

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

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERÍA MECÁNICA**

**INFLUENCIA DE LA LUBRICACIÓN EN LA LONGEVIDAD DEL
RODAMIENTO RÍGIDO DE BOLAS 6208 BAJO CONDICIONES
DE TRABAJO VARIABLE**

Autor: Yeinier Rodríguez Laborit.

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

Prof. Tit., Ing. Isnel Rodríguez González, Dr. C.

MOA, 2015

“AÑO 57 DE LA REVOLUCIÓN”

DECLARACIÓN DE AUTOR

Yo Yeinier Rodríguez Laborit:

Autor de este trabajo de diploma así como los tutores, Amauris Gilbert Hernández e Isnel Rodríguez González declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Yeinier Rodríguez Laborit

Tutor: Amauris Gilbert Hernández

Tutor: Isnel Rodríguez González

PENSAMIENTO

Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría, y que obtiene la inteligencia. Porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata, y sus frutos más que el oro fino. Más preciosa es que las piedras preciosas, y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella. Largura de días está en su mano derecha, en su izquierda, riquezas y honra. Sus caminos son caminos deleitosos, y todas sus veredas paz. Ella es árbol de vida a los que de ella echan mano, y bienaventurados son los que la retienen.

Proverbios: 3: 13 - 18.

DEDICATORIA

Son muchos los caminos a seguir para lograr un triunfo, siempre te acompaña tropiezos, alegrías y sufrimientos, pero el que le creé a Dios todo le es posible. Con el amor, el cariño, la fuerza, la amistad, la comprensión y el apoyo incondicional brindado por muchas personas que en este momento tan importante y esperado no puedo dejar de mencionar, por todo lo que significa para mí. Con todo el amor del mundo dedico este trabajo.

A mi Dios por estar siempre conmigo y guiarme por el camino correcto.

A mi pequeña hija Yeilin que está por nacer, por ser mi principal fuente de energía para lograr el título como profesional.

A mis padres como muestra del amor infinito que les tengo y por ser la fuente de inspiración en todo lo que hago.

A mi querida esposa Dailin Sánchez Bauta por el amor que nos une, por su comprensión en todo momento y porque sin su apoyo la terminación del trabajo hubiera sido casi imposible.

AGRADECIMIENTOS

En este mundo no hay nada que tú no te propongas sembrar y no lograr recoger, ni caminos que por duros y empedrados que sean no se pueden cruzar, pero siempre encuentra una mano amiga que es capaz que tu esfuerzo sean menos, persona a la que tú puedes decirle gracias, por todo cuando llegue el momento. Por esta razón es que quiero agradecer a todas las personas que de una forma u otra lograron que estos años que han transcurrido, de esfuerzo, estudio y sacrificio se conviertan en un día feliz.

A ti, Dios por estar siempre a mi lado, todo te lo debo a ti.

A La Revolución Cubana porque me brindó la posibilidad de formarme como Ingeniero Mecánico.

A mi tutores principales, el ing. Amauris Gilbert Hernández y el Dr. C. Isnel Rodríguez González por haber llegado en el momento que más orientación necesitaba, por su valiosa e impagable ayuda, por su dedicación ilimitada y apasionada a la investigación y por siempre mostrar la profesionalidad que de él esperaba.

A mis suegros Ismeria y Daniel por la amistad sincera y desinteresada que me brindan, y por las reiteradas ayudas ofrecidas durante estos años.

A mis hermanos Leyannis y Reinier por el apoyo brindado en todo momento.

A todas las personas que de una forma u otras me han apoyado, a todos gracias

RESUMEN

En el presente trabajo se expone la influencia que tiene la lubricación en la longevidad del rodamiento 6208, bajo condiciones de trabajo variable. Para ello se emplearon los métodos de cálculos utilizados con más frecuencia, en este caso la metodología planteada por SKF, siguiendo un enfoque simulado y otro experimental.

También se realizaron ensayos que muestran las cargas equivalentes máximas que pueden soportar el rodamiento cuando este trabaja bajo condiciones específicas, al igual se evaluó la longevidad del rodamiento a través del criterio de la vida nominal ajustada, demostrando la fuerte relación que existe entre la duración del rodamiento y el fenómeno de la lubricación. De igual forma, se calculó la lubricación hidrodinámica para las velocidades y las cargas utilizadas, en la experimentación y se crearon los diagramas para la obtención de la viscosidad de servicio, en aceites industriales con índices de viscosidad 120, 160 y 240, reflejándose menor incidencia de la temperatura en la viscosidad para los aceites de mayor índice

SUMMARY

In this paper the influence of lubrication in 6208 bearing longevity under variable working conditions is exposed. For this, it was used some calculation methods, in this case the methodology proposed by SKF, following a simulated and an experimental approach.

Tests showing the maximum equivalent loads that can withstand the bearing when it works under specific conditions, in this way, the bearing longevity through the criterion adapted nominal life was assessed, showing the strong relationship between bearing life and the lubrication phenomenon. Similarly, hydrodynamic lubrication for the speeds and loads in experimentation was calculated and diagrams to obtain service viscosity, in industrial oils having 120, 160 and 240 viscosity indexes, reflecting lower temperature incidence on viscosity for greater index oils.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Fundamento de la lubricación	4
1.3. Regímenes de lubricación.....	5
1.3.1. Lubricación hidrodinámica	5
1.3.2. Lubricación mixta.....	6
1.3.3. Lubricación límite	6
1.4. Características de los lubricantes	6
1.4.1. Las grasas lubricantes	6
1.4.2. Aceites lubricantes.....	7
1.5. Propiedades de los aceites lubricantes.....	8
1.5.1. La viscosidad como propiedad fundamental de los lubricantes	8
1.5.2. Índice de viscosidad.....	9
1.5.3. Aditivos que se utilizan para cambiar las propiedades de los lubricantes.....	10
1.5.4. Otras propiedades de los aceites	10
1.6. Selección de los aceite para rodamientos.....	11
1.6.1. Características de la lubricación de rodamientos	11
1.7. Características de los rodamientos	14
1.7.1. Clasificación de los rodamientos	15
1.7.2. Selección del tipo de rodamiento	16
1.7.3. Capacidad de carga de los cojinetes de rodamiento	17
1.7.4. Vida del rodamiento	18

1.7.5. Velocidad permisible	19
1.7.6. Selección del tamaño de rodamiento.....	19
1.8. Designaciones básicas	19
1.9. Código del tipo de rodamiento	20
1.10. Conclusiones.....	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
2.1. Introducción.....	22
2.2. Cálculo de la longevidad de rodamientos	22
2.2.1. Vida nominal de un cojinete de rodamiento	22
2.2.2. Vida nominal ajustada de un cojinete de rodamiento	23
2.3. Selección del método de lubricación.....	27
2.4. Selección de la viscosidad del aceite lubricante	28
2.4.1. Método analítico para determinar la viscosidad mínima necesaria.....	29
2.4.2. Método gráfico	29
2.5. Relación de viscosidad	32
2.6. Determinación del nivel de contaminación.....	32
2.7. Curva de viscosidad del aceite.....	32
2.7.1. Viscosidad del aceite a 100 °C	33
2.8. Breve descripción de la máquina	34
2.9. Variables a considerar en la experimentación	35
2.10. Matriz del diseño experimental.....	36
2.11. Conclusiones del capítulo	37
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	38
3.1. Introducción.....	38

3.2. Carga equivalente máxima del rodamiento 6208	38
3.3. Vida nominal y vida nominal ajustada del rodamiento 6208	40
3.3.1. Vida nominal	40
3.3.2. Vida nominal ajustada.....	42
3.4. Velocidad máxima recomendada para el rodamiento 6208	45
3.5. Viscosidad mínima necesaria.....	46
3.6. Mediciones realizadas para la experimentación.....	47
3.7. Experimentación realizada.....	49
3.8. Cálculo de la viscosidad necesaria y grado de viscosidad ISO.....	49
3.9. Cálculo de la relación de viscosidad	51
3.10. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio.....	52
3.11. Análisis económico	53
3.12. Análisis ambiental	54
3.13. Conclusiones del capítulo	54
CONCLUSIONES GENERALES	55
RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS	I

INTRODUCCIÓN

La lubricación es una técnica tan antigua en la historia humana como la rueda y el eje. Los primeros lubricantes usados por el hombre en las máquinas y dispositivos creados fueron el agua y la arcilla, y en lo posterior el cebo de origen animal. El empleo de aceites minerales como lubricantes se inició con el descubrimiento en 1859 del pozo Drake en Pennsylvania (Estados Unidos), con el cual comenzó la llamada industria moderna del petróleo. Construyéndose en este lugar la primera instalación refinadora, de la cual el residuo de destilación o mazut se empezó a utilizar parcialmente como grasa para ejes. En 1876 el gran químico ruso D. I. Mendeléiev fundamentó la posibilidad de obtener a partir del mazut aceites lubricantes, los cuales comenzaron a desplazar los materiales lubricantes de origen vegetal y animal.

A medida que se desarrolló la industria mecánica, la tecnología de producción de los aceites se sometió a serios cambios. Si bien en la primera mitad del siglo XX la cantidad fundamental de aceites lubricantes se obtenía a partir de clases especiales de petróleos, más tarde, en la práctica industrial, se introdujeron los procesos de extracción que permiten obtener aceites básicos de alta calidad a partir de petróleos comunes. También se empiezan a utilizar aditivos que refuerzan sus propiedades anticorrosivas, antioxidantes, detergentes y otras (Álvarez, 1999).

En busca de mejorar el rendimiento mecánico de las máquinas el hombre emplea elementos que ayudan a mejorar la movilidad interna de esta, un elemento fundamental para garantizar el funcionamiento de las partes móviles son los rodamientos, dando una mayor durabilidad y control de la temperatura en los puntos de fricción, con la ayuda de los lubricantes.

La lubricación en los rodamientos tiene la función de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento. Más del 50 % de todos los daños registrados en rodamientos son debidos a lubricación deficiente. Una lubricación defectuosa en las zonas de contacto origina desgaste, surcos de resbalamiento, estrías y huellas de gripado. Algunas veces se produce un sobrecalentamiento de los rodamientos si los aros se calientan desigualmente en caso de una lubricación

insuficiente o excesiva, ocasionando así una disminución en la longevidad de los rodamientos.

Situación Problémica

La experiencia obtenida de la práctica ha demostrado que numerosas empresas presentan dificultades, debido a la duración de los rodamientos empleado en sus máquinas, lo cual se debe fundamentalmente a la inadecuada selección, contaminación, montaje deficiente, fatiga y sobre todo incorrecta lubricación. Las mayores dificultades en este aspecto recaen en la inadecuada selección de la viscosidad del aceite, el no considerar el comportamiento de la viscosidad con los cambios de temperatura, no tomar en cuenta el índice de viscosidad del aceite y los niveles de contaminación a los cuales quedan expuestos en algunas aplicaciones industriales, lo cual conduce a una disminución de la longevidad requerida.

Problema

El Insuficiente conocimiento del efecto de la lubricación en la longevidad de rodamientos rígidos de bolas, que limita mostrar su influencia bajo condiciones de trabajo variable.

Objeto de estudio

Rodamiento rígido de bola 6208.

Campo de acción

Lubricación de rodamiento rígido de bola.

Objetivo general

Determinar la influencia de la lubricación en la longevidad del rodamiento rígido de bolas 6208 bajo condiciones de trabajo variable.

Hipótesis

La evaluación de la lubricación en rodamientos rígidos de bolas para diferentes valores de velocidad de rotación, características geométricas, temperatura de trabajo, relación de viscosidad, índice de fiabilidad, carga límite de fatiga y niveles de contaminación, posibilitará determinar la influencia en la longevidad de los rodamientos.

Objetivos específicos

- Determinar la carga equivalente que garantice la longevidad requerida según valores orientativos de vida nominal.
- Seleccionar la viscosidad del aceite que cumpla con la lubricación hidrodinámica en rodamientos rígidos de bolas.
- Evaluar el comportamiento de aceites industriales para diferentes valores del índice de viscosidad.

Tareas

- Actualización del estado del arte en relación con las características de rodamientos y aceites industriales.
- Establecimiento de la capacidad de carga dinámica de los rodamientos.
- Cálculo de la viscosidad mínima del aceite.
- Establecimiento de los valores orientativos de vidas nominales de rodamientos.
- Valoración económica y ambiental asociada a la influencia de la lubricación en la longevidad de rodamientos.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

El papel que desempeñan los lubricantes en la industria mecánica es considerable en los tiempos actuales. La selección de un lubricante adecuado requiere de estudios previos significativos, en los cuales, se tienen en cuenta todos los parámetros que pudieran intervenir, tales como temperatura de operación, viscosidad y aditivos para funciones especiales.

El análisis riguroso de estudios en el campo de la lubricación de rodamientos, permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que se manifiestan entre las teorías y la práctica existente.

Al respecto Saavedra (2012) plantea que conocer los elementos, que afectan la capacidad de trabajo de los rodamientos, brinda una información indispensable para realizar actividades de ingeniería y mantenimientos, al igual que para evitar paradas no deseadas o pérdidas de producción en las industrias.

Se establece como **objetivo** del capítulo: Exponer los fundamentos teóricos de la lubricación y particularidades de los rodamientos con influencia en su longevidad; a partir de la sistematización del conocimiento de la literatura consultada.

1.2. Fundamento de la lubricación

La lubricación es el proceso o técnica empleada para reducir el rozamiento entre dos superficies que se encuentran muy próximas y en movimiento una respecto de la otra, interponiendo para ello una sustancia entre ambas denominada lubricante que soporta o ayuda a soportar la carga y presión generada entre las superficies enfrentadas, estas sustancias puede ser gaseosa, líquida o sólida, que colocada entre dos piezas móviles, no se degrada, y forma así mismo una película que impide su contacto, permitiendo su movimiento incluso a elevadas temperaturas. Un buen lubricante debe disminuir al máximo el desgaste de las superficies lubricadas, el calor generado por fricción, el consumo de energía, el ruido, y el impacto negativo sobre el ambiente cuando finalmente se desecha, como resultado de su proceso de oxidación normal (Albarracín, 2005). Al igual Hobson (1970), Fuller (1984) y Benlloch (1986), plantean que la

lubricación comprende cualquier procedimiento u operación de intercalar una sustancia lubricante entre las superficies móviles, en contacto y con carga, a fin de reducir el rozamiento, desgaste, calentamiento y las pérdidas de energía.

1.3. Regímenes de lubricación

Cada equipo tiene diversos regímenes de operación, así como diferente velocidad de rotación y temperatura de trabajo. Diversos especialistas e investigadores han tenido en cuenta estos factores en la lubricación y la han diversificado a fin de cumplir con las aplicaciones y características deseadas para cada equipo. La tendencia y naturaleza de los contactos entre las diferentes piezas que se están lubricando, las presiones y los tipos de carga, así como la naturaleza y características físico químicas de los lubricantes utilizados, influyen en el tipo o régimen de lubricación (Delgado, 2006).

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.

1.3.1. Lubricación hidrodinámica

La lubricación hidrodinámica (Figura 1.1) 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).

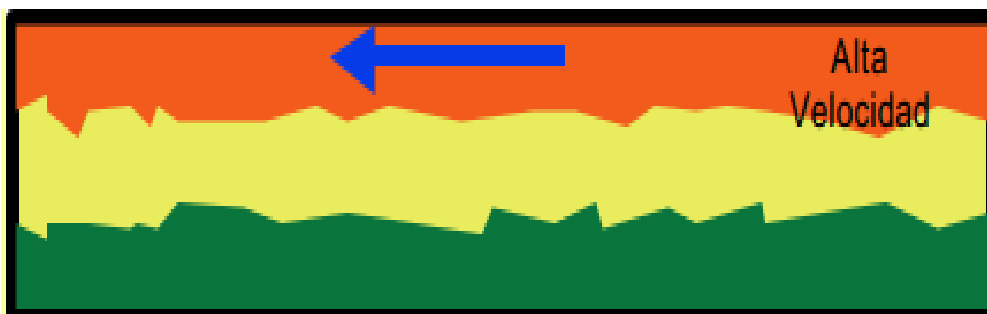


Figura 1.1. Lubricación hidrodinámica. (Fuente: Shell, 2011).

1.3.2. 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 lubricación mixta 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.

1.3.3. 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 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).

1.4. Características de los lubricantes

Históricamente las sustancias de uso más frecuente como lubricantes han sido grasas y aceites, sin embargo pueden ser adecuados otros materiales de naturaleza diversa. Algunos sólidos, semisólidos y fluidos suelen emplearse como materiales lubricantes. Así mismo, el lubricante desempeña con frecuencia funciones múltiples, pueden ser un medio de transferencia de calor, protector contra la corrosión, sellador o para arrastrar los contaminantes (Castillo, 2007).

1.4.1. Las grasas lubricantes

Las grasas son lubricantes de aspecto semisólido, generalmente elaboradas de aceite mineral, un agente espesante (tradicionalmente jabones metálicos) y aditivos, que permite retener el lubricante en los sitios donde se aplica. Las grasas protegen efectivamente a las superficies de la contaminación extrema, sin embargo, debido a que no fluyen tan libremente como los aceites, son menos refrigerantes que éstos y más difíciles de aplicar a una máquina cuando está en operación.

1.4.2. Aceites lubricantes

Los lubricantes líquidos se fabrican partiendo de una base, que puede ser un aceite mineral o sintético, a la que se añaden unos aditivos que confieren al aceite las propiedades específicas que requerirá el servicio en el que vaya a ser utilizado (Elizagárate, 2010).

Al respecto, hay muchos lubricantes líquidos que pueden ser utilizados, como son los aceites de origen vegetales, el cual en los últimos tiempos ha tenido gran impacto en la ingeniería por su característica de ser menos nocivo al medio ambiente y de poca degradación en comparación con los aceites minerales, sin embargo la gran mayoría de los aceites utilizados en las industria tienen un origen mineral y en menor medida sintético.

Al igual que Castrol (2014) la mayoría de las compañías productoras de aceites y grasas lubricantes (Cubalub, Shell, Total, Amoco Oil, BP Oil, Chevron, Exxon, Mobil Oi, Texaco Lubricants,) clasifican sus productos en tres grandes grupos:

- Aceites para motores.
- Aceites de transmisiones.
- Aceites industriales.

Sin embargo en el presente estudio está ampliamente dirigido hacia los aceites industriales, que según sus fabricantes se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Aceites hidráulicos y de turbina
- Aceites para refrigeración
- Aceites para corte de metal
- Aceites de engranajes industriales

Estos lubricantes industriales derivados del petróleo y de otras sustancias de origen sintéticos, están clasificados en una variedad muy amplia, de acuerdo con el servicio al que se han de aplicar en mayor proporción (Farías, 2008). Algunos de ellos se destinan virtualmente a usos especiales, mientras que otros pueden emplearse con éxito en una

variedad tan extensa de maquinaria, que se convierten en productos de aplicación múltiple.

1.5. Propiedades de los aceites lubricantes

Para los aceites lubricantes, la viscosidad es una de las propiedades más importantes y determinan la eficiencia de lubricación de un aceite. Si la viscosidad es demasiado baja, la formación de la película de aceite será insuficiente y ocurrirán daños en las pistas de los rodamientos. Si la viscosidad es demasiado alta, la fricción viscosa será muy grande, provocando incremento de temperatura y pérdidas de energía. En general, para aplicaciones de alta velocidad debe emplearse un aceite de baja viscosidad; para aplicaciones más pesadas, debe emplearse un aceite de mayor viscosidad (NTN, 2004).

1.5.1. La viscosidad como propiedad fundamental de los lubricantes

La viscosidad de un fluido (Figura 1.2) puede definirse desde el punto de vista práctico como su resistencia a fluir, es por tanto una medida de su fricción interna. La viscosidad determina la capacidad del lubricante para formar una película que separe las superficies metálicas en movimiento relativo (Orellana, 2005).

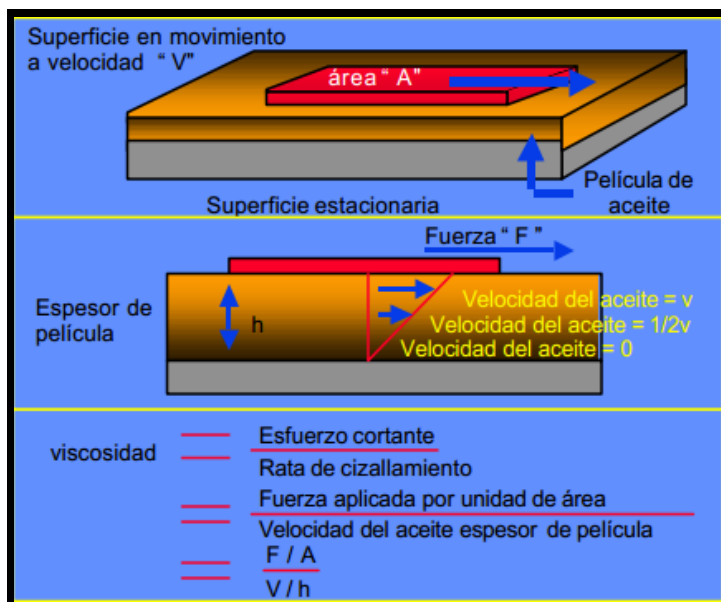


Figura 1.2. Formación de la película lubricante. (Fuente: Shell, 2011).

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. Ésta es la que se utiliza comúnmente para la clasificación de los aceites lubricantes. La unidad de medida de la viscosidad cinemática es el centistokes (mm^2/s). La viscosidad de un fluido resulta ser función fundamentalmente de la temperatura (Shell, 2011).

En los líquidos, la viscosidad disminuye al incrementar la temperatura y aumenta al disminuir la temperatura (Figura 1.3). 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.

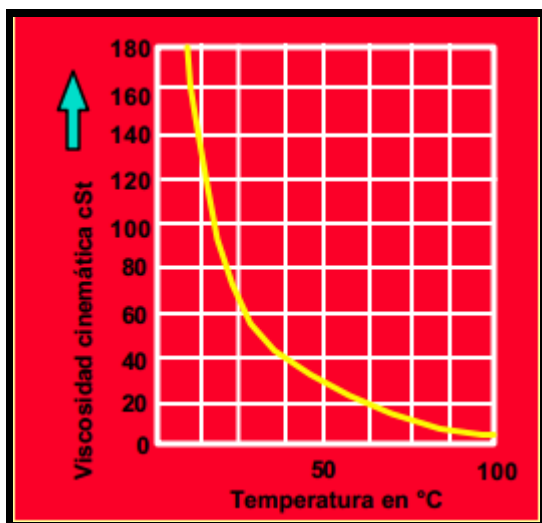


Figura 1.3. Influencia de la temperatura en la viscosidad. (Fuente: Shell, 2011).

1.5.2. Índice de viscosidad

El índice de viscosidad de un lubricante describe el efecto de la temperatura en su viscosidad. Los aceites con una viscosidad muy sensible a los cambios de la temperatura se dice que tienen un bajo índice de viscosidad, los aceites de alto índice de viscosidad son menos afectados por los cambios de temperatura.

Según (Shell, 2011) el índice de viscosidad está determinado por el comportamiento de dicha propiedad a 40°C y 100°C. El rango normal de índice de viscosidad para aceites

minerales es de 0 a 100. Aceites con índice de viscosidad mayor de 85, son llamados aceites de alto índice de viscosidad. Aquellos con índices menores a 30 son conocidos como aceites de bajo índice de viscosidad, los situados en el rango intermedio son conocidos como aceites de mediano índice de viscosidad.

1.5.3. Aditivos que se utilizan para cambiar las propiedades de los lubricantes

Hoy día existen numerosos rodamientos que trabajan bajo condiciones excepcionales, tales que requieren de lubricantes con características únicas. Con el objeto de cumplir con estas demandas la mayoría de los lubricantes industriales contienen aditivos bases o confieren propiedades adicionales. Hay muchos tipos de aditivos, algunos de los cuales pueden cumplir varias funciones. La combinación de aditivos en un lubricante depende del uso que se vaya a dar al mismo.

Es conveniente dividir los aditivos en tres categorías fundamentales y se clasifican de la siguiente forma.

Aditivos que modifican el desempeño del lubricante, se incluyen los mejoradores de índice de viscosidad y los depresores del punto de fluidez.

Aditivos que protegen el lubricante, comprenden los agentes antioxidantes y antiespumantes.

Aditivos que protegen la superficie lubricada, a este grupo pertenecen los inhibidores de corrosión, los inhibidores de herrumbre, los detergentes, dispersantes y aditivos antidesgaste.

1.5.4. Otras propiedades de los aceites

Otras propiedades que son fundamentales al igual que las anteriormente mencionadas y que hay que tenerla en cuenta a la hora de realizar la selección de un lubricante son:

- 1- Untuosidad.
- 2- Densidad.
- 3- Peso específico.
- 4- Punto de congelación.
- 5- Punto de inflamación.
- 6- Número de neutralización.

1.6. Selección de los aceite para rodamientos

Siempre que se vaya a seleccionar el aceite para un rodamiento (NTN, 2004), se tiene presente, que se debe utilizar un aceite de especificación ISO y que cualquier recomendación que se dé, se debe llevar a este sistema.

Los siguientes son los pasos que es necesario tener en cuenta para seleccionar el aceite de un rodamiento:

- 1- Consultar en el catálogo del fabricante del rodamiento, las recomendaciones del aceite a utilizar.
- 2- Selección del grado ISO del aceite requerido a la temperatura de operación en el rodamiento.
- 3- Tener pendiente el rango de velocidad del rodamiento y las cargas que actúan en el mismo.
- 4- Contaminación a la que está expuesto el lubricante.

Normalmente, la lubricación con aceite se emplea cuando las elevadas velocidades o las altas temperaturas de funcionamiento no permiten el uso de grasa, cuando es necesario evacuar del rodamiento el calor producido por la fricción o de origen externo, o cuando los componentes adyacentes (engranajes, y otros) están lubricados con aceite. La selección del aceite lubricante depende fundamentalmente de las condiciones de funcionamiento (del margen de temperaturas y velocidades), así como de la influencia del entorno (SKF, 2008).

1.6.1. Características de la lubricación de rodamientos

Para el funcionamiento de rodamientos en régimen normal, conviene utilizar aceites que a temperatura de operación presenten una viscosidad dinámica que varíe entre 12 y 30 cP (Reshetov, 1985). El trabajo enfatiza en la variación de la viscosidad mediante los cambios de cargas, temperatura y velocidades. Independientemente que la información brindada es de vital importancia, no se presentan elementos para desarrollar un procedimiento de elección de un lubricante, pues el estudio realizado es limitado en cuanto los tipos de aceites y no dispone de una vía específica para obtener la viscosidad requerida para la aplicación.

De acuerdo con los criterios de Herrera (2004), la lubricación más eficiente en los rodamientos, es la hidrodinámica. Alcanzada cuando las dos superficies móviles estén completamente separadas por una película de lubricante. Solo que el espesor de la película de aceite depende principalmente de la viscosidad del lubricante.

Albarracín y Pizón (2004) exponen como disminuir costos de operación (menor consumo de energía, costos de mantenimiento y pérdidas de producción) de equipos, mediante el control de los diferentes fenómenos de la fricción en mecanismos lubricados. Para hacer esto posible fue necesario conocer las condiciones críticas de trabajo de los mismos, a qué tipo de lubricación corresponden, y que clase lubricante requiere, para así calcular los valores de los coeficientes de fricción de los lubricantes

García *et al.* (2007) muestran las correspondencias entre las magnitudes de capacidad de carga estática declaradas en los catálogos técnicos de reconocidos fabricantes de rodamientos con los valores presentes en NC-ISO 76 y considera diferentes geometrías de rodamientos de bolas rígidos y de contacto angular, rodamientos axiales de bolas y rodamientos de rodillos cilíndricos. Adicionalmente, el estudio permitió establecer las dependencias entre la capacidad de carga nominal estática del rodamiento y algunos parámetros geométricos, como el diámetro del elemento rodante, el diámetro interior y la relación diámetro interior, diámetro exterior que cuyos parámetros son fundamentales para la selección del lubricante.

Hernández y Atxa (2006) efectúan una caracterización de las técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de señal más importantes para el análisis de vibraciones en rodamientos, realizando la detección de desperfectos, siguiendo enfoques simulados y experimentales, reflejando la incidencia de estos deterioros en la longevidad de los rodamientos.

Rivero *et al.* (2006) analizan y calculan las cargas que se generan en los apoyos de los árboles de los conjuntos mecánicos rotatorios, y enfatizan en la selección de los rodamientos, por lo que propone el uso del programa Microsoft Visual Basic versión 6.0 como herramientas efectivas de diseño y modelación para la solución de este problema.

Por otro lado Wellesley y Martínez (2007) desarrollaron el basamento matemático para establecer el análisis del efecto nocivo que se produce sobre los rodamientos de los

mecanismos planetarios empleados en los aerogeneradores, dado esto por las condiciones variables del viento en cuanto a su velocidad, dirección y medios contaminantes.

SKF (2008) y FAG (2003) brindan mediante métodos gráficos los valores de viscosidad correspondientes a la temperatura de referencia (40 °C) internacionalmente normalizada para aceites industriales, sin embargo estos trabajos se ven limitados por los índices de viscosidad evaluados, al exponer solo el comportamiento de los aceites para un índice de viscosidad de 95. Lo cual impide realizar una estimación precisa de la longevidad del rodamiento, al considerar este parámetro.

Widman International S.R.L (2005) propone un nuevo modelo numérico en 2D de con lubricación de rodamiento, para la 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.

Rivero (2010) efectúa un estudio donde plantea que los problemas sociales que acompañan a la explotación de la tecnología del rodamiento, guarda una relación directa entre el valor de uso del rodamiento y los valores que han sido creados en el usuario. En muchos países en vías de desarrollo como Cuba, la comunidad de beneficiarios del rodamiento posee una escasa cultura tecnológica de este producto, al extremo que el 34 % corresponde a una falla inevitable que es de carácter técnico, el otro 66 % de las causas tiene un carácter social y puede ser controlada, reflejando que el parámetro de mayor influencia social en la explotación de la tecnología del rodamiento es la inadecuada lubricación y representa el mayor porcentaje de fallas. Que se están empleando y compararlos con los de otros lubricantes que pueden dar lugar a ahorros de energía y mantenimiento. Además presentan algunos ejemplos tomados de casos reales, que confirman que con una buena implementación de un programa de

tribología se obtienen resultados satisfactorios desde el punto de vista económico y a la vez demuestran la importancia de la correcta selección del tipo de lubricante y su influencia en la longevidad de los rodamientos.

1.7. Características de los rodamientos

El rodamiento es el conjunto de esferas o rodillos que se encuentran unidas por un anillo interior y uno exterior (Figura 1.4) en los cuales se transfiere la carga principal mediante elementos que experimentan contacto rodante en vez de contacto deslizante. Estos elementos son fabricados para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje puras o una combinación de ellas.

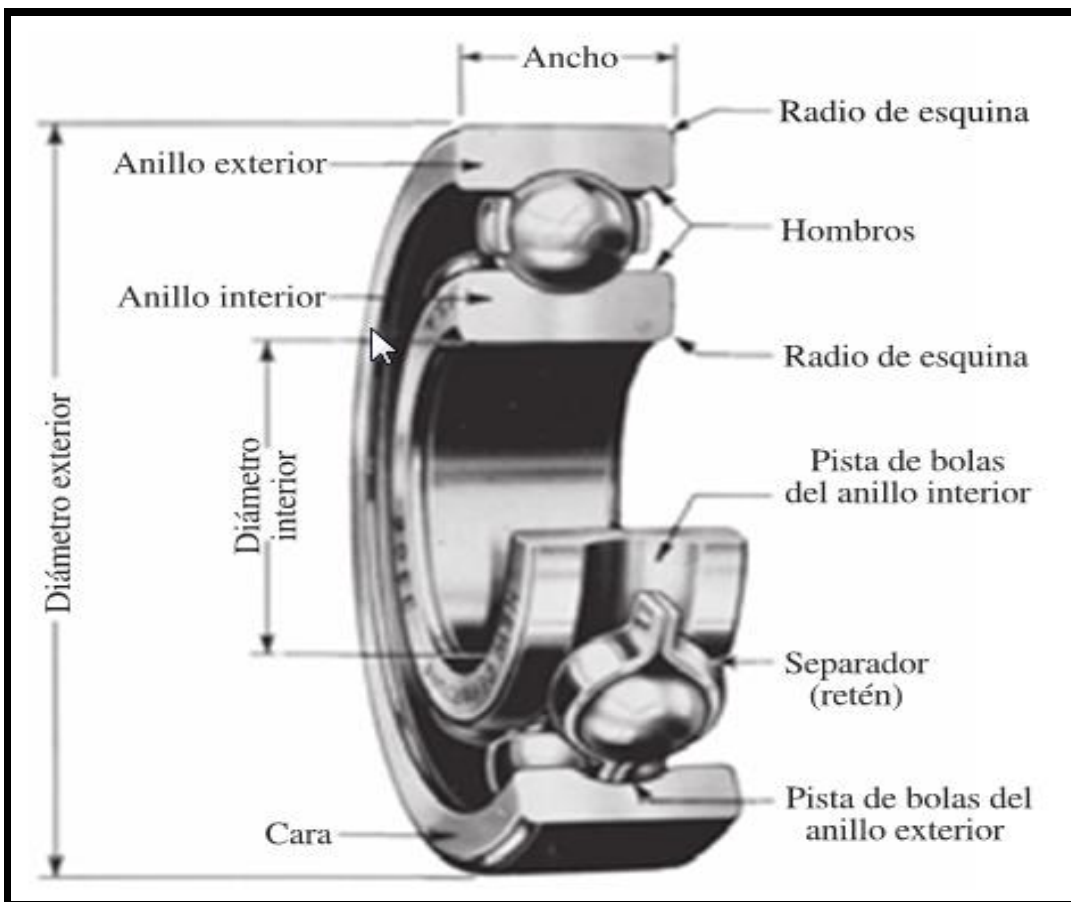


Figura 1.4. Nomenclatura de un cojinete de bolas. (Fuente: Richard *et al*, 2008).

Los rodamientos se pueden nombrar, cojinetes de contacto rodante, cojinetes antifricción o cojinetes de rodamiento. Teóricamente, estos rodamientos no necesitan lubricación, ya que las bolas o rodillos ruedan sin deslizamiento dentro de una pista. Sin

embargo, como la velocidad de giro del eje, no es exactamente constante, las pequeñas aceleraciones generadas por las fluctuaciones de velocidad, producen un deslizamiento entre los elementos en contacto. En función de ese fenómeno se lubrica el rodamiento creando una película entre las pistas y elementos rodantes.

Las bolas o rodillos, en su trayectoria circular, están sometidas alternativamente a cargas y descargas, lo que produce deformaciones alternantes, que a su vez provocan un calor de histéresis que habrá que eliminar. En dependencia de estas cargas y su velocidad, el rodamiento se lubricará simplemente por grasa o por aceite (Richard *et al*, 2008).

1.7.1. Clasificación de los rodamientos

Los rodamientos se dividen en dos categorías principales: rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos. Los rodamientos de bolas se clasifican de acuerdo a su configuración en: rodamientos rígidos de bolas y rodamientos a contacto angular. Por otro lado los rodamientos de rodillos, se clasifican de acuerdo a la forma de los elementos rodantes en: rodillos cilíndricos, cónicos, agujas y esféricos. Adicionalmente los rodamientos pueden clasificarse de acuerdo a la dirección en que se aplica la carga: así los rodamientos radiales soportan cargas radiales y los rodamientos axiales soportan cargas axiales (NTN, 2004).

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

Rodamientos radiales:

- Rodamientos rígidos de bolas
- Rodamientos de bolas a rótula
- Rodamientos de rodillos cilíndricos
- 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

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 bolas con contacto angular
- 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

Igualmente hay otros método de clasificación que incluyen los números de hileras de los elementos rodantes, que pueden ser de una, dos y hasta cuatros hileras, si son separables o no separables. También existen una gran generalidad de rodamientos diseñados por los diferentes proveedores con características disímiles, que son manufacturados para aplicaciones en específicos, así como rodamientos para ejes de vagones ferroviario, tornillos de bolas, rodamientos de tornamesa, rodamientos de movimiento rectilíneo, rodamientos lineales de bolas, rodamientos lineales de rodillos y rodamientos lineales de rodillos delgados.

1.7.2. Selección del tipo de rodamiento

Para una correcta selección de los rodamientos es significativo considerar varios factores y varias alternativas, de esto elementos se dispone de una gran variedad de tipos, configuración y tamaños, de los cuales cada uno de ellos presenta características diferentes que depende de su fabricación y diseño, el cual lo hace más o menos conveniente en una aplicación determinada.

En función de una adecuada selección NTN, (2004) propone como guía general, el procedimiento básico para seleccionar el rodamiento más apropiado, donde se tiene en

cuenta la mayoría de las propiedades que son de vital importancia a la hora de realizar el procedimiento electivo, el mismo se muestra a continuación.

- 1- Confirmar las condiciones y el ambiente de operación.
- 2- Seleccionar el tipo de rodamiento y su configuración.
- 3- Seleccionar las dimensiones del rodamiento.
- 4- Seleccionar las tolerancias del rodamiento.
- 5- Seleccionar el juego interno del rodamiento.
- 6- Seleccionar el tipo y material de la jaula.
- 7- Seleccionar el lubricante, método de lubricación y método de sellado.
- 8- Seleccionar cualquier especificación especial del rodamiento.
- 9- Confirmar el procedimiento de manejo.

1.7.3. Capacidad de carga de los cojinetes de rodamiento

Las cargas que actúan sobre un rodamiento en función de su característica, magnitud y dirección pueden ser considerablemente variables, de igual forma se pueden clasificar en radial, axial y combinadas, sin embargo el fabricante en las tablas de dimensiones de rodamientos indica la capacidad de manejo de la carga dinámica y estática las cuales se deben de tener en cuenta a la hora de seleccionar el rodamiento y realizar los cálculos preliminar.

Al respecto la magnitud de la carga es uno de los factores que suele determinar el tamaño del rodamiento a utilizar. Por lo general, los rodamientos de rodillos pueden soportar mayores cargas que los rodamientos de bolas de tamaño similar y los rodamientos completamente llenos de elementos rodantes pueden soportar mayores cargas que los rodamientos con jaula correspondientes. Los rodamientos de bolas son más utilizados cuando las cargas son ligeras o moderadas. Para cargas elevadas y ejes de gran diámetro, la elección más adecuada son los rodamientos de rodillos, (SKF, 2008).

1.7.3.1. Cargas estáticas

La capacidad de carga estática (C_0) se usa en los cálculos cuando los rodamientos giran a velocidades muy bajas ($n < 10$ rpm), realizan movimientos oscilantes muy lentos o permanecen estacionarios bajo carga durante largos períodos de tiempo.

Esta capacidad de carga se define según la ISO 76:1987 como la carga estática que corresponde a una tensión de contacto calculada en el centro de la superficie de contacto más cargada entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura. Por tanto esta es la tensión que produce la deformación permanente total del elemento rodante (SKF, 2008).

1.7.3.2. Cargas dinámicas

Es la capacidad de carga (C) que se usa en los cálculos para los rodamientos sometidos a esfuerzos dinámicos, y refleja la carga máxima que puede soportar un rodamiento en movimiento por el periodo de un millón de revoluciones, sin que aparezcan signos de fatiga en ninguno de sus elementos. Dicha capacidad se expresa como carga radial pura para los rodamientos radiales y carga axial pura para los rodamientos axiales.

1.7.4. Vida del rodamiento

Es el número total de horas de trabajo que soporta un rodamiento a una velocidad constante, hasta que aparezcan fallas en el funcionamiento, el cual se basa en un modelo estadístico (con nivel de precisión del 90 %), que se expresa como el número total de revoluciones que el 90 % de los rodamientos de un grupo idéntico, sometidos a iguales condiciones de operación, alcanzará o sobrepasará antes de que ocurra la falla por fatiga del metal.

Al respecto SKF (2008) hace referencia a otros tipos de vida de un rodamiento. Uno de ellos es la vida de servicio, que representa la vida real de un rodamiento bajo condiciones reales de funcionamiento antes de fallar. Se debe advertir que la vida de rodamientos individuales sólo se puede predecir estadísticamente. Los cálculos de la vida sólo hacen referencia a un grupo de rodamientos y a un determinado grado de fiabilidad (90 %). Así mismo, las fallas en la práctica no suelen estar causadas únicamente por la fatiga, sino por la contaminación, el desgaste, la desalineamiento, la corrosión, fallas en la jaula y la lubricación.

1.7.5. Velocidad permisible

La velocidad permisible dependerá del tipo de rodamiento, su tamaño, tolerancia, tipo de jaula, carga aplicada, condiciones de lubricación y condiciones de enfriamiento. En general, los rodamientos rígidos de bolas, los rodamientos de bolas a contacto angular y los rodamientos de rodillos cilíndricos son más adecuados para aplicaciones a alta velocidad (NTN, 2004).

De igual forma hay que tener en cuenta la temperatura, que es un factor que limita la velocidad a la que los rodamientos pueden funcionar, por tanto se recomienda utilizar rodamientos que ofrecen una baja fricción y a su vez, una pequeña generación de calor interno. Las velocidades más altas se pueden alcanzar con los rodamientos rígidos de bolas y con los rodamientos, de bolas a rótula cuando, las cargas son puramente radiales y con los rodamientos de bolas con contacto angular, para cargas combinadas (SKF, 2008).

1.7.6. Selección del tamaño de rodamiento

El tamaño del rodamiento para una aplicación determinada se selecciona inicialmente en base a su capacidad de cargas dinámica y estática, en relación con las cargas que tendrá que soportar y según las exigencias de duración y fiabilidad.

Es de vital importancia, verificar las cargas dinámicas utilizando un espectro representativo de las condiciones de carga del rodamiento, que dicho espectro debe incluir, todas las cargas de pico elevadas que puedan ser producidas en ocasiones excepcionales. Las cargas estáticas no sólo son aquéllas aplicadas al rodamiento en reposo o a bajas velocidades ($n < 10$ rpm), sino que también deben incluir la verificación de la seguridad estática de las cargas de choque muy elevadas, lo cual contiene las cargas que actúan en breves periodos (SKF, 2008).

1.8. Designaciones básicas

Los rodamientos 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 números. La primera cifra (1) designa el tipo de cojinete, la segunda cifra (2) indica la serie de ancho, el tercer número (3) muestra la serie de diámetro y las dos últimas cifras (45) son los

números que definen el diámetro interior, dicha cifras se multiplica por cinco en un intervalo de 20 y 480 mm.

En el caso que el rodamiento sobrepase el diámetro de 480 mm no se cumple el método anterior y se indica directamente en la cifra de la designación; al igual que, cuando resulta inferior a los 20 mm la designación es la expuesta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Diámetros para rodamientos pequeños.

Número de la serie	00	01	02	03
Diámetro interior	10	12	15	17

Algunas veces, la cifra completa va precedida o seguida de letras que se usan para indicar alguna característica especial del rodamiento: (tener una ranura circular de sujeción, una jaula de poliamida, una tapa de protección o cualquiera otra característica).

Al respecto, los diferentes fabricantes garantizan que para una determinada designación (con algunas excepciones), el rodamiento siempre tendrá las mismas características geométricas sin importar la marca y se logra la deseada intercambiabilidad entre los rodamientos de un mismo tipo (González, 2009).

1.9. Código del 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, p. ej., NJ, NU, NUP, NN, NNU, NNCF.

QJ - Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto.

T - Rodamientos de rodillos cónicos.

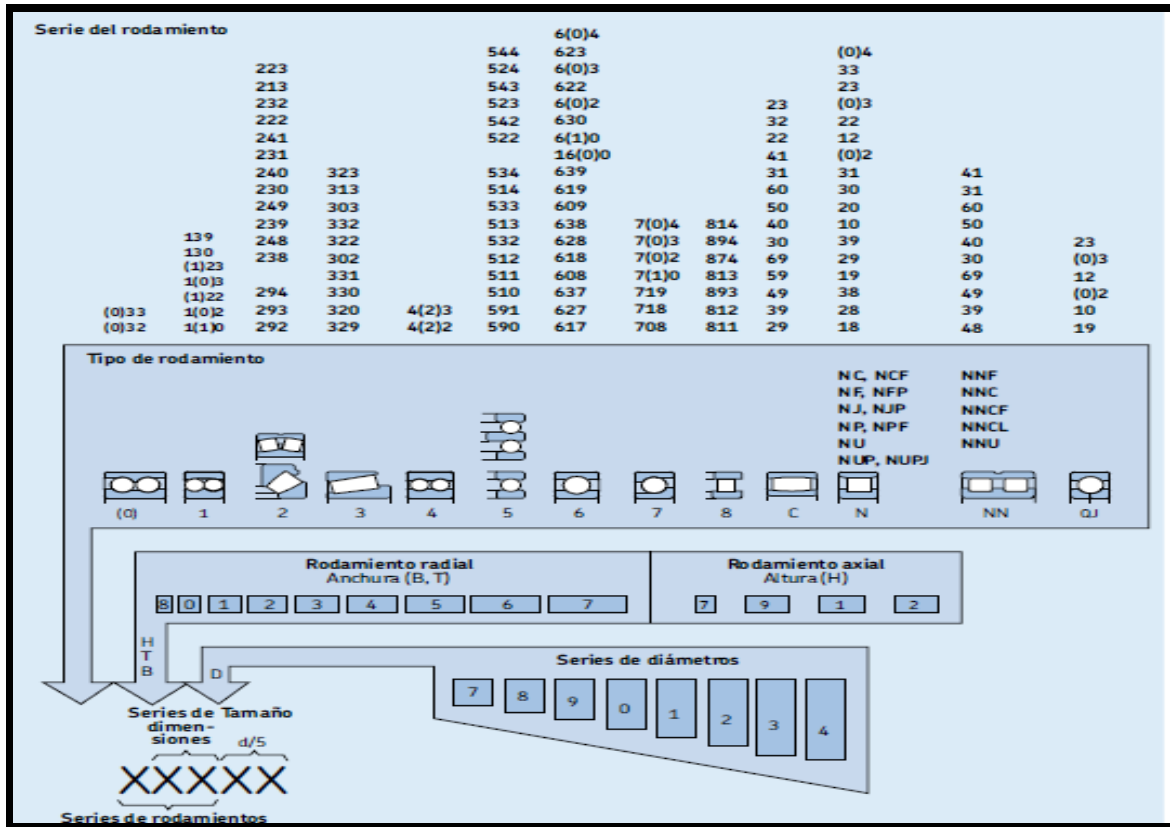


Figura 1.5. Designación de rodamientos de bolas y rodillos. (Fuente: SKF, 2008).

1.10. Conclusiones

- En la literatura consultada resulta limitada la relación que existe entre la temperatura y los índices de viscosidad de los aceites, para la lubricación de cojinetes de rodamiento y su influencia en la longevidad.
- Quedan establecidos los fundamentos teóricos que, permiten determinar la Influencia de la lubricación en la longevidad de rodamientos rígidos de bolas, para diferentes condiciones de explotación

2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción

Uno de los factores de mayor influencia en la vida de los rodamientos es la correcta lubricación, evitando el contacto metálico directo entre los elementos rodantes. El lubricante se comporta como mediador entre las superficies disminuyendo la fricción y el desgaste, a la vez actúa como aislante contra las impurezas del medio ambiente, protegiendo la superficie de la oxidación y de los componentes corrosivos.

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de los lubricantes en los rodamientos, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación y diseño de elementos de máquina.

Se define como **objetivo** del capítulo: establecer el procedimiento que permita la evaluación de la longevidad de rodamientos rígidos de bolas, bajo condiciones de trabajo variable y el comportamiento del aceite lubricante en función de la temperatura.

2.2. Cálculo de la longevidad de rodamientos

En rodamientos que operen bajo condiciones normales, las superficies de las pistas y los elementos rodantes están constantemente sometidos a esfuerzos compresivos repetitivos, que causan descascarillado de las superficies en rozamiento. Este descascarillado es producto de la fatiga del metal y causa la falla del rodamiento. La vida efectiva o útil de los rodamientos, usualmente se expresa en términos del número total de revoluciones, que un rodamiento puede funcionar antes de que se presente el descascarillado de las pistas o de los elementos rodantes.

2.2.1. Vida nominal de un cojinete de rodamiento

En este trabajo se pretende señalar la relación entre la carga y la vida útil. Aunque los rodamientos se fabrican en acero resistentes, tienen una vida útil limitada y en algún momento presentarán fallas por fatiga debido a la considerable tensión por contacto a la que se les somete. Sin embargo, como es obvio, cuanto más ligera sea la carga más prolongada será su vida útil y viceversa. La relación entre carga, P , y vida útil L , para cojinetes de contacto giratorio se puede establecer en los distintos términos (Nieto, 2007).

El método más simple para calcular la duración de un rodamiento consiste en la aplicación de la fórmula ISO de la vida nominal (SKF, 2008). La vida nominal de un rodamiento se determina según la expresión:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2.1)$$

Siendo:

C : capacidad de carga dinámica; [kN].

P : carga dinámica equivalente del rodamiento; [kN].

p : exponente de la ecuación de la vida nominal.

(Para los rodamientos de bolas $p = 3$)

(Para los rodamientos de rodillos $p = 10/3$)

Si la velocidad es constante, suele ser preferible calcular la vida expresada en horas de funcionamiento utilizando la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} \quad (2.2)$$

Donde:

L_{10} : vida nominal (con un 90 % de fiabilidad); [millones de revoluciones].

L_{10h} : vida nominal (con un 90 % de fiabilidad); [horas de funcionamiento].

n : velocidad de giro; [min^{-1}].

2.2.2. Vida nominal ajustada de un cojinete de rodamiento

Para los rodamientos de alta calidad, la vida nominal o básica se puede desviar significativamente de la vida de servicio real en una aplicación determinada. La vida de servicio en una aplicación depende de una variedad de factores, entre los que se encuentra la lubricación, el grado de contaminación, la desalineación, el montaje adecuado y las condiciones ambientales. Por este motivo SKF (2008) define la siguiente ecuación:

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot L_{10} \quad (2.3)$$

Si la velocidad es constante, la vida puede expresarse en horas de funcionamiento usando la ecuación:

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{nm} \quad (2.4)$$

Siendo:

L_{nm} : vida nominal ajustada (con un 100 – n % de fiabilidad); [millones de revoluciones].

L_{nmh} : vida nominal ajustada (con un 100 – n %de fiabilidad); [horas de funcionamiento].

a_1 : factor de ajuste de la vida para una mayor fiabilidad (Tabla 2.1); [adimensional].

a_{SKF} : factor de ajuste de la vida (Figura 2.1); [adimensional].

Tabla 2.1.Valores para el factor de ajuste de la vida a_1 .

Fiabilidad %	Probabilidad de falla n %	Vida nominal SKF L_{nm}	Factor a_1
90	10	L10m	1
95	5	L5m	0,62
96	4	L4m	0,53
97	3	L3m	0,44
98	2	L2m	0,33
99	1	L1m	0,21

El factor de ajuste de la vida (a_{SKF}) aplica el concepto de carga límite de fatiga (P_u) análogo al utilizado cuando se realizan cálculos para otros componentes de la máquina. Los valores para la carga límite de fatiga se encuentran en las tablas de productos de los catálogos. Con el fin de reflejar las condiciones de funcionamiento de la aplicación, el factor de ajuste de la vida hace uso de las condiciones de lubricación (relación de viscosidad k) y del factor η_c para el nivel de contaminación, dicho factor puede determinarse de manera gráfica auxiliándose de la Figura 2.1.

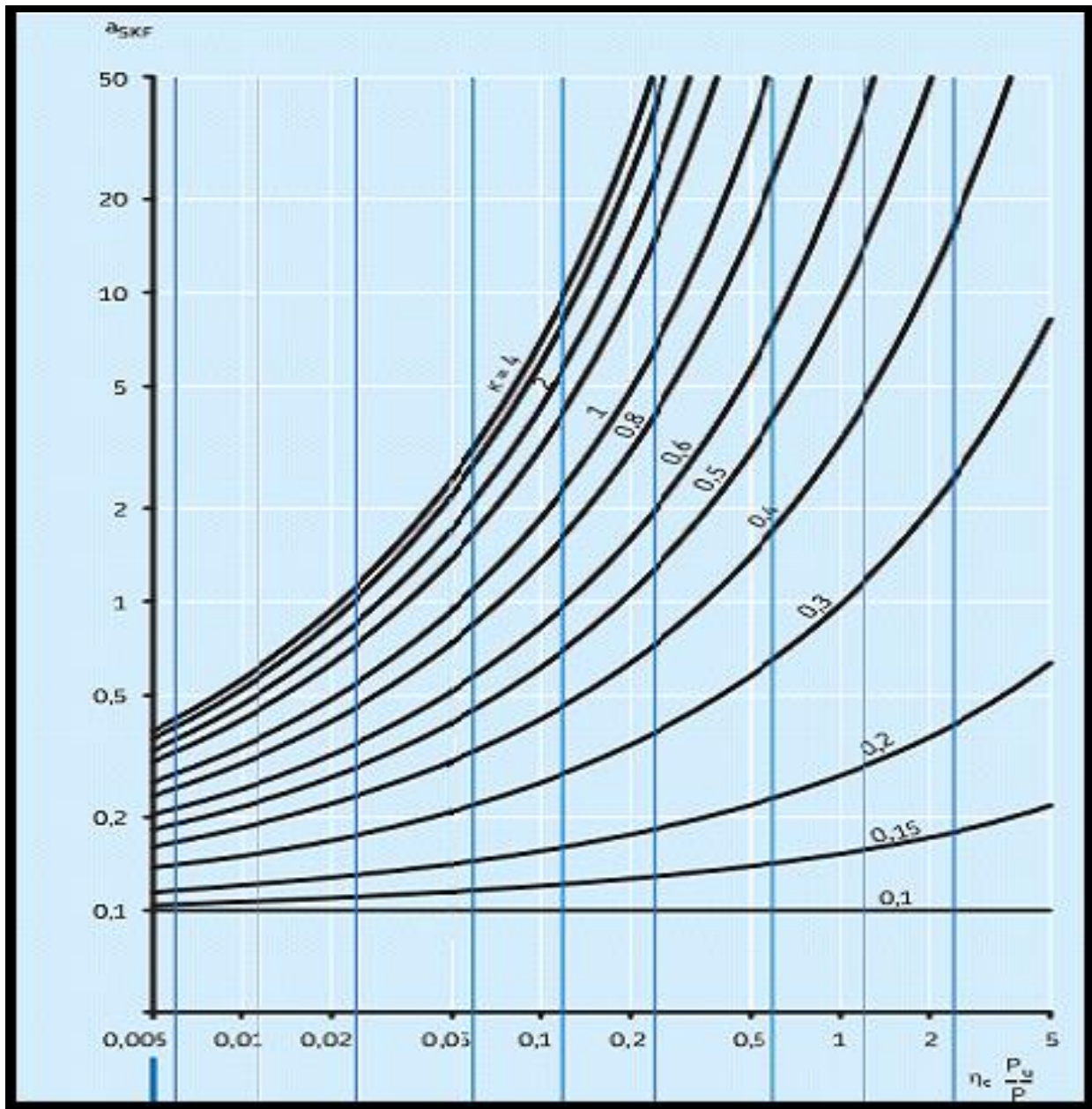


Figura 2.1. Factor a_{SKF} para rodamientos radiales de bolas. (Fuente: SKF, 2008).

Es aconsejable verificar la vida nominal ajustada calculada con la vida determinada de la aplicación, en caso de conocer ésta última. Normalmente esto depende del tipo de máquina y de los requisitos relacionados con la duración del servicio y la fiabilidad de funcionamiento. Si no se dispone de experiencia previa, se pueden utilizar los valores orientativos señalados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores orientativos de vida nominal para diferentes clases de máquinas

Clase de máquinas	Vida nominal (horas de funcionamiento)
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico.	300 ... 3 000
Máquinas usadas intermitentemente o por cortos períodos: herramientas eléctricas portátiles, aparatos elevadores en talleres, máquinas y equipos para la construcción.	3 000 ... 8 000
Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente: ascensores (elevadores), grúas para mercancías embaladas o eslingas de tambores.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre totalmente utilizadas: transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos de uso industrial, machacadoras rotativas.	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario totalmente utilizadas: máquinas herramientas, máquinas para trabajar la madera, máquinas para la industria de ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos para imprentas, separadores y centrífuga.	20 000 ... 30 000
Máquinas para trabajo continuo, 24 horas al día: cajas de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil.	40 000 ... 50 000
Máquinas para la industria de energía eólica, esto incluye el eje principal, la orientación, los engranajes, los rodamientos del generador.	30 000 ... 100 000

Maquinaria para el abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas sableadoras, maquinaria de propulsión para transatlánticos.	60 000 ... 100 000
Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, bombas y ventiladores para minas, rodamientos para la línea de ejes de transatlánticos.	> 100 000

Fuente: SKF, 2008.

2.3. 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 la temperatura y el entorno. La capacidad de velocidad de un rodamiento y la capacidad de la lubricación utilizada para alcanzar velocidades específicas resultan importantes.

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

$$Fv = n \cdot dm \quad (2.5)$$

Siendo:

$$D_m = \frac{D + d}{2} \quad (2.6)$$

Dónde:

Fv : 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].

Tabla 2.3. Valores típicos de factor de velocidad.

Métodos de lubricación	Fv
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).

2.4. 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 empleando por la Norma Cubana.
2. Método gráfico empleando por SKF.

2.4.1. 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.

$$\nu_1 = 45000 \cdot n^{-0,83} \cdot D_m^{-0,5} \quad \text{Para } n < 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.7)$$

$$\nu_1 = 45000 \cdot n^{-0,5} \cdot D_m^{-0,5} \quad \text{Para } n \geq 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.8)$$

Donde:

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

n : número de revoluciones [min⁻¹].

D_m : diámetro medio del rodamiento [mm].

2.4.2. Método gráfico

La viscosidad nominal requerida (ν_1), para una lubricación adecuada se puede calcular con el diagrama que muestra la Figura 2.2, usando el diámetro medio del rodamiento (D_m), y la velocidad de giro del rodamiento (n) dada en min⁻¹. Obsérvese que esta viscosidad solamente tiene comprendido las características geométricas del rodamiento, queriéndose decir que para que exista una lubricación hidrodinámica en el

par tribológico de los elementos en contacto, la viscosidad debe de estar comprendida según el diagrama consultado.

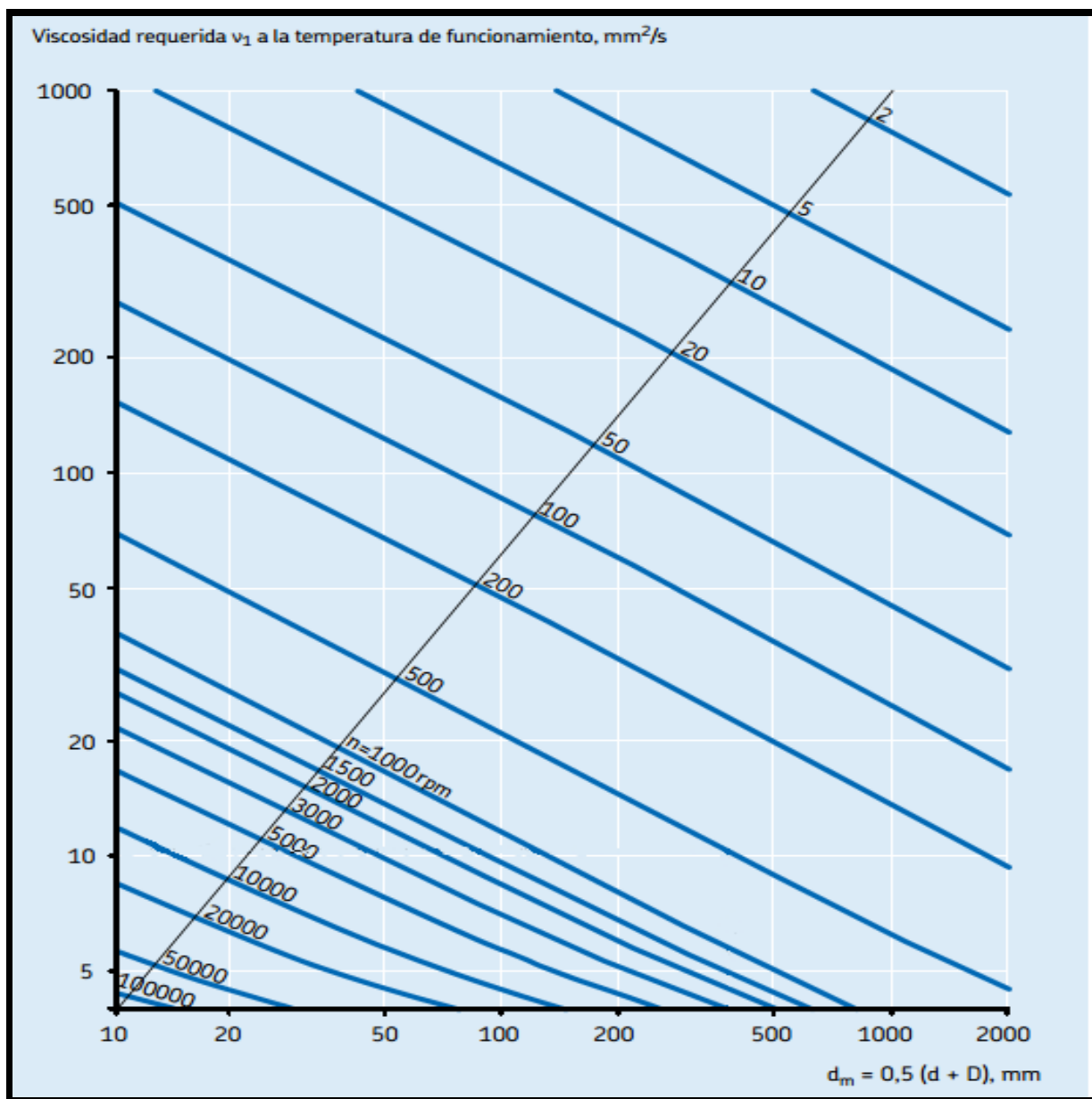


Figura 2.2. Método gráfico para la obtención de la viscosidad. (Fuente: SKF, 2008).

El diagrama anterior ha sido revisado teniendo en cuenta los últimos hallazgos en tribología de rodamientos (SKF, 2008).

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 2.3.

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. Determinados tipos de rodamientos, por ejemplo los rodamientos de rodillos a rótula, los rodamientos de rodillos cónicos y los rodamientos axiales de rodillos a rótula tienen normalmente una temperatura de funcionamiento superior a la de otros rodamientos, por ejemplo los rodamientos rígidos de bolas y los rodamientos de rodillos cilíndricos, bajo unas condiciones de funcionamiento similares.

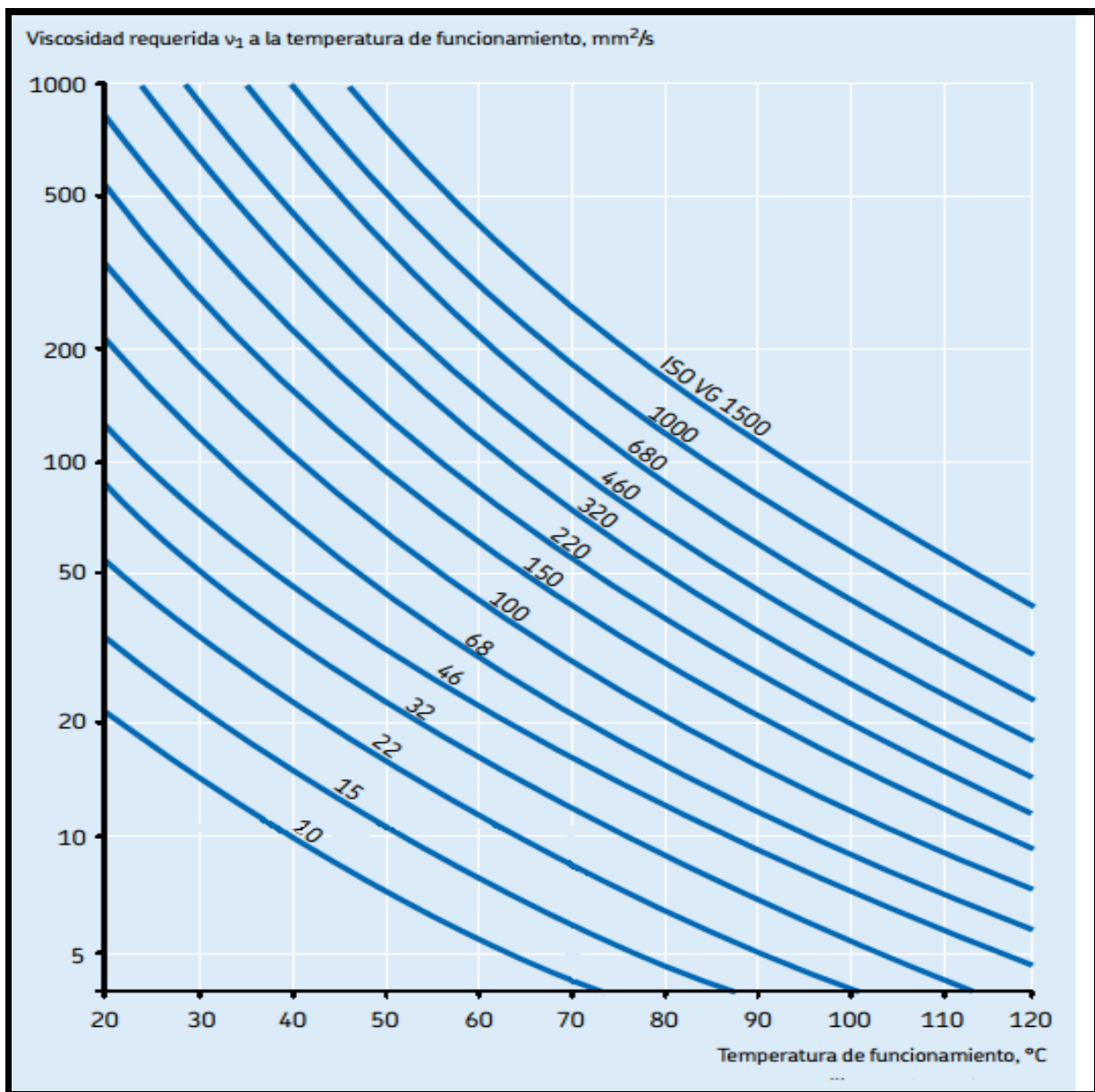


Figura 2.3. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 95. (Fuente: SKF, 2008).

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 (v_1) necesaria para una lubricación adecuada, teniendo en cuenta ambos valores cuando el lubricante está a una temperatura de funcionamiento normal.

$$k = \frac{v}{v_1} \quad (2.9)$$

Donde:

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

v_1 : viscosidad mínima necesaria o viscosidad nominal; [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.

2.6. Determinación del nivel de contaminación

Este factor ha sido introducido con el fin de tener en cuenta el nivel de contaminación del lubricante a la hora de calcular la vida del rodamiento. La influencia de la contaminación en la fatiga del rodamiento depende de una serie de parámetros entre los que se incluyen el tamaño del rodamiento, el espesor relativo de la película de lubricante, el tamaño y la distribución de las partículas contaminantes sólidas y los tipos de contaminante blando y duro. Los valores orientativos según los niveles de contaminación se muestran en la Tabla 1 del Anexo 1.

2.7. 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 2.4).

Con el empleo de este programa es posible evaluar simultáneamente hasta cuatro aceites, de los cuales es necesario conocer los siguientes datos:

- Nombre del aceite que se desea evaluar.
- Viscosidad cinemática del aceite a 40 °C.
- Viscosidad cinemática del aceite a 100 °C.

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 2.4. Calculador de Widman International.

2.7.1. Viscosidad del aceite a 100 °C

Dentro de las características que ofrecen los productores de aceites, aparece la viscosidad que es una de la propiedad más importante de los lubricantes, al respecto 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 S.R.L, este calculador opera con solo 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 2.5). Este programa determina el valor de la viscosidad del aceite evaluado a 100 °C conociendo los siguientes datos:

- Viscosidad cinemática del aceite a 40 °C.
- Índice de viscosidad del aceite.

Calcular la viscosidad cSt a 100°C	
Índice de Viscosidad	
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 40°C	
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 100°C	
Calcular Borrar	

Figura 2.5. Calculador del índice de viscosidad.

2.8. Breve descripción de la máquina

La máquina de ensayo permitió evaluar el comportamiento de la temperatura en un lubricante Castros ISO VG 68, sometido al régimen de explotación de un rodamiento 6208 bajo diversas condiciones de trabajo (cargas, velocidad de rotación, nivel del lubricante). El accionamiento del equipo está compuesto por un motor eléctrico, transmisión polea-correa (múltiple de tres diámetros) y un cabezal móvil (Figura 2.6).



Figura 2.6. Máquina de ensayo de lubricación.

Por medio de esta máquina fue posible operar con tres velocidades de giro diferentes y aplicar diferentes valores de carga según los pesos con los que se cuentan. La temperatura es tomada mediante un termómetro, que queda introducido directamente en el aceite contenido en el cabezal de la máquina. Con la medición de la temperatura y aplicando los procedimientos y software especializados, se realizó ensayos u experimento para predecir el comportamiento de un aceite en el rodamiento utilizado.

2.9. Variables a considerar en la experimentación

Dentro de las variables tomadas en cuenta durante la experimentación para determinar la temperatura del lubricante:

Humedad relativa: en la medida que aumenta este factor la humectación del lubricante se ve afectada, para la experimentación se controló el local, donde hay presente un acondicionador de aire, que garantiza una humedad no superior al 60 %, ello conduce a que no influya de manera significativa sobre los resultados obtenidos.

Tipo y nivel de lubricación: se empleó el método de lubricación por inmersión, donde el rodamiento quedó sumergido en aceite hasta la mitad de la bola ubicada en la parte inferior del rodamiento, acorde a los indicadores de nivel de la máquina (Figura 1 Anexo 1).

Temperatura del medio: el acondicionador de aire fue puesto en funcionamiento con antelación a al desarrollo experimental, de forma tal que el inicio de los experimentos se desarrollaron para una temperatura estable de 25 °C, la cual fue controlada durante toda la fase de experimentación.

Características del lubricante: se empleó el aceite industrial de Castrol Hyspin AWHM-68 con densidad relativa a 15 °C de 0,88, índice de viscosidad de 150, punto de inflamación 210 °C y punto de congelación - 36 °C.

Carga aplicada sobre los rodamientos: se utilizaron tres valores de cargas, definiendo un nivel máximo, medio y mínimo.

Velocidad de rotación: se experimentan para valores de velocidad máxima, media y mínima según las relaciones de transmisión disponible en la máquina (Figura 2 Anexo 1).

2.10. Matriz del diseño experimental

La mayor parte de los experimentos e investigaciones industriales, conducen a descubrir los efectos individuales y conjuntos que varios factores ejercen sobre la variable más relevante de los fenómenos que se investigan. Los diseños experimentales usados con mayor frecuencia son los de bloque aleatorio simple, o del tipo de clasificación en dos dimensiones, pero la característica distintiva de la mayoría de ellos es el arreglo factorial de los tratamientos o condiciones experimentales (Freund, 1996). En la Tabla 2.5 se muestra la matriz de experimento, propia de un diseño factorial completo N^k , con tres niveles y dos variables de entrada.

Tabla 2.5. Matriz del diseño experimental.

Experimento	Velocidad de rotación	Carga
1	n_1	P_1
2		P_2
3		P_3
4	n_2	P_1
5		P_2
6		P_3
7	n_3	P_1
8		P_2
9		P_3

En la experimentación se establecen dos variables de entrada (velocidad, cargas) para obtener su influencia en la variable de salida (temperatura del aceite). Este experimento consta de nueve combinaciones de carga y velocidad, este con el fin de tomar la variación de la temperatura en el lubricante para cada uno de las repeticiones.

2.11. Conclusiones del capítulo

- Quedó establecido el procedimiento que permite determinar la evaluación de la longevidad de rodamientos rígidos de bolas, bajo condiciones de trabajo variable, aplicando los criterios de vida nominal y vida nominal ajustada.
- Se diseñó un experimento factorial completo N^k con tres niveles de experimentación y dos factores, para un total de nueve experimentos, que reflejen el comportamiento de la temperatura del aceite, bajo la influencia de la velocidad de rotación y la carga aplicada al rodamiento.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La vida de un rodamiento se define como el número de revoluciones, o de horas a una velocidad constante determinada, que el rodamiento pueda trabajar antes que se manifieste el primer signo de fatiga en uno de sus aros o de sus elementos rodantes; sin embargo, los ensayos de laboratorios y las experiencias obtenidas de la práctica han puesto de manifiesto que rodamientos aparentemente idénticos, funcionando en idénticas condiciones, tienen vidas diferentes. La duración de un rodamiento se puede calcular con diferentes niveles de sofisticación, que dependen de la precisión que puedan alcanzar en la definición de las condiciones de funcionamiento.

En el capítulo anterior fueron estudiados los patrones, establecidas las ecuaciones y los procedimientos, que permiten estimar la longevidad de los rodamientos rígidos de bolas para diferentes condiciones de explotación; de ahí que se declare como **objetivo** del capítulo, realizar el análisis de los resultados siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior.

3.2. Carga equivalente máxima del rodamiento 6208

El rodamiento 6208 se clasifica como un rodamiento rígido de bolas, posee como dimensiones fundamentales; diámetro interior de 40 mm, diámetro exterior de 80 mm y ancho de 18 mm. Tiene una capacidad de carga estática de 19 kN, capacidad de carga dinámica de 32,5 kN y su carga límite a la fatiga es de 0,8 kN. La velocidad máxima recomendada para su uso es de $11\,000\text{ min}^{-1}$, su masa es de aproximadamente 0,37 kg y posee 9 bolas como elementos rodantes.

Los resultados de carga equivalente que se muestran en la tabla 3.1 fueron calculados para los valores orientativos de vida nominal requeridos en horas de trabajo para diferentes clasificaciones de máquinas. En la misma se estableció un rango de carga equivalente inferior (I) y superior (S), de acuerdo a lo designado en la Tabla 2.2, los datos corresponden al rodamiento rígido de bola 6208 y los valores fueron obtenidos por la fórmula 2.2.

Tabla 3.1. Carga equivalente máxima que puede soportar el rodamiento 6208.

<i>n</i>	valores orientativos de vidas nominales (horas)								
	Inferior	300	3000	8000	10000	20000	40000	30000	60000
	Superior	3000	8000	12000	25000	30000	50000	100000	100000
2	P(kN) I	98,43	45,69	32,95	30,58	24,27	19,27	21,21	16,83
	P(kN) S	45,69	32,95	28,78	22,53	21,21	17,89	14,20	14,20
5	P(kN) I	72,52	33,66	24,27	22,53	17,89	14,20	15,62	12,40
	P(kN) S	33,66	24,27	21,21	16,60	15,62	13,18	10,46	10,46
10	P(kN) I	57,56	26,72	19,27	17,89	14,20	11,27	12,40	9,84
	P(kN) S	26,72	19,27	16,83	13,18	12,40	10,46	8,30	8,30
20	P(kN) I	45,69	21,21	15,29	14,20	11,27	8,94	9,84	7,81
	P(kN) S	21,21	15,29	13,36	10,46	9,84	8,30	6,59	6,59
50	P(kN) I	33,66	15,62	11,27	10,46	8,30	6,59	7,25	5,76
	P(kN) S	15,62	11,27	9,84	7,71	7,25	6,12	4,85	4,85
100	P(kN) I	26,72	12,40	8,94	8,30	6,59	5,23	5,76	4,57
	P(kN) S	12,40	8,94	7,81	6,12	5,76	4,85	3,85	3,85
200	P(kN) I	21,21	9,84	7,10	6,59	5,23	4,15	4,57	3,63
	P(kN) S	9,84	7,10	6,20	4,85	4,57	3,85	3,06	3,06
500	P(kN) I	15,62	7,25	5,23	4,85	3,85	3,06	3,37	2,67
	P(kN) S	7,25	5,23	4,57	3,58	3,37	2,84	2,25	2,25
1000	P(kN) I	12,40	5,76	4,15	3,85	3,06	2,43	2,67	2,12
	P(kN) S	5,76	4,15	3,63	2,84	2,67	2,25	1,79	1,79
1500	P(kN) I	10,83	5,03	3,63	3,37	2,67	2,12	2,33	1,85
	P(kN) S	5,03	3,63	3,17	2,48	2,33	1,97	1,56	1,56
2000	P(kN) I	9,84	4,57	3,29	3,06	2,43	1,93	2,12	1,68
	P(kN) S	4,57	3,29	2,88	2,25	2,12	1,79	1,42	1,42
3000	P(kN) I	8,60	3,99	2,88	2,67	2,12	1,68	1,85	1,47
	P(kN) S	3,99	2,88	2,51	1,97	1,85	1,56	1,24	1,24
5000	P(kN) I	7,25	3,37	2,43	2,25	1,79	1,42	1,56	1,24
	P(kN) S	3,37	2,43	2,12	1,66	1,56	1,32	1,05	1,05

10000	P(kN) I	5,76	2,67	1,93	1,79	1,42	1,13	1,24	0,98
	P(kN) S	2,67	1,93	1,68	1,32	1,24	1,05	0,83	0,83
20000	P(kN) I	4,57	2,12	1,53	1,42	1,13	0,89	0,98	0,78
	P(kN) S	2,12	1,53	1,34	1,05	0,98	0,83	0,66	0,66
50000	P(kN) I	3,37	1,56	1,13	1,05	0,83	0,66	0,73	0,58
	P(kN) S	1,56	1,13	0,98	0,77	0,73	0,61	0,49	0,49
100000	P(kN) I	2,67	1,24	0,89	0,83	0,66	0,52	0,58	0,46
	P(kN) S	1,24	0,89	0,78	0,61	0,58	0,49	0,39	0,39

Los resultados obtenidos muestran que existe un comportamiento descendente de la carga equivalente en función de los valores orientativos y la velocidad de rotación. Se pudo observar que para 300 horas de vida del rodamiento, a una velocidad de dos min^{-1} la carga límite que podrá soportar es de 98,43 kN; sin embargo, se observa que para una vida de 60 000 horas con la misma velocidad la carga deberá ser de 16,83 kN. El comportamiento mostrando por la carga equivalente en función del valor orientativo resulta análogo al comportamiento de la carga equivalentes en función de la velocidad de rotación, obsérvese cómo para el valor orientativo superior de vida nominal con velocidad de rotación de dos min^{-1} la carga equivalente es 45,69 kN, mientras que a 100 000 min^{-1} arroja valor de 1,24 kN.

3.3. Vida nominal y vida nominal ajustada del rodamiento 6208

El término histórico empleado para determinar la longevidad de los rodamiento es el de vida nominal, el cual engloba en su análisis la capacidad propia del rodamiento para soportar una carga determinada; sin embargo, la estimación de la vida nominal se ve limitada en su estudio, al no considerar elementos con marcada incidencia en la vida de un rodamiento como la fiabilidad, la repetición de cargas cíclicas y la lubricación, elementos tomados en consideración en los análisis de la vida nominal ajustada.

3.3.1. Vida nominal

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de la vida nominal (L_{10}) que se obtuvo mediante la expresión 2.1, donde se tomaron cargas equivalentes que están en el rango que puede soportar el rodamiento 6208, con velocidad de rotación de 1 500 min^{-1} para

su límite superior, el valor del exponente de la vida nominal se tomó igual a tres, ya que se trata de un rodamiento rígido de bola.

Tabla 3.2. Vida nominal L_{10} .

P	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
L_{10}	34328	10171	4291	2197	1271	801	536	377	275

Con los valores obtenidos de la vida nominal (L_{10}) en millones de revoluciones, se procedió al cálculo de la vida nominal (L_{10h}) en horas de funcionamiento, por medio de la expresión 2.2. Se obtuvieron para cada longevidad que se muestra en la Tabla 3.2 y la velocidad de rotación experimentada, los resultados mostrados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Vida nominal L_{10h} .

n	L_{10}					
	34328	10171	4291	2197	1271	801
2	286067708	84760802	35758464	18308333	10595100	6672133
5	114427083	33904321	14303385	7323333	4238040	2668853
10	57213542	16952160	7151693	3661667	2119020	1334427
20	28606771	8476080	3575846	1830833	1059510	667213
50	11442708	3390432	1430339	732333	423804	266885
100	5721354	1695216	715169	366167	211902	133443
200	2860677	847608	357585	183083	105951	66721
500	1144271	339043	143034	73233	42380	26689
1000	572135	169522	71517	36617	21190	13344
1500	381424	113014	47678	24411	14127	8896
2000	286068	84761	35758	18308	10595	6672
3000	190712	56507	23839	12206	7063	4448
5000	114427	33904	14303	7323	4238	2669
10000	57214	16952	7152	3662	2119	1334
20000	28607	8476	3576	1831	1060	667
50000	11443	3390	1430	732	424	267
100000	5721	1695	715	366	212	133

Resulta evidente la marcada disminución de la vida del rodamiento al incrementarse la velocidad de operación, lo cual se debe fundamentalmente al aumento del contacto íntimo de las asperezas de las bolas con los aros interior, exterior y el retén. Dicho comportamiento ha sido registrado en la literatura científica (Aponte y Villazón, 2009) para elementos en movimiento.

3.3.2. Vida nominal ajustada

La vida nominal ajustada es sencillamente, la vida nominal influenciada por otros parámetros que intervienen y modifican la longevidad de los rodamientos y no están reflejados en las expresiones establecidas de la vida nominal. En la Tabla 3.4 se muestra los resultados de L_{nm} , los cuales fueron calculados mediante la expresión 2.3, donde se realizó el cálculo variando los coeficientes de fiabilidad (a_1) y manteniendo constante la vida nominal con un valor de 34 328 millones de revoluciones y el factor de ajuste (a_{SKF}) con valor de 0,1.

Tabla 3.4. Vida nominal ajustada L_{nm} variando el factor a_1 .

a_1	a_{SKF}	L_{10}	L_{nm}
1	0,1	34328	3433
0,62			2128
0,53			1819
0,44			1510
0,33			1133
0,21			721

Los valores expuestos en la Tabla 3.4 reflejan la marcada incidencia de la fiabilidad del rodamiento en su longevidad, evidenciándose como a medida que disminuye el factor de fiabilidad, decrece la vida nominal ajustada. Esta disminución muestra un comportamiento con tendencia logarítmica que puede ser evaluado según el modelo de regresión expuesto en la Figura 1 del Anexo 2.

Similar análisis se realizó para nuevas combinaciones, que dieron lugar a los resultados obtenidos en la Tabla 3.5. En este caso se obtuvo el comportamiento de la vida nominal

ajustada variando el factor a_{SKF} y manteniendo constante el factor de fiabilidad a_1 en 1 y la vida nominal nominal L_{10} en 34 328 millones de revoluciones.

Tabla 3.5. Vida nominal ajustada L_{nm} variando el factor a_{SKF} .

a_1	a_{SKF}	L_{10}	L_{nm}
1	0,1	34328	3433
	0,2		6866
	0,5		17164
	1		34328
	2		68656
	5		171641
	10		343281
	20		686563
	50		1716406

Resulta evidente el aumento que experimenta la vida nominal ajustada al incrementarse el factor a_{SKF} , comportamiento diametralmente opuesto al reflejado al variar el factor de fiabilidad. El modelo que refleja el comportamiento de esta variable para las condiciones que se realizó el cálculo, indica que se sigue una fuerte tendencia exponencial, estos resultados aparecen reflejados en la Figura 2 del Anexo 2.

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de vida nominal ajustada para variaciones de L_{10} , en este caso se mantuvieron los valores del factor de ajuste de fiabilidad (a_1) y el factor de ajuste a_{SKF} , la expresión matemática empleada es la misma que se utilizó en los dos análisis anteriores.

Tabla 3.6. Vida nominal ajustada (L_{nm}) variando L_{10} .

a_1	a_{SKF}	L_{10}	L_{nm}
1	0,1	34328	3433
		10171	1017
		4291	429
		2197	220
		1271	127
		801	80
		536	54
		377	38
		275	27

Los resultados obtenidos muestran como a medida que disminuye la vida nominal, existe una disminución de la vida nominal ajustada, explicado por un comportamiento potencial decreciente, que puede ser evaluado por el modelo que aparece en la Figura 3 del Anexo 2.

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos de la vida nominal ajustada expresada en horas, los mismos fueron calculados en función de la velocidad de rotación y los valores de vida nominal ajustada en millones de revoluciones expuestas en la Tabla 3.4, la expresión empleada para el cálculo fue la 2.4.

Tabla 3.7. Vida nominal ajustada (L_{nmh}) variando el factor a_1 .

n	L_{nm}					
	3433	2128	1819	1510	1133	721
2	28606771	17736198	15161589	12586979	8714063	6007422
5	11442708	7094479	6064635	5034792	3485625	2402969
10	5721354	3547240	3032318	2517396	1742813	1201484
20	2860677	1773620	1516159	1258698	871406	600742
50	1144271	709448	606464	503479	348563	240297
100	572135	354724	303232	251740	174281	120148

200	286068	177362	151616	125870	87141	60074
500	114427	70945	60646	50348	34856	24030
1000	57214	35472	30323	25174	17428	12015
1500	38142	23648	20215	16783	11619	8010
2000	28607	17736	15162	12587	8714	6007
3000	19071	11824	10108	8391	5809	4005
5000	11443	7094	6065	5035	3486	2403
10000	5721	3547	3032	2517	1743	1201
20000	2861	1774	1516	1259	871	601
50000	1144	709	606	503	349	240
100000	572	355	303	252	174	120

En la Tabla 3.7 se observa como independientemente del valor de L_{nm} utilizado para el cálculo, a medida que aumenta la velocidad rotación disminuye la vida nominal ajustada (expresadas en horas), para todos los valores de velocidad de rotación evaluados, lo cual resulta lógico debido la naturaleza del contacto, tal como ha sido planteado por Martínez (1986) y Álvarez (1999).

Los resultados de vida nominal ajustada expresada en horas, obtenidos para las mismas velocidades de rotación de la Tabla 3.7 y los valores de vida nominal L_{nm} expuestos en las Tablas 3.5 y 3.6 aparecen en las Tablas 1 y 2 del Anexo 2. Al igual que lo mostrado en la Tabla 3.7, manifiesta un decrecimiento de la longevidad con el aumento de la velocidad de rotación.

3.4. Velocidad máxima recomendada para el rodamiento 6208

La velocidad máxima desarrollada para el rodamiento 6208, se estableció según los valores típicos del factor de velocidad y los distintos métodos de lubricación, expuestos en la Tabla 2.3 del capítulo anterior. Conocidas las características geométricas del rodamiento (diámetro medio igual a 60 mm) y establecidos los límites de aplicación por método de lubricación, se despejó la velocidad de rotación (Tabla 3.8) de la ecuación 2.5, obteniéndose el límite de velocidad a la cual este rodamiento puede trabajar para cada método de lubricación.

Tabla 3.8. Velocidad límite del rodamiento 6208 según método de lubricación.

Método de lubricación	n
Lubricación por baño de aceite	8333
Lubricación por circulación de aceite	12500
Lubricación por salpicadura de aceite	13333
Lubricación por neblina de aceite	25000
Lubricación por cantidad mínima	50000

3.5. Viscosidad mínima necesaria

La viscosidad mínima necesaria se obtuvo empelando el método analítico, utilizando las expresiones 2.7 y 2.8 para velocidades menores y mayores que 1000 min^{-1} respectivamente, las velocidades consideradas en el cálculo son las fijadas por SKF en el método gráfico para la obtención de la viscosidad mínima requerida.

Los valores calculados de la viscosidad mínima necesaria del rodamiento 6208 se graficaron (Figura 3.1) en función de las velocidades de operación, reflejando que según aumentan las velocidades de rotación disminuye la viscosidad mínima necesaria, lo cual está influenciado al aumento de la fuerza centrífuga y la energía transmitida al lubricante, requiriéndose menores valores de viscosidad para mayores velocidades.

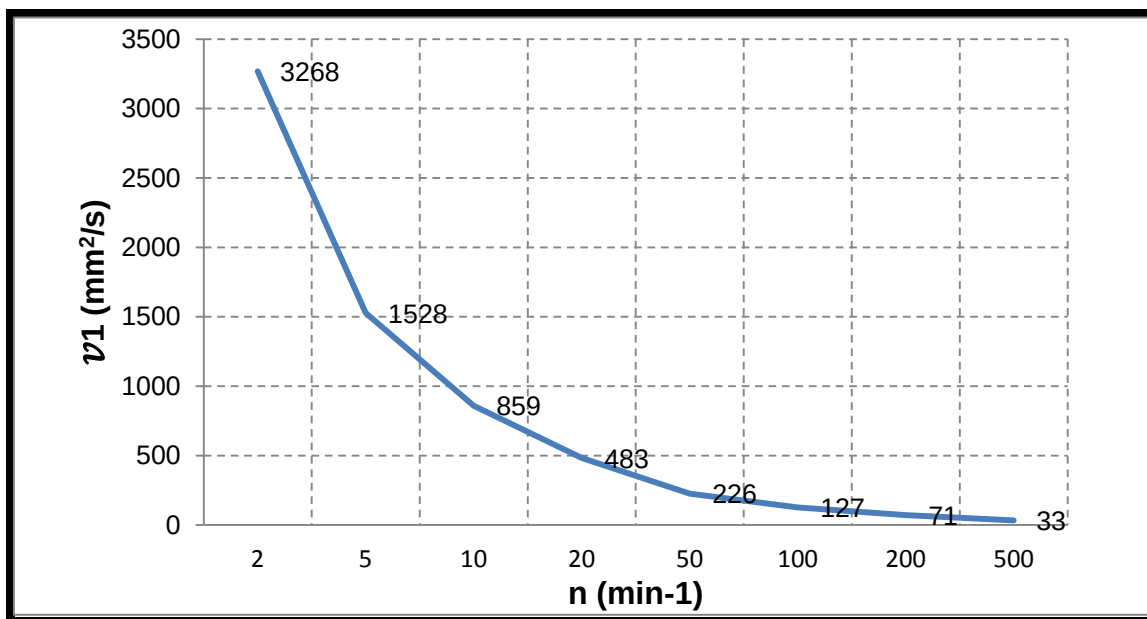


Figura 3.1. Comportamiento de la v_1 para $n < 1000 \text{ min}^{-1}$.

El cálculo de la viscosidad mínima necesaria por la expresión 2.8 se empleó, para velocidades mayores o igual que 1000 min^{-1} . Los valores obtenidos se muestran en la Figura 3.2 y reflejan un comportamiento similar a la Figura 3.1; sin embargo el rango de viscosidades calculadas (valores mínimos y máximos) resulta mucho menor, evidenciándose la marcada disminución que experimenta la viscosidad mínima necesaria al incrementarse la velocidad de rotación.

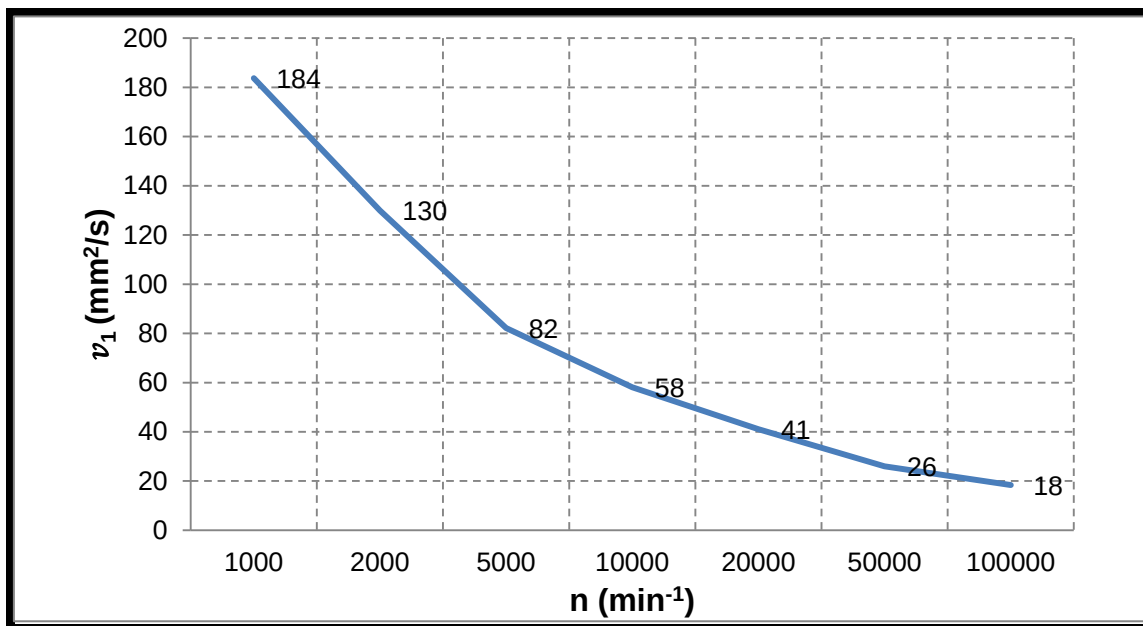


Figura 3.2. Comportamiento de las v_1 para $n > 1000 \text{ min}^{-1}$.

En la Figura 4 del Anexo 2 se muestra el comportamiento de la viscosidad mínima necesaria para la totalidad de las velocidades analizadas, aunque al igual que en las Figuras 3.1 y 3.2 se evidencia una disminución de la viscosidad mínima necesaria con el aumento de la velocidad de rotación, se observa en el rango de 500 a $1\,000 \text{ min}^{-1}$ un pico que se debe al cambio de expresión para su cálculo, resultado de adecuaciones realizadas a modelos anteriores.

3.6. Mediciones realizadas para la experimentación

La comprobación de las velocidades de rotación del rodamiento fue medida a través del tacómetro, que proporciona la lámpara estroboscópica SHIMPO modelo DT-311N. Se realizaron tres mediciones (Figura 3.3), en correspondencia con las relaciones de transmisiones de la máquina. Los valores registrados para el cálculo fueron tomados al

lograr la paralización de la imagen, producto de la correspondencia de la frecuencia de centelleo de la lámpara con la frecuencia de la máquina.



Figura 3.3. Medición de la velocidad de rotación del rodamiento.

Para determinar la masa de las cargas empleadas en la experimentación, se utilizó una pesa digital marca WeiHeng con precisión de 5 g en un rango de medición de 0 a 10 kg, los valores de las masas registradas aparecen en la Figura 3.4. Debe tomarse en consideración que para cada experimento se utiliza el doble de la masa mostrada, apropiando a las condiciones operacionales de la máquina (Figura 2.6).

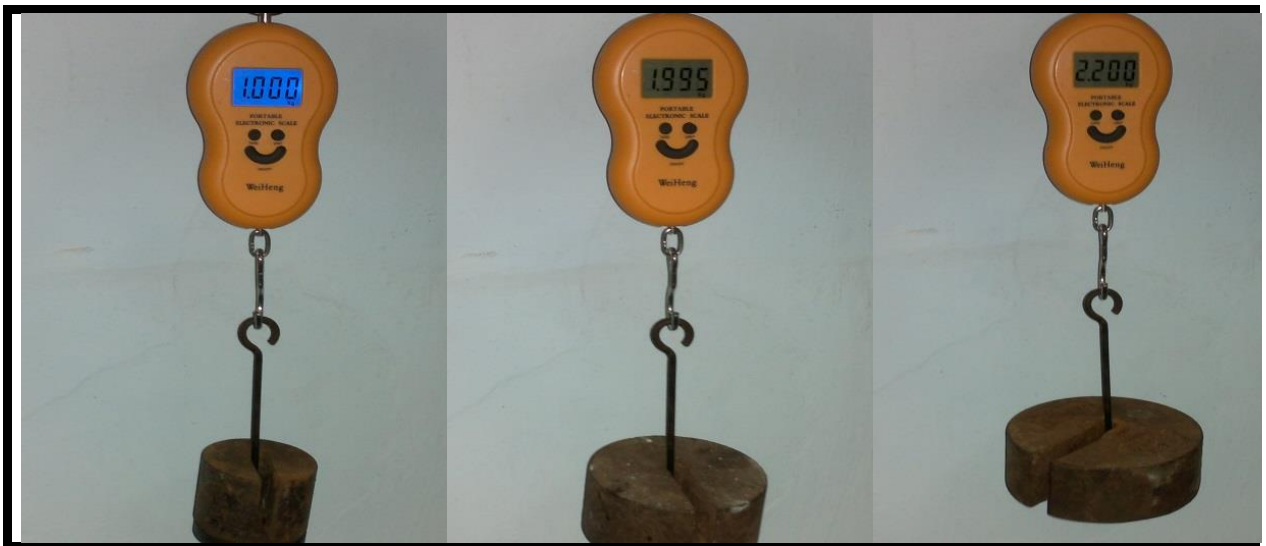


Figura 3.4. Medición de la carga aplicada al rodamiento.

3.7. Experimentación realizada

Para determinar la influencia de los parámetros de operación en la temperatura del aceite se utilizó un diseño factorial completo 3^2 , tomando como factores o variables independientes la velocidad de rotación del rodamiento con tres niveles experimentales (693, 2505 y 3754 min^{-1}) y la carga aplicada con igual número de niveles (20; 39,9 y 44 N). Los valores de temperatura obtenidos mediante la experimentación se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados obtenido para los experimentos realizados.

Exp.	Velocidad de giro	Carga	Temperatura registrada
1	693	20	48
2		39,9	52
3		44	54
4	2505	20	74
5		39,9	76
6		44	78
7	3754	20	84
8		39,9	93
9		44	95

Los valores de temperatura, obtenidos mediante la experimentación, al fijar la velocidad de rotación e incrementar la carga, refleja un ascenso, que varía desde ligero a moderado a medida que se incrementa la velocidad de rotación.

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

En la Tabla 3.10 se muestran los valores calculados de la viscosidad mínima necesaria, al igual que la viscosidad ISO. En este caso fueron establecidas tres viscosidades mínimas necesarias, las cuales se obtuvieron por el método analítico (ecuación 2.7 y 2.8) en función de la velocidad de operación y la característica geométrica del rodamiento, de igual forma se obtuvieron los grados de viscosidad que garantizan la viscosidad necesaria para aceites con índice de viscosidad (IV) de 95, 120, 160 y 240.

Tabla 3.10. Viscosidad mínima requerida y viscosidad ISO.

Exp.	Temp.	Viscosidad mínima necesaria	Grado de viscosidad ISO			
			IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1	48	25,48	46	46	32*	32*
2	52		46	46	46	46
3	54		46	46	46	46
4	74	116,07	1000	680	680	460
5	76		1000	1000	680	460
6	78		1000	1000	680	460
7	84	94,81	1500	1000	680	460
8	93		1500*	1500	1000	680
9	95		1500*	1500	1000	680

En la Tabla 3.10 se refleja cómo mantener la viscosidad mínima necesaria. A medida que aumenta el índice de viscosidad del aceite es menor el grado de viscosidad que se necesita, lo cual resulta un comportamiento legítimo si se toma en cuenta que el índice de viscosidad relaciona la variación que sufren los aceites con el incremento de la temperatura, mostrando un comportamiento más estable aquellos aceites de mayor índice de viscosidad. El asterisco representa las clases de aceite ISO normalizadas por el límite inferior.

En la Tabla mostrada (3.10) se tiene la viscosidad real de operación de los grados de viscosidad determinados en la tabla 3.11, en función de la temperatura registrada en la experimentación.

Tabla 3.11. Viscosidad real de funcionamiento.

Temperatura	IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
48	32,4	33	24,2	25
52	27,6	28,4	29,7	31,6
54	25,5	26,3	27,7	29,8
74	141,6	121,7	147	145

76	129,3	151,1	136,5	136,9
78	118,2	138,9	126,9	129,4
84	121,6	109,2	102,9	109,8
93	84	103,4	101,6	118,3
95	77,8	96,1	95,3	112,3

Los resultados expuestos en la Tabla 3.11 responden al valor real de la viscosidad, del grado de viscosidad seleccionado a la temperatura de funcionamiento. Esta viscosidad resulta fundamental y debe ser igual o ligeramente superior a la viscosidad mínima necesaria, en aras de garantizar la lubricación hidrodinámica del rodamiento.

3.9. Cálculo de la relación de viscosidad

Se calculó la relación de viscosidad (k) para todas las combinaciones existentes, tomando en consideración las nueve temperaturas registradas y los cuatro grados de viscosidad. Para el cálculo se tuvo en cuenta la relación entre la viscosidad real de funcionamiento y la viscosidad mínima necesaria y se utilizó la ecuación 2.9 (Tabla 3.12).

Tabla 3.12. Relación de viscosidad.

Relación de viscosidad k			
IV 95	IV 120	IV 160	IV 240
1,272	1,295	0,950	0,981
1,083	1,115	1,166	1,240
1,001	1,032	1,087	1,170
1,220	1,049	1,266	1,162
1,114	1,302	1,176	1,179
1,018	1,197	1,093	1,115
1,283	1,152	1,085	1,158
0,886	1,091	1,072	1,248
0,821	1,014	1,005	1,184

Los resultados obtenidos demuestran que para la mayoría de los casos evaluados se obtienen valores por encima de la unidad, sin embargo los valores de relación de viscosidad a la temperatura de 48 °C con aceites de grados de viscosidad 160 y 240, y los registrados para las temperaturas de 93 y 95 °C de índice de viscosidad 90, muestran valores menores que uno, lo que indica que es necesario emplear aditivos EP bajo estas combinaciones de explotación.

3.10. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio

Auxiliándose de los programas “Módulos para calcular el índice de viscosidad” y “El cálculo de la curva de viscosidad” desarrollados por la compañía Widman (2009), se desarrollaron los diagramas de selección de aceites industriales para índices de viscosidad 120 (Figura 3.5), 160 y 240 (Figuras 1 y 2, Anexo 3), ampliando el espectro de selección, que hasta el momento solo había sido 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.

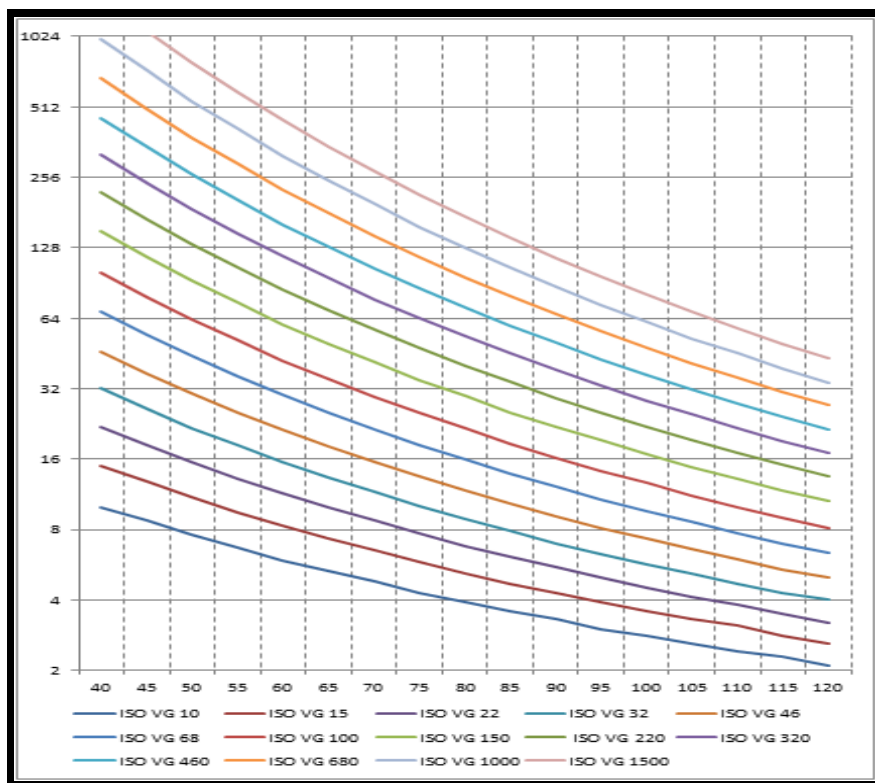


Figura 3.5. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 120.

3.11. Análisis económico

La adecuada lubricación de los rodamientos garantiza un periodo de vida útil más prolongado (FAG, 2007; FAG, 2014), lográndose solo la vida máxima estimada para condiciones de extrema limpieza, carga apropiada, y viscosidad idónea. La influencia de la viscosidad en la vida de un rodamiento aparece reflejada en el factor de ajuste a_{SKF} , si se retoma el análisis de la longevidad ajustada variando el factor antes mencionado correspondiente al tópico 3.3.2, se puede obtener el comportamiento mostrado en la Figura 3.6.

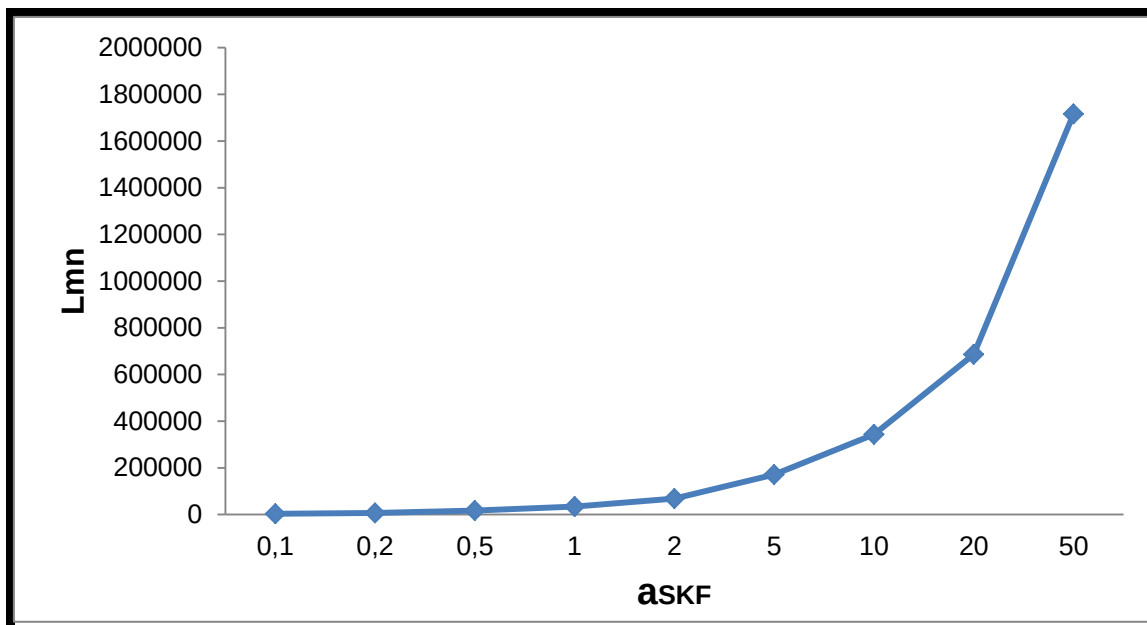


Figura 3.6. Comportamiento de la vida ajustada L_{mn} en función del factor a_{SKF} .

En el rango evaluado se observa como para el máximo valor a_{SKF} (donde se considera el efecto extraordinario del lubricante) calculado, se obtiene una longevidad 1 716 406 horas mientras que para las condiciones más críticas de lubricación y bajo las mismas condiciones de trabajo se alcanzan solo las 3 433 horas, resultando una disminución de más de 499 veces respecto al valor inicialmente apreciado. Adoptando el precio establecido por FAG (2014) de 31,30 USD para el rodamiento rígido de bolas 6208, se puede estimar que debido a una adecuada lubricación se puede realizar un ahorro máximo de 15 618,7 USD.

3.12. Análisis ambiental

El hombre es el principal causante de la contaminación del planeta, debido a la eliminación de residuos líquidos, domésticos e industriales, así como desperdicios sólidos que causan un efecto directo sobre el medio ambiente. Los aceites industriales utilizados en los rodamientos, son productos empleados en múltiples actividades y sus residuos pueden causar graves afecciones al medio ambiente y a la salud humana (Tabla 3.13). 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.

Tabla 3.13. Efecto de la lubricación sobre la salud humana.

Acción	Efecto
Contacto directo con la piel	Puede generar irritaciones
Inhalación	Puede generar graves intoxicaciones
Ingestión	Puede provocar la muerte

Por otro lado existe clara incidencia del efecto negativo que tiene un entorno ruidoso sobre las personas. Las molestias que ocasiona el ruido continuo provocado por un deficiente estado técnico del rodamiento, pueden ser de distintas índoles y van desde trastornos a la hora de dormir e incapacidad para concentrarse, hasta lesiones en la membrana auditiva, dependiendo de la intensidad y duración del ruido.

3.13. Conclusiones del capítulo

- Se estableció las cargas equivalentes para el rodamiento rígidos de bola 6208 en función de la longevidad establecida por SKF en horas de explotación lo cual queda determinado que para garantizar la vida recomendada no se debe aplicar cargas mayores que las obtenidas.
- Quedó demostrado el aumento de la longevidad del rodamiento al ser introducido los coeficiente de a_1 y a_{SKF} los cuales tienen en cuenta todas las influencias en los aceites y en la condiciones de trabajo, al igual que se creó los diagramas para la selección de los aceites con índice de viscosidad mayores que 95.

CONCLUSIONES GENERALES

- La carga equivalente máxima que puede soportar el rodamiento rígido de bolas 6208 es de 98,43 kN, registrada para el primer límite inferior de los valores orientativos y velocidad de rotación de 20 min^{-1} ; mientras que la carga mínima se registró para el último límite superior de los valores orientativos y velocidad de 100000 min^{-1} siendo de 0,39 kN.
- La evaluación de la longevidad del rodamiento 6208 a través del criterio de la vida nominal ajustada, demuestra la fuerte dependencia que existe en la duración del rodamiento, de los factores de ajuste de fiabilidad, el factor de ajuste a_{SKF} y la vida nominal; reflejando tendencias logarítmicas decreciente, creciente exponencial y potencial decreciente respectivamente.
- La condición de lubricación hidrodinámica para las velocidades y cargas utilizadas en la experimentación y las temperaturas registradas aseveran que; para un aceite de índice de viscosidad 95, con viscosidades mínimas necesarias de 25,48, 116,07 y 94,81 mm^2/s , deben emplearse aceites industriales con grado de viscosidad de 46, 1000 y 1500.
- Se crearon los diagramas para la obtención de la viscosidad de servicio en aceites industriales con índices de viscosidad 120, 160 y 240, reflejándose menor incidencia de la temperatura en la viscosidad para los aceites de mayor índice.

RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis similar al desarrollado en el presente trabajo para rodamientos de bola a contacto angular, rodamientos de rodillos cónicos, rodamientos de rodillos cilíndricos y rodamientos autoalineables.
- Ampliar el rango de experimentación utilizado en la investigación, considerando variables no tomadas en cuenta, determinando su influencia en la temperatura del aceite y su repercusión en la longevidad del rodamiento.
- Emplear los diagramas creados para la obtención de la viscosidad de servicio, cuando se trabaje con aceites industriales de índices de viscosidad 120, 160 y 240.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E. 1999.** *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.
- Albarracín, P. 2005.** *Fundamentos sobre lubricación*. Antioquia, Colombia. No. 5. Vol. IV
- Aponte, J; Villazón, A. 1999.** *Incidencia de la lubricación en elementos mecánicos en movimiento*. pág 93- 100.
- Alberracin, A. 2003.** *Selección correcta de un aceite industrial*. Medellín, Colombia.
- BDC International S.A. 2010.** *Seminario de rodamientos Tema: Lubricación y montaje*. Moa. pág. 29.
- Benlloch, J. 1986.** *Lubricantes y lubricación aplicada*. La Habana, Cuba. pág. 113. SNLC:CU01.40220.x.
- Castillo, F. 2007.** *Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Ingeniería*. Cuautitlán Izcalli. Tesis de grado.
- Castrol, 2012.** *Catálogo general de lubricantes*. Madrid.
- Corzo, L; González, G. 2012.** *Estimación analítica del efecto de la desalineación angular en la duración de rodamientos de bolas*. Revista Cubana de Ingeniería, No. 3. Vol. III, pág 65-73. ISSN 2223 -1781.
- Delgado, J. 2006.** *Sistemas de lubricación a bordo*. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Tesis de grado.
- Elizagárate, C. 2010.** *Los lubricantes para automoción*. 7ma ed. Madrid.
- 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 para máquinas y equipos*. Guayaquil, Ecuador.

- Freund, J; Miller, I; Johnson, R. 1996.** *Probabilidad y estadística para ingenieros*. La Habana Cuba: Editorial Félix Varela.
- Fuller, D. 1984.** *Theory and Practice of Lubrication for Engineers*. N. York: Editorial Mc Graw.
- Farías, J. 2008.** *Diseño e implantación de un plan de lubricación*. Guayaquil Ecuador.
- González, G. 2009.** *Nociones sobre la designación de rodamientos*. La Habana, Cuba: 2009.
- García, A; González, G; García, M. 2007.** *Capacidad de carga estática en rodamientos. normalización y tendencias*. No. 1. pág 31-38.
- Hernández, F; Atxa, V. 2007.** *Aplicación de técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones al diagnóstico de cojinetes. Análisis experimental*. La Habana, Cuba: Ingeniería Mecánica, Vol. I, pág. 71- 82.
- Herreras, M. 2004.** *Desarrollo de un prototipo tribológico funcional para evaluar el desgaste por fatiga por contacto de rodadura*. México.
- Hobson, D. 1970.** *Práctica de la lubricación industrial*. Madrid: Ediciones Interciencia.
- Martínez, F. 1968.** *Teoría y práctica del rozamiento*. La Habana, Cuba. ISPJAE.
- Nieto, A. 2007.** *Elementos de máquinas*. Castilla, La Mancha, 2007.
- 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.
- Rivero, G. 2010.** *Problemas endógenos de la explotación de la tecnología del rodamiento*. La Habana Cuba.
- Romero, J. 2003.** *Simulación computacional para el estudio termoelastohidrodinámico de cojinetes radiales de patines pivoteados*. Universidad Zulia. Maracaibo. Tesis de grado.

- Rivero, G; Tauler, J; Gaubeca, S. 2005.** *Modelación de las cargas de reacción en los apoyos de los árboles de la transmisión por tornillo sinfín.* La Habana, Cuba. No. 2, pág 59 - 65.
- Reshetov. 1985.** *Elementos de Máquinas.* La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
- Richard, G; Keith, J; Ríos , M. 2008.** *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* México. ISBN-10: 970-10-6404-6.
- SKF. 2008.** *Catálogo general.* Suecia.
- Shell. 2011.** *Introducción a los lubricantes y a la lubricación.* Madrid, España.
- Saavedra, J. 2012.** *Irregularidad en la lubricación de cojinetes hidrostáticos de los espesadores de pulpa en la empresa "Pedro Sotto Alba.* Moa, Cuba. Tesis de ingeniería.
- Wellesley, J; Martínez, L. 2007.** *Influencia del movimiento tridimensional sobre los engranajes planetarios tipo 2KH-A en aerogeneradores.* La Habana, Cuba. Ingeniería Mecánica, No. 2, Vol. 3, pág 77 – 82. ISSN 1029-516X.
- Widman. 2005.** *Fundamentos de la Lubricación, Fricción y Desgaste.* Santa Cruz.
- Widman. 2009.** *Calculo de la curva de viscosidad.* [En línea] 2009. [Citado el: 12 de Enero de 2014.] Disponible en: <http://www.widman.biz>.
- Widman. 2009.** *Indice de viscosidad.* [En línea] 2009. [Citado el: 12 de Enero de 2014.] Disponible en: <http://www.widman.biz>.

ANEXO 1

Tabla 1. Valores orientativos del factor η_c para distintos niveles de contaminación.

Condición	rodamientos con diámetro	
	Dm < 100 mm	Dm ≥ 100 mm
MUY LIMPIO: Tamaño de partículas del orden del espesor de la película lubricante. Condiciones de laboratorio	1	1
LIMPIO: Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino. Condiciones típicas de los rodamientos engrasados y obturados de por vida	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
NORMAL: Aceite filtrado a través de un filtro fino. Condiciones típicas de los rodamientos, engrasados de por vida y con placas de protección	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
CONTAMINACIÓN LIGERA: Lubricante ligeramente contaminado	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
CONTAMINACIÓN TÍPICA: Condiciones típicas de los rodamientos sin obturaciones integradas, filtros de paso grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas desde el entorno	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
CONTAMINACIÓN SEVERA: Entorno del rodamiento muy contaminado y disposición no obturada adecuadamente	0,1 ... 0	0,1 ... 0
CONTAMINACIÓN MUY SEVERA: Bajo condiciones de contaminación extrema los valores de η_c pueden estar fuera de la escala resultando en una reducción más severa de la vida que la predicha por la ecuación L_{nm}	0	0

Fuente: SKF, 2008.

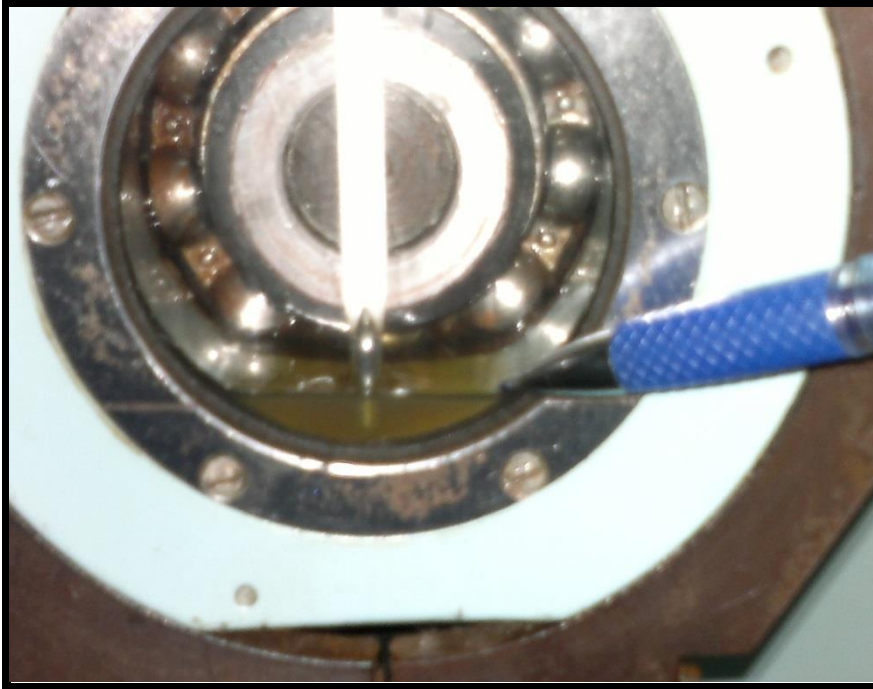


Figura 1. Nivel de aceite mantenido en la máquina durante la experimentación.



Figura 2. Relación de transmisión.

ANEXO 2

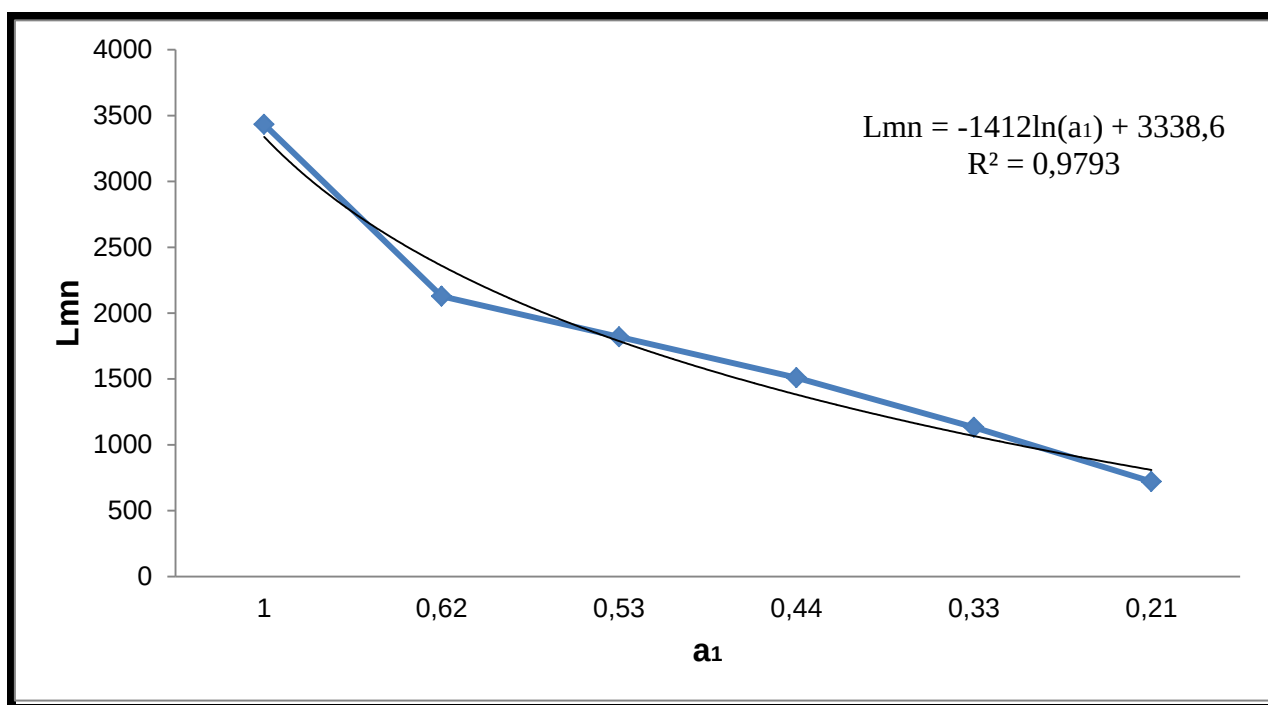


Figura 1. Comportamiento de la vida ajustada L_{mn} en función del factor a_1 .

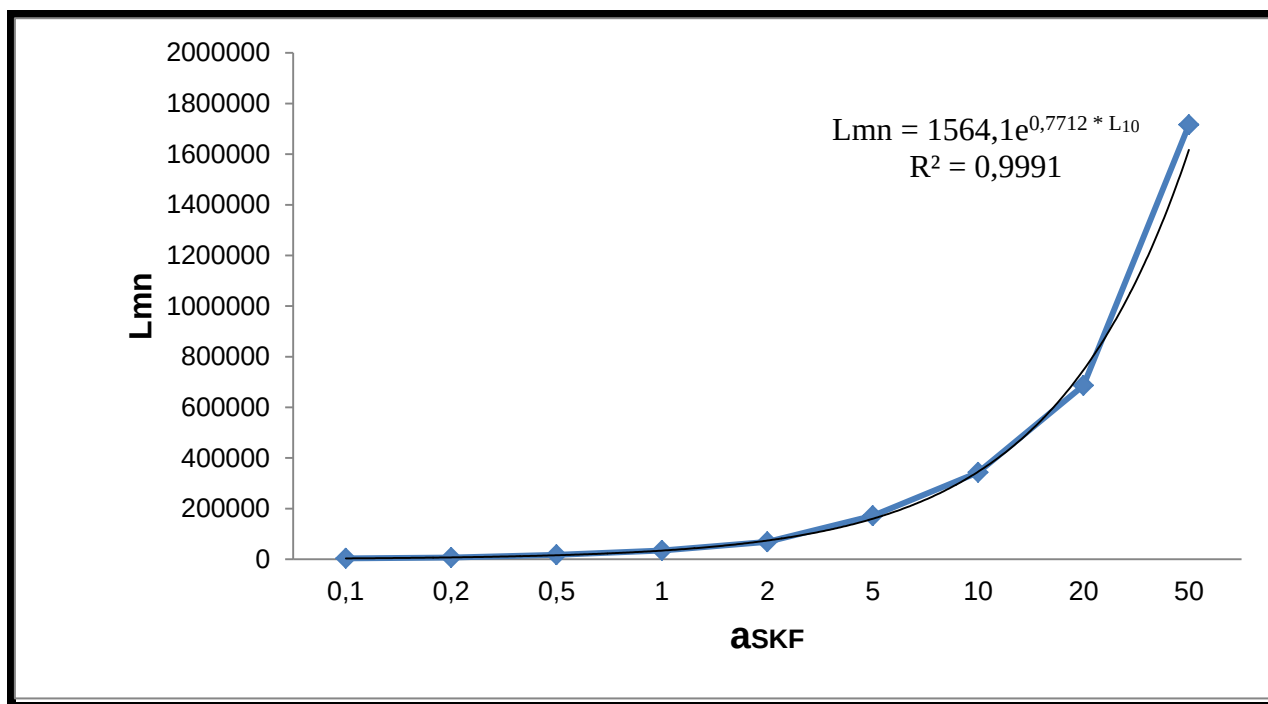


Figura 2. Comportamiento de la vida ajustada L_{mn} en función del factor a_{SKF} .

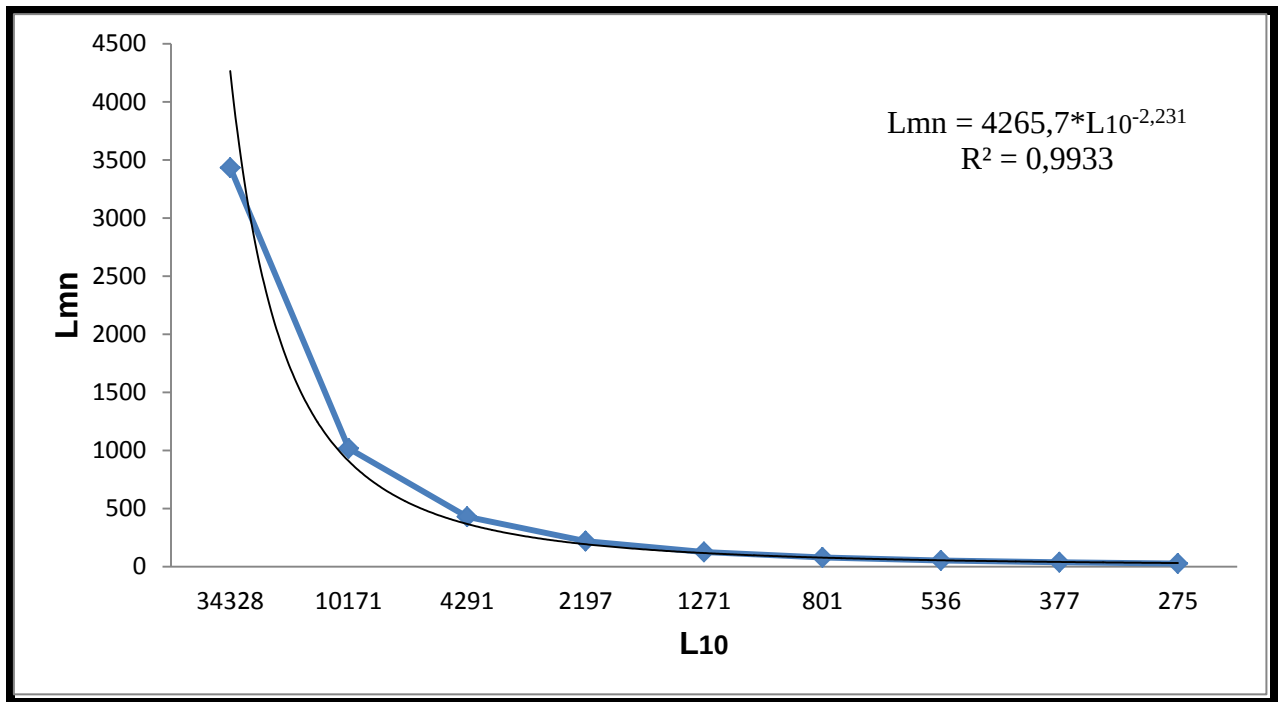


Figura 3. Comportamiento de la vida ajustada L_{mn} en función de L_{10} .

Tabla 1. Vida nominal SKF L_{nmh} variando el factor a_{SKF} .

n	L_{nm}					
	3433	6866	17164	34328	68656	171641
2	28606771	57213542	143033854	286067708	572135417	1430338542
5	11442708	22885417	57213542	114427083	228854167	572135417
10	5721354	11442708	28606771	57213542	114427083	286067708
20	2860677	5721354	14303385	28606771	57213542	143033854
50	1144271	2288542	5721354	11442708	22885417	57213542
100	572135	1144271	2860677	5721354	11442708	28606771
200	286068	572135	1430339	2860677	5721354	14303385
500	114427	228854	572135	1144271	2288542	5721354
1000	57214	114427	286068	572135	1144271	2860677
1500	38142	76285	190712	381424	762847	1907118
2000	28607	57214	143034	286068	572135	1430339
3000	19071	38142	95356	190712	381424	953559
5000	11443	22885	57214	114427	228854	572135

10000	5721	11443	28607	57214	114427	286068
20000	2861	5721	14303	28607	57214	143034
50000	1144	2289	5721	11443	22885	57214
100000	572	1144	2861	5721	11443	28607

Tabla 2. Vida nominal SKF L_{nmh} variando L_{10} .

n	L_{nm}					
	3433	1017	429	220	127	80
2	28606771	8476080	3575846	1830833	1059510	667213
5	11442708	3390432	1430339	732333	423804	266885
10	5721354	1695216	715169	366167	211902	133443
20	2860677	847608	357585	183083	105951	66721
50	1144271	339043	143034	73233	42380	26689
100	572135	169522	71517	36617	21190	13344
200	286068	84761	35758	18308	10595	6672
500	114427	33904	14303	7323	4238	2669
1000	57214	16952	7152	3662	2119	1334
1500	38142	11301	4768	2441	1413	890
2000	28607	8476	3576	1831	1060	667
3000	19071	5651	2384	1221	706	445
5000	11443	3390	1430	732	424	267
10000	5721	1695	715	366	212	133
20000	2861	848	358	183	106	67
50000	1144	339	143	73	42	27
100000	572	170	72	37	21	13

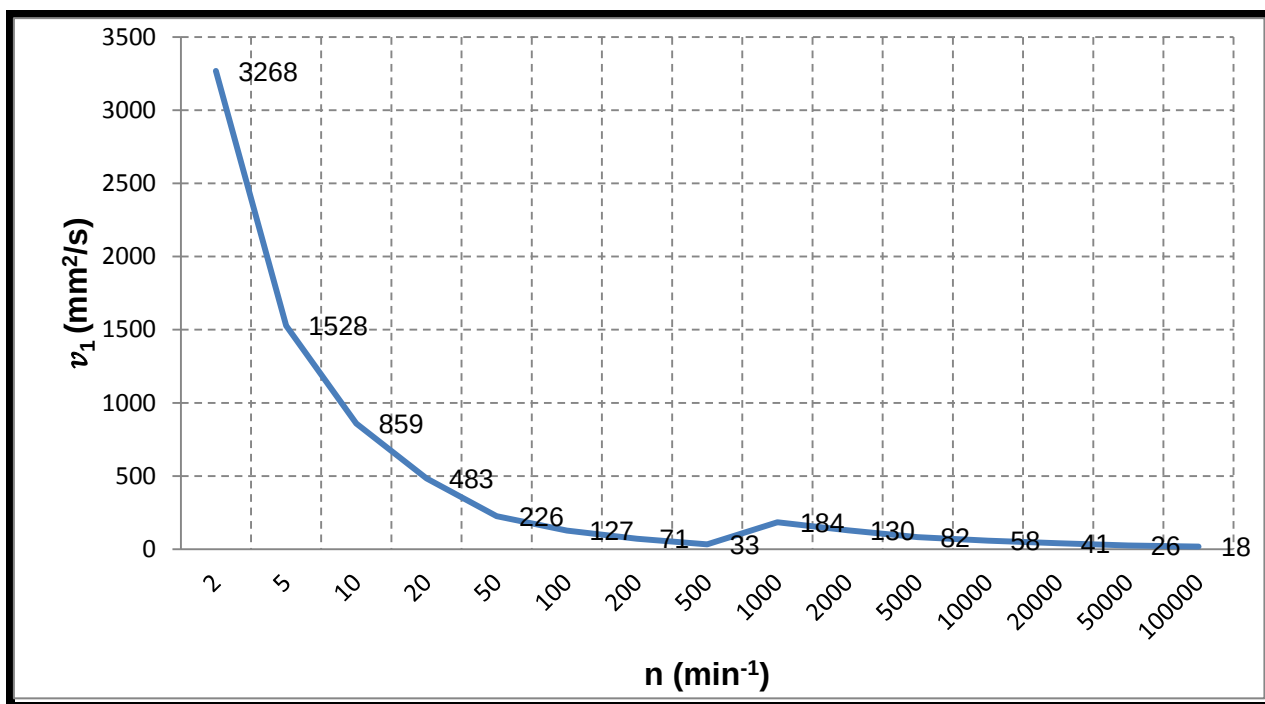


Figura 4. Comportamiento de las v_1 .

ANEXO 3

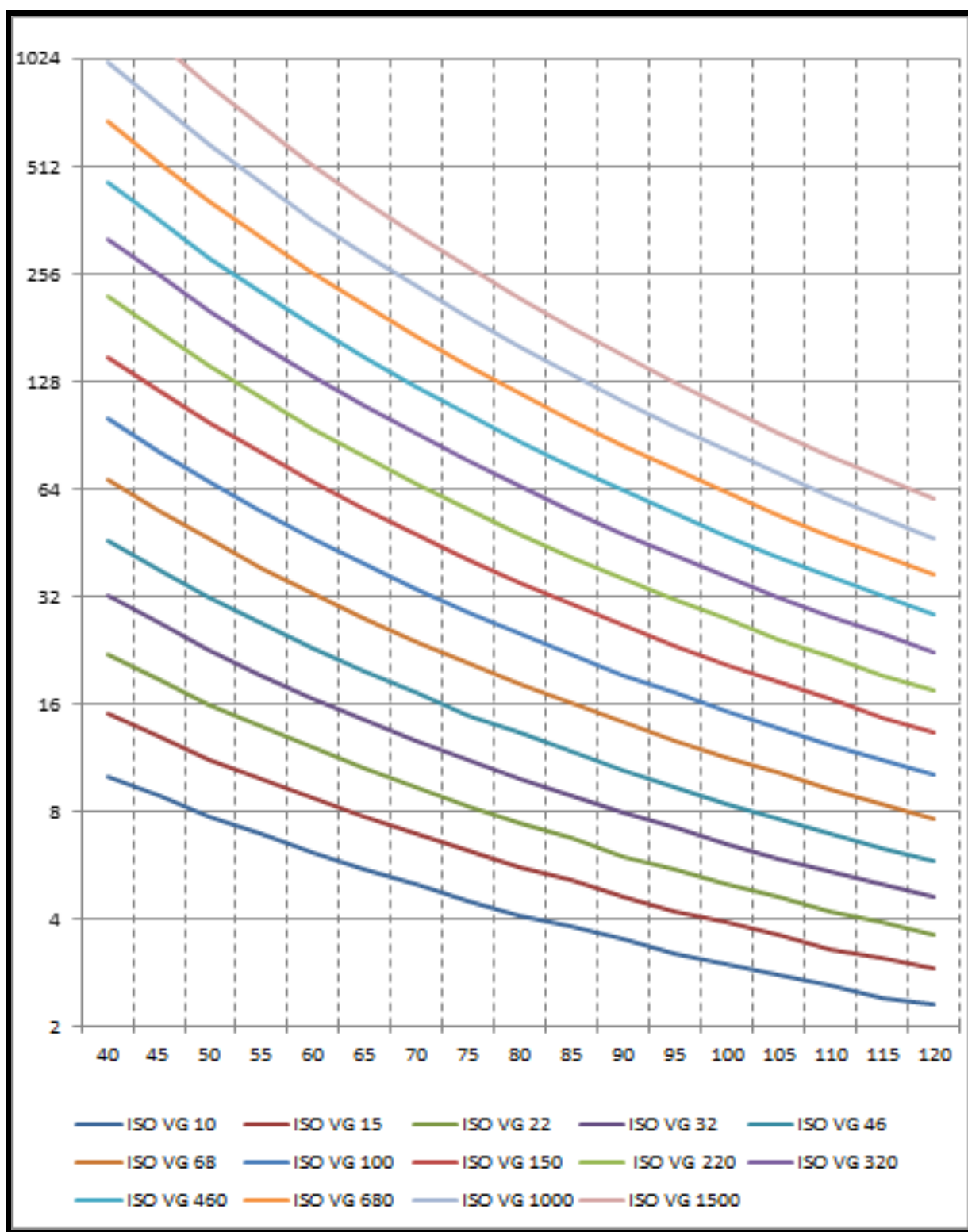


Figura 1. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 160.

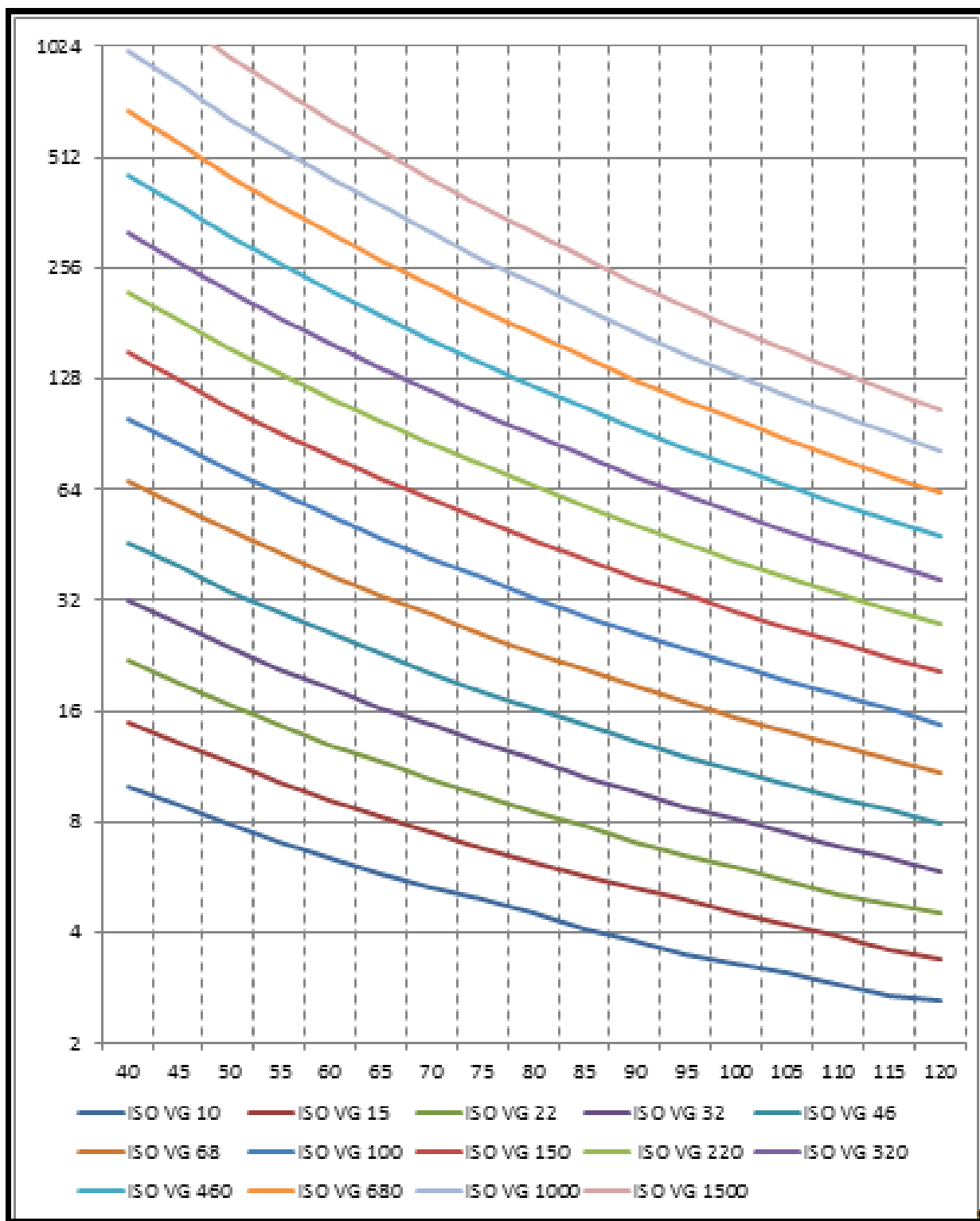


Figura 2. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 240.