizar el método de lubricación empleado.
- C. Seleccionar las clases de aceites alternativos en el método de lubricación según el criterio relación de viscosidad.

Tareas

- A.1. Determinación de las características geométricas y operacionales de los rodamientos.
- A.2. Cálculo de la viscosidad mínima necesaria de funcionamiento.
- B.1. Establecimiento de la relación de viscosidad recomendada por el método de lubricación.
- B.2. Obtención de la cantidad de aceite para la lubricación.
- C.1. Evaluación del comportamiento de aceites industriales con índice de viscosidad 95, 120, 160 y 240.
- C.2. Cálculo de la relación de viscosidad obtenida para cada clase de aceite.

Métodos de investigación

- **Análisis y síntesis.** Se realizó el análisis durante la búsqueda de información relacionada con la selección de lubricantes para rodamientos y la contextualización de la misma, también permitió conocer la actualidad de la problemática. La síntesis permitió la esencia de todo el material consultado, así como derivar algunas conclusiones. El análisis y la síntesis en su interrelación dialéctica se aplicó durante todo el proceso de investigación.
- **Sistémico estructural.** Para el procesamiento de los conocimientos científicos que tributan a la investigación, entre los que se destacan las diversas vías de lubricación de rodamientos, la correcta selección de los lubricantes y la posterior estructuración jerárquica de los conocimientos.
- **Histórico lógico.** Se utilizó para la revisión y actualización del marco teórico conceptual relacionado con la selección del lubricante para rodamientos, atendiendo a las condiciones específicas de funcionamiento.
- **Inducción y deducción.** Para encontrar la relación existente entre la correcta selección del tipo de aceite para la lubricación de rodamientos y la influencia de la durabilidad del mismo, que se mantienen invariantes en la propuesta de un procedimiento para la selección de aceites alternativos para la lubricación de los rodamientos del husillo de la caja de avance del torno 16k20.
- **Experimental.** Para la obtención de la viscosidad de los aceites industriales para un índice de viscosidad de 95, 120, 160 y 240.
- **Computacional.** Para la digitalización y realización de gráficos, así como el cálculo de la viscosidad de aceites.

Se complementó con métodos empíricos, como entrevistas a los operarios y especialista de mantenimiento para conocer las principales características funcionales del torno.

1. MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LA SELECCIÓN DE LUBRICANTES PARA RODAMIENTOS

1.1. Introducción

Los rodamientos son partes seguras de máquinas, aunque a menudo son uno de los componentes de más difícil acceso. La causa más común de avería es debido a una lubricación insuficiente o incorrecta en los rodamientos que trae aparejados serios problemas, entre los que se destacan las paradas no deseadas y las pérdidas de producción en las industrias (SKF, 2008).

Esto indica, que la correcta lubricación de los rodamientos es una etapa importante para que se logre su óptimo rendimiento y la máxima vida útil. Donde la viscosidad juega un papel esencial por ser la principal propiedad de los lubricantes.

Para adentrarse en lo relacionado con las propiedades de los aceites que usan los rodamientos, es necesario realizar una caracterización de los mismos. Atendiendo a su tipo, su nomenclatura y sus propiedades físicas y mecánicas. Los elementos antes mencionados, sugieren el siguiente **objetivo para este capítulo**: exponer los fundamentos teóricos relacionados con los rodamientos y la selección del grado de viscosidad de aceites, para su lubricación.

1.2. Rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos que encuentran una amplia utilización dentro de la industria de construcción de maquinaria, ya que están diseñados para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje o la combinación de ellas, posibilitando un movimiento de rodadura.

La mayoría de los rodamientos están constituidos por dos anillos, uno exterior y otro interior. Además de poseer elementos rodantes, que en lo general son bolas y rodillos. Así como retenedores que separan a los elementos rodantes (bolas o rodillos cilíndricos, de agujas, cónicos o en forma de barril) a intervalos iguales (NTN, 2004).

1.2.1. Tipos de rodamientos

Al respecto SKF, (2008) realiza una clasificación de los rodamientos un poco más amplia y detallada, cómo se muestran a continuación

1) Rodamientos radiales

- Rodamientos rígidos de bolas

- Rodamientos de bolas a rótula
- Rodamientos de rodillos cilíndricos
- Rodamientos completamente llenos de rodillos cilíndricos
- Rodamientos de agujas con pestañas y sin pestañas
- Rodamientos de agujas autoalineables
- Rodamientos de rodillos a rótula

2) Rodamientos axiales

- Rodamientos axiales de bolas
- Rodamientos axiales de bolas con contacto angular
- Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos
- Rodamientos axiales de agujas
- Rodamientos axiales de rodillos cónicos y a rótula
- Rodamientos CARB
- Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos de simple efecto
- Rodamientos axiales de agujas de simple efecto
- Rodamientos axiales de rodillos a rótula de simple efecto
- Rodamientos axiales de rodillos cónicos de simple efecto

Rodamientos Rígidos de Bolas

Los rodamientos rígidos de una hilera de bolas son particularmente versátiles. Su diseño sencillo, no desarmable lo hace muy resistente durante el funcionamiento. Están diseñados para soportar cargas radiales y axiales, además son apropiados para revoluciones elevadas. Estos rodamientos no son despiezables y su adaptabilidad angular es relativamente pequeña. Los rodamientos rígidos de bolas obturados están exentos de mantenimiento y posibilitan instrucciones sencillas. Por su gran variedad de aplicaciones y debido a su precio económico, estos rodamientos son los más usados entre todos los tipos de rodamientos, exigiendo así poco mantenimiento (FAG, 1997).

Rodamiento de bolas con contacto angular

Los rodamientos de bolas con contacto angular tienen los caminos de rodadura de sus aros interior y exterior desplazados entre sí, en la dirección del eje del rodamiento. Han sido diseñados para soportar cargas combinadas (cargas radiales y axiales simultáneas). La capacidad de carga

axial de los rodamientos de bolas con contacto angular se incrementa al incrementar el ángulo de contacto, el cual se define como el ángulo que forma la línea que une los puntos de contacto entre la bola y los caminos de rodadura en el plano radial, a lo largo de la cual se transmite la carga de un camino de rodadura al otro, y una línea perpendicular al eje del rodamiento (SKF, 2008).

Rodamiento de rodillos cilíndricos

En el diseño estándar de rodamientos de rodillos cilíndricos, los rodillos siempre van guiados entre las pestañas integrales abiertas de uno de los aros. Estas pestañas combinadas con los extremos de los rodillos especialmente diseñados y con un acabado superficial especial, permiten una mejor lubricación, una menor fricción y por tanto una temperatura de funcionamiento más baja. Los rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos pueden soportar cargas radiales elevadas y altas velocidades. Se fabrican con varios diseños, y la principal diferencia reside en la configuración de las pestañas (SKF, 2008).

1.2.2. Nomenclatura de rodamientos radiales

Para lograr un correcto funcionamiento dentro de las máquinas, los rodamientos radiales se componen de importantes elementos que entre si funcionan como un todo, como se representan en la Figura 1.1. Sin embargo se pueden destacar algunos por su gran importancia: un anillo interior y otro exterior, elementos rodantes que en lo general son bolas y rodillos; y los retenedores diseñados para separar los elementos rodantes a espacios iguales (SKF, 2008).

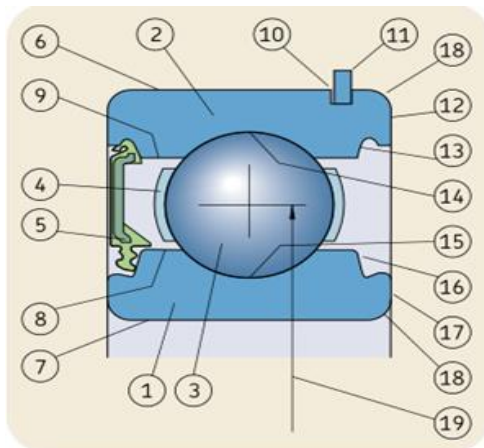


Figura 1.1. Terminología de rodamientos radiales (Fuente: SKF, 2008).

Aro interior (1), aro exterior (2), elemento rodante: bola (3), jaula (4), carcasa (5), diámetro exterior del aro exterior (6), agujero del aro interior (7), diámetro del reborde del aro interior (8),

diámetro del reborde del aro exterior (9), ranura para anillo elástico (10), anillo elástico (11), cara lateral del aro exterior (12), ranura de anclaje para la obturación (13), camino de rodadura del aro exterior (14), camino de rodadura del aro, Interior (15), ranura de obturación (16), cara lateral del aro interior (17), chaflán (18), diámetro medio del rodamiento (19).

1.3. Longevidad de los rodamientos

Todos los rodamientos tienen una vida útil precalculada. No obstante las investigaciones han demostrado, que por varias razones, no todos llegan a alcanzarlas. Las etapas más importantes que lo afectan considerablemente son: montaje, alineación, lubricación, monitorización básica del estado, y desmontaje.

Sin embargo la mayor parte de todas las fallas prematuras, recaen en la etapa de la lubricación del rodamiento. Por lo que cerca del 36 % de los fallas de estos son causados por especificaciones y aplicaciones incorrectas de los lubricantes ([SKF, 2008](#)).

Al respecto ([FAG, 2003](#)), plantea que la lubricación en los rodamientos tiene la función de evitar o de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento, es decir, mantener bajos el rozamiento y el desgaste. En los rodamientos se lleva el aceite, que se adhiere a las superficies de las piezas que ruedan unas sobre otras, a las zonas de contacto. El aceite separa las superficies de contacto y evita así el contacto metálico (lubricación física). En las superficies de contacto aparecen movimientos de deslizamiento aparte de los movimientos de rodadura, pero en un grado mucho menor que en los cojinetes de deslizamiento. Estos movimientos de deslizamiento tienen su origen en deformaciones elásticas de los componentes de los rodamientos y en la forma curva de las superficies de rodadura. En las zonas en las que en rodamientos aparecen movimientos puros de deslizamiento, específicamente entre cuerpos rodantes y jaula o entre las superficies frontales de los rodillos y las superficies de los bordes, las presiones generalmente son mucho menores que en el campo de rodadura.

Ya que los movimientos de deslizamiento en los rodamientos sólo desempeñan un papel secundario, la potencia perdida y el desgaste de los rodamientos no rebasa ciertos límites, aún en el caso de una lubricación deficiente. Así es posible lubricar rodamientos con grasas de diferente consistencia o con aceites de diferente viscosidad. Además puede dominarse una amplia zona de velocidades y también grandes sollicitaciones a carga sin repercusión. Muchas veces no se

formará una película lubricante totalmente importante, con lo que por lo menos en algunas zonas la separación debida a la película lubricante estará interrumpida.

1.4. Designación de los rodamientos

Todos los rodamientos (SKF, 2008) estándar tienen una designación básica característica, que por lo general se compone de 3, 4 o 5 cifras, o de una combinación de letras y cifras. En la Figura 1.2 se muestra esquemáticamente el diseño del sistema usado para casi todos los rodamientos de bolas y de rodillos estándar. Las cifras y las combinaciones de letras y cifras tienen el siguiente significado:

- La primera cifra o la primera letra o combinación de letras identifica el tipo de rodamiento (el verdadero tipo de rodamiento puede verse en la Figura 1.2).
- Las dos siguientes cifras identifican la serie de dimensiones ISO, la primera cifra indica la serie de anchuras o de alturas (dimensiones B, T o H respectivamente) y la segunda indica la serie de diámetros (dimensión D).
- Las dos últimas cifras de la designación básica ofrecen el código del tamaño del rodamiento, al multiplicarlo por 5 se obtiene el diámetro del agujero en milímetros.

Casos del sistema de designación de los rodamientos

1. En algunos casos se omite la cifra para el tipo de rodamiento y la primera cifra de la identificación de la serie de dimensión. Estas cifras se encuentran entre paréntesis en la Figura 1.2.
2. Para los rodamientos con un diámetro de agujero menor de 10 mm o igual o mayor de 500 mm, el diámetro del agujero generalmente se da en milímetros y no está codificado. La identificación del tamaño está separada del resto de la designación del rodamiento por medio de una barra inclinada, lo cual es válido para los rodamientos estándar, según la normativa ISO 15:1998, con diámetros de agujero de 22, 28 o 32 mm.
3. Los rodamientos con diámetros de agujero de 10, 12, 15 y 17 mm tienen las siguientes identificaciones para el código de tamaño:

00 = 10 mm

02 = 15 mm

01 = 12 mm

03 = 17 mm

4. Para algunos rodamientos más pequeños con un diámetro de agujero inferior a los 10 mm, como los rodamientos rígidos de bolas, de bolas a rótula y de bolas con contacto angular, el diámetro del agujero también se indica en milímetros (sin codificar) pero no va separado de la designación de la serie por medio de una barra inclinada. Los diámetros de agujeros que se desvían del estándar, siempre se indican sin codificar, en milímetros con un máximo de tres decimales. Esta identificación del diámetro del agujero es parte de la designación básica, y está separada de ésta por medio de una barra inclinada.

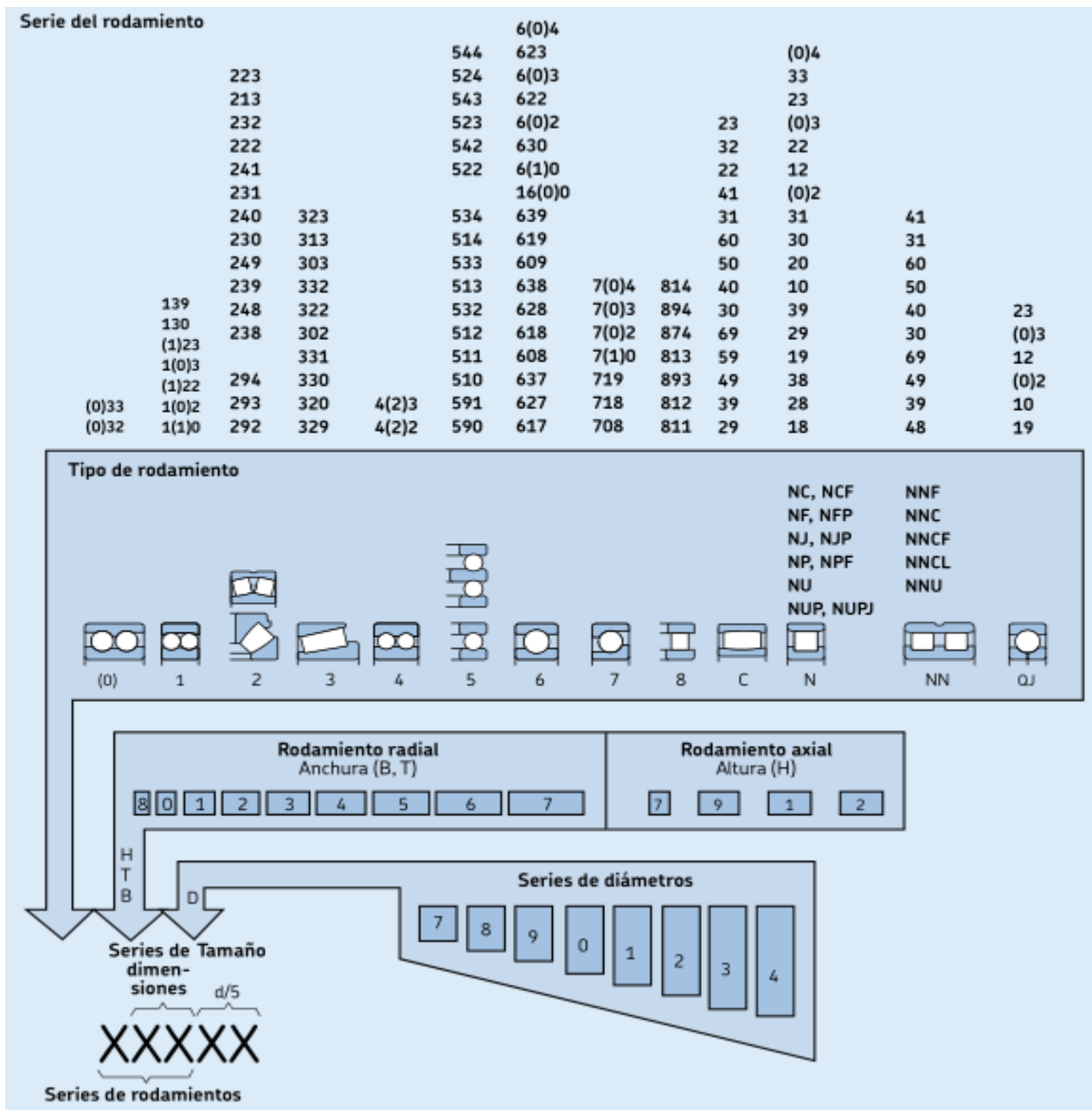


Figura 1.2. Designación de los rodamientos (Fuente: SKF, 2008).

Código según el tipo de rodamiento

0 - Rodamientos de dos hileras de bolas con contacto angular.

1 - Rodamientos de bolas a rótula.

2 - Rodamientos de rodillos a rótula, rodamientos axiales de rodillos a rótula.

3 - Rodamientos de rodillos cónicos.

4 - Rodamientos rígidos de dos hileras de bolas.

5 - Rodamientos axiales de bolas.

6 - Rodamientos rígidos de una hilera de bolas.

7 - Rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular.

8 - Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos.

C - Rodamientos CARB.

N - Rodamientos de rodillos cilíndricos. Se utiliza una segunda y a veces una tercera letra para identificar el número de hileras o la configuración de las pestañas.

QJ - Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto.

T - Rodamientos de rodillos cónicos según ISO 355-1977.

1.5. Trabajos relacionados con la lubricación de rodamientos

La lubricación de máquinas y equipos es una importante tarea del Mantenimiento Preventivo Planificado, estos trabajos planificados y organizados, normando debidamente las cantidades y tipos de lubricantes a utilizar, métodos y frecuencia de su aplicación y las medidas de control que permite asegurar su cumplimiento. De ahí la necesidad de comprender perfectamente que cuando se aplica un buen lubricante, en la oportunidad y cantidad adecuada, la vida de las máquinas y equipos se prolonga, las roturas y el desgaste disminuye y por lo tanto se evitan interrupciones innecesarias ([Navarrete y Gonzáles, 1988](#)).

[Widman \(2005\)](#) propone un modelo numérico en 2D de lubricación de rodamiento, para las simulaciones de eventos mecánicos, como una alternativa a las metodologías experimentales y analíticas, para el estudio del comportamiento dinámico de sus piezas en rotación. El modelo fue capaz de analizar la distribución de fuerzas de contacto sobre la pista externa debida a la dinámica de las piezas de rotación del rodamiento. El estudio permitió diferenciar una zona en la que el deslizamiento se mantiene prácticamente nulo en la zona de rodadura y los efectos de la

velocidad del eje y del coeficiente de fricción sobre la extensión de la zona de trabajo. Sin embargo en dicho modelo no se tiene en cuenta la variable temperatura.

[Cabañas \(2011\)](#), realiza un estudio donde afirma que la capacidad de realizar pronósticos ajustados sobre el estado de funcionamiento de máquinas supone un aspecto clave en su mantenimiento. Así, hay que indicar que el propósito de cualquier sistema de diagnóstico es el análisis de información externa relevante de la maquinaria, generalmente a través de medidas indirectas como vibraciones, emisiones acústicas, control de partículas y otros, para establecer un plan de mantenimiento que o bien disminuya el costo de la reparación asociado a un modo de fallo, o bien alargue la vida efectiva de los componentes afectados por la falla. De esta forma, se minimizarían los perjuicios provocados por una parada o por el funcionamiento anormal de la máquina. Por lo que alerta sobre la necesidad de desarrollar un método que permita detectar y clasificar el estado de los rodamientos de bolas sometidos a esfuerzos transitorios.

[Gómez \(2014\)](#), desarrolla y aplica diferentes técnicas para detectar defectos en ejes a través de su respuesta vibratoria durante su funcionamiento a baja velocidades, alejadas de la crítica. Para ello utiliza diversas herramientas que trabajan tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia para encontrar posibles indicadores de defecto. Para cada posible indicador, estudia diferentes sistemas de clasificación para automatizar la decisión sobre el estado del elemento. Concluyendo con el desarrollo de una metodología general que permite encontrar la técnica de diagnóstico óptima, en cuanto a fiabilidad y coste computacional. El trabajo, que inicialmente se ha centrado en ejes, posteriormente ha sido aplicado con éxito a rodamientos, demostrando que es posible generalizar la metodología a otro tipo de elementos mecánicos rotativos.

[Marín \(2009\)](#), realiza la modelización de un rodamiento de bolas mediante técnicas newtonianas y lagrangianas. Creando un modelo que contemplará la posibilidad de incluir la presencia de defectos. Proponiendo, otro modelo térmico de comportamiento del rodamiento. Marín plantea que el comportamiento de los rodamientos es no lineal y como sistemas no lineales, con frecuencia, no responden al patrón de comportamiento esperado, además de ser muy sensibles a las condiciones iniciales. Para intentar comprender todos los fenómenos generados en los rodamientos se recurre a modelos empíricos (derivados de procesos estadísticos) o a modelos matemáticos (de parámetros distribuidos o concentrados) aunque estos últimos pocos generales. Logrando de forma experimental, mediante ensayos de impacto, el valor del coeficiente de

amortiguamiento en los rodamientos, que posteriormente fue utilizado en las ecuaciones de los modelos y cuyos resultados se alejan de los sugeridos por la literatura clásica, ampliamente utilizados desde entonces. Concluyendo que el amortiguamiento es un parámetro importante en el modelo de simulación.

[Rivas \(2009\)](#), desarrolla un sistema de detección de averías en cambiadores de tomas en carga basado en el análisis de la señal de vibraciones de un cambiador de tomas en carga. Trabajo que aunque no analiza al rodamiento, como parte de una máquina. Es de suma importancia por caracterizar cada señal de vibración de cada una de las averías mediante un programa de ensayos en cambiadores de tomas en buen estado y con averías simuladas. Registrando todas las vibraciones obtenidas e implementando una metodología para automatizar el proceso de hallar los principales indicadores de diagnóstico (el número de impulsos de vibración, la amplitud de los impulsos de vibración y el tiempo entre los impulsos de vibración). Aplicando técnicas de reprocesamiento (normalización, sincronización y transformada Hilbert), al igual que técnicas de procesamiento de datos tanto en el dominio de la frecuencia (Transformada rápida de Fourier), como en el dominio tiempo-frecuencia (Transformada corta de Fourier y Transformada discreta de Wavelet), para obtener así los principales diagnósticos.

[Álvarez \(2013\)](#) diseña e implementación una aplicación para Smartphone con sistema operativo Androide capaz de calcular parámetros de rodamientos con el fin de ahorrar tiempo al ingeniero en su diseño y estimar el mantenimiento oportuno d dicho rodamiento. El mismo se apoya en el software SKF Campus, desarrollado para Windows XP 32 bit que se utiliza para el aprendizaje sobre los rodamientos pudiendo calcular una infinidad de parámetros además de tener una gran base de datos sobre todos los tipos de rodamientos, para comprobar los resultados mostrados por dicha aplicación. El trabajo pone en función de la ingeniera las nuevas tecnologías informáticas existentes en nuestro planeta. Además de proporcionarles a los usuarios de manera rápida resultados de ciclos de rodamientos, con una cierta precisión y en un formato de acceso directo como lo es un Smartphone. Pero no analiza la lubricación como uno de los principales aspectos en la longevidad de los rodamientos.

1.6. Regímenes de lubricación

Numerosas bibliografías ([NTN](#), [SKF](#), [FAG](#)) hacen referencias de los regímenes de lubricación, algunas de manera generalizadas y muy pocas de manera específica. Siendo [Álvarez \(1999\)](#),

quien define con mayor claridad acerca del tema. En este se plantea que el efecto de la capacidad lubricante del aceite durante la fricción, se define por diferentes mecanismos, fundamentados sobre la base de dos tipos de efectos:

1 - Volumétrico

2 - Superficial

Los efectos volumétricos garantizan la fricción fluida y los mismos se definen por las propiedades físicas de los aceites:

- Densidad
- Viscosidad
- Índice de viscosidad
- Oleosidad

Los efectos superficiales, garantizan la lubricación límite y se definen por las propiedades físicas y químicas de los aceites, dada por su capacidad de absorción sobre la superficie y de desprenderse de esta a través de reacciones químicas.

De este modo la capacidad lubricante de los aceites se define o se fundamenta en los siguientes efectos:

Durante la lubricación fluida

- Efectos de viscosidad.
- Hidrostático.
- Hidrodinámico.
- Efecto viscoelástico.

Durante la lubricación mixta

- Efecto de absorción
- Efecto de reacción química con las superficies de fricción.
- Absorción de las capas de óxido.
- Formación de una capa con los elementos activos de los aditivos.

Durante la lubricación de los elementos de máquinas se pueden distinguir diferentes regímenes de lubricación en dependencia de: la carga normal a las superficies, la velocidad de deslizamiento entre los cuerpos, la microgeometría superficial, las propiedades de los lubricantes utilizados y la forma geométrica de los cuerpos en contacto.

La lubricación siempre mejora la suavidad del movimiento de una superficie sobre otra. Esto puede ser logrado en una variedad de formas. El tipo de lubricación que cada sistema necesita se basa en la relación de los componentes en movimiento. Los diferentes tipos de lubricación normalmente son denominados regímenes de lubricación.

Lubricación hidrodinámica

La lubricación hidrodinámica (Figura 1.3) se presenta en superficies con una lubricación por película fluida. En este tipo de lubricación las películas son gruesas de manera que se previene que las superficies sólidas opuestas entren en contacto. Con frecuencia se la llama la forma ideal de lubricación, porque proporciona baja fricción y alta resistencia al desgaste. La lubricación de las superficies sólidas se rige por las propiedades físicas del volumen del lubricante, especialmente de la viscosidad (Farías, 2008).

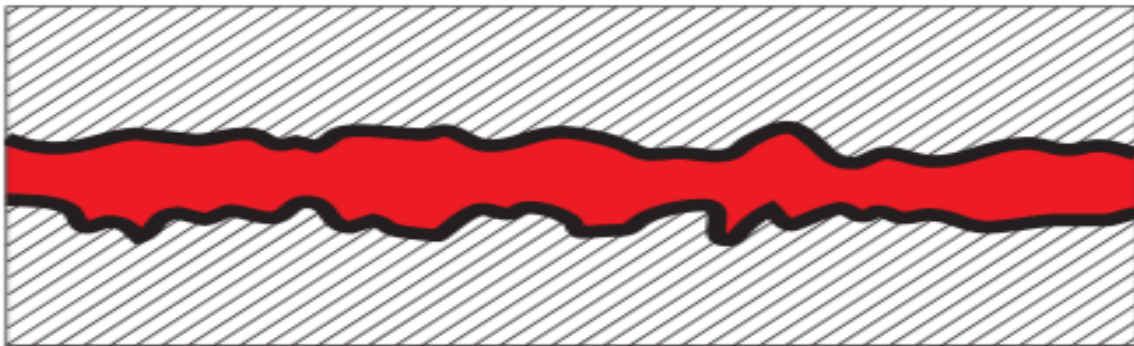


Figura 1.3. Lubricación hidrodinámica (Fuente: FAG, 1997).

Lubricación mixta

Es una condición intermedia entre las películas límite e hidrodinámica, en la cual un buen porcentaje de las crestas de las dos superficies, interactúan presentándose la película límite y otras ya están separadas en las cuales la película límite no desempeña ninguna labor. En una lubricación mixta (Figura 1.4) el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad.

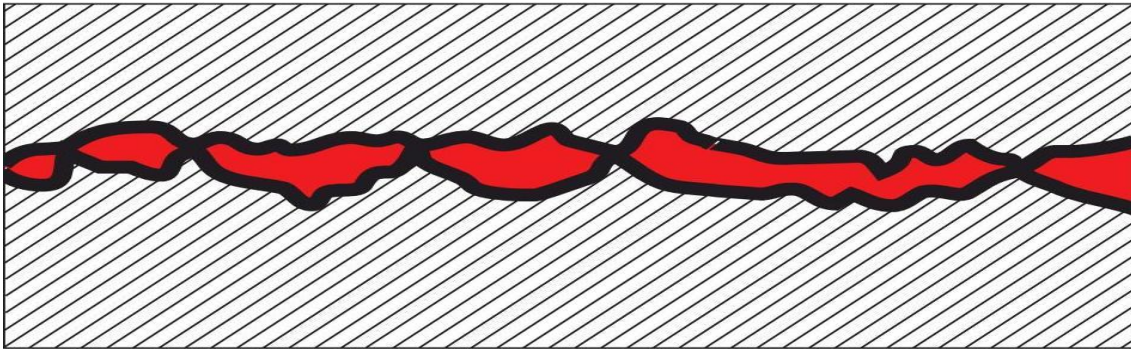


Figura 1.4. Lubricación mixta (Fuente: FAG, 1997).

Lubricación límite

Es la formación de una capa que se adhiere a las superficies metálicas e impide que cuando estas deslicen la una sobre la otra, se presente el contacto metal metal y por consiguiente el desgaste adhesivo. La lubricación por película límite (Figura 1.5) se presenta siempre que un mecanismo arranque, o se detenga (Albarracín y Pinzón, 2004). Por otro lado esta lubricación es considerada la menos eficiente ya que la película que forma es tan delgada que el contacto entre las superficies tiene lugar sobre una área similar a cuando no hay lubricante (Shell, 2011).

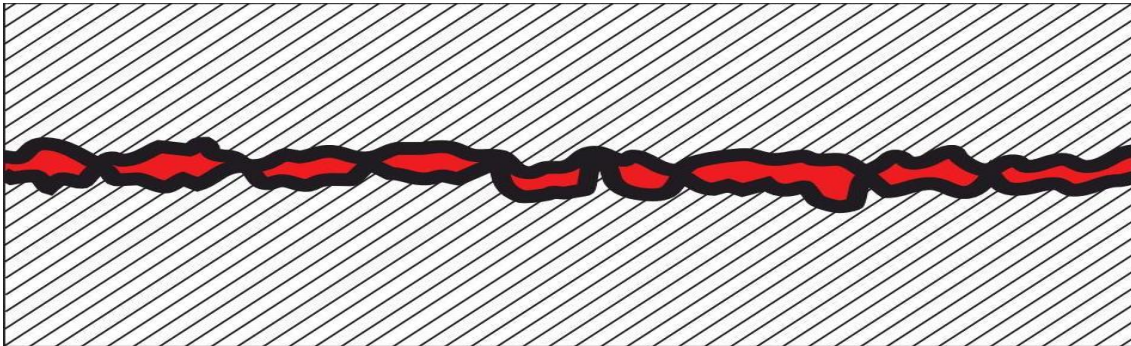


Figura 1.5. Lubricación hidrodinámica (Fuente: FAG, 1997).

1.7. Métodos de lubricación

La lubricación en los rodamientos tiene la función de evitar o de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento, manteniendo bajos el rozamiento y el desgaste. Hoy día por sus inmensas aplicaciones en todos tipos de rodamientos se encuentra la lubricación con grasa y la lubricación con aceite (SKF, 2008).

Lubricación con grasa

La inmensa mayoría de los rodamientos, alrededor del 90 %, se lubrican con grasa ([NKE, 2010](#)).

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 salidos y 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.

Lubricación con aceite

La lubricación con aceite se usa generalmente cuando se dispone normalmente de aceite dentro de la máquina respectiva, o en los casos en que son de aplicación condiciones especiales de funcionamiento (velocidades y cargas elevadas) que exigen una evacuación eficaz del calor en posiciones o áreas específicas.

1.8. Sistemas de lubricación con aceites

Un sistema de lubricación con aceite resulta adecuado si los elementos de máquina próximos deben lubricarse con aceite o cuando sea necesario evacuar calor mediante el lubricante. La evacuación de calor puede ser necesaria en el caso de elevadas velocidades de giro, altas solicitaciones a carga o si la aplicación de rodamientos está sometida a calor desde afuera ([FAG, 2003](#)).

Lubricación por circulación de aceite

La lubricación por circulación de aceite tiene la función de llevar aceite lubricante de manera continua a los diferentes puntos de la máquina. Con este sistema no se consigue únicamente lubricar, sino también se refrigeran los rodamientos sometidos a grandes cargas y velocidades medias y altas. En la lubricación por circulación, el aceite después de pasar a través de los rodamientos se lleva a un depósito colector para abastecer nuevamente los rodamientos desde allí. Donde es absolutamente indispensable prever un filtro para el aceite y así eliminar las partículas de suciedad y desgaste. La cantidad de aceite en circulación depende de las condiciones de servicio. Las cantidades que originan una resistencia moderada al paso del aceite, bajo razones de viscosidad entre 1 y 2,5 (FAG, 2003).

Lubricación por baño de aceite

La lubricación en baño de aceite es ampliamente utilizada en los casos de velocidades bajas o medias. El nivel de aceite debe estar en el centro del elemento de rodadura más bajo. Es aconsejable disponer de un indicador de nivel visual con el fin de comprobar que se mantiene el nivel de aceite óptimo.

Lubricación por inyección de aceite

En el caso de rodamientos con altas velocidades de rotación, el aceite se inyecta directamente en el paso entre la jaula y un anillo. La lubricación por inyección con grandes cantidades de lubricante conlleva una gran pérdida de rendimiento. Se requieren grandes esfuerzos para evitar el calentamiento de los rodamientos.

Lubricación por disco

El mismo eje que soporta el rodamiento lleva un disco por el que circula aceite haciendo un circuito de aceite que pasa por el rodamiento.

Lubricación por goteo

La lubricación por goteo se utiliza habitualmente en rodamientos de bolas pequeños, funcionando a velocidades relativamente altas.

Lubricación por salpicadura

Mediante este método de lubricación, el aceite es salpicado sobre los rodamientos mediante engranajes o simples discos giratorios instalados cerca de los rodamientos y sin necesidad de sumergir los rodamientos en aceite. Normalmente se utiliza este sistema en la transmisión de automóviles y en engranajes finales de transmisión.

Lubricación por niebla de aceite

La lubricación por niebla de aceite pulveriza una niebla sobre los rodamientos posibilitando que la cantidad de aceite necesaria sea mínima, la resistencia del aceite a la agitación es baja y se posibilitan velocidades mayores. Lográndose una contaminación del entorno sea mínima debido a que las fugas de aceite son muy pequeñas. Facilitando el suministro de aceite continuamente fresco, prolongándose la vida del rodamiento.

Lubricación por mezcla aire aceite

Utilizando el método de lubricación aire/aceite, se descarga una pequeña cantidad de aceite intermitente, mediante un pistón de cantidad constante en un tubo que conduce un caudal constante de aire comprimido. El aceite fluye a lo largo de la pared del tubo aproximándose a un caudal constante y proporcional. Siendo aconsejable para altas velocidades debido a su menor generación de calor. Demás la temperatura del rodamiento permanece estable. Prácticamente no se produce polución ambiental. La deterioración del aceite no necesita ser considerada, y la presión interna del mismo es alta, y en consecuencia el polvo o fluidos cortantes no pueden introducirse.

1.9. Relación de viscosidad y propiedades de los aceites lubricantes

Una característica elemental para seleccionar el tipo de aceite alternativo para la lubricación de un rodamiento, es la determinación de la relación de viscosidad. De esta dependerá en gran medida que el rodamiento pueda alcanzar el máximo de vida útil. Debido a que el tiempo de funcionamiento a la fatiga alcanzable y la seguridad contra el desgaste son tanto mayores cuanto mejor estén separadas las superficies de contacto por una película lubricante. Ya que el espesor de la capa lubricante aumenta con la viscosidad del aceite (FAG, 2003).

Principales propiedades de los aceites lubricantes

Las exigencias hacia los aceites lubricantes en base a los cuales se efectúa su selección se puede dividir en dos grandes grupos: exigencias sobre las propiedades físico químicas y exigencias sobre las propiedades de explotación, las cuales a su vez se divide en exigencias sobre las propiedades lubricantes, que aseguran características antidesgaste y antifricción y exigencias sobre propiedades de servicio que aseguren la fiabilidad económica y fácil explotación (NTN 2004).

En dependencia de los estados de fricción la capacidad de lubricación de los aceites la determinan:

- La viscosidad durante la fricción hidrodinámica o elastohidrodinámica.
- La capacidad de untuosidad u oleosidad durante la fricción mixta o límite.
- La actividad química en aquellas condiciones de fricción las cuales excluyen la formación de una capa lubricante.

La viscosidad como propiedad fundamental de los lubricantes

Orellana, (2005) plantea que la viscosidad de un fluido puede definirse desde el punto de vista práctico como su resistencia a fluir, es por tanto una medida de su fricción interna. Donde la viscosidad determina la capacidad del lubricante para formar una película que separe las superficies metálicas en movimiento relativo. De ahí que existen dos tipos de viscosidad: absoluta o dinámica y cinemática. La primera es la viscosidad que se definió inicialmente, mientras que la viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad absoluta de un aceite y su densidad, a la temperatura a la cual se efectúa la determinación de la viscosidad. Utilizándose comúnmente para la clasificación de los aceites lubricantes. La unidad de medida de la viscosidad es el centistokes ($1 \text{ cm}^2/\text{s}$). La viscosidad de un fluido resulta ser función de la temperatura. En los líquidos, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura y aumenta al disminuir la temperatura. La variación de presión no provoca cambios apreciables.

En los líquidos, la viscosidad disminuye al incrementar la temperatura (Figura 1.6) y aumenta al disminuir la temperatura. En el caso de aceites lubricantes se refiere específicamente a las propiedades de los líquidos como fluidos newtonianos, es decir, que los esfuerzos cortantes en el fluido son proporcionales a las velocidades de deformación tangenciales.

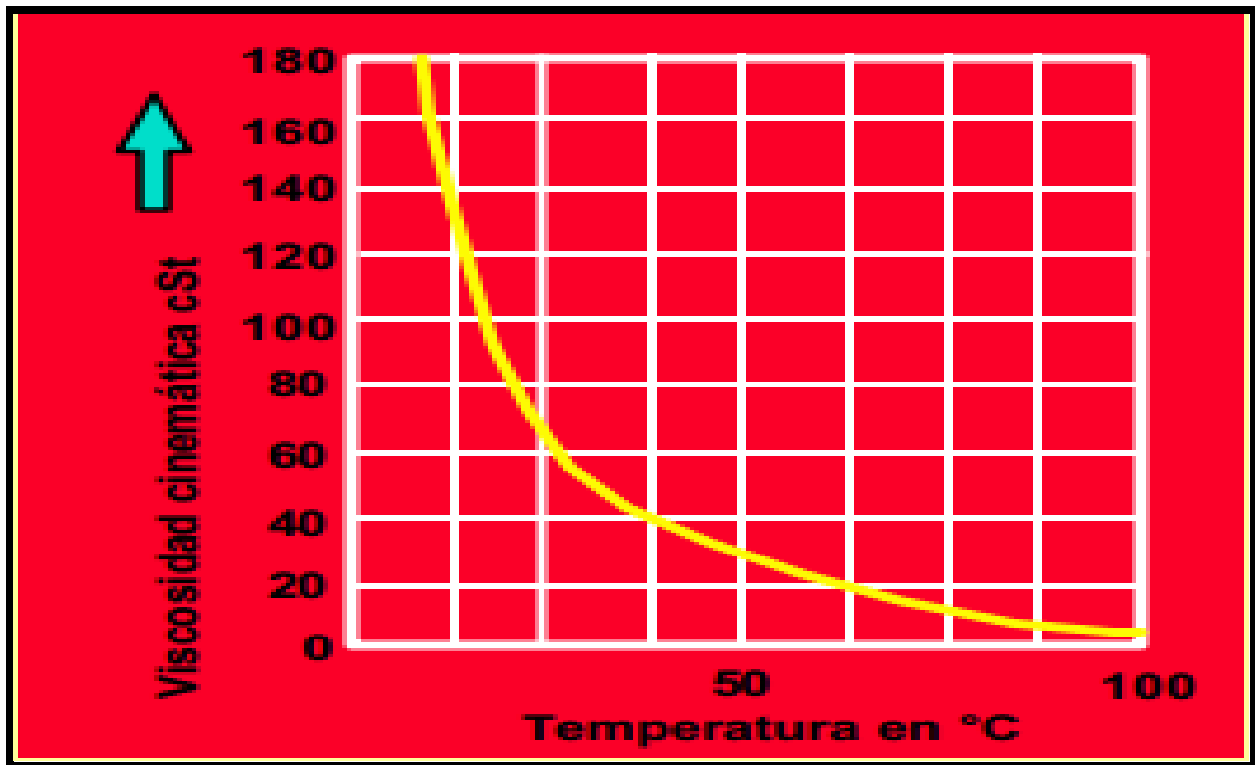


Figura 1.6. Influencia de la temperatura en la viscosidad (Fuente: Shell, 2011).

1.10. Criterios de selección del sistema de lubricación

Al construir una máquina es aconsejable determinar lo más pronto posible el sistema para lubricar los rodamientos montados. La elección puede tomarse entre un sistema por aceite y un sistema por grasa (FAG, 1997). Al elegir el sistema de lubricación deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Condiciones de servicio de los rodamientos
- Exigencias respecto al comportamiento de los rodamientos con relación al giro, al ruido, al rozamiento y a la temperatura
- Exigencias respecto a la seguridad de servicio, seguridad respecto a la falla prematura debido al desgaste, a la fatiga, a la corrosión o daños debidos a agentes del medio ambiente que hayan entrado en el rodamiento.
- Gastos originados por la instalación del sistema de lubricación y el mantenimiento durante el servicio.

Una condición previa importante para una elevada seguridad de servicio es la alimentación sin perturbaciones de lubricante a los rodamientos (presencia constante de lubricante). La presencia de lubricante no presenta la misma seguridad en los diferentes sistemas de lubricación. Una alimentación de aceite continuada sólo es segura cuando se controla constantemente (FAG, 1997).

En aplicaciones de rodamientos con lubricación por baño de aceite debe controlarse el nivel de aceite regularmente si se exige una elevada seguridad de servicio. Los rodamientos lubricados con grasa pueden considerarse como suficientemente seguros en el servicio si se observan los períodos de reengrase o si no se sobrepasa la duración de servicio de la grasa en aplicaciones de rodamientos lubricados de por vida. Al usar sistemas de lubricación con relubricaciones en intervalos de tiempo cortos, la seguridad de servicio depende del buen funcionamiento de los aparatos de alimentación. En rodamientos protegidos contra la suciedad (rodamientos con tapas de obturación) a ambos lados, la seguridad de servicio se mantiene más allá de la duración deservicio de la grasa debido a la lubricación con aceite (FAG, 1997).

1.11. Criterios de selección de aceites para rodamientos

Un sistema de lubricación con aceite resulta adecuado si los elementos de máquina próximos deben lubricarse con aceite o cuando sea necesario evacuar calor mediante el lubricante. La evacuación de calor puede ser necesaria en el caso de elevadas velocidades de giro, altas solicitaciones a carga o si la aplicación de rodamientos está sometida a calor desde afuera. En la lubricación con aceite por pequeñas cantidades (lubricación por goteo, por neblina de aceite o por aceite y aire) es posible dosificar la cantidad de aceite exactamente. Esto ofrece la ventaja de que el rozamiento por chapoteo se evita y el rozamiento del rodamiento puede mantenerse bajo. Al usar aire como medio portante de la lubricación puede conseguirse una alimentación dirigida y una corriente favorable para la obturación. La lubricación por inyección de aceite con grandes cantidades, facilita la alimentación precisa de todos los puntos de contacto en rodamientos altamente revolucionados y una buena refrigeración (FAG, 1997).

1.12. Conclusiones parciales

- La literatura es abundante en relación con la lubricación de rodamientos. Sin embargo resultan limitadas las investigaciones consultadas, que muestren procedimientos para la selección de la clase de aceites según el criterio relación de viscosidad.

- Quedó establecido el marco teórico relacionado con la selección de la clase de aceites para la lubricación de los rodamientos de rodillos de cilíndricos y rígidos de bolas a contacto angular, el mismo contiene los criterios más significativos sobre los trabajos precedentes como los criterios de selección del sistema de lubricación, y el criterio de relación de viscosidad de los aceites para la lubricación de rodamientos.
- Queda establecido los fundamentos teóricos relacionados con los rodamientos y la selección del grado de viscosidad de aceites para su lubricación.

2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LAS CLASES DE ACEITES ALTERNATIVOS PARA RODAMIENTOS

2.1. Introducción

El rodamiento es el apoyo más empleado en todo tipo de máquinas por los elementos rotativos que lo componen, debido a ventajas como: pequeño par de arranque, reducida fricción en un amplio rango de velocidades, bajo consumo de energía y de lubricante, largos intervalos de mantenimiento, facilidad de montaje y desmontaje; y gran variedad de dimensiones estandarizadas.

La lubricación determina la vida útil de cada rodamiento. Esta tiene como función la reducción de la fricción mediante una sustancia llamada lubricante. De ahí que el 36 % de las fallas prematuras de los rodamientos según [SKF \(2009\)](#) corresponden al proceso de lubricación. Por ende resulta de vital importancia, la correcta selección del método de lubricación y la adecuada selección del grado de viscosidad del aceite con que se desarrolla dicha acción, atendiendo siempre a las condiciones operacionales del rodamiento.

En tal sentido se define como **objetivo** del capítulo: establecer el procedimiento para la selección de los aceites alternativos, para la lubricación de los rodamientos 7216 y NN 3020, por el método de circulación.

2.2. Selección del método de lubricación

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 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 factor de velocidad, proporciona una ecuación (2.1) importante para evaluar la capacidad de un lubricante o de un cierto método de lubricación.

$$Fv = n \cdot Dm \quad (2.1)$$

Siendo:

$$Dm = \frac{D + d}{2} \quad (2.2)$$

Dónde:

F_v : factor de velocidad; [mm/min].

n : velocidad de funcionamiento del rodamiento; [min^{-1}].

D_m : diámetro medio del rodamiento; [mm].

D : diámetro exterior del rodamiento; [mm].

d : diámetro del agujero del rodamiento; [mm].

NKE (2010) ofrece un valor orientativo de velocidad recomendada para la explotación de rodamientos, en función del método de lubricación. Dichas recomendaciones se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores típicos de factor de velocidad.

Métodos de lubricación	F_v
Lubricación con grasa:	
Grasas estándar para rodamientos	$\leq 500\,000$
Grasas especiales	$\leq 1\,000\,000$
Lubricación con aceite:	
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 (BDC, 2010).

2.3. Selección de la viscosidad del aceite lubricante

NKE (2010) 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 empleado por la [NC 281 \(2012\)](#).
2. Método gráfico empleando por [SKF \(2008\)](#).

2.3.1. Método analítico para determinar la viscosidad mínima necesaria

Con el fin de formar una película de lubricante adecuada entre las superficie de contacto en el rodamiento, el lubricante debe mantener una viscosidad mínima segura a la temperatura de operación. La duración del rodamiento podrá prolongarse si se garantiza dicha viscosidad. La cual puede calcularse a través de las expresiones 2.3 y 2.4.

$$\nu_1 = 45000 \cdot n^{-0,83} \cdot Dm^{-0,5} \quad \text{Para } n < 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.3)$$

$$\nu_1 = 45000 \cdot n^{-0,5} \cdot Dm^{-0,5} \quad \text{Para } n \geq 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.4)$$

Dónde:

ν_1 : viscosidad mínima necesaria; [mm²/s].

2.3.2. Método gráfico para determinar la viscosidad requerida

La viscosidad requerida (ν_1), para una lubricación adecuada se puede calcular con el diagrama que muestra la Figura 2.1, usando el diámetro medio del rodamiento (D_m), y la velocidad de giro. Esta viscosidad se determina según las características geométricas y operacionales; y constituye la condición indispensable para que exista una lubricación hidrodinámica en el par tribológico de los elementos en contacto.

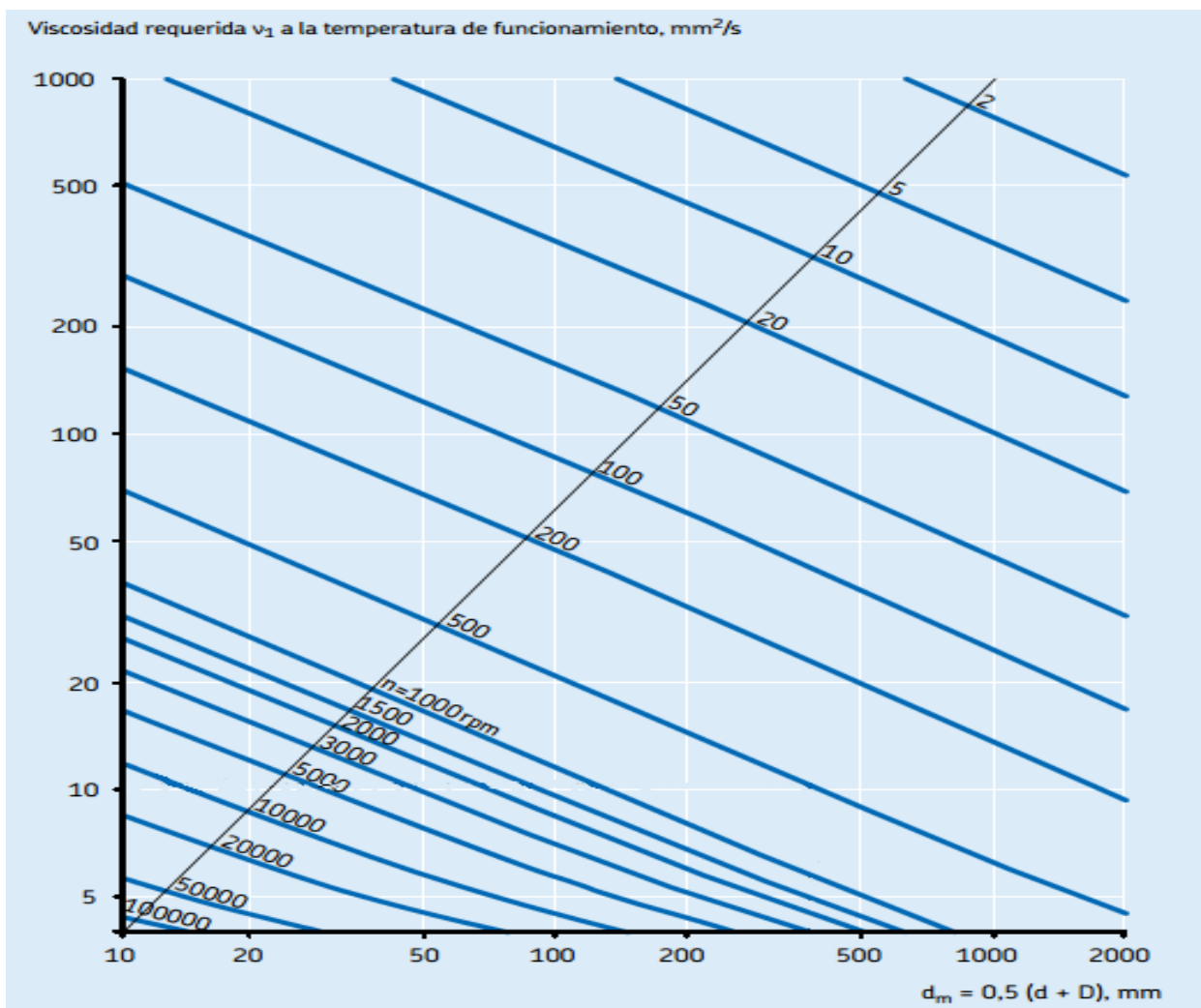


Figura 2.1. Método gráfico para la obtención de la viscosidad (Fuente: SKF, 2008).

2.4. Grados ISO de aceites lubricantes

La clasificación de ISO de viscosidades, desarrollada por institutos de normalización de varios países miembros de la ISO (International Organization for Standardization); se basa en el establecimiento de las 18 grados de viscosidad, comprendido entre 2 y 1 500 centiStokes a 40 °C.

Donde cada grado de viscosidad se designa por el número entero más cercano a su viscosidad cinemática media, expresada en centiStokes a 40 °C. Dicho sistema de acuerdo con lo pautado por ISO, se adoptó en Cuba y otros países integrantes en enero de 1978.

Si, por experiencia, se conoce la temperatura de funcionamiento, o si se puede determinar de otra manera, la viscosidad correspondiente a la referencia normalizada internacionalmente de 40 °C se puede obtener del diagrama que muestra la Figura 2.2. El diagrama corresponde a un índice de viscosidad de 95 y los aceites a la normativa ISO 3448:1992, cual muestra la gama de viscosidad para cada una de las clases a 40 °C.

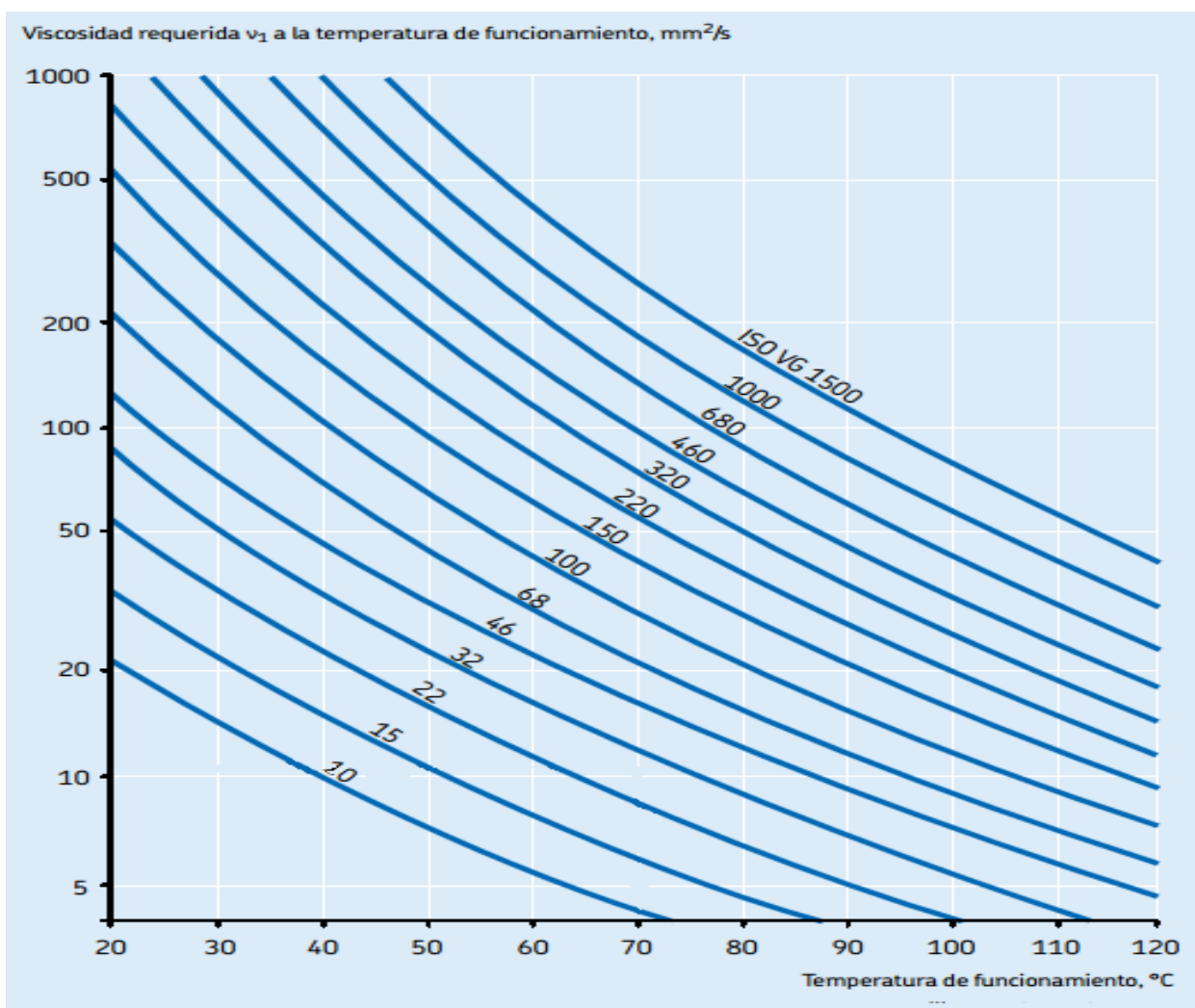


Figura 2.2. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 95
(Fuente: SKF, 2008).

2.5. Relación de viscosidad

La eficacia del lubricante viene determinada fundamentalmente por el grado de separación entre las superficies de contacto de rodadura. Para que se forme una película de lubricante adecuada, éste debe tener una viscosidad mínima cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento normal. Las condiciones del lubricante se describen según la relación de viscosidad (k) como la relación entre la viscosidad real del lubricante (v) y la viscosidad necesaria (v_1) para una lubricación adecuada, teniendo en cuenta que la viscosidad real se debe registrar cuando el lubricante está a una temperatura de funcionamiento normal (SKF, 2008).

$$k = \frac{v}{v_1} \quad (2.5)$$

Donde:

v : viscosidad real de funcionamiento del lubricante; [mm²/s].

Si la relación de viscosidad es menor que uno, se recomienda que el aceite contenga aditivos EP y si es menor que 0,4 se hace necesario el uso de un aceite con tales aditivos.

FAG (2003) recomienda el rango de relación de viscosidad bajo la que puede operar un rodamiento, tomando en consideración el sistema de lubricación que ha sido seleccionado para cumplir con sus exigencias tecnológicas. Dichas recomendaciones son mostradas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Relación de viscosidad recomendada según el sistema de lubricación.

Relación de viscosidad	Sistema de lubricación
1 – 2,5	Lubricación por circulación de aceite
1 – 4	Lubricación por inyección de aceite
8 – 10	Lubricación con cantidades mínimas

2.6. Curva de viscosidad del aceite

Para determinar la variación de la viscosidad del aceite con el incremento de la temperatura, se empleó el calculador de la compañía Widman International (Figura 2.3). Con el empleo de este programa es posible evaluar simultáneamente hasta cuatro aceites, de los cuales es necesario conocer los siguientes datos:

Aceite 1, 2, 3, 4: nombre del aceite que se desea evaluar.

$\nu_{(40)}$: viscosidad cinemática del aceite a 40 °C; [mm²/s].

$\nu_{(100)}$: viscosidad cinemática del aceite a 100 °C; [mm²/s].

La temperatura mínima (°C) a la que se requiere evaluar el aceite, debe ser definida en el programa, si en el rango de viscosidades mostrado no se observa el valor de viscosidad requerido, debe incrementarse la temperatura mínima, hasta mostrar el comportamiento del aceite evaluado en el rango de temperatura para el cual se realiza el estudio.

Calcular

	Aceite 1	Aceite 2	Aceite 3	Aceite 4	Temperatura
Nombre de Producto					Mínima (Celsius)
Viscosidad cSt a 40°C					0
Viscosidad cSt a 100°C					

Temperatura	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	55

Figura 2.3. Calculador de Widman International.

Viscosidad del aceite a 100 °C

Dentro de las características que ofrecen los productores de aceites, aparece la viscosidad considerada la propiedad más importante de los lubricantes, es de vital importancia tenerla en cuenta, ya que ésta es severamente sensible con la temperatura.

Para obtener el comportamiento de la viscosidad con el incremento de la temperatura se empleó el calculador que se muestra en la Figura 2.4 perteneciente a la compañía Widman International, este calculador opera al introducirle la viscosidad del aceite a 40 °C y 100 °C. Sin embargo los proveedores exponen en sus catálogos la viscosidad de los aceites a 40 °C acorde

a lo establecido por la Norma ISO 3448 y el índice de viscosidad en relación con la norma ISO 2909.

Para obtener el valor de la viscosidad a 100 °C es necesario emplear el calculador de la compañía Widman International (Figura 2.4). Este programa determina el valor de la viscosidad del aceite evaluado a 100 °C conociendo la viscosidad cinemática del aceite a 40 °C y el índice de viscosidad del aceite.

Calcular la viscosidad cSt a 100°C	
Indice de Viscosidad	<input type="text"/>
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 40°C	<input type="text"/>
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 100°C	<input type="text"/>
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Borrar"/>	

Figura 2.4. Calculador del índice de viscosidad.

2.7. Sistemas de circulación de aceite

En la lubricación por circulación, el aceite después de pasar a través de los rodamientos se lleva a un depósito colector para abastecer nuevamente los rodamientos desde allí. Siendo absolutamente indispensable prever un filtro para eliminar las partículas de suciedad y desgaste (FAG, 2003). Los elementos más comunes de un sistema de lubricación por circulación de aceite pueden ser vistos en la Figura 2.5.

Un sistema moderno de lubricación de aceite suele estar compuesto de recipiente (1), instalación de bombeo (2), válvula limitadora de la presión (3), control eléctrico del nivel de aceite (4), enfriador (5), termómetro (6), manómetro (7), filtro (8), distribuidor [válvula reguladora del caudal] (9), puntos de lubricación (10), tuberías de recuperación del aceite (11).

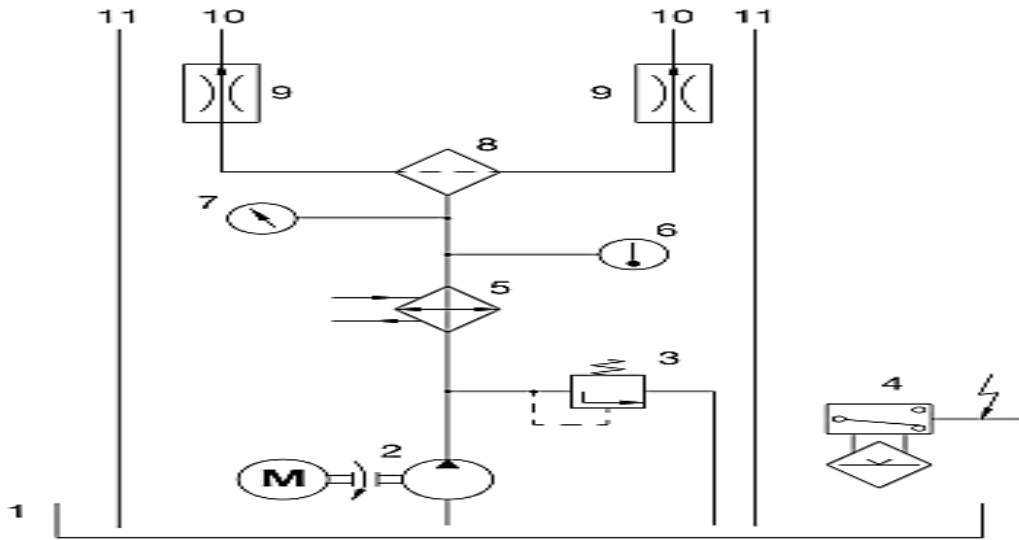


Figura 2.5. Esquema de un sistema de circulación de aceite (Fuente FAG, 2003).

Cantidad de lubricante en el sistema de circulación de aceite

La cantidad de aceite en circulación depende de las condiciones de servicio. Suelen establecerse tres zonas para elegir el flujo lubricante, una zona **a** (cantidad suficiente para la lubricación) donde se recomiendan cantidades de aceite donde se garantiza que incluso en el caso de una alimentación desfavorable en la que el aceite no llega directamente al rodamiento, todas las superficies de contacto queden abastecidas de forma segura, una zona **b** (rodamientos de sección simétrica) y una zona **c** (rodamientos de sección asimétrica). Cada una de estas zonas posee un límite inferior y superior, el cual se escoge según la relación de diámetros (D/d), siguiendo las condiciones planteadas en las expresiones 2.6 y 2.7.

$$\frac{D}{d} > 1,5 \quad \text{Para: } a_1, b_1, c_1 \quad 2.6$$

$$\frac{D}{d} \leq 1,5 \quad \text{Para: } a_2, b_2, c_2 \quad 2.7$$

2.8. Breve descripción del Torno 16K20

El torno 16k20 (Figura 2.6) es una máquina capaz de realizar las operaciones como torneado cilíndrico interior y exterior, revestimiento; de cortar los hilos de rosca métrica, pulgadas y módulo para taladrar, escariar y abordar las ranuras. También le permite al operario girar piezas de trabajo de tipo plano y piezas de forma irregular. Logra un redondeado de 0,01 mm y un

cilindrado de 0,02 mm sobre una longitud de 200 mm, con un acabado superficial alto ([Manual de Servicio, 1978](#)).



Figura 2.6. Torno 16k20.

Partes básicas del torno 16k20

- Bancada: es su estructura y suele ser un gran cuerpo de fundición. Sirve de soporte y guía para las otras partes del torno.
- Eje principal y plato: sobre este eje se coloca la pieza para que gire. En un extremo lleva un eje terminado en punta que es móvil, llamado contrapunto, para sujetar la pieza por un punto, en el otro extremo se sujeta la pieza con un plato. El plato se puede cambiar mediante el husillo. El torno dispone de varios platos para la sujeción de la pieza a mecanizar y que la hará girar en torno a un eje. La pieza queda sujeta por un extremo por el plato y por el otro por la punta del contrapunto. La pieza se coloca en el plato y se mueve el contrapunto hasta que apriete la pieza.
- Carro Longitudinal o Principal: este se mueve a lo largo de la bancada o sea hacia la izquierda o hacia la derecha. Produce el movimiento de avance de la pieza, desplazándose en forma manual o automática, paralelamente al eje del torno. Se mueve a lo largo de la bancada, sobre la cual se apoya.
- Carro Transversal: se mueve hacia adelante o hacia atrás perpendicular al carro principal. Es utilizado para dar la profundidad. Se mueve perpendicularmente al eje del torno en forma manual, girando la manivela de avance transversal o embragando la palanca de avance transversal automático. Sobre el carro está montado el carro orientable o carro auxiliar.

- Carro Auxiliar o Portaherramientas: es una base giratoria a 360° y sirve principalmente para hacer conicidades o penetrar la herramienta con cierto ángulo. El carro auxiliar sólo puede moverse manualmente girando la manivela de tornillo para su avance. El buril o herramienta cortante se sujeta en la torreta portaherramientas que está situada sobre el carro auxiliar. La Torreta Portaherramientas, ubicada sobre el carro auxiliar permite montar varias herramientas en la misma operación de torneado y girarla para determinar el ángulo de incidencia en el material.
- Caja de avance: sirve para ajustar las revoluciones de las velocidades mediante unas palancas que accionan un conjunto de engranajes que se encuentran en el interior de la caja. Para un total de 22 velocidades. El husillo del torno se apoya en dos rodamiento 7216 y un NN 3020, lubricados a través de tuberías, por el método por circulación.

2.9. Técnicas experimentadas realizadas

Para la medición de las temperaturas se utilizó una cámara termográfica Fluke Ti30 (Figura 2.7). La misma está diseñada para que el personal de mantenimiento pueda capturar de forma rápida y sencilla, imágenes por infrarrojos de gran calidad. La cámara recopila 12 bits de información para cada uno de sus 19 200 píxeles. Posee un rango de temperatura que va desde -10 a 250 °C. Con una precisión de $\pm 2\%$ o $\pm 2\text{ °C}$, un rango espectral de 7 - 14 micrones y una escala de temperatura en grados °C o °F.



Figura 2.7. Cámara termográfica Fluke Ti30.

Las imágenes obtenidas pueden combinarse en el software Inside IR™ (Figura 2.8) con los nombres de las ubicaciones y los datos de temperaturas. En el mismo se puede acceder a una

tabla de temperatura, un histograma, y posibilita la elaboración de un informe en formato PDF, con los resultados obtenidos.

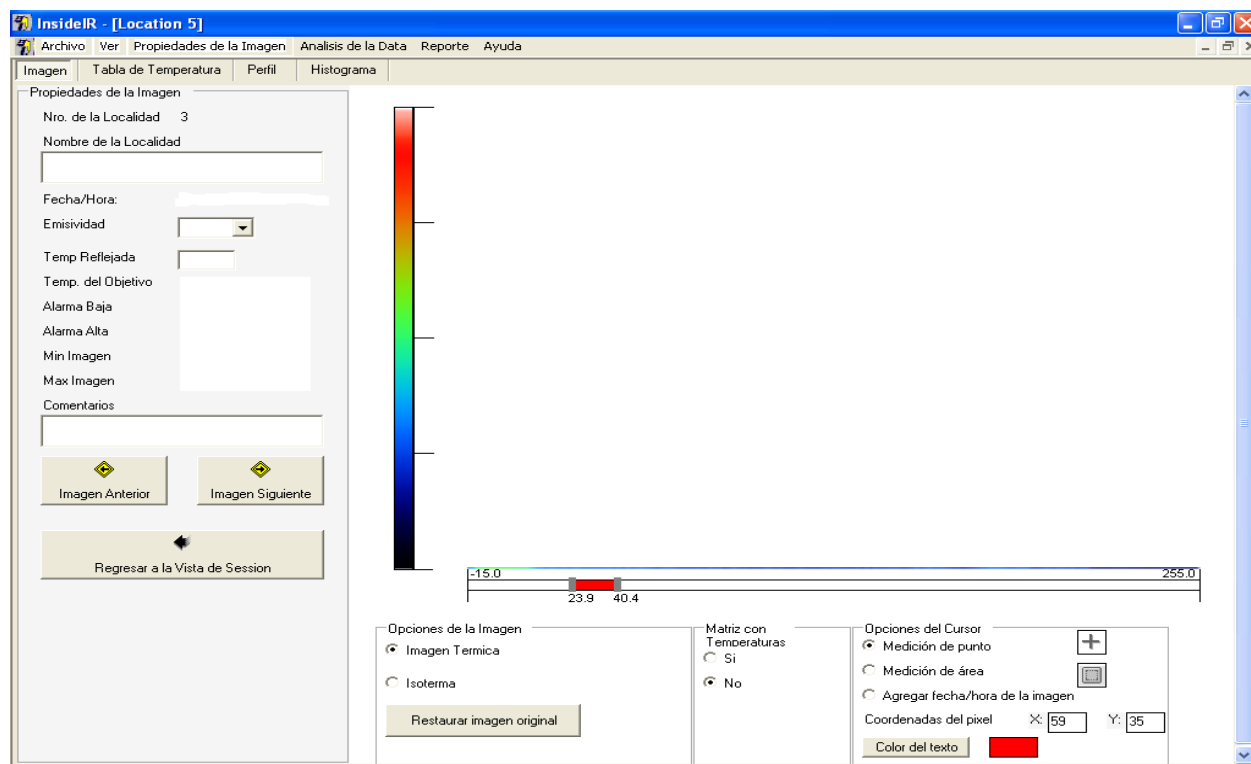


Figura 2.8. Ventana principal del software Inside IR™.

2.10. Algoritmo para la selección de las clases de aceites alternativos

La Figura 2.9 se muestra el algoritmo creado, el que contiene la secuencia de los pasos lógicos para determinar las clases de aceites adecuados para la lubricación de rodamientos, atendiendo al criterio de relación de viscosidad por el método de circulación. Tanto para rodamientos que operan a velocidades menores de $1\,000\text{ min}^{-1}$, como para rodamientos con velocidades mayores que $1\,000\text{ min}^{-1}$.

Para la lubricación de rodamientos que utilicen el método de circulación se establece un algoritmo (Figura 2.9) que contempla la geometría del rodamiento, velocidad del funcionamiento, temperatura de trabajo, índice de viscosidad, viscosidad del aceite y la relación de viscosidad.

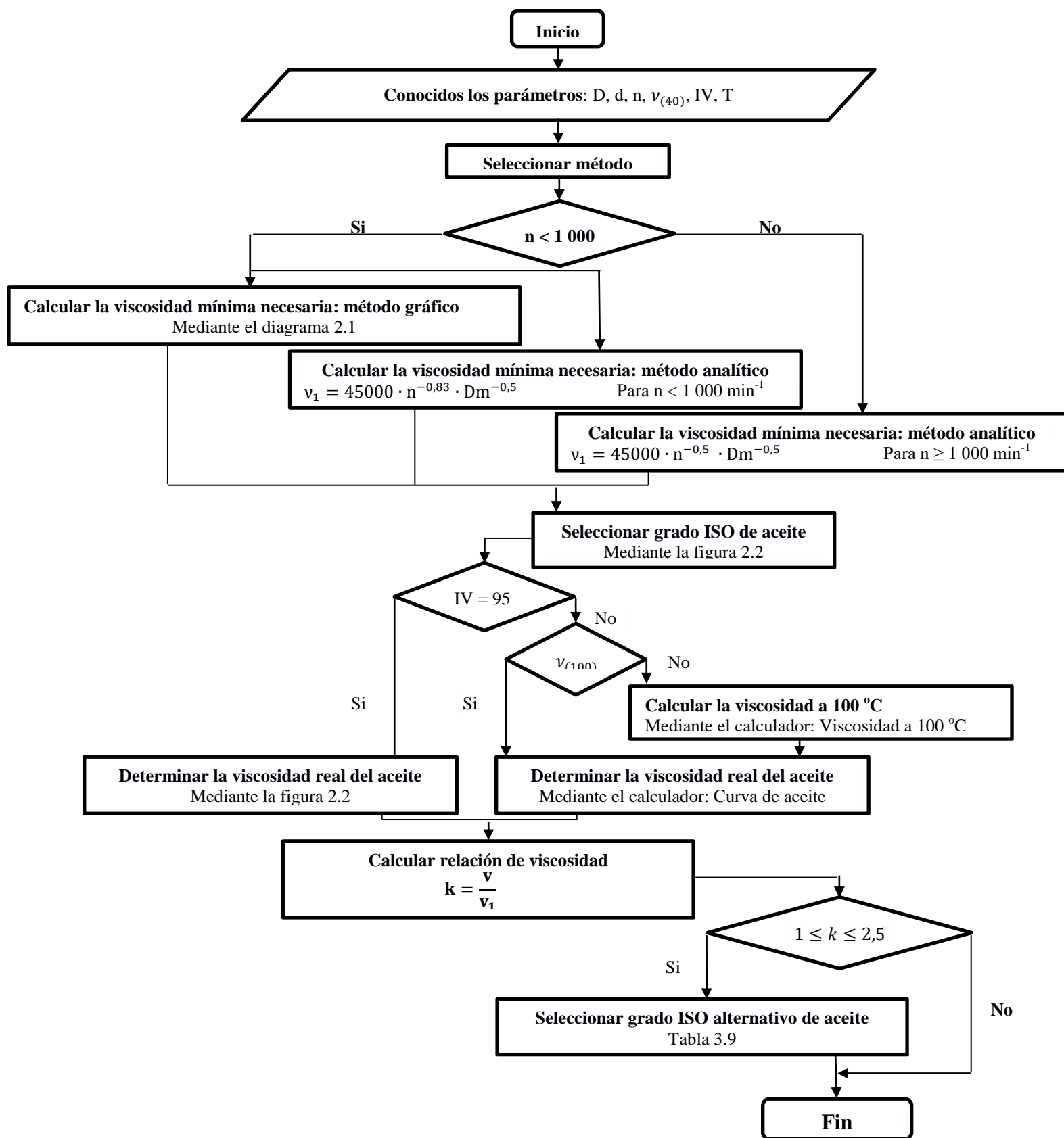


Figura 2.9. Algoritmo para la selección de las clases de aceites alternativos para rodamientos.

2.11. Conclusiones parciales

1. Se caracterizó el método de lubricación que permitió realizar el cálculo de la viscosidad mínima necesaria para velocidades de rotación mayores que 1000 min^{-1} .
2. Se estableció el procedimiento para la determinación del grado de viscosidad del aceite, que se usan en la lubricación de los rodamientos, 72 16 y NN 30 20, que posibilitó la utilización de aceites alternativos para el mantenimiento de los rodamientos del torno 16k20 de la Empresa Ernesto Che Guevara.

3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE ACEITES ALTERNATIVOS PARA RODAMIENTOS

3.1. Introducción

La lubricación es la reducción de la fricción mediante el uso de una sustancia llamada lubricante. Los lubricantes se componen de un aceite base y aditivos, éstos últimos varían de acuerdo a las necesidades de aplicación. En el caso particular de los rodamientos, una correcta lubricación conllevaría alcanzar el máximo de vida útil para el cual fue diseñado. De ahí la importancia que tiene la adecuada selección de la clase de aceite para su lubricación.

En el capítulo anterior quedaron establecidos los procedimientos que dieron paso a la realización del método para la selección de la clase de aceite, que se utilizará en la lubricación de rodamientos por el sistema de circulación de aceite.

Por tal motivo se define como objetivo de este capítulo: Implementar el procedimiento desarrollado a un caso de estudio y realizar la valoración de los resultados, los beneficios económicos y el impacto ambiental asociado.

3.2. Caracterización de los rodamientos del husillo del torno 16k20

El torno 16k20 de fabricación soviética cuenta con la caja de avance para regular sus 22 velocidades (12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1 000; 1 250; 1 600 min^{-1}), en función de las necesidades tecnológicas de la pieza que se está maquinando. El husillo emplea como puntos de apoyos dos rodamientos de bolas a contacto angular (7216) apareados y un rodamiento de rodillo cilíndrico (NN 3020). El 7216 es de sección asimétrica en el punto de apoyo A (Figura 3.1), ubicado en la parte izquierda de la máquina del lado de la transmisión polea y correa de la caja de avance, y el NN 3020 de sección simétrica en el punto de apoyo B (Figura 3.1), junto al plato del husillo.

El rodamiento 7216 se clasifica como un rodamiento de una hilera de bola con contacto angular, posee como dimensiones fundamentales; diámetro interior de 80 mm, diámetro exterior de 140 mm y ancho de 26 mm. Tiene una capacidad de carga estática de 75 kN, capacidad de carga dinámica de 85 kN y su carga límite a la fatiga es de 3,05 kN. La velocidad máxima recomendada para su uso es de 56 000 min^{-1} .

El rodamiento NN 3020 se clasifica como un rodamiento de rodillos cilíndrico de una hilera, posee como dimensiones fundamentales; diámetro interior de 100 mm, diámetro exterior de 150 mm y ancho de 37 mm. Tiene una capacidad de carga estática de 310 kN, capacidad de carga dinámica de 209 kN y su carga límite a la fatiga es de 37,5 kN. La velocidad máxima recomendada para su uso es de $26\,000\text{ min}^{-1}$, y su masa es de aproximadamente 2,15 kg.



Figura 3.1. Imagen de los puntos de apoyos A y B en la caja de avance del torno 16k20.

3.3. Velocidad máxima recomendada para rodamientos 7216 y NN 3020

Según los valores típicos del factor de velocidad, y los distintos métodos de lubricación expuestos en la Tabla 2.1, se estableció la velocidad máxima que deben desarrollar los rodamientos 7216 y NN 3020. Donde conociendo las características de ambos tipos de rodamientos (diámetro medio igual a 110 mm para el rodamiento 7216 y 125 mm para el rodamiento NN 3020), y establecidos los límites de aplicación por método de lubricación, se despejó la velocidad de rotación (Tabla 3.1 y 3.2) de la ecuación 2.1, obteniéndose el límite de velocidad a la cual estos rodamientos puede trabajar para cada método de lubricación.

Tabla 3.1. Velocidad límite del rodamiento 7216 según el método de lubricación.

Método de lubricación	<i>n</i>
Lubricación por baño de aceite	4 545
Lubricación por circulación de aceite	6 818
Lubricación por salpicadura de aceite	7 273
Lubricación por neblina de aceite	13 636
Lubricación por cantidad mínima	27 273

Tabla 3.2. Velocidad límite del rodamiento NN 3020 según el método de lubricación.

Método de lubricación	<i>n</i>
Lubricación por baño de aceite	4 000
Lubricación por circulación de aceite	6 000
Lubricación por salpicadura de aceite	6 400
Lubricación por neblina de aceite	12 000
Lubricación por cantidad mínima	24 000

La máxima velocidad del husillo (1600 min^{-1}) está muy por debajo de las velocidades calculadas por el factor de velocidad, las cuales se consideran las velocidades límites según el sistema de lubricación, por lo que es adecuada la aplicación de este método para la lubricación de los rodamientos.

3.4. Medición de la temperatura en el torno

La temperatura de funcionamiento del torno es un parámetro importante a tener en cuenta, el calentamiento sostenido incide negativamente en las propiedades térmicas de los materiales, siendo necesario monitorear de manera sistemática las temperaturas durante el funcionamiento, la medición de la temperatura de trabajo se realizó con la cámara termográfica, modelo Fluke Ti30, se obtuvieron las imágenes térmicas de la caja de avance del husillo del torno 16k20 y se analizaron mediante el software especializado Insaide IR (Figura 3.2 B).

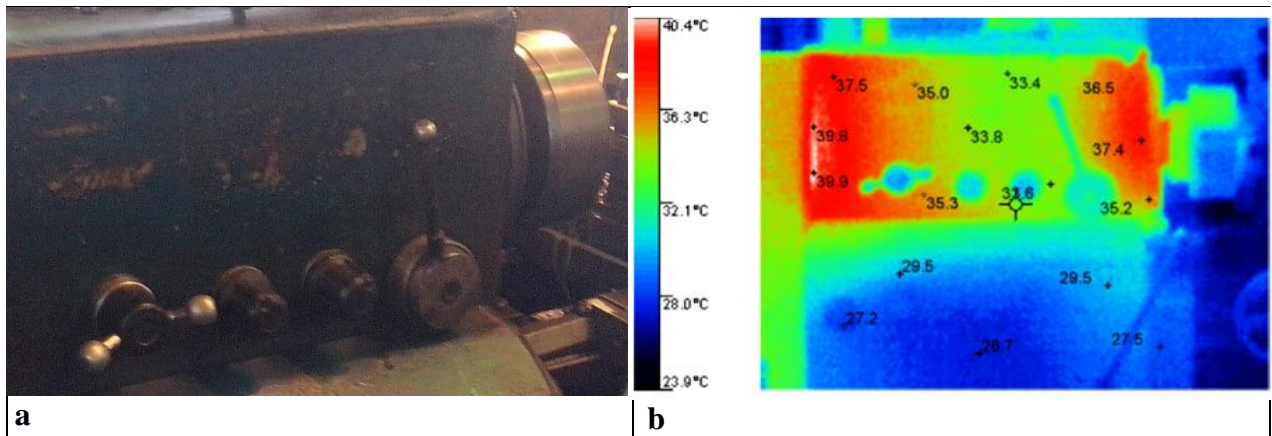


Figura 3.2. Imagen real de la caja de avance (a). Imagen termográfica de la caja de avance (b).

En la Figura 3.2 (b) se muestra la imagen térmica de la caja de avance del torno 16k20. Donde se observa que las mayores temperaturas se registran en los puntos de apoyos A y B, donde se localizan los rodamientos 7216 y NN 3020. Siendo captados rangos de temperatura que oscilan de 37,4 °C a 40 °C.

Para una mejor interpretación de los datos se tomaron las imágenes térmicas de los puntos de apoyo, de la caja de avance del torno 16k20, de manera separada. Analizando en un primer momento el punto de apoyo B (Figura 3.3) por presentar las temperaturas más bajas.

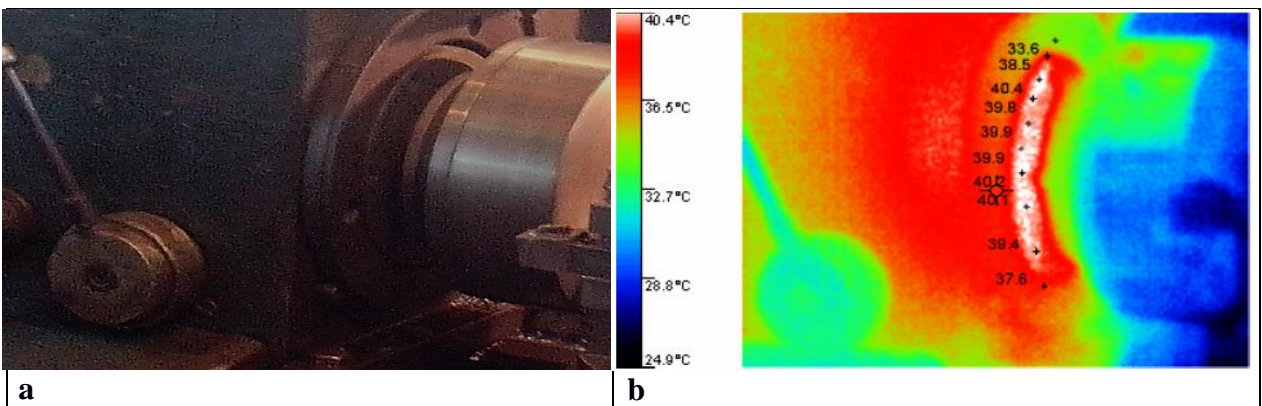


Figura 3.3. Imagen real del punto de apoyo B del husillo (a). Imagen termográfica del punto de apoyo B del husillo (b).

En la Figura 3.3 (b) se muestran las temperaturas registradas por la cámara termográfica en el punto de apoyo B del husillo. Indicando las mayores temperaturas registradas durante el funcionamiento del torno; que van desde 37,6 °C hasta 40,4 °C.

En un segundo momento se analizó el punto de apoyo A (Figura 3.4), donde se registraron las mayores temperaturas que oscilan desde 34 °C hasta 44 °C.

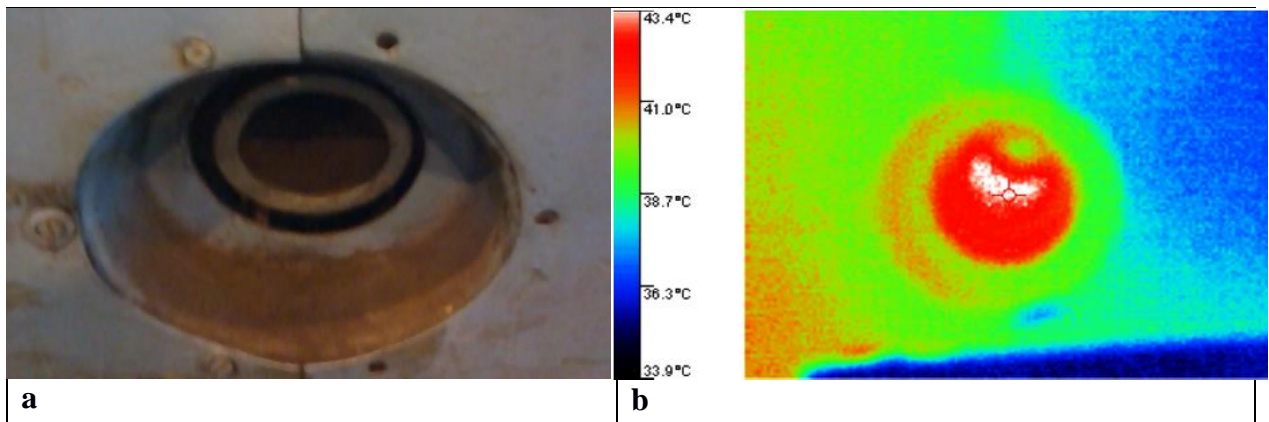


Figura 3.4. Imagen real del punto de apoyo A del husillo del torno 16k20 (a). Imagen termográfica del punto de apoyo A del husillo del torno 16k20 (b).

En la Figura 3.4 se muestra la imagen termográfica del punto de apoyo A. Indicando mediante diferentes tonalidades, las temperaturas que van desde 34 °C hasta 44 °C; esta última la mayor temperatura registrada. Aunque la mayor temperatura fue de 44°C para el cálculo de la viscosidad necesaria y el grado ISO para ambos tipos de rodamientos se tomó una temperatura de 54 °C, como lo recomienda la norma SKF (2009), por la diferencia de temperatura (+ 10°C) entre el aro exterior y el alojamiento o soporte del rodamiento.

Imagen de perfiles de temperaturas

Mediante el Software Inside IR se analizó el perfil de temperatura (Figura 3.5) en el punto más caliente.

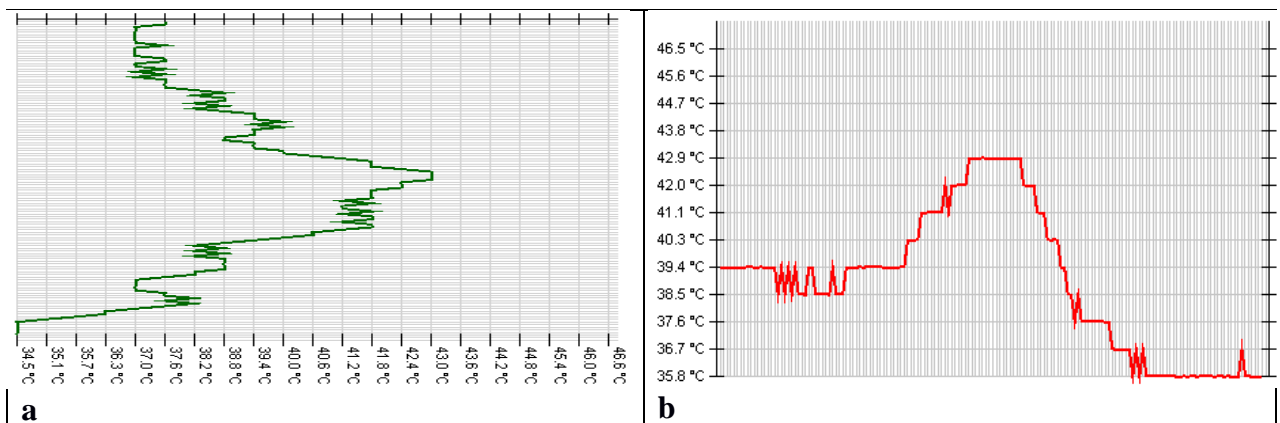


Figura 3.5. Perfil de temperatura en el eje X (a) y en el eje Y (b).

La Figura 3.5 muestra el aumento de las temperaturas en ambos eje, en los puntos de apoyos de los rodamientos. Observándose la mayor temperatura de $42,9^{\circ}\text{C}$ en el centro de apoyo de dichos rodamientos.

Histograma de medición de las temperaturas

Con las imágenes tomadas se pudo analizar la cantidad de pixeles que reflejaban las diferentes temperaturas captadas por la cámara. Siendo procesada toda esa información mediante el histograma de la Figura 3.6.

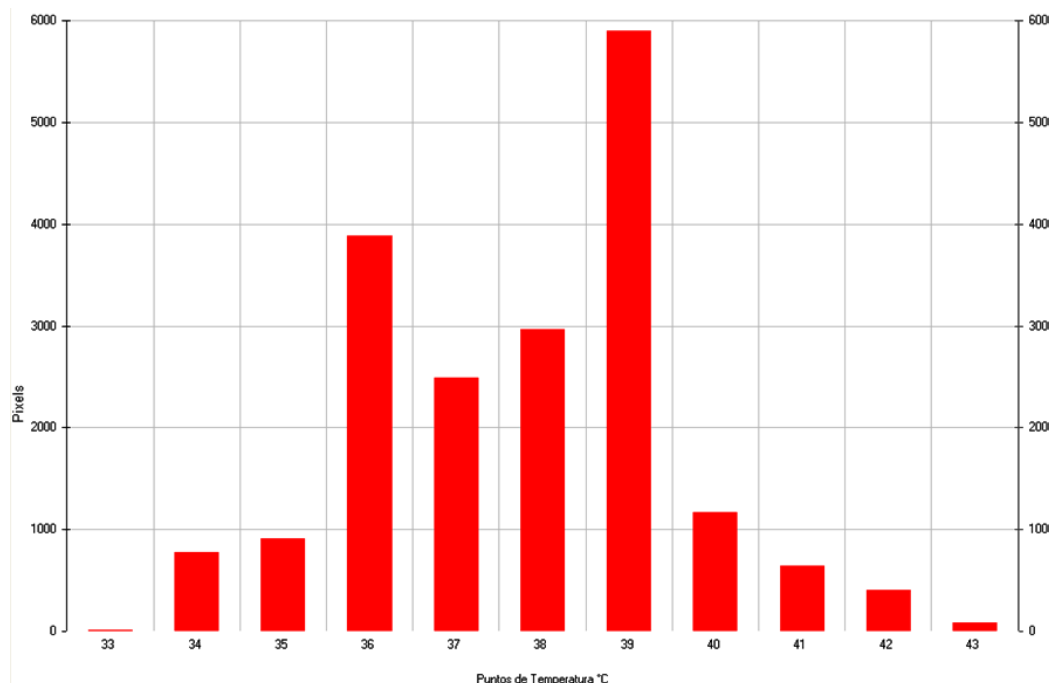


Figura 3.6. Histograma de la medición de las temperaturas.

Atendiendo a la muestra de todas las temperaturas registradas por la cámara termográfica, se determinó que la temperatura que más se repite es de 39°C .

3.5. Cantidad de lubricante en el sistema de circulación de aceite

En la determinación de la cantidad de aceite (Figura 3.7), que se utiliza en el sistema de lubricación por circulación; es necesario el empleo de las expresiones 2.6 y 2.7, para determinar la relación de diámetros de los rodamientos. La expresión 2.6 representa una relación mayor que 1,5 y recomienda el uso de las curvas **a**₁, **b**₁, y **c**₁. La expresión 2.7 representa la relación menor e igual que 1,5 y recomienda el uso de las curvas **a**₂, **b**₂, y **c**₂. Donde la curva **a** es para obtener una cantidad suficiente para la lubricación, la curva **b** es para el límite superior para rodamientos de

sección simétrica y la curva **c** para el límite superior de rodamiento de sección asimétrica. Estas cantidades de aceites se recomiendan para estar seguro de que incluso en el caso de una alimentación desfavorable, donde el aceite no llega directamente al rodamiento, todas las superficies de contactos queden abastecidas de forma segura.

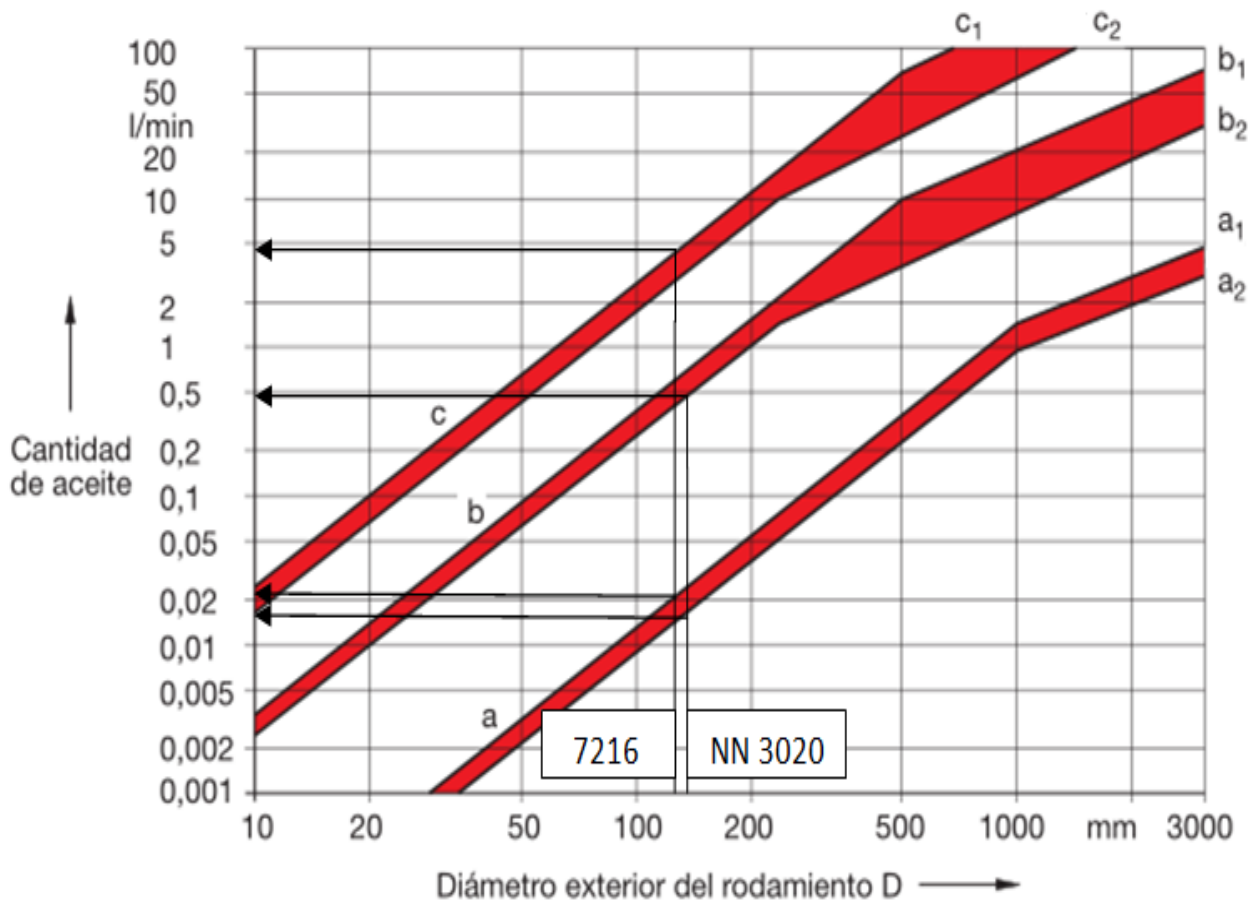


Figura 3.7. Cantidad de lubricante en el sistema de lubricación por el método de circulación.

Con la relación de diámetro del rodamiento NN 3020 igual a 1,5 y el rodamiento apareado 7216 igual a 1,75 se determinó primeramente en la curva a_1 y a_2 . Que no es más que la cantidad suficiente de aceite para la lubricación de ambos rodamientos. Concluyendo que el valor de $a_1 = 0,19 \text{ l/min}$ (7216) y el valor de $a_2 = 0,21 \text{ l/min}$ (NN3020). Posteriormente mediante la curva b_2 se detreminó el límite de superior del rodamineto de sección simétrica NN 3020, siendo igual a $0,5 \text{ l/min}$. Finalmente con la curva c_1 se determina el límite superior del rodamiento apareado de sección asimétrica 7216, siendo igual a $4,9 \text{ l/min}$, como se muestra en la Figura 3.7.

3.6. Cálculo de la viscosidad necesaria y grado de viscosidad ISO

Para determinar los grados de viscosidad ISO para cada rodamiento y teniendo en cuenta sus velocidades de rotación en cada posición de la palanca de la caja de avance del husillo, se calculó la viscosidad necesaria de funcionamiento según el método analítico y mediante las expresiones 2.3 y 2.4 en función de las velocidades de operación y las características geométricas. Se analizó la temperatura de funcionamiento de ambos rodamientos, seleccionando la mayor y tomando 10 °C de diferencia por las distintas temperaturas, entre el aro exterior y el alojamiento o soporte del rodamiento; realizando los cálculos con 54 °C de temperatura. Finalmente se obtuvo los grados ISO para el rodamiento 7216 en la tabla 3.3 y el NN 3020 en la tabla 3.4.

Tabla 3.3. Viscosidad requerida y viscosidad ISO para el rodamiento 7216.

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:32	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	12,5	54	467	1 500	1 500	1 000	1 000
2	16		381	1 000	1 000	1 000	680
3	20		317	1 000	1 000	680	680
4	25		263	680	680	680	460
5	31,5		218	680	680	460	460
6	40		178	460	460	460	320

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:8	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	50	54	148	460	320	320	320
2	63		123	320	320	320	320
3	80		101	220	220	220	220
4	100		84	220	220	220	150
5	125		70	150	150	150	150
6	160		57	150	150	100	100

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:2	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	200	54	47	100	100	100	100
2	250		39	100	100	68	68
3	315		33	68	68	68	68
4	400		27	68	68	46	46
5	500		22	46	46	46	46
6	630		19	46	32	32	32

Posición	N (min ⁻¹) i = 1,25:1	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	500	54	22	46	46	46	46
2	630		19	46	32	32	32
3	800		15	32	32	32	22
4	1000		121	320	320	320	220
5	1250		108	320	220	220	220
6	1600		96	220	220	220	220

Tabla 3.4. Viscosidad requerida y viscosidad ISO para el rodamiento NN 3020.

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:32	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	12,5	54	452	1 500	1 500	1 000	1 000
2	16		368	1 000	1 000	1 000	680
3	20		306	1 000	680	680	680
4	25		255	680	680	680	460
5	31,5		210	680	460	460	460
6	40		172	460	460	460	460

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:8	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	50	54	143	460	460	460	460
2	63		118	320	320	220	220
3	80		97	220	220	220	220
4	100		81	220	220	150	150
5	125		67	150	150	150	150
6	160		55	150	150	100	100

Posición	N (min ⁻¹) i = 1:2	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	200	54	46	100	100	100	100
2	250		38	100	100	68	68
3	315		32	68	68	68	68
4	400		26	68	46	46	46
5	500		22	46	46	46	46
6	630		18	32	32	32	32

Posición	N (min ⁻¹) i = 1,25:1	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
				IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	500	54	22	46	46	46	46
2	630		18	32	32	32	32
3	800		15	32	32	32	22
4	1000		117	320	320	220	220
5	1250		104	220	220	220	220
6	1600		92	220	220	220	150

Al calcular la viscosidad mínima necesaria para ambos rodamientos 7216 (Tabla 3.3) y NN 3020 (Tabla 3.4) para las seis posiciones de la palanca en la caja de avance, en la relación de transmisión de 1:2; a una temperatura de trabajo de 54 °C se determinó en la tabla 3.3 y 3.4 cuáles son las viscosidades mínimas necesarias para cada una de esas velocidades, en función de

cuatro índice de viscosidad (95, 120, 160 y 240). Para 400 min⁻¹ se muestra cómo a medida que se aumenta el índice de viscosidad es necesario la utilización de un aceite menor grado de viscosidad. Lo cuál se debe a una mayor estabilidad del aceite respecto a la temperatura.

3.7. Viscosidad real de funcionamiento

Las velocidades de 500 min⁻¹ y 630 min⁻¹ coinciden para la posición cinco y seis de la relación de transmisión 1:2, con la posición uno y dos de la relación de transmisión 1,25:1, por lo que se calculó la viscosidad real del aceite a la máxima temperatura estimada (54 °C), para las 22 velocidades de rotación que desarrolla el torno 16K20.

Tabla 3.5. Viscosidad real de funcionamiento para el rodamiento 7216.

N (min ⁻¹)	IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
12,5	578 (1 500)	626 (1 500)	481 (1 000)	563 (1 000)
16	404 (1 000)	436 (1 000)	481 (1 000)	395 (680)
20	404 (1 000)	436 (1 000)	338 (680)	395 (680)
25	286 (680)	308 (680)	338 (680)	274 (460)
31,5	286 (680)	308 (680)	236 (460)	274 (460)
40	202 (460)	216 (460)	236 (460)	195 (320)
50	202 (460)	155 (320)	169 (320)	195 (320)
63	146 (320)	155 (320)	169 (320)	195 (320)
80	105 (220)	111 (220)	121 (220)	121 (220)
100	105 (220)	111 (220)	121 (220)	95 (150)
125	74 (150)	78 (150)	84 (150)	95 (150)
160	74 (150)	78 (150)	58 (100)	65 (100)
200	51 (100)	54 (100)	58 (100)	65 (100)
250	51 (100)	54 (100)	40 (68)	45 (68)
315	37 (68)	38 (68)	40 (68)	45 (68)
400	37 (68)	38 (68)	28 (46)	31 (46)
500	26 (46)	27 (46)	28 (46)	31 (46)
630	26 (46)	19 (32)	20 (32)	22 (32)
800	19 (32)	19 (32)	20 (32)	22 (32)
1000	146 (320)	155 (320)	169 (320)	123 (220)

1250	146 (320)	111 (220)	111 (220)	123 (220)
1600	105 (220)	111 (220)	111 (220)	123 (220)

Tabla 3.6. Viscosidad real de funcionamiento para el rodamiento NN 3020.

N (min⁻¹)	IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
12,5	578 (1 500)	626 (1 500)	481 (1 000)	563 (1 000)
16	404 (1 000)	436 (1 000)	481 (1 000)	395 (680)
20	404 (1 000)	308 (680)	338 (680)	395 (680)
25	286 (680)	308 (680)	338 (680)	274 (460)
31,5	286 (680)	216 (460)	236 (460)	274 (460)
40	202 (460)	216 (460)	236 (460)	274 (460)
50	202 (460)	216 (460)	236 (460)	274 (460)
63	146 (320)	155 (320)	121 (220)	121 (220)
80	105 (220)	111 (220)	121 (220)	121 (220)
100	105 (220)	111 (220)	84 (150)	95 (150)
125	74 (150)	78 (150)	84 (150)	95 (150)
160	74 (150)	78 (150)	58 (100)	65 (100)
200	51 (100)	54 (100)	58 (100)	65 (100)
250	51 (100)	54 (100)	40 (68)	45 (68)
315	37 (68)	38 (68)	40 (68)	45 (68)
400	37 (68)	27 (46)	28 (46)	31 (46)
500	26 (46)	27 (46)	28 (46)	31 (46)
630	19 (32)	19 (32)	20 (32)	22 (32)
800	19 (32)	19 (32)	20 (32)	22 (32)
1000	146 (320)	155 (320)	121 (220)	123 (220)
1250	105 (220)	111 (220)	121 (220)	123 (220)
1600	105 (220)	111 (220)	121 (220)	95 (150)

3.8. Cálculo de la relación de viscosidad

Para el cálculo de la relación de viscosidad se tuvo en cuenta la viscosidad real de funcionamiento y la viscosidad mínima necesaria para las 22 velocidades de rotación en el rodamiento 7216 (Tabla 3.7) y en el rodamiento NN 3020 (Tabla 3.8).

Tabla 3.7. Relación de viscosidad para el rodamiento 7216.

N (min -1)	IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
12,5	1,24	1,34	1,03	1,20
16	1,06	1,14	1,26	1,04
20	1,27	1,37	1,07	1,25
25	1,09	1,17	1,28	1,04
31,5	1,31	1,41	1,08	1,26
40	1,13	1,21	1,32	1,09
50	1,36	1,05	1,14	1,32
63	1,19	1,26	1,37	1,58
80	1,04	1,10	1,20	1,22
100	1,25	1,32	1,44	1,13
125	1,06	1,11	1,20	1,36
160	1,30	1,37	1,02	1,14
200	1,08	1,15	1,23	1,38
250	1,31	1,38	1,02	1,15
315	1,12	1,15	1,21	1,36
400	1,37	1,41	1,04	1,15
500	1,18	1,23	1,27	1,41
630	1,37	1	1,05	1,16
800	1,20	1,27	1,33	1,47
1000	1,20	1,28	1,40	1,02
1250	1,35	1,03	1,12	1,14
1600	1,09	1,16	1,26	1,28

Tabla 3.8. Relación de viscosidad para el rodamiento NN 3020.

N (min -1)	IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
12,5	1,28	1,38	1,06	1,24
16	1,10	1,18	1,31	1,07
20	1,32	1,01	1,10	1,29
25	1,12	1,21	1,32	1,07
31,5	1,36	1,03	1,13	1,30
40	1,17	1,25	1,37	1,59
50	1,41	1,51	1,65	1,92
63	1,24	1,31	1,02	1,02
80	1,08	1,14	1,25	1,25
100	1,30	1,37	1,04	1,17
125	1,10	1,16	1,25	1,42
160	1,34	1,42	1,05	1,18
200	1,11	1,17	1,26	1,41
250	1,34	1,42	1,05	1,18
315	1,16	1,19	1,25	1,40
400	1,42	1,04	1,08	1,19
500	1,18	1,23	1,27	1,41
630	1,05	1,05	1,11	1,22
800	1,27	1,27	1,33	1,47
1000	1,25	1,32	1,03	1,05
1250	1,01	1,07	1,16	1,18
1600	1,14	1,21	1,21	1,03

3.9. Grados ISO alternativos para índice de viscosidad 95, 120, 160 y 240.

Calculados los grados de aceites alternativos, para la lubricación de ambos rodamientos, y tomando en consideración que el método de lubricación es el de circulación, donde el valor de relación de viscosidad está entre 1 y 2,5; se calculó los para grados ISO para aceites alternativos,

con índice de viscosidad de 95 (Tabla 3.9 y Tabla 3.13), 120 (Tabla 3.10 y Tabla 3.14), 160 (Tabla 3.11 y Tabla 3.15) y 240 (Tabla 3.12 y Tabla 3.16); para rodamientos 7216 y NN 3020.

Tabla 3.9. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento 7216 según el índice de viscosidad 95.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 95)		
12,5	1,237 (ISO VG 1 500)		
16	1,060 (ISO VG 1 000)	1,517 (ISO VG 1500)	
20	1,274 (ISO VG 1 000)	1,823 (ISO VG 1500)	
25	1,087 (ISO VG 680)	1,536 (ISO VG 1 000)	2,197 (ISO VG 1500)
31,5	1,311 (ISO VG 680)	1,853 (ISO VG 1 000)	
40	1,134 (ISO VG 460)	1,606 (ISO VG 680)	
50	1,364 (ISO VG 460)	1,932 (ISO VG 680)	
63	1,186 (ISO VG 320)	1,642 (ISO VG 460)	
80	1,039 (ISO VG 220)	1,445 (ISO VG 320)	2,000 (ISO VG 460)
100	1,25 (ISO VG 220)	1,738 (ISO VG 320)	2,404 (ISO VG 460)
125	1,057 (ISO VG 150)	1,500 (ISO VG 220)	2,085 (ISO VG 320)
160	1,298 (ISO VG 150)	1,842 (ISO VG 220)	
200	1,085 (ISO VG 100)	1,574 (ISO VG 150)	2,234 (ISO VG 220)
250	1,307 (ISO VG 100)	1,897 (ISO VG 150)	
315	1,211 (ISO VG 68)	1,545 (ISO VG 100)	2,422 (ISO VG 150)
400	1,370 (ISO VG 68)	1,888 (ISO VG 100)	
500	1,181 (ISO VG 46)	1,681 (ISO VG 68)	2,318 (ISO VG 100)
630	1,368 (ISO VG 46)	1,947 (ISO VG 68)	
800	1,200 (ISO VG 32)	1,733 (ISO VG 46)	2,466 (ISO VG 68)
1000	1,206 (ISO VG 320)	1,669 (ISO VG 460)	2,363 (ISO VG 680)
1250	1,351 (ISO VG 320)	1,870 (ISO VG 460)	
1600	1,093 (ISO VG 220)	1,520 (ISO VG 320)	2,104 (ISO VG 460)

Tabla 3.10. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento 7216 según el índice de viscosidad 120.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 120)		
12,5	1,340 (ISO VG 1500)		
16	1,144 (ISO VG 1 000)	1,645 (ISO VG 1500)	
20	1,375 (ISO VG 1 000)	1,977 (ISO VG 1500)	
25	1,171 (ISO VG 680)	1,657 (ISO VG 1 000)	2,384 (ISO VG 1500)
31,5	1,412 (ISO VG 680)	2,000 (ISO VG 1 000)	
40	1,213 (ISO VG 460)	1,730 (ISO VG 680)	2,449 (ISO VG 1000)
50	1,047 (ISO VG 320)	1,459 (ISO VG 460)	2,081 (ISO VG 680)
63	1,260 (ISO VG 320)	1,756 (ISO VG 460)	2,504 (ISO VG 680)
80	1,099 (ISO VG 220)	1,534 (ISO VG 320)	2,138 (ISO VG 460)
100	1,321 (ISO VG 220)	1,845 (ISO VG 320)	
125	1,114 (ISO VG 150)	1,585 (ISO VG 220)	2,214 (ISO VG 320)
160	1,368 (ISO VG 150)	1,947 (ISO VG 220)	
200	1,148 (ISO VG 100)	1,659 (ISO VG 150)	2,361 (ISO VG 220)
250	1,384 (ISO VG 100)	2 (ISO VG 150)	
315	1,151 (ISO VG 68)	1,636 (ISO VG 100)	2,363 (ISO VG 150)
400	1,407 (ISO VG 68)	2 (ISO VG 100)	
500	1,227 (ISO VG 46)	1,727 (ISO VG 68)	2,454 (ISO VG 100)
630	1,000 (ISO VG 32)	1,421 (ISO VG 46)	2,000 (ISO VG 68)
800	1,266 (ISO VG 32)	1,8 (ISO VG 46)	
1000	1,280 (ISO VG 320)	1,785 (ISO VG 460)	
1250	1,027 (ISO VG 220)	1,435 (ISO VG 320)	2,000 (ISO VG 460)
1600	1,156 (ISO VG 220)	1,614 (ISO VG 320)	2,250 (ISO VG 460)

Tabla 3.11. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento 7216 según el índice de viscosidad 160.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 160)		
12,5	1,340 (ISO VG 1000)	1,486 (ISO VG 1500)	
16	1,144 (ISO VG 1 000)	1,821 (ISO VG 1500)	
20	1,375 (ISO VG 680)	1,517 (ISO VG 1000)	2,189 (ISO VG 1500)
25	1,171 (ISO VG 680)	1,828 (ISO VG 1 000)	
31,5	1,412 (ISO VG 460)	1,550 (ISO VG 680)	2,206 (ISO VG 1000)
40	1,213 (ISO VG 460)	1,898 (ISO VG 680)	
50	1,047 (ISO VG 320)	1,594 (ISO VG 460)	2,283 (ISO VG 680)
63	1,260 (ISO VG 320)	1,918 (ISO VG 460)	
80	1,099 (ISO VG 220)	1,673 (ISO VG 320)	2,336 (ISO VG 460)
100	1,321 (ISO VG 220)	2,011 (ISO VG 320)	
125	1,114 (ISO VG 150)	1,728 (ISO VG 220)	2,414 (ISO VG 320)
160	1,368 (ISO VG 100)	1,473 (ISO VG 150)	2,122 (ISO VG 220)
200	1,148 (ISO VG 100)	1,787 (ISO VG 150)	
250	1,384 (ISO VG 68)	1,487 (ISO VG 100)	2,153 (ISO VG 150)
315	1,151 (ISO VG 68)	1,757 (ISO VG 100)	
400	1,407 (ISO VG 46)	1,481 (ISO VG 68)	2,148 (ISO VG 100)
500	1,227 (ISO VG 46)	1,818 (ISO VG 68)	
630	1 (ISO VG 32)	1,473 (ISO VG 46)	2,105 (ISO VG 68)
800	1,266 (ISO VG 32)	1,866 (ISO VG 46)	
1000	1,280 (ISO VG 320)	1,950 (ISO VG 460)	
1250	1,027 (ISO VG 220)	1,564 (ISO VG 320)	2,185 (ISO VG 460)
1600	1,156 (ISO VG 220)	1,760 (ISO VG 320)	2,458 (ISO VG 460)

Tabla 3.12. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento 7216 según el índice de viscosidad 240.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 240)		
12,5	1,205 (ISO VG 1000)	1,751 (ISO VG 1500)	
16	1,036 (ISO VG 680)	1,480 (ISO VG 1000)	2,146 (ISO VG 1500)
20	1,246 (ISO VG 680)	1,779 (ISO VG 1000)	
25	1,041 (ISO VG 460)	1,501 (ISO VG 680)	2,258 (ISO VG 1000)
31,5	1,256 (ISO VG 460)	1,811 (ISO VG 680)	
40	1,095 (ISO VG 320)	1,539 (ISO VG 460)	2,219 (ISO VG 680)
50	1,317 (ISO VG 320)	1,851 (ISO VG 460)	
63	1,585 (ISO VG 320)	2,227 (ISO VG 460)	
80	1,217 (ISO VG 220)	1,930 (ISO VG 320)	
100	1,119 (ISO VG 150)	1,464 (ISO VG 220)	2,321 (ISO VG 320)
125	1,342 (ISO VG 150)	1,757 (ISO VG 220)	
160	1,122 (ISO VG 100)	1,666 (ISO VG 150)	2,157 (ISO VG 220)
200	1,361 (ISO VG 100)	2,021 (ISO VG 150)	
250	1,153 (ISO VG 68)	1,667 (ISO VG 100)	2,435 (ISO VG 150)
315	1,363 (ISO VG 68)	1,969 (ISO VG 100)	
400	1,111 (ISO VG 46)	1,666 (ISO VG 68)	2,407 (ISO VG 100)
500	1,363 (ISO VG 46)	2,045 (ISO VG 68)	
630	1,105 (ISO VG 32)	1,631 (ISO VG 46)	2,368 (ISO VG 68)
800	1,000 (ISO VG 22)	1,466 (ISO VG 32)	2,066 (ISO VG 46)
1000	1,016 (ISO VG 220)	1,611 (ISO VG 320)	2,264 (ISO VG 460)
1250	1,138 (ISO VG 220)	1,805 (ISO VG 320)	
1600	1,281 (ISO VG 220)	2,031 (ISO VG 320)	

Tabla 3.13. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento NN 3020, según el índice de viscosidad 95.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 95)		
12,5	1,278 (ISO VG 1 500)		
16	1,097 (ISO VG 1 000)	1,510 (ISO VG 1500)	
20	1,320 (ISO VG 1 000)	1,888 (ISO VG 1500)	
25	1,121 (ISO VG 680)	1,584 (ISO VG 1 000)	2,266 (ISO VG 1500)
31,5	1,361 (ISO VG 680)	1,923 (ISO VG 1 000)	
40	1,174 (ISO VG 460)	1,662 (ISO VG 680)	2,348 (ISO VG 1000)
50	1,412 (ISO VG 460)	2,000 (ISO VG 680)	
63	1,237 (ISO VG 320)	1,711 (ISO VG 460)	2,423 (ISO VG 680)
80	1,082 (ISO VG 220)	1,505 (ISO VG 320)	2,082(ISO VG 460)
100	1,296 (ISO VG 220)	1,802 (ISO VG 320)	2,494(ISO VG 460)
125	1,104 (ISO VG 150)	1,567 (ISO VG 220)	2,179 (ISO VG 320)
160	1,345 (ISO VG 150)	1,909 (ISO VG 220)	
200	1,108 (ISO VG 100)	1,608 (ISO VG 150)	2,282 (ISO VG 220)
250	1,342 (ISO VG 100)	1,947 (ISO VG 150)	
315	1,156 (ISO VG 68)	1,593 (ISO VG 100)	2,312 (ISO VG 150)
400	1,423 (ISO VG 68)	1,961 (ISO VG 100)	
500	1,181 (ISO VG 46)	1,681 (ISO VG 68)	2,318 (ISO VG 100)
630	1,055(ISO VG 32)	1,444 (ISO VG 46)	2,055 (ISO VG 68)
800	1,266 (ISO VG 32)	1,733 (ISO VG 46)	2,466 (ISO VG 68)
1000	1,247 (ISO VG 320)	1,726 (ISO VG 460)	2,444 (ISO VG 680)
1250	1,009 (ISO VG 220)	1,403 (ISO VG 320)	1,942 (ISO VG 460)
1600	1,141 (ISO VG 220)	1,586 (ISO VG 320)	2,195 (ISO VG 460)

Tabla 3.14. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento NN 3020, según el índice de viscosidad 120.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 120)		
12,5	1,387 (ISO VG 1500)		
16	1,184 (ISO VG 1 000)	1,703 (ISO VG 1 500)	
20	1,006 (ISO VG 680)	1,424 (ISO VG 1 000)	2,049 (ISO VG 1500)
25	1,207 (ISO VG 680)	1,709 (ISO VG 1 000)	2,458 (ISO VG 1500)
31,5	1,028 (ISO VG 460)	1,466 (ISO VG 680)	2,076 (ISO VG 1000)
40	1,255 (ISO VG 460)	1,790 (ISO VG 680)	
50	1,510 (ISO VG 460)	1,153 (ISO VG 680)	
63	1,313 (ISO VG 320)	1,830 (ISO VG 460)	
80	1,144 (ISO VG 220)	1,597 (ISO VG 320)	2,226(ISO VG 460)
100	1,370 (ISO VG 220)	1,913 (ISO VG 320)	
125	1,164 (ISO VG 150)	1,656 (ISO VG 220)	2,313 (ISO VG 320)
160	1,418 (ISO VG 150)	2,018 (ISO VG 220)	
200	1,173(ISO VG 100)	1,695 (ISO VG 150)	2,413(ISO VG 220)
250	1,421 (ISO VG 100)	2,052 (ISO VG 150)	
315	1,187 (ISO VG 68)	1,687 (ISO VG 100)	2,437 (ISO VG 150)
400	1,038 (ISO VG 46)	1,461(ISO VG 68)	2,076 (ISO VG 100)
500	1,227 (ISO VG 46)	1,727 (ISO VG 68)	2,454 (ISO VG 100)
630	1,055 (ISO VG 32)	1,500 (ISO VG 46)	2,111 (ISO VG 68)
800	1,266 (ISO VG 32)	1,800 (ISO VG 46)	
1000	1,324 (ISO VG 320)	1,846 (ISO VG 460)	
1250	1,067 (ISO VG 220)	1,490 (ISO VG 320)	2,076 (ISO VG 460)
1600	1,206 (ISO VG 220)	1,684 (ISO VG 320)	2,347 (ISO VG 460)

Tabla 3.15. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento NN 3020, según el índice de viscosidad 160.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 160)		
12,5	1,064 (ISO VG 1000)	1,535 (ISO VG 1500)	
16	1,307 (ISO VG 1 000)	1,885 (ISO VG 1500)	
20	1,104 (ISO VG 680)	1,571 (ISO VG 1000)	2,267 (ISO VG 1500)
25	1,325 (ISO VG 680)	1,886 (ISO VG 1 000)	
31,5	1,123 (ISO VG 460)	1,609 (ISO VG 680)	2,290 (ISO VG 1000)
40	1,372 (ISO VG 460)	1,965 (ISO VG 680)	
50	1,650 (ISO VG 460)	2,363 (ISO VG 680)	
63	1,025 (ISO VG 220)	1,432 (ISO VG 320)	2,000 (ISO VG 460)
80	1,247 (ISO VG 220)	1,742 (ISO VG 320)	2,432 (ISO VG 460)
100	1,037 (ISO VG 150)	2,493 (ISO VG 220)	
125	1,253 (ISO VG 150)	1,805 (ISO VG 150)	
160	1,054 (ISO VG 100)	1,527 (ISO VG 150)	2,2 (ISO VG 220)
200	1,260 (ISO VG 100)	1,826 (ISO VG 150)	
250	1,052 (ISO VG 68)	1,526 (ISO VG 100)	2,210 (ISO VG 150)
315	1,25 (ISO VG 68)	1,812 (ISO VG 100)	
400	1,076 (ISO VG 46)	1,538 (ISO VG 68)	2,230 (ISO VG 100)
500	1,272 (ISO VG 46)	1,818 (ISO VG 68)	
630	1,111 (ISO VG 32)	1,555 (ISO VG 46)	2,222 (ISO VG 68)
800	1,333 (ISO VG 32)	1,866 (ISO VG 46)	
1000	1,034 (ISO VG 220)	1,444 (ISO VG 320)	2,017 (ISO VG 460)
1250	1,163 (ISO VG 220)	1,625 (ISO VG 320)	2,269 (ISO VG 460)
1600	1,206 (ISO VG 220)	1,836 (ISO VG 320)	

Tabla 3.16. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento NN 3020, según el índice de viscosidad 240.

N (min -1)	Relación de viscosidad (IV 240)		
12,5	1,245 (ISO VG 1000)	1,809 (ISO VG 1500)	
16	1,073 (ISO VG 680)	1,529 (ISO VG 1000)	2,222 (ISO VG 1500)
20	1,290 (ISO VG 680)	1,839 (ISO VG 1000)	
25	1,074 (ISO VG 460)	1,549 (ISO VG 680)	2,207 (ISO VG 1000)
31,5	1,304 (ISO VG 460)	1,880 (ISO VG 680)	
40	1,593 (ISO VG 460)	2,296 (ISO VG 680)	
50	1,916 (ISO VG 460)	1,363 (ISO VG 320)	1,916 (ISO VG 460)
63	1,042 (ISO VG 220)	1,652 (ISO VG 320)	2,322 (ISO VG 460)
80	1,268 (ISO VG 220)	2,010 (ISO VG 320)	
100	1,172 (ISO VG 150)	1,518 (ISO VG 220)	2,407 (ISO VG 320)
125	1,417 (ISO VG 150)	1,835 (ISO VG 220)	
160	1,181 (ISO VG 100)	1,727 (ISO VG 150)	2,236 (ISO VG 220)
200	1,413 (ISO VG 100)	2,065 (ISO VG 150)	
250	1,184 (ISO VG 68)	1,710 (ISO VG 100)	2,500 (ISO VG 150)
315	1,406 (ISO VG 68)	2,031 (ISO VG 100)	
400	1,192 (ISO VG 46)	1,730 (ISO VG 68)	2,500 (ISO VG 100)
500	1,409 (ISO VG 46)	2,045 (ISO VG 68)	
630	1,222 (ISO VG 32)	1,722 (ISO VG 46)	2,500 (ISO VG 68)
800	1,466 (ISO VG 22)	2,066 (ISO VG 32)	
1000	1,051 (ISO VG 220)	1,666 (ISO VG 320)	2,341 (ISO VG 460)
1250	1,182 (ISO VG 220)	1,875 (ISO VG 320)	
1600	1,032 (ISO VG 150)	1,336 (ISO VG 220)	

Aunque para cada número de revoluciones se propuso de dos a tres clases de aceites para la lubricación de los rodamientos del husillo de la caja de avance del torno 16k20. Mediante entrevistas realizadas a los operarios del torno del taller de mantenimiento de la empresa

productora del níquel Ernesto Che Guevara. Donde se evidenció que por lo general todos realizaban el maquinado de la pieza con velocidades de 315 min^{-1} y 400 min^{-1} , puesto que eran velocidades intermedias y le permitían lograr un avance significativo sin necesidad de mucha precisión. Por ende se decidió tomar estos valores de referencia para la propuesta de las clases de aceites alternativos que garantizaran la correcta lubricación.

3.10. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio

Mediante los programas desarrollados por la compañía Widman (2009), “Módulos para calcular el índice de viscosidad” y “El cálculo de la curva de viscosidad” se desarrollaron los diagramas de selección de aceites industriales para índices de viscosidad 95 (Figura 3.8), al igual que de 120, 160 y 240 (Anexos 1, Figura 1, 2 y 3). Ampliando así el espectro de selección de aceites para la lubricación de ambos rodamientos. Teniendo en cuenta que hasta el momento solo se había registrado en la literatura científica acreditada (FAG, 2003; SKF, 2008; NKE, 2010) para índice de viscosidad 95. Para la construcción de los diagramas se empleó el tabulador Excel y se trabajó con la escala logarítmica de base dos.

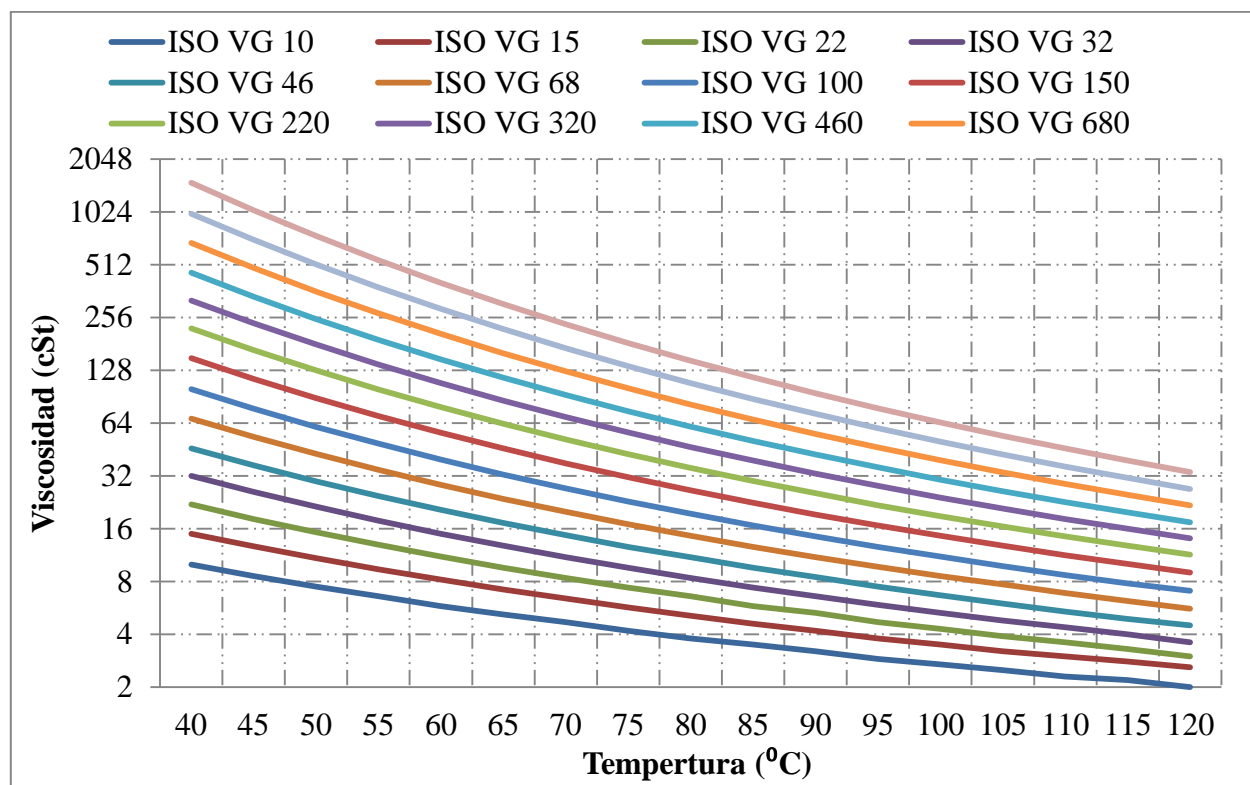


Figura 3.8. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 95.

3.11. Análisis económico

La selección de la clase de aceites para la lubricación de rodamientos influye determinantemente en la vida útil de los rodamientos. Con una buena selección y una correcta lubricación se logra la vida máxima estimada para condiciones de viscosidad idónea, esto evita la compra de los rodamientos que día tras día se incrementan más los precios, esto trae un considerable ahorro a la economía. El bajo rendimiento de cualquier máquina producido por deficiente mantenimiento requiere más uso de combustible fósiles y consecuentemente más gastos para la economía nacional. Según el precio establecido por FAG (2014) para el rodamiento 7216 está valorado en 240 €. Mientras que el NN 3020, está valorado en 225 €. Llegando a la conclusión de que con la correcta lubricación del rodamiento se ahorrarían alrededor de 690 €, por la sustitución de dichos rodamientos por fallas técnicas.

3.12. Análisis ambiental

Hoy día el hombre se enfrenta al desafío mayor de todos los tiempos. Cada momento que pasa nuestro planeta se contamina más y más. Producto del vertimiento de residuos sólidos y líquidos al medio ambiente. Afectando así las diferentes formas de vida tanto de origen animal como vegetal, y los recursos naturales imprescindibles para vivir. El aceite industrial, que es utilizado en la lubricación de rodamientos rígidos de bolas es considerado como un gran agente contaminante. El vertimiento del mismo en tierras como en aguas puede causar la muerte a cientos de animales y plantas. Afectando directamente al hombre. Rodríguez, (2015) señala que estos residuales representan más del 60 % de los aceites lubricantes consumidos, lo que los convierte en uno de los contaminantes más abundantes en la actualidad.

Por otra parte el ruido ocasionado por las vibraciones de un rodamiento defectuoso se convierte en un agente contaminante. Provocando fuerte estrés y dolor de cabeza en los operarios de las máquinas que son expuesto al ruido. El bajo rendimiento de cualquier máquina producido por deficiente mantenimiento requiere más uso de combustibles fósiles y consecuentemente más emisión de residuos contaminantes al medio ambiente.

3.13. Conclusiones del capítulo

- Para la selección de la clase de aceites según el criterio de relación de viscosidad se demostró que el índice de viscosidad 240 mostraba menor variación de sus propiedades ante la incidencia de la temperatura.
- Quedó demostrado que con la correcta selección de la clase de aceite se puede prolongar considerablemente la vida útil de cada rodamiento, influyendo de manera directa en la economía.
- Se creó un diagrama para la selección de las clases de aceites, según las diferentes temperaturas que puede alcanzar el rodamiento en su estado de funcionamiento.

CONCLUSIONES GENERALES

- Para lograr una lubricación eficaz en los rodamiento 7216, que opera a 315 min^{-1} con una viscosidad mínima necesaria de $33 \text{ mm}^2/\text{s}$, con la utilización de un aceite de índice de viscosidad 95, se recomienda el empleo de un aceite ISO VG 68; y como aceites alternativos un ISO VG 100 y ISO VG 150.
- Para lograr una lubricación eficaz en el rodamiento NN 3020, que opera a 400 min^{-1} con una viscosidad mínima necesaria de $26 \text{ mm}^2/\text{s}$, con la utilización de un aceite de índice de viscosidad 95, se recomienda el empleo de aceites ISO VG 68; y como aceite alternativo un ISO VG 100.
- Quedó caracterizado el método de lubricación por circulación, donde se tuvo en cuenta las limitaciones y restricciones de dicho método.
- Quedó establecido el procedimiento para la selección de las clases de aceites para la lubricación mediante el método por circulación de los rodamientos 7216 y NN 3020, siendo los aceites de IV 240 los que presentan mejor comportamiento ante las temperaturas más elevadas.
- Basados en los elementos teóricos antes expuestos se crearon los diagramas de índices de viscosidad 95, 120, 160 y 240, con temperaturas de 40°C hasta 120°C , que reflejan el comportamiento de los 15 tipos aceites, con la influencia de las temperaturas.

RECOMENDACIONES

- Utilizar el procedimiento mediante el algoritmo matemático establecido, que permita la selección de las clases de aceites alternativos, para la lubricación de rodamientos por el método de circulación.
- Perfeccionar el procedimiento utilizado, considerando otros métodos cómo la lubricación por baño de aceite o por cantidad mínima.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E. 2013.** *Tribología: fricción, desgaste y lubricación*. Santa Clara, Cuba.
- Albarracín, P; Pinzón, R. 2004.** *Cálculo del ahorro de energía por menor fricción*. No 144, Medellín, Colombia. pág137-149. ISSN 0012-7353.
- Budynas, R; Keith, J. 2008.** *Diseño de Ingeniería Mecánica DE Shigley*. Octava Edición. México D.F. ISBN-13: 978 - 870 -10 - 6404 -7.
- BDC International S.A. 2010.** Seminario de rodamientos Tema: Lubricación y montaje. Moa. pág. 29.
- Cabañas, Miguel Alberto. 2011.** *Monitorización y clasificación de defectos en rodamientos rígidos de bolas*. Universidad Carlos III. Loganes. Tesis de grado
- Delgado, J. 2006.** *Sistemas de lubricación a bordo*. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Tesis de grado.
- FAG. 1997.** *Averías de los rodamientos*. Alemania.
- FAG. 2014.** *Lista de precios*. Alemania.
- FAG. 2003.** *Lubricación de rodamiento*. Sant Cugat del Vallès, Barcelona: España.
- FAG. 2007.** *Sealed FAG spherical roller bearings*. Alemania.
- Farías, J. 2008.** *Diseño e implantación de un plan de lubricación*. Guayaquil Ecuador.
- García, Toll. 2007.** *Capacidad de carga estática en rodamientos*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba. pág31-38.
- Gómez, G. 2014.** *Metodología de selección de indicadores óptimos para el análisis y diagnosis del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos*. Tesis doctoral.
- Laminado, L. 2014.** *Modelo de rodamiento utilizando técnica m.e.s. aplicación al estudio del deslizamiento en la zona de carga*. Tesis doctoral.
- Manual de Servicio. 1978.** Pasaporte del Torno 16k20. Rusia.
- Martín, Miguel Angel. 2009.** Estudio de la evolución de las tensiones sobre la pista externa de un rodamiento. Universidad Carlos III. Tesis de grado.
- Martín, F. 1968.** Teoría y práctica del rozamiento. La Habana, Cuba. ISPJAE.

- Navarrete, E; Gonzáles, J. 1986.** Mantenimiento industrial. Tomo 1, ISPJAE, La Habana.
- NKE Bearings. 2010.***General catalogue*. Steyr: D-36043 Fulda, 2010. 2000/05 DE.
- NTN. 2004.** *Rodamientos de bolas y rodillos*.
- Orellana, J. 2005.** *Estudio de lubricación para el ahorro de recursos en una empresa*. Guatemala.
- SKF. 2008.** *Catálogo general*. Suecia.
- SKF. 2009.** *Manual de mantenimiento de Rodamiento*. Suecia.
- Shell. 2011.** *Introducción a los lubricantes y a la lubricación*. Madrid, España.
- Widman. 2005.** *Fundamentos de la Lubricación, Fricción y Desgaste*. Santa Cruz.
- Widman. 2009.** *Cálculo de la curva de viscosidad*. [En línea] 2009. [Citado el: 12 de Enero de 2014.] Disponible en: <http://www.widman.biz>.
- Widman. 2009.** *Índice de viscosidad*. [En línea] 2009. [Citado el: 12 de Enero de 2014.] Disponible en: <http://www.widman.biz>.

ANEXO 1

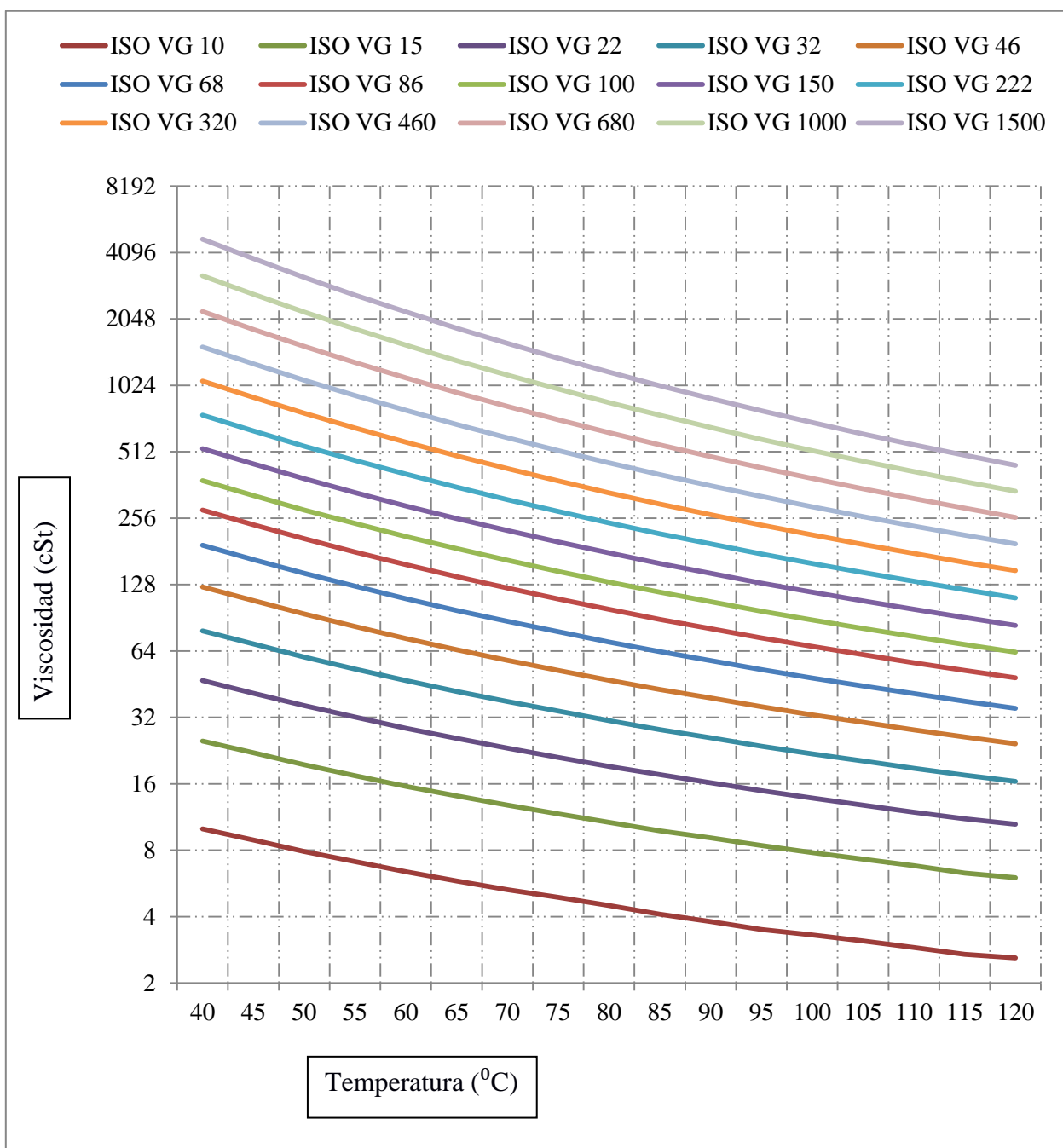


Figura 1. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 95.

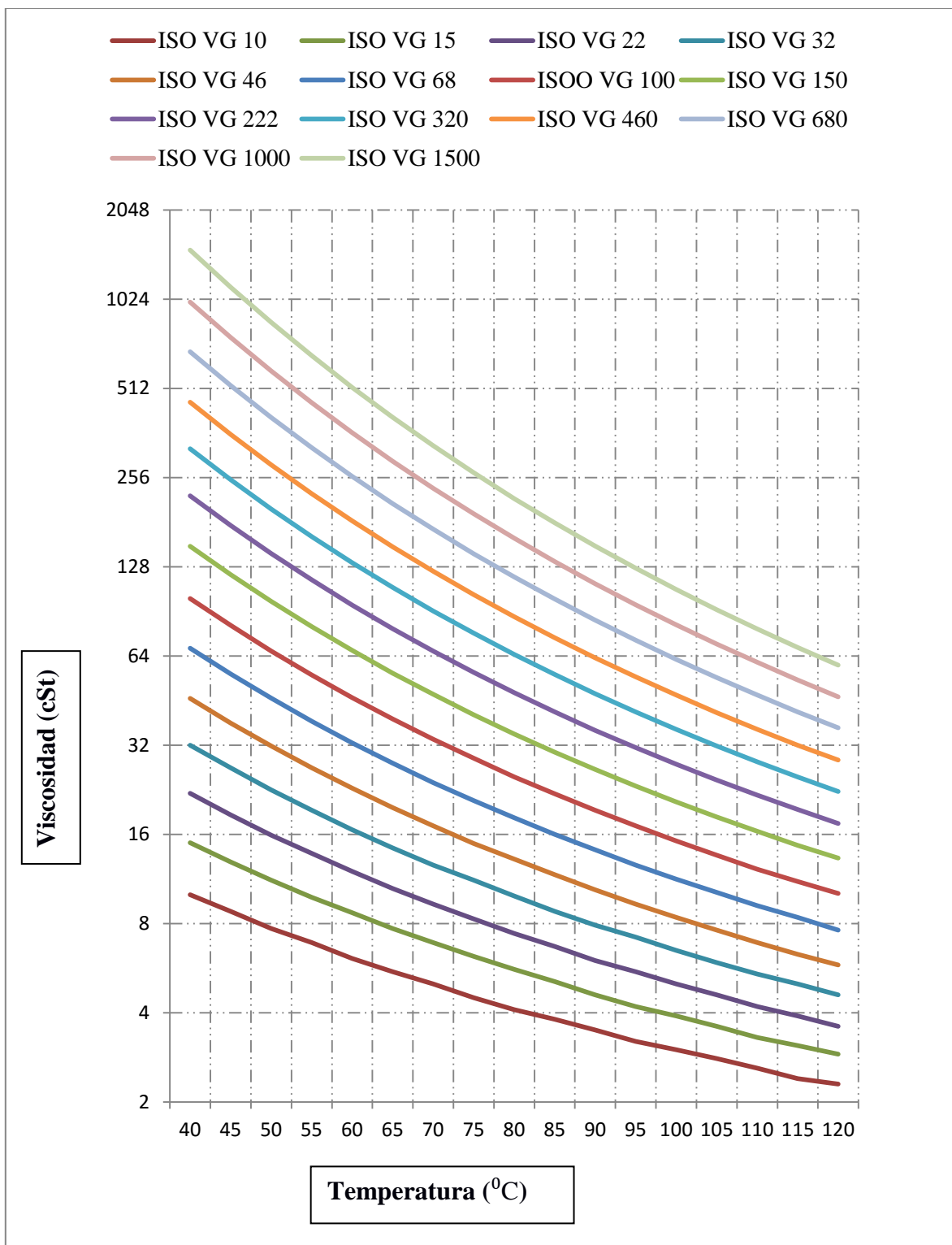


Figura 2. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 160.

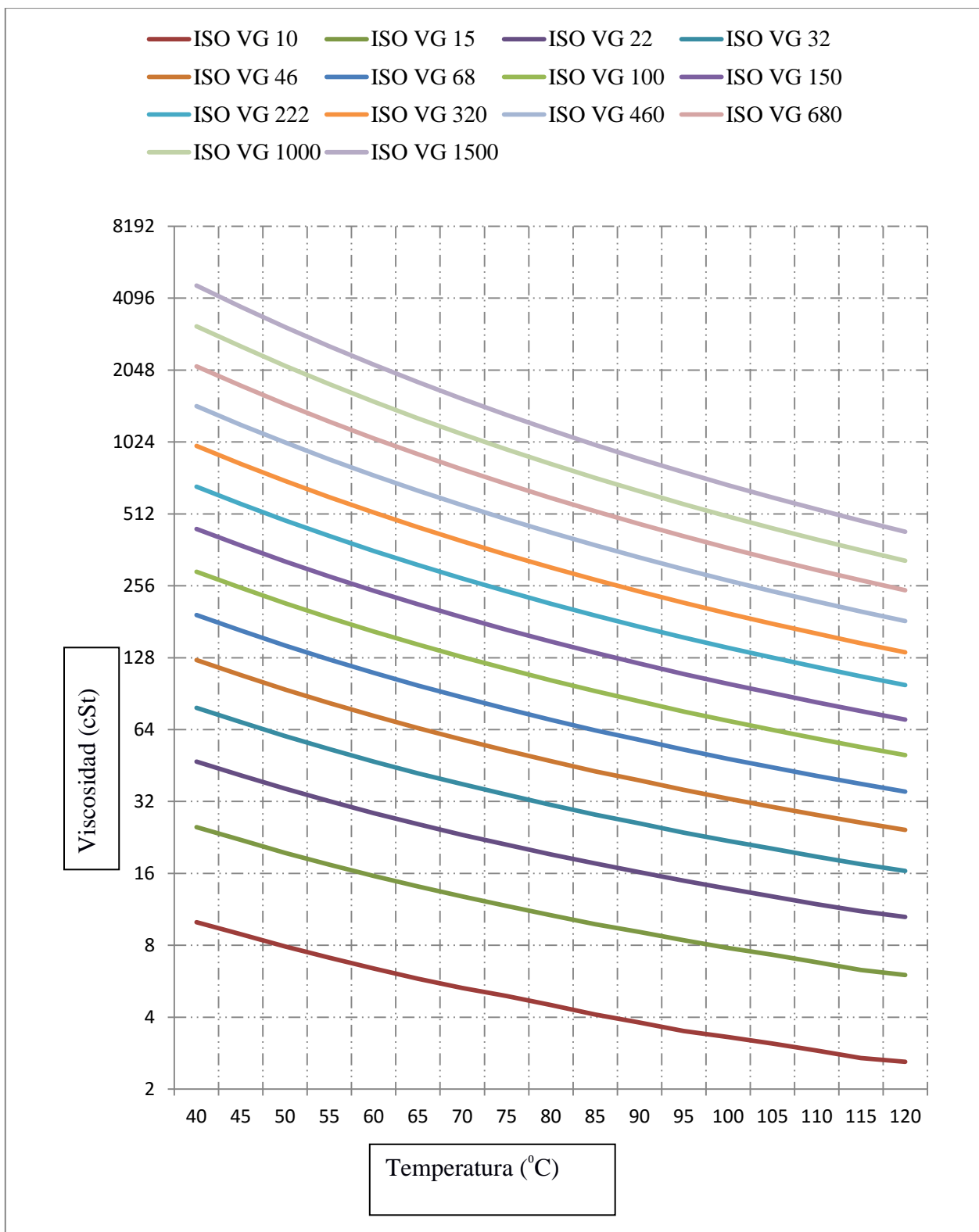


Figura 3. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 240.