



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis presentada en opción al título de
Ingeniero mecánico

SELECCIÓN DEL TIPO DE ACEITE PARA EL VENTILADOR 121-02-UE-22 DE LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

Autor: Celso Abel Matutes Charchabal.

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

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

Moa, 2018

DECLARACIÓN DE AUTOR

Yo Celso Abel Matutes Charchabal, 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: Celso Abel Matutes Charchabal

Tutor: Amauris Gilbert Hernández

Tutor: Isnel Rodríguez González

Pensamiento

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

Henry Ford

Dedicatoria

- ❖ **A Dios**, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.
- ❖ **A la Revolución Cubana y nuestro Comandante en Jefe** por darme la posibilidad de formarme como un profesional capaz y competente.
- ❖ **A mi madre** por darme la vida, quererme mucho, creer en mí, por siempre apoyarme y estar en los momentos buenos y malos de mi vida.
- ❖ **A mi padre** por educarme, enseñarme, prepararme para la vida. Brindarme todo su apoyo incondicional, incluso cuando la vida me mostraba su cara oscura, por además darme la posibilidad de creer en mí aun cuando las circunstancias me hacían dudar del triunfo.
- ❖ **A mi novia** Lexin Virgen Rigña Gainza por todo su apoyo amor y dedicación, por suplementar la ausencia de mi madre tantas veces por quererme y amarme cuando no lo merezco, por todo eso y más le agradezco.
- ❖ **A mi tutor**, su tiempo, paciencia y comprensión, por ser además un buen amigo.
- ❖ **A mi primo querido**, Abel Matutes Guardarramos por guiarme y muchas veces educarme.
- ❖ **A mi grandísima y maravillosa familia.**
- ❖ **A mis amigos** Oniel, Jorlis, Arley, Rogelio, Luis Rolando, por ser más que amigos ser mis hermanos.
- ❖ **A mis vecinos de barrio, conocidos de viajes, Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.**

Resumen

En el trabajo se seleccionó la clase y el tipo de aceite para garantizar una adecuada longevidad, de los rodamientos del ventilador 121-02-UE-22 de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Se realizó una revisión bibliográfica que permitió conocer el estado actual de las investigaciones relacionadas con la lubricación de los rodamientos. Se aplicó el estudio a los rodamientos 22330 localizados en el eje del ventilador 121-02-UE-22 de la Empresa Productora de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara en el municipio de Moa. Para estos rodamientos se determinó las clases de aceites que garantizan la correcta lubricación para las 24 temperaturas registradas en un día de funcionamiento, proponiéndose el aceite ISO VG100, con índice de viscosidad 95, para la correcta lubricación de ambos tipos de rodamientos.

Summary

In the work the class and the type of oil were selected to guarantee an adequate longevity, of the bearings of the fan 121-02-UE-22 of Comandante Ernesto Che Guevara. A bibliographic review was made that allowed to know the current state of the investigations related to the lubrication of the bearings. The study was applied to the bearings 22330 located on the shaft of the fan 121-02-UE-22 of the Company Producer of Nickel Commander Ernesto Che Guevara in the municipality of Moa. For these bearings the classes of oils that guarantee the correct lubrication for the 24 temperatures registered in a day of operation were determined, proposing the oil ISO VG 100, with index of viscosity 95, for the correct lubrication of both types of bearings.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO	4
1.1. Introducción	4
1.2. Máquinas soplantes centrífugas	4
1.2.1. Sopladores centrífugos	4
1.2.2. Compresores de fluidos	5
1.2.3. Ventiladores centrífugos	5
1.3. Rodamientos empleados en ventiladores centrífugos	8
1.3.1. Cargas que actúan en los rodamientos de rodillos a rótula	10
1.3.2. Cargas estáticas	10
1.3.3. Cargas dinámicas	10
1.4. Longevidad en rodamiento	11
1.4.1. Vida nominal	11
1.4.2. Vida nominal ajustada o vida nominal SKF	13
1.5. Funciones de la lubricación en los rodamientos	13
1.5.1. Regímenes de lubricación	14
1.5.2. Lubricación hidrodinámica	15
1.5.3. Lubricación mixta	15
1.5.4. Lubricación límite	16
1.6. Métodos de lubricación aplicados a ventiladores	16
1.7. Sistemas de lubricación con aceites	17
1.7.1. Lubricación por circulación de aceite	18
1.7.2. Criterios de selección de aceites para rodamientos	18

1.8. Fallas prematuras en los rodamientos	19
1.8.1. Daños debidos a lubricación deficiente	20
1.9. Conclusiones parciales	23
2. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Introducción del capítulo	24
2.2. Obtención de las cargas radiales y axiales en los rodamientos.....	24
2.3. Cálculo de la longevidad de rodamientos	25
2.3.1. Capacidad de carga axial de los rodamientos montados sobre un manguito de fijación	25
2.3.2. Vida nominal de un cojinete de rodamiento.....	26
2.3.3. Vida nominal ajustada de un cojinete de rodamiento	27
2.4. Selección del método de lubricación.....	32
2.4.1. Selección de la viscosidad del aceite lubricante	33
2.5. Método analítico para determinar la viscosidad mínima necesaria	34
2.5.1. Método gráfico para determinar la viscosidad requerida	34
2.5.2. Grados ISO de aceites lubricantes.....	35
2.6. Relación de viscosidad	36
2.7. Cantidad de lubricante en el sistema de circulación de aceite.....	37
2.7.1. Breve descripción del ventilador centrífugo 121-02-UE-22	37
2.8. Técnicas experimentadas realizadas.....	39
2.9. Conclusiones parciales.....	39
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	40
3.1. Introducción	40
3.2. Caracterización del ventilador centrífugo 121-02-UE-22	40

3.3. Obtención de las reacciones en los apoyos del árbol del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 a través del Software XVIGAS	41
3.4. Velocidad máxima recomendada para rodamientos 22330	43
3.5. Medición de la temperatura en el ventilador centrífugo 121-02-UE-22	44
3.6. Cantidad de lubricante en el sistema de circulación de aceite.....	45
3.7. Cálculo de la viscosidad necesaria y grado de viscosidad ISO	47
3.8. Viscosidad real de funcionamiento	48
3.9. Cálculo de la relación de viscosidad	49
3.10. Grados ISO alternativos para índice de viscosidad 95	50
3.11. Tipos de aceites recomendados y alternativos	52
3.12. Vida nominal y vida nominal ajustada del rodamiento 22330	52
3.12.1. Capacidad de carga axial máxima permisible	53
3.12.2. Vida nominal	53
3.12.3. Vida nominal ajustada	54
3.13. Análisis económico	55
3.14. Análisis ambiental	56
3.15. Conclusiones del capítulo	56
CONCLUSIONES GENERALES	57
RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXO	61

INTRODUCCIÓN

La empresa minera Comandante Ernesto Che Guevara está ubicada en la región oriental de nuestro país en la provincia Holguín municipio Moa la cual fue construida entre los años 1973 y 1985, como resultado de la cooperación entre Cuba y la antigua Unión Soviética. La misma se desarrolla en la práctica de una minería de tipo cielo abierto en la que una vez obtenida la materia factible de los yacimientos es trasladada a las plantas encargadas de procesar la mena laterítica utilizando para ello el proceso CARON conocido por los cubanos como Lixiviación-Carbonato-Amoniaca, siendo diseñada para producir 30 000 toneladas de Ni+Co anualmente dicha producción es destinada a la exportación con fin de generar ingresos de divisas a nuestro país.

En este momento la industria antes mencionada se encuentra trabajando al 50 % de su capacidad productiva dada la crisis energética existente en nuestro país y las constantes averías que presentan su técnica por los años de explotación de las maquinarias y la imposibilidad de nuestro país debido a la existencia de un crudo bloqueo económico impuesto a nuestra isla por el gobierno de Estados Unidos.

Una de las plantas que intervienen en el proceso productivo de la industria es la de preparación de mineral donde se inicia el proceso productivo de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara, según la tecnología Carbonato amoniacal. Todo el mineral procedente de las minas de extracción llega a la planta a través de tiro por camiones primero y mediante transportadores después, que lo introducen al depósito interior de la planta, este tiene capacidad suficiente para almacenar materia que se suministrara cuando el flujo de material de las minas se detenga por cualquier inclemencia.

Una vez dentro este mineral alimenta los tambores secadores en los cuales por medio del intercambio de calor con el aire caliente de la cámara de combustión disminuye su humedad. Este flujo de aire es posible por la existencia de tres ventiladores centrífugos registrado por las nomenclatura 121-02-VE -21; 121-02-VE -22; y 121-02-VE -23 que se encuentran al final de la descarga los cuales aprovechan los gases producidos en la plata de horno de reducción en aras de aumentar la eficiencia de la planta como respuesta a las necesidades del país.

Las constantes fallas de los ventiladores antes mencionados se encuentra en sus rodamientos registradas en el SGESTMAN (software encargado de registrar el plan de mantenimiento así como su cumplimiento y la cantidad de intervenciones que se le hacen a un equipo en el periodo de cinco años) se impone la necesidad de un estudio de ingeniería que determine las causas y efectos de dichas fallas lo cual es la razón de la existencia de este proyecto ingeniería el que a continuación declarará en aras de dirigir su investigación su situación problemática.

Situación Problemática

En el proceso productivo de la planta de preparación de mineral intervienen con fin de aumentar la eficacia del secado del mismo tres ventiladores centrífugos que se encargan de trasegar gases a altas temperaturas que son resultado del tratamiento realizado en la planta de hornos de reducción los cuales registran numerosas fallas en sus rodamientos en cortos periodos de tiempos afectando así la eficiencia de la productividad de la planta de preparación de mineral lo cual aumenta el costo de producción del níquel y cobalto debido a que se tiene que emplear mayor cantidad de combustible para elevar la temperatura en la cámara de combustión.

Problema

Necesidad de seleccionar el tipo de aceite capaz de garantizar la longevidad de los rodamientos del ventilador centrífugo 121-02-UE-22, de la planta Preparación de Mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objeto de la investigación

Rodamiento 22330 del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 de la planta Preparación de Mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Campo de acción

Influencia de la lubricación en la longevidad de rodamientos.

Objetivo del trabajo

Seleccionar el tipo de aceite capaz de garantizar la longevidad adecuada para los rodamientos del ventilador 121-02-UE-22 de la empresa Ernesto Che Guevara.

Hipótesis

Si se establecen las características geométricas de los rodamientos, las cargas que soportan y el rango de temperatura de trabajo, es posible seleccionar el tipo de aceite capaz de garantizar la longevidad adecuada para los rodamientos del ventilador 121-02-UE-22 de la empresa Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos

- Evaluar la longevidad de los rodamientos del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 de la empresa Ernesto Che Guevara.
- Seleccionar la clase de aceite que garantice la formación de la lubricación hidrodinámica de los rodamientos.

Tareas del trabajo

- Determinación de las cargas actuantes en los rodamientos.
- Caracterización de los rodamientos del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 de la empresa Ernesto Che Guevara.
- Recopilación de información en el sistema de adquisición de datos Citect, empleado en la empresa.
- Comprobación de la idoneidad del sistema de lubricación empleado para la lubricación de los rodamientos.
- Evaluación económica y ambiental asociada a la investigación.

1.MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

1.1. Introducción

Las máquinas en general son aparatos poderosos de los que se sirve al hombre para la producción, en los cuales están previamente calculados los efectos de las fuerzas de potencia, roce, peso y resistencia, así como sus movimientos, teniendo como fin la utilización de las fuerzas de la naturaleza, para modificarlas, transformarlas, transmitir las y gastarlas con la debida oportunidad y la conveniente celeridad, a fin de que den el resultado apetecido, pues aunque carecen de voluntad, de inteligencia y de destreza, funcionan con mayor ajuste, regularidad y precisión que el más despejado obrero (Céspedes, 2013). Estos aparatos, si bien tienen movimientos constantes, circunscritos y regulados por sus piezas, y si bien no piensan, juzgan y deliberan en sus procedimientos, el hombre los impulsa, los dirige y las adapta a sus fines productores, en calidad de auxiliarse de su trabajo (Larrazabal, 2013).

Objetivo para este capítulo: exponer los fundamentos teóricos relacionados con la lubricación y longevidad de rodamientos en ventiladores centrífugos, a partir de la sistematización del conocimiento de la bibliografía consultada.

1.2. Máquinas soplantes centrífugas

Las máquinas soplantes pueden dividirse en tres clases generales que, a semejanza de las bombas, no tienen marcada una clara línea de separación entre ellas. Estas tres clases según Church (1976) se les designa con las denominaciones de:

- Sopladores centrífugos.
- Compresores de fluidos.
- Ventiladores centrífugos.

1.2.1. Sopladores centrífugos

Un soplador es una máquina destinada a la compresión de aire o de un gas mediante la fuerza centrífuga hasta una presión final no superior a $2,46 \text{ kg/cm}^2$ (0,24 MPa) (Ramos, 1994). No se usa en ellos la refrigeración con agua, pues el costo adicional del sistema refrigerante no resulta justificado en vista de la ganancia relativamente pequeña que se obtiene con estas presiones de trabajo.

Cuando se usan en aplicaciones especiales se les da algunas veces otras denominaciones. En la industria del gas, los sopladores usados para extraer los gases de los hornos de coquefacción son conocidos con la denominación de aspiradores. Si la presión en la aspiración es superior a la atmosférica, el soplador es conocido con la denominación de compresor o alimentador (Church, 1976).

1.2.2. Compresores de fluidos

Los compresores de fluidos, también llamados compresores centrífugos radiales, son un tipo especial de turbomaquinaria que incluye bombas, ventiladores, o compresores (Wales& Sears, 2013). Los modelos más primitivos de este tipo de máquina eran las bombas y los ventiladores, lo que diferencia a estos de los compresores es que el fluido de trabajo puede ser considerado incompresible, permitiendo así, un análisis preciso a través de la ecuación de Bernoulli (Church, 1976). Los compresores centrífugos producen un incremento de densidad mayor que un 5 %, además, la velocidad relativa del fluido puede alcanzar un número de Mach de 0,3 si el fluido de trabajo es aire o nitrógeno, por otra parte, son máquinas destinadas a comprimir un aire o un gas hasta una presión final superior a 2,46 kg/cm² (0,24 MPa), estableciendo, asimismo, que tales aparatos están invariablemente refrigerados con agua. Algunas veces se aplica esta denominación a las máquinas multicelulares en general, independientemente de las presiones finales o de la refrigeración. Aunque se han construido compresores para presiones que exceden de los 7,03 kg/cm² (0,7 MPa), son las máquinas alternativas las que comúnmente se emplean para presiones mayores de 3,515 kg/cm² (0,35 MPa) (Mataix, 1986).

1.2.3. Ventiladores centrífugos

(Matos, 2010) Un ventilador es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire, es laturbomáquina que absorbe energía mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión no mayor de 1,0 mm de agua aproximadamente, por lo que da lugar a una variación muy pequeña del volumen específico y suele ser considerada una máquina hidráulica (Wales& Sears, 2013). Los ventiladores se usan cuando se requieren bajas presiones (desde unos pocos centímetros de columna de agua hasta 0,07 kg/cm² (0,007 MPa)) y grandes

volúmenes comparativamente. Funcionan a velocidades relativamente pequeñas, estando, por lo general, la cubierta y el rodete contruidos de plancha de acero.

Ventiladores centrífugos, sus características geométricas principales

Los principales elementos que componen un ventilador centrífugo, según Ramos (1994) se muestran en la Figura 1.1.

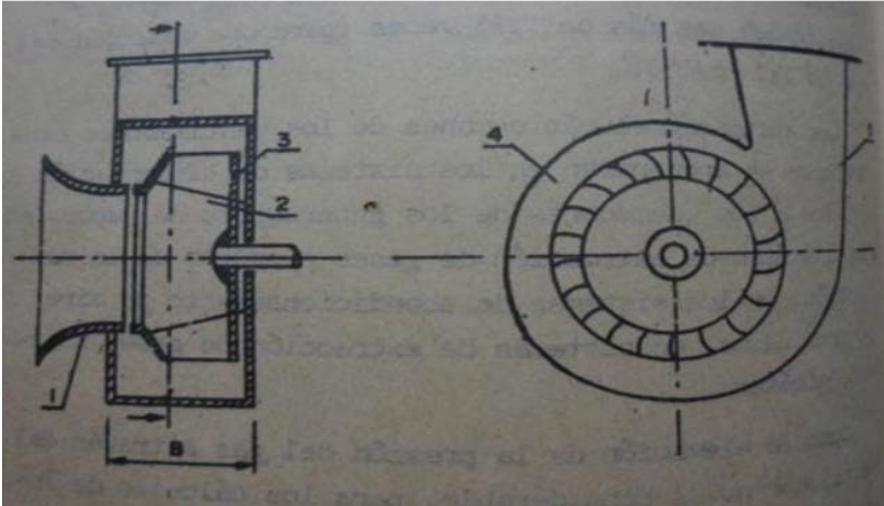


Figura 1.1. Esquema de un ventilador centrífugo (Fuente: Ramos, 1994).

Dentro de las partes de un ventilador centrífugo destacan: el conducto de entrada del fluido (1), el impelente (2) el cual está formado por álabes (3), ambos se encuentran dentro de la voluta (4) con el fin de impulsar el fluido al conducto de descarga (5).

1. Conducto de entrada: El conducto de entrada es el encargado de conducir el gas desde el exterior del ventilador hacia el interior del impelente, pueden tener varias configuraciones, la selección de estos dependen de las posibilidades constructivas y del costo permisible del ventilador.
2. Impelente: En el impelente del ventilador, como en toda máquina centrífuga, ocurre la entrega de energía al fluido que penetra en él, estos generalmente están formados por los discos delantero y trasero, y los álabes que se encuentran fijos entre ambos, en ocasiones se emplean impelentes semiabiertos que carecen del disco delantero. El parámetro característico de los impelentes de los ventiladores centrífugos es su diámetro exterior, el cual se define por el borde de salida de los álabes, ya que

existen ventiladores en los cuales este diámetro es menor que el diámetro exterior de los discos del impelente (Ramos, 1994).

3. Álabes: Los álabes de los impelentes de los ventiladores centrífugos generalmente son curvos, aunque en algunas construcciones pueden emplearse álabes rectos. El conjunto de álabes del impelente, también llamado corona de álabes, se caracteriza por un parámetro denominado densidad de la corona, se define como la relación entre la longitud del álabe y el paso o distancia medida sobre la cuerda, entre dos álabes continuos, en el radio medio (Sánchez, 2013).
4. Voluta: La voluta de un ventilador centrífugo, tiene como función la recolección del flujo que sale del impelente y conducirlo en una dirección determinada, de igual forma, convertir parte de la carga dinámica en presión. El diseño de la voluta se puede realizar de acuerdo con la espiral logarítmica o empleando la llamada construcción cuadrada, la cual se denomina así porque toma como base un cuadrado cuyo lado es la cuarta parte del ancho, según indica la Figura 1.2. La sección transversal de la voluta de los ventiladores centrífugos, generalmente es rectangular y de ancho constante (Ramos, 1994).

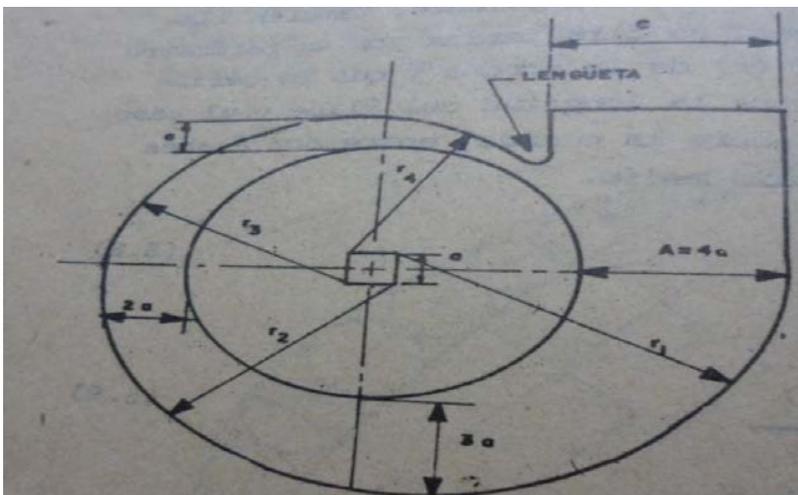


Figura 1.2. Construcción de la voluta por el método del cuadrado (Fuente: Ramos, 1994).

5. Conducto de descarga: Se puede considerar igual a los conductos de entrada, una cuestión particular de estos, es que las dimensiones pueden ser mayores o menores

a la de los conductos de entrada, eso está en dependencia de las características de la instalación.

Principio de funcionamiento

Según [Church \(1976\)](#), el funcionamiento de estos tipos de máquinas soplantes es similar al de las bombas, los cuales en los períodos de arranque y de paro, debe estrangularse la corriente a fin de reducir la carga sobre el motor. Durante su funcionamiento, puede decidirse que la única atención que requieren es la comprobación ocasional de la temperatura de los cojinetes y del suministro de aceite. Periódicamente, debe procederse al desmontado de la máquina y examen de su desgaste y corrosión, particularmente de los pasos laberínticos, los cuales son de fácil deterioro.

1.3. Rodamientos empleados en ventiladores centrífugos

Los rodamientos son elementos mecánicos que encuentran una amplia utilización dentro de la industria de construcción de maquinaria, ya que están diseñados para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje o la combinación de ellas, posibilitando un movimiento de rodadura. La mayoría de los rodamientos están constituidos por dos anillos, uno exterior y otro interior. Además de poseer elementos rodantes, que en lo general son bolas y rodillos. Así como retenedores que separan a los elementos rodantes (bolas o rodillos cilíndricos, de agujas, cónicos o en forma de barril) a intervalos iguales ([NTN, 2004](#)).

Tipos de rodamientos

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

1) Rodamientos radiales

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

- Rodamientos de rodillos a rótula

2) Rodamientos axiales

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

En las grandes industrias unos de los rodamientos más empleados por su alta resistencia a cargas radiales o sea su disposición de poder montar grandes ejes o árboles son los rodamientos de rodillos cilíndricos los cuales son empleados en maquinarias pesadas y de gran tamaño.

Rodamientos de rodillos a rótula

Los rodamientos de rodillos a rótula tienen dos hileras de rodillos, con un camino de rodadura esférico común en el aro exterior, y dos caminos de rodadura en el aro interior inclinados para formar un ángulo con el eje del rodamiento. Esto les dota de una atractiva combinación y características que les hace irremplazables en distintas aplicaciones muy exigentes. Son autoalineables y por tanto insensibles a la desalineación del eje con respecto al alojamiento y a la flexión o curvatura del eje. Los rodamientos de rodillos a rótula pueden soportar grandes cargas radiales, además de grandes cargas axiales que actúan en ambos sentidos (SKF, 2008).

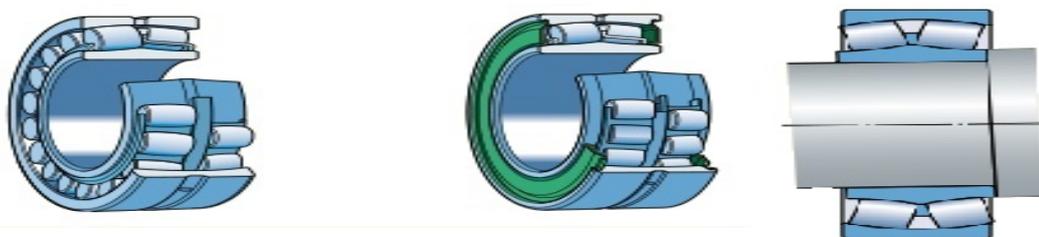


Figura 1.3. Rodamientos de rodillos a rótula (Fuente: SKF, 2008).

1.3.1. Cargas que actúan en los rodamientos de rodillos a rótula

Todo rodamiento está sometido durante su funcionamiento a la influencia de cargas, ya sean de tipo axiales, radiales, o combinada (Una carga combinada consta de una carga radial y una carga axial que actúan simultáneamente.). La capacidad que tiene un rodamiento para soportar una carga axial está determinada por su ángulo de contacto; cuanto mayor es dicho ángulo, más adecuado es el rodamiento para soportar cargas axiales. Para las cargas radiales los rodamientos completamente llenos de elementos rodantes pueden soportar mayores cargas que los rodamientos con jaula correspondientes. 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, el número y tamaño de sus rodillos le dan una capacidad de carga muy grande. La mayoría de las series puede soportar no solamente fuertes cargas radiales sino también cargas axiales considerables en ambas direcciones, por tanto, para cargas elevadas y ejes de gran diámetro, la elección más adecuada son los rodamientos de rodillos.

1.3.2. 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. Portanto, esta es la tensión que produce la deformación permanente total del elemento rodante (SKF, 2008).

1.3.3. 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. Se deben

verificar las cargas dinámicas utilizando un espectro representativo de las condiciones de carga del rodamiento. Dicho espectro debe incluir todas las cargas de pico (elevadas) que se puedan producir 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 (cargas de duración muy breve).

1.4. Longevidad en rodamiento

El número total de horas de trabajo que soporta un rodamiento a una velocidad constante, hasta que aparezcan fallas en el funcionamiento, es lo que se entiende por, longevidad de un rodamiento, la 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, el desalineamiento, la corrosión, fallas en la jaula y la lubricación. Existen métodos más precisos para el cálculo de 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 lo que permite un análisis más profundo y fiel en cuanto a la vida del rodamiento.

1.4.1. Vida nominal

Para la obtención de la vida nominal, se tiene en cuenta la tensión provocada por las cargas externas, junto con las tensiones originadas por la topografía de la superficie, la lubricación y la cinemática de las superficies de contacto. La influencia de esta

combinación de tensiones sobre la vida del rodamiento permite predecir mejor el funcionamiento real del rodamiento en una aplicación determinada.

Esto permite al usuario explotar al máximo el potencial de vida del rodamiento, realizar reducciones de tamaño controladas y reconocer la influencia de la lubricación y la contaminación en la vida del rodamiento. Por regla general, el principal fallo en los rodamientos es a causa de la fatiga del metal de las superficies de contacto. Por tanto, para seleccionar el tamaño de un rodamiento para una aplicación determinada, generalmente basta con un criterio basado en la fatiga del camino de rodadura. Las normativas internacionales, como por ejemplo la ISO 281, se basan en la fatiga del metal de las superficies de contacto.

Sin embargo, es importante recordar que el rodamiento completo (1)(figura.1.4), se puede considerar como un sistema en el que la vida de cada componente, es decir, la pista de rodadura(2), los elementos rodantes (3), la jaula(4), el lubricante(5) y la obturación(6) si la hubiese, contribuye por igual a la resistencia del rodamiento, en algunos casos de manera dominante.

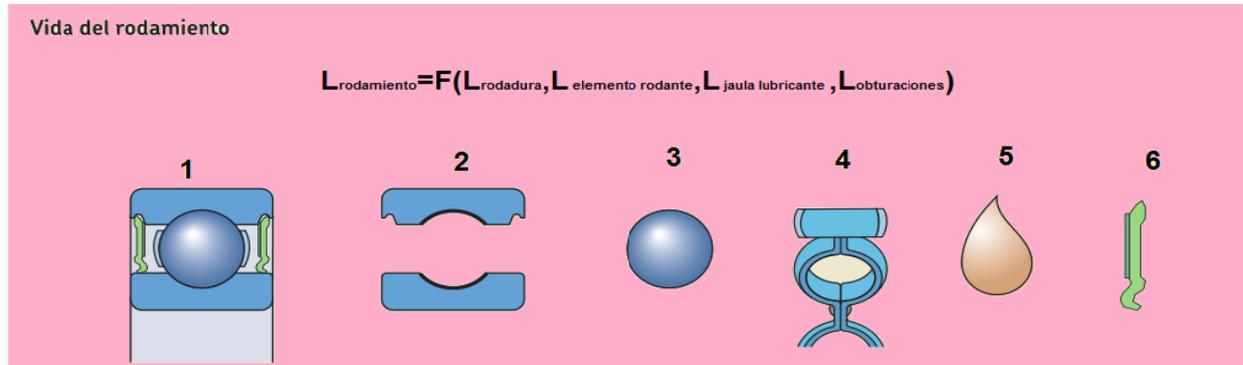


Figura 1.4. Elementos influyentes en la vida nominal de un rodamiento.

En otras palabras, la vida calculada corresponderá a la vida útil real del rodamiento cuando la vida de los otros componentes sea como mínimo de la misma duración que la vida del rodamiento. Entre los otros componentes se pueden incluir la jaula, la obturación y el lubricante.

1.4.2. Vida nominal ajustada o vida nominal SKF

Para los rodamientos modernos 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, la normativa ISO 281:1990/Amd 2:2000 contiene una fórmula de la vida ajustada para complementar la vida nominal. Este cálculo de la vida usa un factor de ajuste para tener en cuenta las condiciones de lubricación y contaminación del rodamiento y el límite de fatiga del material. La normativa ISO 281:1990/Amd 2:2000 también permite que los fabricantes de rodamientos recomienden un método adecuado para calcular el factor de ajuste de la vida al aplicar a un rodamiento en base a las condiciones de funcionamiento.

El factor de ajuste de la vida 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. Asimismo, con el fin de reflejar las condiciones de funcionamiento de la aplicación, el factor de ajuste de la vida a SKF hace uso de las condiciones de lubricación (relación de viscosidad k) y del factor h_c para el nivel de contaminación. La ecuación para la vida nominal SKF cumple con la normativa ISO 281:1990/Amd 2:2000.

1.5. Funciones de la lubricación en los rodamientos

La lubricación en los rodamientos tiene la función igual que en los cojinetes de deslizamiento de evitar o de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento, es decir, mantener bajos el rozamiento y el desgaste.

En los rodamientos se lleva el aceite, que se adhiere a las superficies de las piezas que ruedan unas sobre otras, a las zonas de contacto. El aceite separa las superficies de contacto y evita así el contacto metálico ("lubricación física"). En las superficies de contacto aparecen movimientos de deslizamiento aparte de los movimientos de rodadura, pero en un grado mucho menor que en los cojinetes de deslizamiento. Estos

movimientos de deslizamiento tienen su origen en deformaciones elásticas de los componentes de los rodamientos y en la forma curva de las superficies de rodadura.

En las zonas en las que en rodamientos aparecen movimientos puros de deslizamiento, como por ejemplo entre cuerpos rodantes y jaula o entre las superficies frontales de los rodillos y las superficies de los bordes, las presiones generalmente son mucho menores que en el campo de rodadura.

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

Muchas veces no se formará una película lubricante totalmente portante, con lo que por lo menos en algunas zonas la separación debida a la película lubricante estará interrumpida. También en estos casos es posible un servicio con poco desgaste si las temperaturas elevadas en los puntos en que aparecen originan reacciones químicas entre los aditivos contenidos en el lubricante y las superficies metálicas de los cuerpos rodantes o de los aros (capas de reacción tribológica), que conducen a productos de reacción con capacidad lubricante ("lubricación química").

La lubricación se ve apoyada no sólo por estas reacciones de los aditivos sino también por los lubricantes sólidos contenidos en el aceite o en la grasa, en el caso de grasas quizá también por el espesante. En casos especiales es posible lubricar los rodamientos exclusivamente con lubricantes sólidos.

Otras funciones de las que debe encargarse el lubricante en el rodamiento es la protección contra la corrosión; la evacuación de calor de rozamiento en el rodamiento (lubricación con aceite); el lavado de partículas abrasivas.

1.5.1. Regímenes de lubricación

Cada equipo posee régimen de operación específico, diferente velocidad de rotación y temperatura de trabajo. Diversos especialistas e investigadores han teniendo 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. El comportamiento respecto al rozamiento y al desgaste del rodamiento, así como la duración que pueda alcanzar depende de los diferentes tipos de lubricación, normalmente denominados regímenes de lubricación.

1.5.2. Lubricación hidrodinámica

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

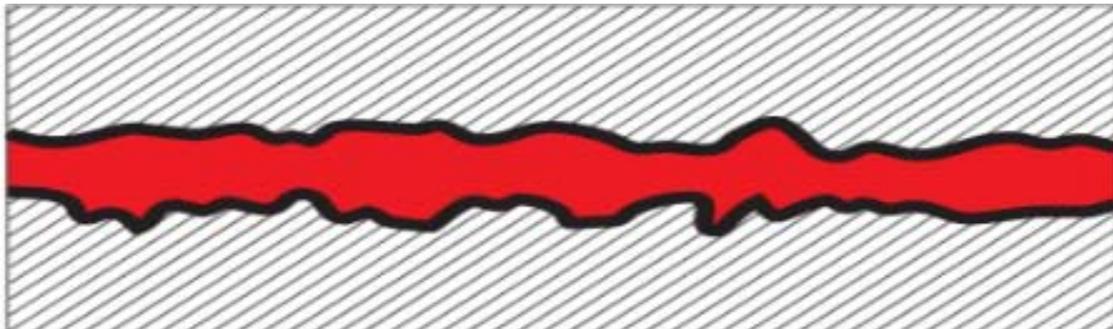


Figura 1.3. Lubricación hidrodinámica (Fuente: Shell, 2011).

1.5.3. 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.

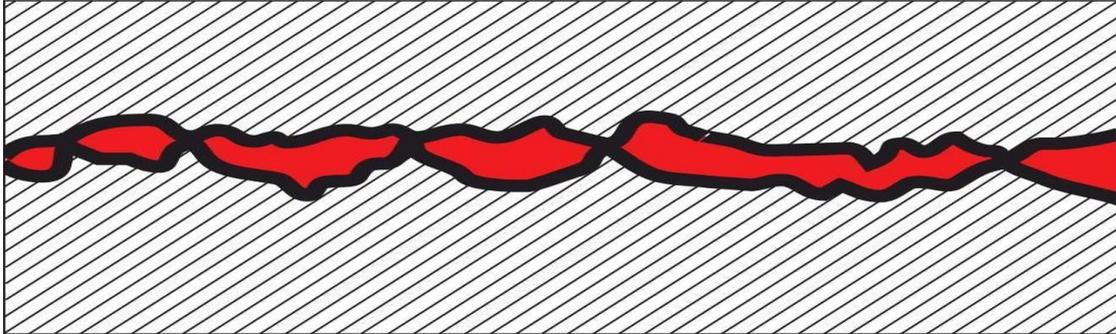


Figura 1.4. Lubricación mixta (Fuente: FAG, 1997).

1.5.4. 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 un área similar a cuando no hay lubricante (Shell, 2011).

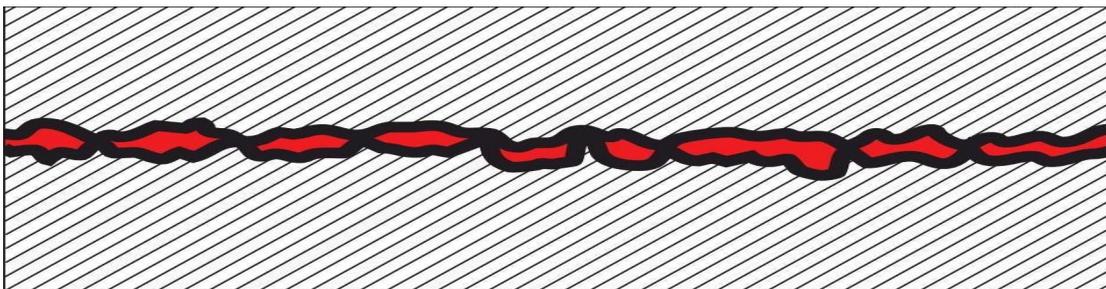


Figura 1.5. Lubricación límite (Fuente: FAG, 1997).

1.6. Métodos de lubricación aplicados a ventiladores

La lubricación en los rodamientos tiene la función de evitar o de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento, manteniendo bajos el rozamiento y el desgaste. Hoy día por sus inmensas aplicaciones en todos tipos de

rodamientos se encuentra la lubricación con grasa y la lubricación con aceite (SKF, 2008).

Lubricación con grasa

La inmensa mayoría de los rodamientos, alrededor del 90 %, se lubrican con grasa (NKE, 2010). Las principales ventajas de la lubricación con grasa son:

- Aplicación muy sencilla
- Exige menos mantenimiento
- Efecto adicional de obturación
- Rodamiento pre engrasado obturado o protegido
- Obturación sencilla de las posiciones de rodamiento
- Gran número de diferentes lubricantes disponibles
- Posibilidad de engrasar perpetuamente disposiciones de rodamiento
- Lubricación con sólidos y secos

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

Lubricación con aceite

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

1.7. Sistemas de lubricación con aceites

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

1.7.1. Lubricación por circulación de aceite

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

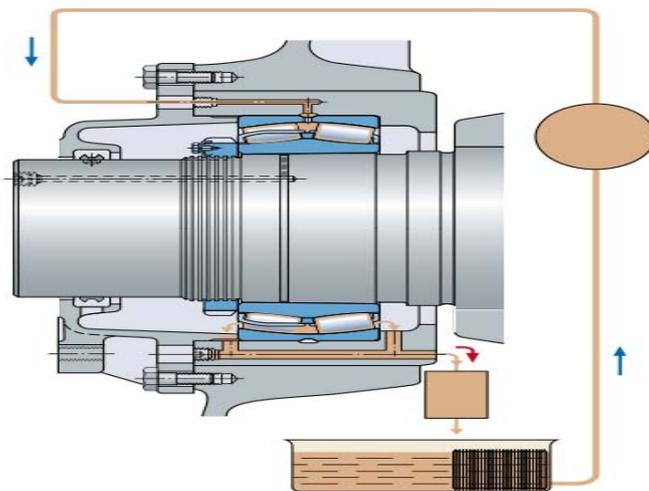


Figura 1.6. Lubricación por circulación de aceite en rodamiento de rodillo a rótula.

1.7.2. Criterios de selección de aceites para rodamientos

En la lubricación con aceite por pequeñas cantidades (lubricación por goteo, por neblina de aceite o por aceite y aire) es posible dosificar la cantidad de aceite exactamente. Esto ofrece la ventaja de que el rozamiento por chapoteo se evita y el rozamiento del

rodamiento puede mantenerse bajo. Al usar aire como medio portante de la lubricación puede conseguirse una alimentación dirigida y una corriente favorable para la obturación. La lubricación por inyección de aceite con grandes cantidades, facilita la alimentación precisa de todos los puntos de contacto en rodamientos altamente revolucionados y una buena refrigeración (FAG, 1997).

1.8. Fallas prematuras en los rodamientos

Todo rodamiento tiene una vida útil precalculada. No obstante, las investigaciones han demostrado que, por varias razones, no todos los rodamientos consiguen alcanzarla. Las etapas importantes que afectan considerablemente a la vida útil de un rodamiento se pueden reconocer durante el ciclo de vida del mismo. Estas etapas son: montaje, lubricación, alineación, monitorización básica del estado y desmontaje. Las etapas en el ciclo de vida de un rodamiento son extremadamente importantes para que el rodamiento logre su máxima vida útil. Aplicando las prácticas adecuadas de mantenimiento y utilizando las herramientas correctas, se puede prolongar considerablemente la vida útil de sus rodamientos y aumentar la productividad y eficiencia de cualquier maquinaria.

Los factores que influyen en fallas prematuras durante el funcionamiento de un rodamiento son figura 1.7, la contaminación, montaje deficiente, fatiga y una lubricación inadecuada.

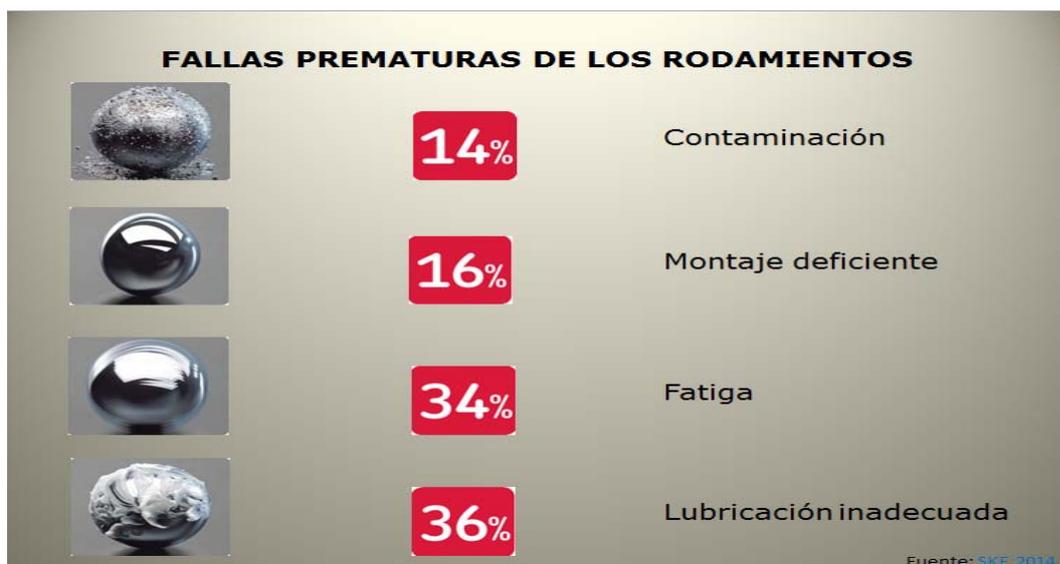


Figura 1.7. Principales factores en las fallas de los rodamientos.

1.8.1. Daños debidos a lubricación deficiente

Más del 50 % de todos los daños registrados en rodamientos son debidos a lubricación deficiente. En otra gran cantidad de daños, que no pueden relacionarse directamente con la lubricación, ésta contribuye también. Una lubricación defectuosa en las zonas de contacto origina desgaste, surcos de resbalamiento, estrías y huellas de gripado. Además, pueden aparecer daños por fatiga (pittings). Algunas veces se produce un sobrecalentamiento de los rodamientos si los aros de los rodamientos se calientan desigualmente en caso de una lubricación insuficiente o excesiva, ocasionando así una disminución del juego o incluso una precarga nociva.

Las causas principales de los daños registrados según (FAG, 2003) se recogen en la tabla 1.1 de forma comprensible las cuales son:

Tabla 1.1 Daños debidos a lubricación deficiente.

Aspecto del daño deficiencia	Causa	Indicaciones
Ruido	Lubricación deficiente	Contacto metálico en algunos puntos; no hay película uniforme, portante y amortiguadora.
	Lubricante no apropiado	Película lubricante demasiado fina, porque el aceite o el aceite básico de la grasa tiene una viscosidad insuficiente. En la grasa, la estructura del espesante puede ser inapropiada. Partículas extrañas acentúan el ruido.
	Suciedad	Las partículas de suciedad interrumpen la película lubricante y originan ruidos.
Desgaste de la jaula	Lubricación deficiente	Contacto metálico en algunos puntos; no hay película uniforme y portante.
	Lubricante no apropiado	Viscosidad demasiado baja del aceite o del aceite básico; lubricantes sin aditivos contra el desgaste; no se forma capa límite.
Desgaste en cuerpos rodantes, caminos de Rodadura y superficies de los bordes	Lubricación deficiente	Contacto metálico en algunos puntos; no hay película uniforme y portante; corrosión tribológica en el caso de movimientos oscilantes relativos; huellas de deslizamiento.

Fatiga	Lubricante no apropiado	Viscosidad demasiado baja del aceite o del aceite básico; lubricantes sin aditivos contra el desgaste o EP (para elevada sollicitación a carga o deslizamientos).
	Suciedad	Partículas sólidas duras o líquidos corrosivos.
	Lubricación deficiente	Contacto metálico en algunos puntos; elevadas tensiones superficiales en la superficie; desgaste.
	Lubricante no apropiado	Viscosidad demasiado baja del aceite o del aceite básico; el lubricante contiene sustancias cuya viscosidad aumenta poco al aumentar la presión, como por ejemplo agua, aditivos ineficaces
	Suciedad	Partículas duras son laminadas y originan puntos de elevada presión específica; sustancias corrosivas originan puntos de corrosión, en los que es más fácil el origen de fatiga.
Temperatura elevada del rodamiento; con color alterado puntos de gripaje (sobrecalentamiento)	Lubricación deficiente	Contacto metálico en algunos puntos; no hay película uniforme y portante.
	Lubricante no apropiado	Rozamiento elevado y altas temperaturas debidos al contacto metálico en algunos puntos
	Exceso de lubricante	A velocidades de giro medias o elevadas, el rodamiento tiene un elevado rozamiento del lubricante, principalmente en el caso de relubricación repentina.
Lubricante alterado (cambio de color; endurecimiento; pérdida de la capacidad lubricante)	Lubricante no apropiado	Temperatura de servicio mayor que la temperatura admisible para el lubricante (formación de residuos).
	Tiempo de servicio demasiado largo	Periodo de reengrase o de cambio de lubricante demasiado largo.
	Suciedad o cambios en el lubricante	Partículas que han penetrado en el rodamiento desde fuera o procedentes del desgaste del rodamiento; reacciones entre lubricante y material del rodamiento.

FAG (2014) Para evitar la lubricación deficiente o el exceso de lubricante debe tenerse en cuenta un abastecimiento de lubricante apropiado al caso de aplicación tanto desde el punto de vista constructivo como del proceso. Los daños debidos a un lubricante

poco apropiado o debido a la variación de las propiedades del lubricante pueden evitarse considerando suficientemente todas las condiciones de servicio al elegir el lubricante y renovando a tiempo el lubricante.

Trabajos relacionados con la lubricación de rodamientos

[FAG \(2003\)](#) indica la relación de viscosidad recomendada para garantizar una lubricación fluida en los sistemas de lubricación por circulación de aceite, lubricación por inyección de aceite y lubricación con cantidades mínimas. Dicha relación brinda un criterio de incalculable valor, al permitir seleccionar clases de aceites que sirvan como lubricantes alternativos, para la operación de las máquinas.

Resulta de relevancia para la investigación el trabajo desarrollado por [Cobas \(2017\)](#), el cual establece el procedimiento para la selección de la clase de aceites alternativos en rodamientos por el método de circulación. Aunque el método establece como elemento novedoso la incorporación del índice de viscosidad, en la selección de la clase de aceite, no establece los tipos de aceites capaces de garantizar la formación de la lubricación hidrodinámica, de los pares tribológicos de los rodamientos para las clases establecidas.

[Rodríguez \(2015\)](#) determinó la influencia de la lubricación en la longevidad del rodamiento rígido de bolas 6208 bajo condiciones de trabajo variable. En esta investigación se emplearon los métodos de cálculos utilizados con más frecuencia por SKF, siguiendo un enfoque simulado y otro experimental. 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.

[Álvarez \(2013\)](#) diseñó e implementó una aplicación para *Smartphone* con sistema operativo Android capaz de calcular parámetros de rodamientos con el fin de ahorrar tiempo al ingeniero en su diseño y estimar el mantenimiento oportuno de dicho rodamiento. El mismo se apoya en el software SKF Campus, desarrollado para Windows XP 32 bit que se utiliza para el aprendizaje sobre los rodamientos pudiendo calcular una infinidad de parámetros además de tener una gran base de datos sobre todos los tipos de rodamientos, para comprobar los resultados mostrados por dicha

aplicación. El trabajo pone en función de la ingeniera las nuevas tecnologías informáticas existentes en nuestro planeta. Además de proporcionarles a los usuarios de manera rápida resultados de ciclos de rodamientos, con una cierta precisión y en un formato de acceso directo como lo es un *Smartphone*. Pero no analiza la lubricación como uno de los principales aspectos en la longevidad de los rodamientos.

1.9. Conclusiones parciales

- Se establecido el marco teórico relacionado con la selección de aceites para la lubricación de rodamientos, el cual contiene los precedentes fundamentales que integra la vía para escoger el sistema de lubricación y el tipo de lubricante.
- Quedaron fundamentados los aspectos teóricos que permiten determinar la Influencia de la lubricación, en la longevidad de rodamientos de ventiladores centrífugos para diferentes condiciones de explotación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

El rodamiento es el apoyo más empleado en todo tipo de máquinas por los elementos rotativos que lo componen, debido a ventajas como: pequeño par de arranque, reducida fricción en un amplio rango de velocidades, bajo consumo de energía y de lubricante, largos intervalos de mantenimiento, facilidad de montaje y desmontaje; y gran variedad de dimensiones estandarizadas. La lubricación determina la vida útil de cada rodamiento. Esta tiene como función la reducción de la fricción mediante una sustancia llamada lubricante. De ahí que el 36 % de las fallas prematuras de los rodamientos según SKF (2009) corresponden al proceso de lubricación. Por ende, resulta de vital importancia, la correcta selección del método de lubricación y la adecuada selección del grado de viscosidad del aceite con que se desarrolla dicha acción, atendiendo siempre a las condiciones operacionales del rodamiento.

En tal sentido se define como objetivo del capítulo: establecer el procedimiento que permita el cálculo de la longevidad de rodamientos de rodillos a rótula y la selección del aceite lubricante.

2.2. Obtención de las cargas radiales y axiales en los rodamientos

El diseño de un rodamiento está dado en correspondencia al tipo de carga que va a soportar durante su funcionamiento. Existen rodamientos que soportan solamente cargas radiales, cargas axiales y otros que por su diseño soportan carga combinada o sea radial axial. El conocimiento de la magnitud de las cargas actuantes en los rodamientos es muy importante para el análisis de longevidad puesto que son las variables que determinan la vida de los mismos. Existen software como el XVIGAS (figura 2.1) y que te permiten la obtención de los valores de las cargas radiales y axiales en los rodamientos. Solamente se le introducen los valores que describen el régimen de operación de los mismos y te brinda como resultado los gráficos de momentos flector y cortante con los valores críticos de cada caso, permitiendo, de una forma muy sencilla un estudio del comportamiento de las cargas en el rodamiento así como a lo largo del árbol.



Figura 2.1: Ventana principal del software XvIGAS – Windows App v0.02f.

2.3. 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.

2.3.1. Capacidad de carga axial de los rodamientos montados sobre un manguito de fijación

Si los rodamientos de rodillos a rótula con un manguito de fijación se montan sobre ejes lisos sin resaltes, la magnitud de la carga axial que pueden soportar viene determinada por el rozamiento entre el eje y el manguito. Siempre que los rodamientos estén montados correctamente, la carga axial permisible se puede calcular usando la fórmula:

$$F_{ap} = 0,003 \cdot B \cdot d \quad (2.1)$$

Dónde

F_{ap} : carga axial máxima permisible; [kN].

B : anchura del rodamiento; [mm].

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

2.3.2. Vida nominal de un cojinete de rodamiento

Aunque los rodamientos se fabrican de acero resistentes, vale señalar que tienen una vida útil limitada y en algún momento presentarán fallas por fatiga debido a la considerable tensión por contacto debido a las cargas a los que son sometido. 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 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:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (2.2)$$

$$P = Fr + Y_1 \cdot Fa \quad \text{cuando } \frac{Fa}{Fr} \leq e \quad (2.3)$$

$$P = 0,67 Fr + Y_2 \cdot Fa \quad \text{cuando } \frac{Fa}{Fr} > e \quad (2.4)$$

Siendo

L_{10} : vida nominal del rodamiento; [millones de revoluciones].

C : capacidad de carga dinámica; [kN].

p : exponente de la ecuación de la vida nominal; [adimensional].

[para los rodamientos de bolas $p = 3$]

[para los rodamientos de rodillos $p = 10/3$]

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

F_r : fuerza radial; [kN].

Y_1 y Y_2 : factores de cálculo tomados de la tablas de producto; [adimensional].

F_a : fuerza axial; [kN].

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

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} \quad (2.5)$$

Dónde:

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

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

2.3.3. 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:

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot L_{10} \quad (2.6)$$

Siendo:

$$a_{SKF} = f\left(\eta c \frac{Pu}{P}\right) \quad (2.7)$$

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

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{nm} \quad (2.8)$$

Donde:

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].

η_c : nivel de contaminación del aceite; [0,8... 0,6].

P_u : carga límite a la fatiga; [kN].

a_{SKF} : factor de ajuste de la vida (Figura 2.2); [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}) puede determinarse auxiliándose de la figura 2.2. En la cual se tiene en cuenta 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 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.

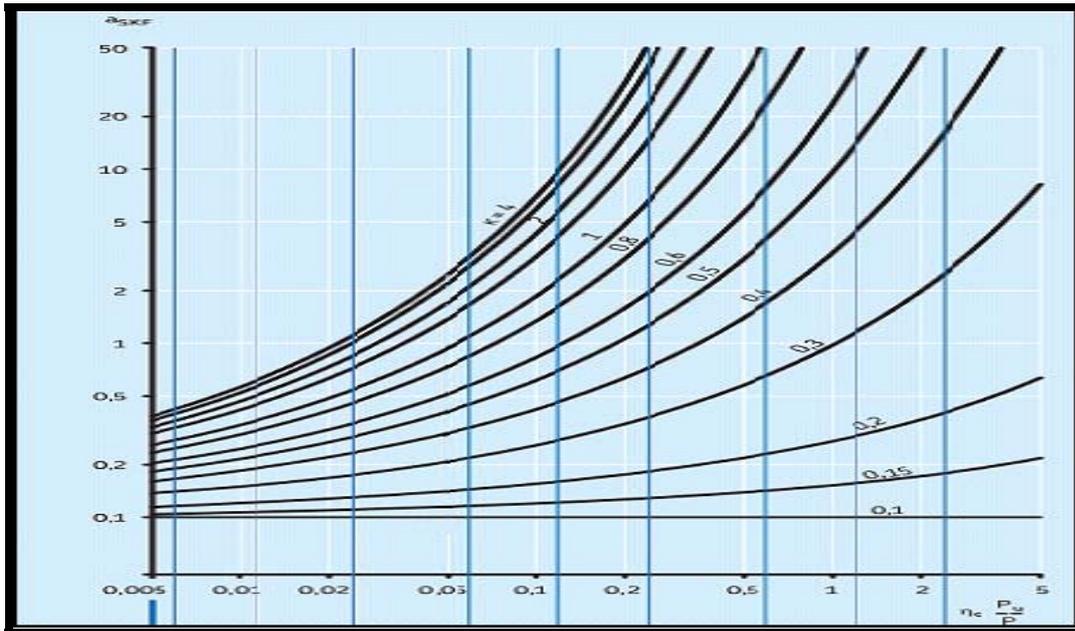


Figura 2.2. Factor a_{SKF} para rodamientos radiales de bolas. (Fuente: SKF, 2008).

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 2.2.

Tabla 2.2. 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	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6

de por vida y con placas de protección		
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 un reducción más severa de la vida que la predicha por la ecuación L_{nm}	0	0

Fuente: SKF, 2008.

Una vez obtenida la relación de viscosidad por la expresión 2.5, y el valor que relaciona la carga límite a la fatiga, carga equivalente y nivel de contaminación según la expresión 2.7, entonces se obtiene el valor a_{skf} haciendo coincidir el valor obtenido por la expresión anterior con la relación de viscosidad y el valor a_{skf} correspondiente. 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 2.3.

Tabla 2.3. 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	30 000 ... 100 000

el eje principal, la orientación, los engranajes, los rodamientos del generador.	
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

2.4. Selección del método de lubricación

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

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

$$Fv = n \cdot Dm \quad (2.9)$$

Siendo:

$$Dm = \frac{D + d}{2} \quad (2.10)$$

Dónde:

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

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

Dm : diámetro medio del rodamiento; [mm].

D : diámetro exterior del rodamiento; [mm].

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

NKE (2010) ofrece un valor orientativo de velocidad recomendada para la explotación de rodamientos, en función del método de lubricación. Dichas recomendaciones se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. 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).

2.4.1. 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:

- Tamaño de rodamiento.
- Velocidad de funcionamiento.
- Temperatura de funcionamiento.

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

Son necesarios los siguientes pasos:

1. Cálculo del diámetro medio del rodamiento.
2. Cálculo de la viscosidad mínima requerida.
3. Determinación de la viscosidad del funcionamiento real.
4. Creación de la relación necesaria entre viscosidad de funcionamiento requerida y actual.

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

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

2.5. Método analítico para determinar la viscosidad mínima necesaria

Con el fin de formar una película de lubricante adecuada entre las superficies de contacto en el rodamiento, el lubricante debe mantener una viscosidad mínima segura a la temperatura de operación. La duración del rodamiento podrá prolongarse si se garantiza dicha viscosidad. La cual puede calcularse a través de las expresiones 2.10 y 2.11.

$$v_1 = 45000 \cdot n^{-0.83} \cdot Dm^{-0.5} \text{ Para } n < 1000 \text{ min}^{-1} \text{ (2.10)}$$

$$v_1 = 45000 \cdot n^{-0.5} \cdot Dm^{-0.5} \text{ Para } n \geq 1000 \text{ min}^{-1} \text{ (2.11)}$$

Dónde:

v_1 : viscosidad mínima necesaria; [mm^2/s].

2.5.1. Método gráfico para determinar la viscosidad requerida

La viscosidad requerida (v_1) para una lubricación adecuada se puede calcular con el diagrama que muestra la Figura 2.3, usando el diámetro medio del rodamiento (Dm), y la velocidad de giro. Esta viscosidad se determina según las características geométricas y operacionales; y constituye la condición indispensable para que exista una lubricación hidrodinámica en el par tribológico de los elementos en contacto.

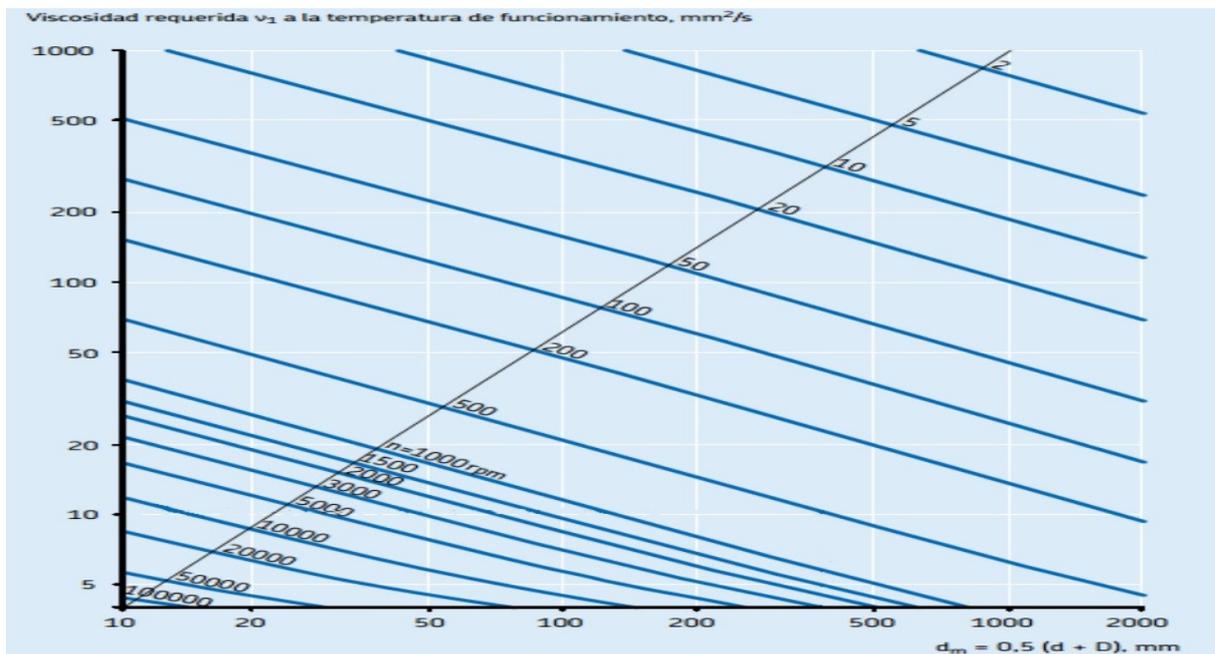


Figura 2.3. Método gráfico para la obtención de la viscosidad (Fuente: SKF, 2008).

2.5.2. Grados ISO de aceites lubricantes

La clasificación de ISO de viscosidades, desarrollada por institutos de normalización de varios países miembros de la ISO (*International Organization for Standardization*); se basa en el establecimiento de las 18 grados de viscosidad, comprendido entre 2 y 1 500 centiStokes a 40 °C. Donde cada grado de viscosidad se designa por el número entero más cercano a su viscosidad cinemática media, expresada en centiStokes a 40 °C. Dicho sistema de acuerdo con lo pautado por ISO, se adoptó en Cuba y otros países integrantes en enero de 1978. Si, por experiencia, se conoce la temperatura de funcionamiento, o si se puede determinar de otra manera, la viscosidad correspondiente a la referencia normalizada internacionalmente de 40 °C se puede obtener del diagrama que muestra la Figura 2.4. El mismo corresponde a un índice de viscosidad de 95 y los aceites a la normativa ISO 3448:1992, cual muestra la gama de viscosidad para cada una de las clases a 40 °C.

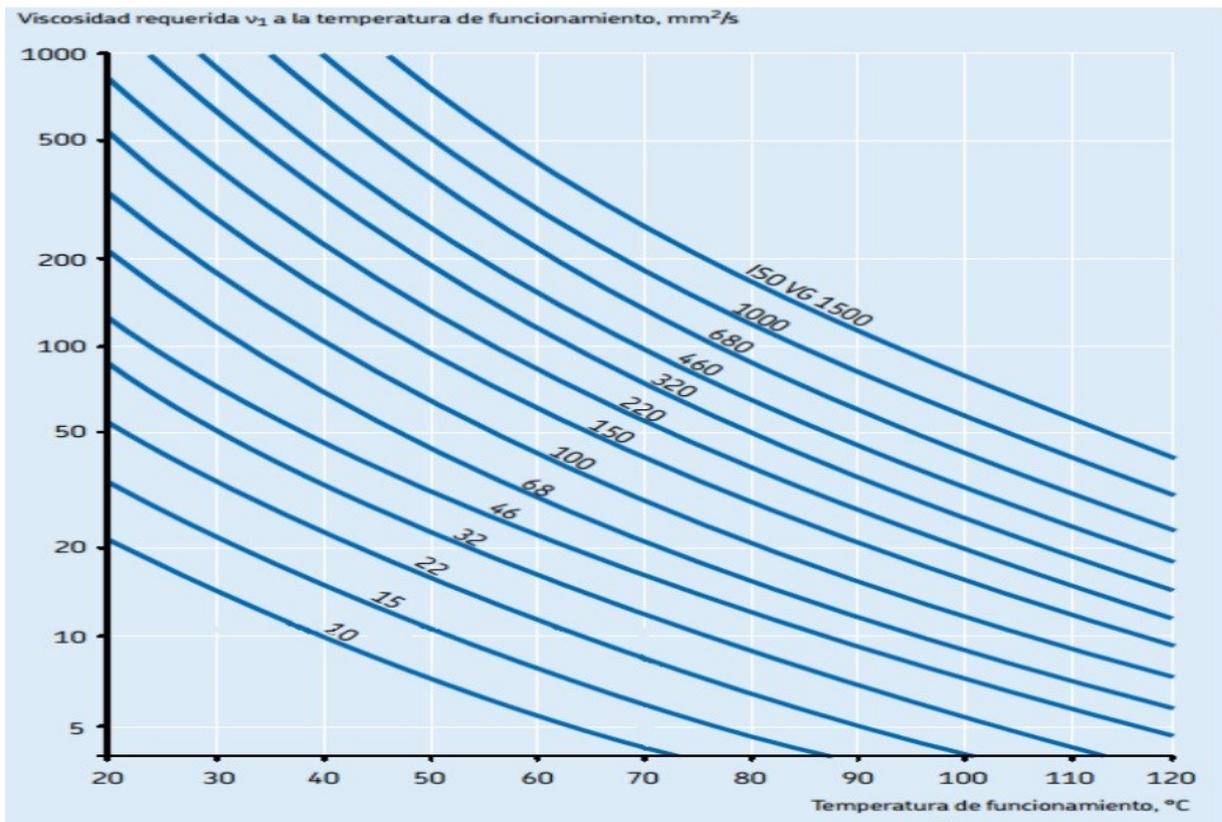


Figura 2.4. Diagrama para la obtención de la viscosidad de servicio con IV 95 (Fuente: SKF, 2008).

2.6. Relación de viscosidad

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

$$k = \frac{v}{v_1} \quad (2.12)$$

Dónde:

v : Viscosidad real de funcionamiento del lubricante; [mm^2/s].

ν_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. FAG (2003) recomienda el rango de relación de viscosidad bajo la que puede operar un rodamiento, tomando en consideración el sistema de lubricación que ha sido seleccionado para cumplir con sus exigencias tecnológicas. Dichas recomendaciones son mostradas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Relación de viscosidad recomendada según el sistema de lubricación.

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

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

La cantidad de aceite en circulación depende de las condiciones de servicio. Suelen establecerse tres zonas para elegir el flujo lubricante, una zona **a** (cantidad suficiente para la lubricación) donde se recomiendan cantidades de aceite donde se garantiza que incluso en el caso de una alimentación desfavorable en la que el aceite no llega directamente al rodamiento, todas las superficies de contacto queden abastecidas de forma segura, una zona **b** (rodamientos de sección simétrica) y una zona **c** (rodamientos de sección asimétrica). Cada una de estas zonas posee un límite inferior y superior, el cual se escoge según la relación de diámetros (D/d), siguiendo las condiciones planteadas en las expresiones 2.6 y 2.9.

$$\frac{D}{d} > 1,5 \text{ Para } a_1, b_1, c_1 \text{ 2.13}$$

$$\frac{D}{d} \leq 1,5 \text{ Para } a_2, b_2, c_2 \text{ 2.14}$$

2.7.1. Breve descripción del ventilador centrífugo 121-02-UE-22

Los ventiladores centrífugos son máquinas para el transporte y mezclado de gases puros y mezclas de gases con materiales sólidos de pequeños diámetros. Se emplean ampliamente en la industria, para la ventilación de edificios, la aspiración de sustancias

nocivas, los procesos tecnológicos, la ventilación de pasajes subterráneos, para el transporte de materiales entre otras utilidades. El ventilador centrífugo 121-02-UE-22 ubicado en la planta de preparación de mineral, es el encargado de trasegar gases de temperatura superiores a los 15 °C provenientes de la planta de hornos de reducción, con el fin de aumentar la eficiencia y eficacia de la extracción de la humedad al mineral.

El mismo se compone de diferentes elementos constructivos como los cuales se describen a continuación en la figura 2.5:



Figura 2.5. Ventilador centrífugo 121-02-UE-22.

El ventilador centrífugo 121-02-UE-22 está impulsado por un motor eléctrico (1). Este motor posee 4 puntos de apoyo regulables con el fin de evitar el desalineamiento. Al ser acoplado al árbol (2). Este último tiene como fin de transmitir la potencia al rodete, el mismo gira en dos rodamientos (3), los cuales sirven de apoyo. El elemento constructivo (4) es la voluta, la cual es de acero y está cubierta de materiales aislantes con el fin de mantener las altas temperaturas de los gases que transporta el ventilador, en su interior, guarda al rodete o impelente, encargado de transmitir su energía a los gases circulantes. El mismo se encuentra en voladizo acoplado al árbol de casquillo cónico, el cual permite un ensamble menos complejo y reduce la posibilidad de desalineamiento durante el mismo.

2.8. Técnicas experimentadas realizadas

Para la medición de las temperaturas se utilizó el Citect; Figura 2.6 software de monitoreo a través de sensores en los equipos que le permite al técnico de instrumentación y control monitorear los parámetros de trabajo del equipo, así como guardar el registro de los mismo permitiendo así un mayor control para la prevención defallas.

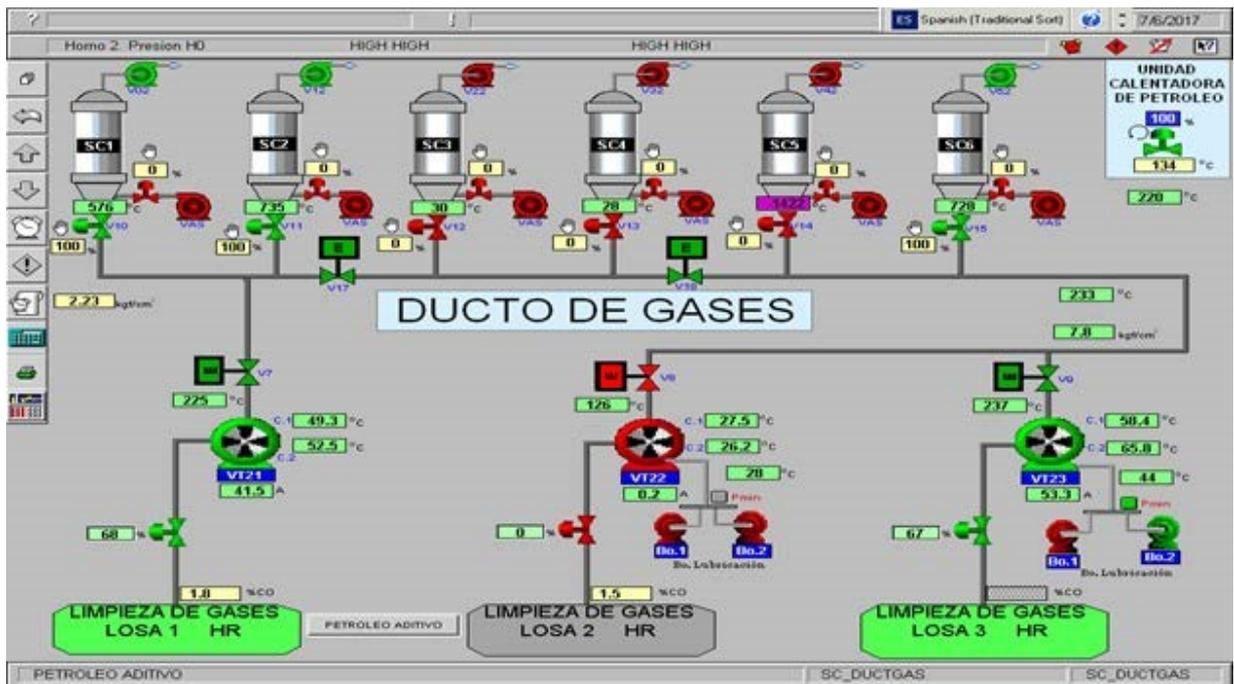


Figura 2.6. Imagen de la interface del Citect.

2.9. Conclusiones parciales

- Quedó establecido el procedimiento para la evaluación de la longevidad, aplicable a los rodamientos de rodillos a rótula del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Se estableció la vía para la selección de las clases de aceites apropiados y alternativos para rodamientos.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

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

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

Por tal motivo se define como **objetivo de este capítulo**: implementar el procedimiento desarrollado, a un caso de estudio y realizar la valoración de los resultados.

3.2. Caracterización del ventilador centrífugo 121-02-UE-22

El ventilador centrífugo 121-02-UE-22 de fabricación polaca es accionado por un motor eléctricoasincrónico de 4250 kg de masa, que para su funcionamiento utiliza una tensión de 6000 V, a una frecuencia de 60 Hz, desarrollando una potencia de 450 KW haciendo girar al eje del rotor a una velocidad de rotación de 893 min^{-1} , el mismo es acoplado al árbol de 2,85m de largo y 150 mm de diámetro, el cual transmite la potencia del motor al rodete o impelente de 2 m de diámetro, que desde su posición en voladizo transmite su energía a los gases circulantes. El árbol utiliza como puntos de apoyo dos rodamientos 22330, los cuales clasifican como rodamientos de rodillos a rótula. Poseen como dimensiones fundamentales; diámetro interior de 150 mm, diámetro exterior de 320 mm y ancho de 108 mm. Tiene una capacidad de carga estática de 1 760 kN, capacidad de carga dinámica de 1 460 kN y su carga límite a la fatiga es de 146 kN. La velocidad máxima recomendada para su uso es de $2\ 000 \text{ min}^{-1}$. Estos rodamientos están ubicados a 45cm y 205cm tomando el motor como referencia. Para la lubricación de los rodamientos se emplea el método de circulación de aceite (figura 3.1), el cual se compone en este caso de una bomba de engranaje, un depósito colector (con filtro), un sistema de tubería por donde circula el aceite, un

intercambiador de calor donde se enfría el aceite e instrumentos de medición para medir la presión en el sistema.



Figura 3.1. Sistema de circulación de aceite para la lubricación de los rodamientos 22330 del ventilador centrífugo 121-02-UE-22.

3.3. Obtención de las reacciones en los apoyos del árbol del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 a través del Software XVIGAS

Para la obtención de las reacciones en los apoyos del árbol del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 se utilizó el software XVIGAS, el cual realiza un análisis partiendo de una viga simplemente apoyada sometida al régimen de carga del árbol del ventilador. Para introducir al software los parámetros operacionales del árbol, se tuvo en cuenta que está sometido a un momento flector, determinado por el cociente resultante de la potencia (450 000 W) y la velocidad angular (93,5 rad/s), tomados por los datos de chapa de motor, obteniendo un momento flector igual a 29,67 kN·m.

Otro parámetro que rige el comportamiento funcional del ventilador, es la carga a la que está sometida el árbol; soportando un impelente de 34kN (según plano del ventilador anexo 1) fijado en el extremo del árbol quedando en voladizo. Por la forma constructiva al ser el 22330 un rodamiento de tipo radial axial, su diseño incorpora una componente axial equivalente al 5% de la fuerza radial, obteniendo al ser calculada una fuerza axial

igual a 1,7kN. Todas estas cargas se le introducen al software a las distancias correspondientes como muestra la figura 3.2.

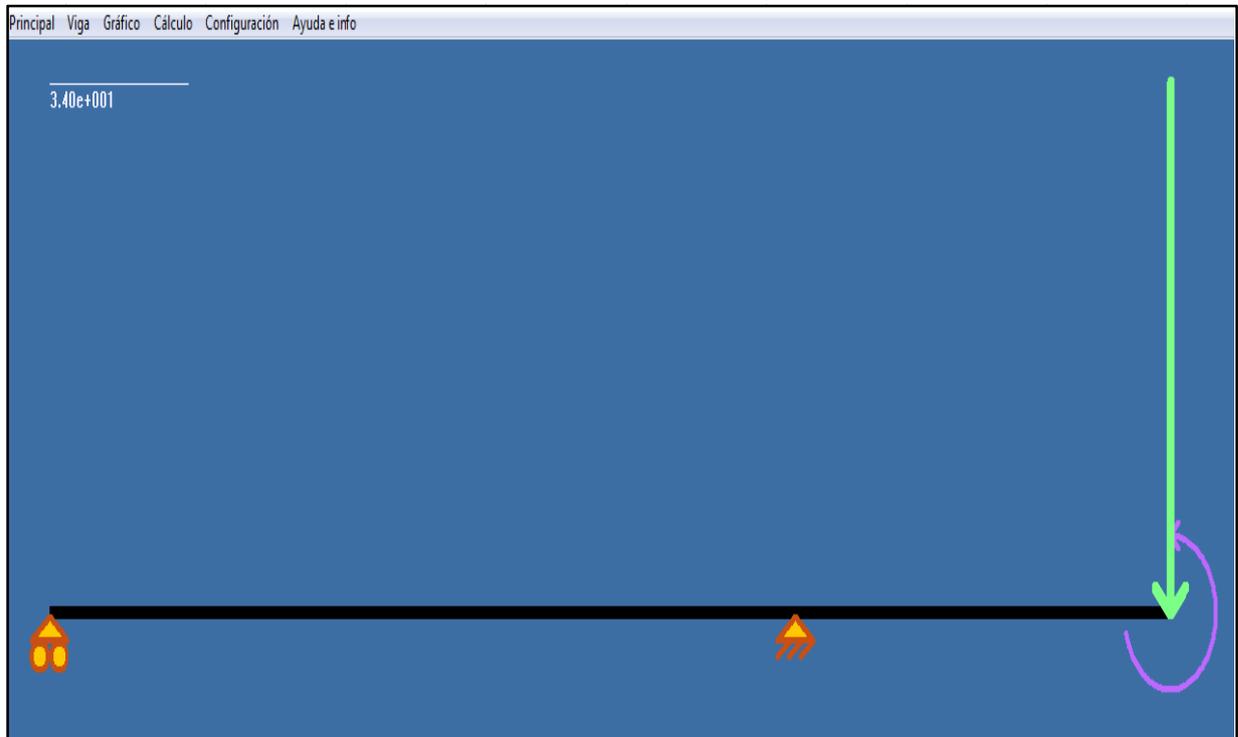


Figura 3.2. Imagen del Software Xviga con las cargas y puntos de apoyo representados.

La fuerza radial(carga representada en el software por la flecha de color verde)y el momento flector(carga representada por la flecha curvada de color morado), están ubicados a la distancia de 2,4 m.Los puntos de apoyo A (izquierdo) yB (derecho) estánseparados poruna distancia de 1,6 m.Luego de introducir el régimen de trabajo se obtuvieron los resultados de la reacción en los apoyos (figura 3.3),cuantificando que en el apoyo A la reacción es de1,54 kN y en el apoyo es de B es 32,45 kN para una carga total de 34 kN, demostrando que bajo estas condiciones de operación el rodamientosometido a mayor carga es el del apoyo B, además de soportar mayor momento flector puesto que en el apoyo A el momento es 0.

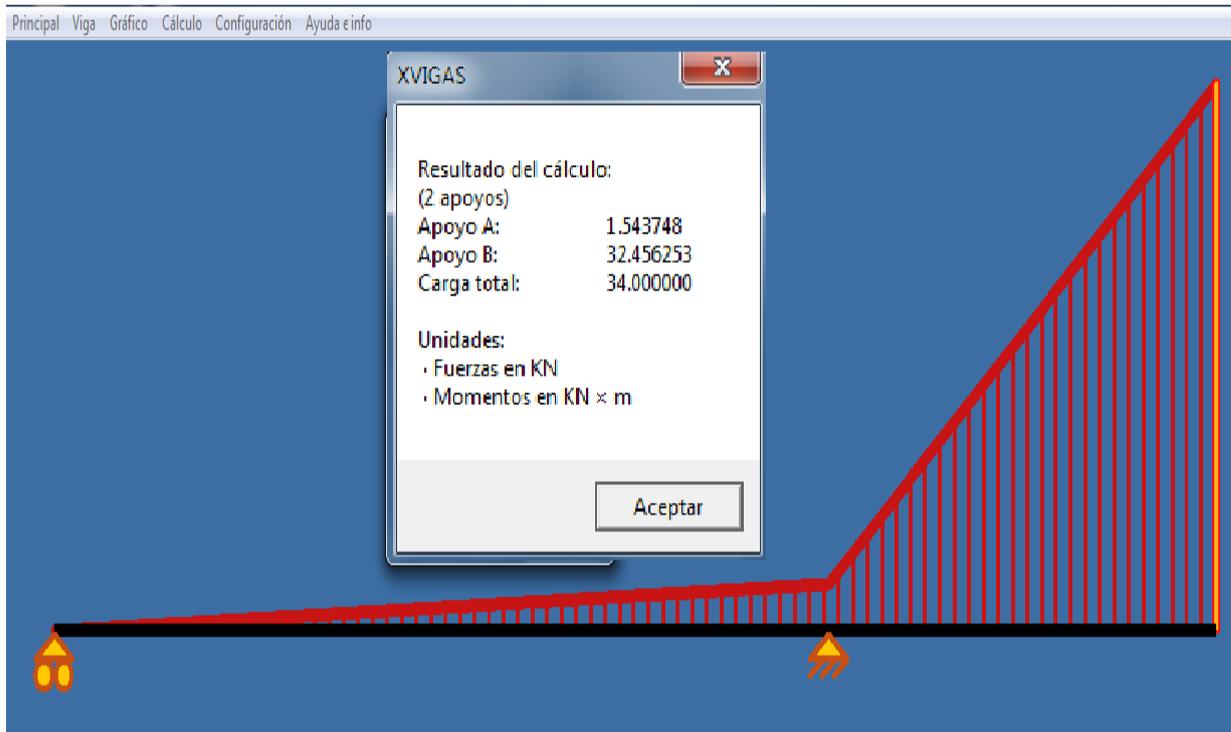


Figura 3.3. Valores de la reacción en los apoyos y gráfico de momento flector.

3.4. Velocidad máxima recomendada para rodamientos 22330

Según los valores típicos del factor de velocidad, y los distintos métodos de lubricación expuestos en la Tabla 2.4, se estableció la velocidad máxima que deben desarrollar los rodamientos 22 330. Donde conociendo las características del tipo de rodamiento (diámetro medio igual a 235 mm, y establecidos los límites de aplicación por método de lubricación, se despejó la velocidad de rotación Tabla 3.1 de la ecuación 2.9, obteniéndose el límite de velocidad a la cual estos rodamientos puede trabajar para cada método de lubricación.

Tabla 3.1. Velocidad límite del rodamiento 22330 según el método de lubricación.

Método de lubricación	n
Lubricación por baño de aceite	1 538
Lubricación por circulación de aceite	2 308
Lubricación por salpicadura de aceite	2 461
Lubricación por neblina de aceite	4 615
Lubricación por cantidad mínima	9 231

La máxima velocidad del eje del ventilador centrífugo es de (893 min^{-1}) está muy por debajo de las velocidades calculadas por el factor de velocidad, las cuales se consideran las velocidades límites según el sistema de lubricación, por lo que es adecuada la aplicación de este método para la lubricación de los rodamientos.

3.5. Medición de la temperatura en el ventilador centrífugo 121-02-UE-22

La temperatura de funcionamiento del ventilador centrífugo 121-02-UE-22 es un parámetro importante a tener en cuenta, el calentamiento sostenido incide negativamente en las propiedades térmicas de los materiales, siendo necesario monitorear de manera sistemática las temperaturas durante el funcionamiento, la medición de la temperatura de trabajo se realizó a través de capilares instalados en el ventilador que son monitoreado desde las oficinas de instrumentación y control apoyándose en el software especializado Citect, (Figura 3.4).



Figura 3.4. Interface del software especializado Citect.

Las mediciones se realizaron en el intervalo de 24 horas y se registraron en el periodo de una hora iniciando en fecha de 30/6/2017 hora 8:42 AM y concluyendo el 1/7/2017 hora 8:42PM como lo indica el interface de software Citect.

Para el análisis de los datos se recogieron en la tabla 3.2 para una mejor apreciación de la información y calcular la temperatura promedio de funcionamiento además de identificar el valor más elevado, para posteriormente emplearla en los cálculos del grado ISO de viscosidad necesaria para una buena lubricación, puesto que al cumplirse para las condiciones límites, en condiciones normales de operación se garantizara una fiabilidad mecánica.

Tabla 3.2. Registro de la temperatura en periodos de una hora.

Hora	Temperatura (C)	Hora	Temperatura (C)
8:00 PM	48	8:00 AM	50
9:00 PM	51	9:00 AM	53
10:00 PM	50	10:00 AM	67
11:00 PM	49	11:00 AM	70
12:00 PM	51	12:00 AM	78
1:00 AM	46	1:00 PM	85
2:00 AM	41	2:00 PM	96
3:00 AM	60	3:00 PM	89
4:00 AM	70	4:00 PM	75
5:00 AM	68	5:00 PM	60
6:00 AM	55	6:00 PM	53
7:00 AM	54	7:00 PM	50
Temperatura promedio registrada (°C)			61,20
Máxima temperatura registrada (°C)			96

El registro de las temperaturas establece que las temperaturas más elevadas alcanzadas en el día fueron alcanzadas en los horarios de las 11:00 AM a las 3:00 PM alcanzando su pico en los 96⁰C que será esta la temperatura utilizada para realizar los cálculos pertinentes.

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

En la determinación de la cantidad de aceite (Figura 3.5), que se utiliza en el sistema de lubricación por circulación; es necesario el empleo de las expresiones 2.6 y 2.10, para

determinar la relación de diámetros de los rodamientos. La expresión 2.6 representa una relación mayor que 1,5 y recomienda el uso de las curvas a 1, b 1, y c 1. La expresión 2.10 representa la relación menor e igual que 1,5 y recomienda el uso de las curvas a 2, b 2, y c 2. Donde la curva a es para obtener una cantidad suficiente para la lubricación, la curva b es para el límite superior para rodamientos de sección simétrica y la curva c para el límite superior de rodamiento de sección asimétrica. Estas cantidades de aceites se recomiendan para estar seguro de que incluso en el caso de una alimentación desfavorable, donde el aceite no llega directamente al rodamiento, todas las superficies de contactos queden abastecidas de forma segura.

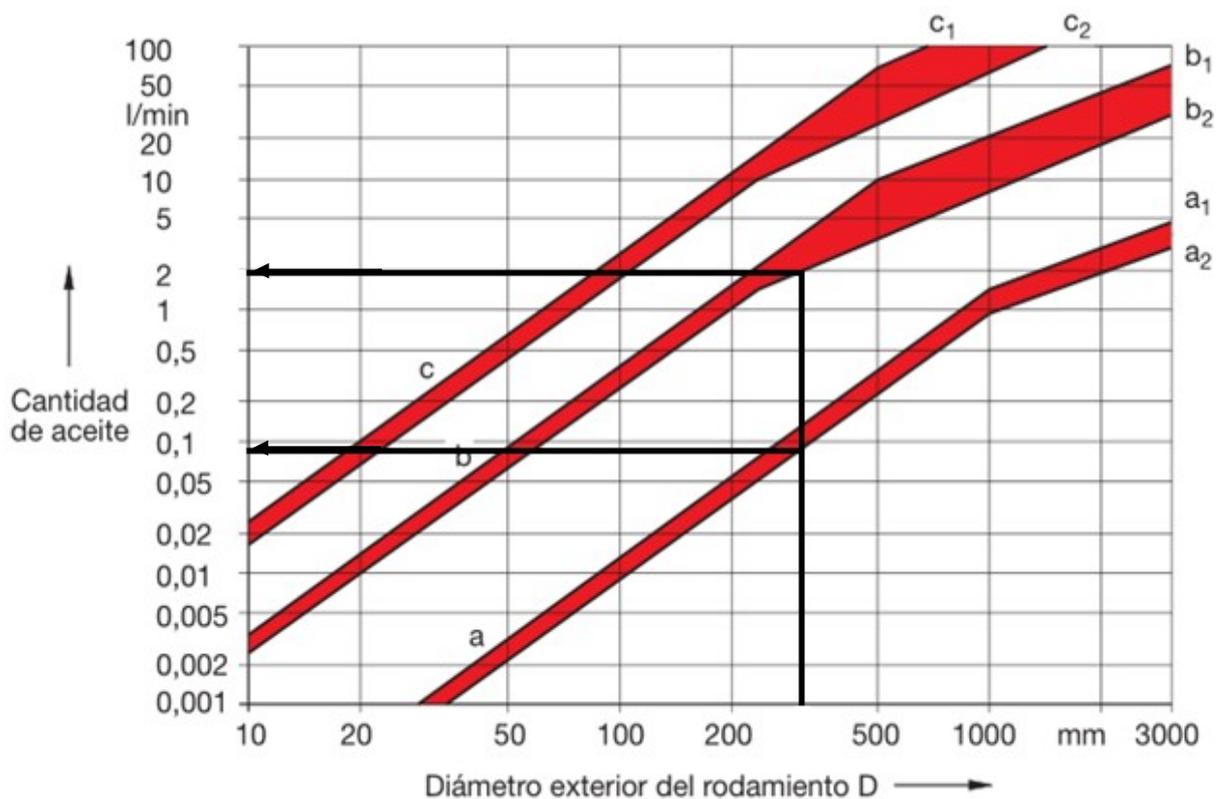


Figura 3.5. Cantidad de aceite en el sistema de lubricación por el método de circulación.

Con la relación de diámetro del rodamiento 22330 igual a 2,1, se determinó primeramente en la curva a_2 . Que no es más que la cantidad suficiente de aceite para la lubricación del rodamiento. Concluyendo que el valor de $a_2 = 0,08 \text{ l/min}$. Posteriormente mediante la curva b_2 se determinó el límite superior del rodamiento de sección simétrica 22330, siendo igual a 2 l/min como se muestra en la Figura 3.5.

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

Para determinar los grados de viscosidad ISO para el rodamiento y teniendo en cuenta su velocidad de rotación en el ventilador centrífugo, se calculó la viscosidad necesaria de funcionamiento según el método analítico y mediante las expresiones 2.3 y 2.4 en función de la velocidad de operación y las características geométricas. Se analizó la temperatura de funcionamiento del rodamiento, seleccionando la mayor y tomando 10°C de diferencia por las distintas temperaturas, entre el aro exterior y el alojamiento o soporte del rodamiento; realizando los cálculos con 96 °C de temperatura. Finalmente se obtuvo los grados ISO para el rodamiento 22330 en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Viscosidad requerida y viscosidad ISO para el rodamiento 23330.

n (min⁻¹)	Temp. °C	Viscosidad mínima necesaria (mm²/s)	Grado de viscosidad ISO
893	41	10,43	ISO VG 15
	46		ISO VG 15
	48		ISO VG 15
	49		ISO VG 15
	50		ISO VG 15
	50		ISO VG 15
	50		ISO VG 15
	51		ISO VG 15
	51		ISO VG 15
	53		ISO VG 22
	53		ISO VG 22
	54		ISO VG 22
	55		ISO VG 22
	60		ISO VG 22
	60		ISO VG 22
	67		ISO VG 32

	68		ISO VG 32
	70		ISO VG 32
	70		ISO VG 32
	75		ISO VG 46
	78		ISO VG 46
	85		ISO VG 68
	89		ISO VG 68
	96		ISO VG 100

Al calcular la viscosidad mínima necesaria para el rodamientos 22330 (Tabla 3.3) a las temperatura de trabajo registrada en la tabla 3.2 se determinó en la Tabla 3.3 cuáles son las viscosidades mínimas necesarias, en función del índice de viscosidad Para 893 min^{-1} se muestra cómo a medida que aumenta la temperatura es necesario la utilización de un aceite mayor grado de viscosidad.

3.8. Viscosidad real de funcionamiento

La velocidad del ventilador es constante por lo que se procede al cálculo, de la viscosidad real del aceite a las diferentes temperaturas registradas ($^{\circ}\text{C}$), para la velocidad de 893 min^{-1} .

Tabla 3.4. Viscosidad real de funcionamiento para el rodamiento 22330.

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Viscosidad real de funcionamiento (mm^2/s)
41	14,5
46	12,3
48	11,5
49	11,1
50	10,8
50	10,8
50	10,8
51	10,5
51	10,5

53	13,8
53	13,8
54	13,4
55	13,0
60	11,1
60	11,1
67	12,1
68	11,7
70	11,0
70	11,0
75	12,6
78	11,6
85	12,7
89	11,4
96	12,4

3.9. Cálculo de la relación de viscosidad

Para el cálculo de la relación de viscosidad se tuvo en cuenta la viscosidad real de funcionamiento y la viscosidad mínima necesaria para las 24 temperaturas registradas por el rodamiento 22330 las cuales se plasman a continuación.

Tabla 3.4. Relación de viscosidad para el rodamiento 22330.

Temp. (°C)	Relación de viscosidad
41	1,390
46	1,179
48	1,103
49	1,064
50	1,035
50	1,035
50	1,035

51	1,007
51	1,007
53	1,323
53	1,323
54	1,285
55	1,246
60	1,064
60	1,064
67	1,160
68	1,122
70	1,055
70	1,055
75	1,208
78	1,112
85	1,218
89	1,093
96	1,189

Al calcular la relación de viscosidad aplicando la ecuación 2.5 y tomando las viscosidades reales expuestas en la tabla 3.4, de los grados de aceite mostrados en la tabla la 3.3. Se comprobó que para ninguna de las condiciones operacionales, se torna indispensable la utilización de aditivos de extrema presión.

3.10. Grados ISO alternativos para índice de viscosidad 95

Calculados los grados de aceites alternativos, para la lubricación de los rodamientos 22330, y tomando en consideración que el método de lubricación es el de circulación, donde el valor de relación de viscosidad está entre 1 y 2,5; se calculó los grados ISO para aceites alternativos, con índice de viscosidad de 95 en la Tabla 3.5 para las diferentes temperaturas registradas por el software Citecen un día de funcionamiento normal del ventilador. Para ello tuvimos en cuenta el comportamiento de la relación de viscosidad para la selección de la clase de aceite que garantice una lubricación adecuada.

Tabla 3.5. Clases de aceites alternativos para la lubricación del rodamiento 22330 según el índice de viscosidad 95.

n (min ⁻¹)	temperatura	Relación de viscosidad		
		recomendados	alternativos	
893	41,00	1,3 (ISO VG 15)	2,3 (ISO VG 22)	
	46,00	1,1 (ISO VG 15)	1,9 (ISO VG 22)	
	48,00	1,1 (ISO VG 15)	1,8 (ISO VG 22)	
	49,00	1,0 (ISO VG 15)	1,7 (ISO VG 22)	2,4 (ISO VG 32)
	50,00	1,1 (ISO VG 15)	1,7 (ISO VG 22)	2,3 (ISO VG 32)
	50,00	1,0 (ISO VG 15)	1,7 (ISO VG 22)	2,3 (ISO VG 32)
	50,00	1,0 (ISO VG 15)	1,7 (ISO VG 22)	2,3 (ISO VG 32)
	51,00	1,0 (ISO VG 15)	1,6 (ISO VG 22)	2,2 (ISO VG 32)
	51,00	1,0 (ISO VG 15)	1,6 (ISO VG 22)	2,2 (ISO VG 32)
	53,00	1,3 (ISO VG 22)	2,2 (ISO VG 32)	
	53,00	1,3 (ISO VG 22)	2,3 (ISO VG 32)	
	54,00	1,2 (ISO VG 22)	2,0 (ISO VG 32)	
	55,00	1,2 (ISO VG 22)	2,2 (ISO VG 32)	
	60,00	1,0 (ISO VG 22)	1,7 (ISO VG 32)	2,2 (ISO VG 46)
	60,00	1,0 (ISO VG 22)	1,7 (ISO VG 32)	2,2 (ISO VG 46)
	67,00	1,1 (ISO VG 32)	1,7 (ISO VG 46)	2,4 (ISO VG 68)
	68,00	1,1 (ISO VG 32)	1,3 (ISO VG 46)	1,8 (ISO VG 68)
	70,00	1,0 (ISO VG 32)	1,6 (ISO VG 46)	2,2 (ISO VG 68)
	70,00	1,0 (ISO VG 32)	1,6 (ISO VG 46)	2,2 (ISO VG 68)
	75,00	1,2 (ISO VG 46)	1,6 (ISO VG 46)	2,2 (ISO VG 68)
	78,00	1,1 (ISO VG 46)	1,7 (ISO VG 68)	2,2 (ISO VG 100)
	85,00	1,2 (ISO VG 68)	1,8 (ISO VG 100)	2,4 (ISO VG 150)
	89,00	1,0 (ISO VG 68)	1,6 (ISO VG 100)	2,1 (ISO VG 150)
	96,00	1,3 (ISO VG 100)	1,7 (ISO VG 150)	2,3 (ISO VG 220)

3.11. Tipos de aceites recomendados y alternativos

Una de las condiciones mínimas necesarias para la lubricación adecuada de un par tribológico es que el aceite al garantice la viscosidad suficiente para mantener separado el par tribológico garantizando una lubricación hidrodinámica. Bajo este principio en la tabla 3.6 se seleccionaron aceites recomendados y alterativos para un índice de viscosidad 95 para en caso de no existir el tipo de aceite propuesto se pueda garantizar una lubricación adecuada con otros aceites.

Tabla 3.6. Tipos de aceites recomendados y alternativos para índice de viscosidad 95.

Clase de aceites	recomendados	alternativos
ISO VG 15	Husillo 15	Husillo 22, Corte Ferroso 22, Corte no Ferroso 22, Circulación 32
ISO VG 22	Husillo 22	Corte Ferroso 22, Circulación 32, Hidráulico 32, Circulación 46
ISO VG 32	Circulación 32	Turbo 32, Husillo 32, Circulación 46, Circulación 68
ISO VG 46	Circulación 46	Turbo 46, Hidráulico 46, Circulación 68
ISO VG 68	Circulación 68	Hidráulico 68, Turbo 68, Circulación 100, Circulación 150
ISO VG 100	Circulación 100	Hidráulico 100, VDL-100, Máquina 100, Circulación 150
ISO VG 150	Circulación 150	Reductor 150, Hidráulico 150, Máquina 150, Circulación 220
ISO VG 220	Circulación 220	Reductor 220, Máquina 220

3.12. Vida nominal y vida nominal ajustada del rodamiento 22330

El término histórico empleado para determinar la longevidad de los rodamientos 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.

3.12.1. Capacidad de carga axial máxima permisible

Para saber si el rodamiento soporta la fuerza axial a la que está sometido se calculó la capacidad de carga axial máxima permisible (F_{ap}) utilizando la expresión 2.1 la cual es resultado del factor obtenido por la multiplicación de un coeficiente igual a 0,003 , el ancho del rodamiento (B) igual a 320 mm y el diámetro interior igual a 150 mm. El despeje de dichas variables arrojó como resultado que la carga axial máxima permisible es igual 48,6 kN. Dado que la fuerza axial que actúa en el rodamiento determinada por el software XWIGAS es de 1,7 kN y la máxima permisible es de 48,6 kN quedó comprobado que es adecuada la selección del rodamiento para las cargas axiales a la que es sometido durante su funcionamiento.

3.12.2. Vida nominal

El resultado de la vida nominal (tabla 3.7) se obtuvo mediante la expresión 2.2, donde se tomó la carga equivalente que soporta el rodamiento 22330; calculada por la ecuación 2.3 para una fuerza radial (F_r) de 34kN, una fuerza axial (F_a) de 1,7kN y un factor de cálculo (Y_1) de 1,9; el valor del exponente de la vida nominal se tomó para rodamientos de rodillos (10/3), ya que se trata de un rodamiento de rodillos a rótula.

Tabla 3.7. Vida nominal L_{10} .

Variable	ecuación	valor	Unidad de medida
L_{10}	2.2	6457	millones de revoluciones

Con los valores obtenidos de la vida nominal (L_{10}) en millones de revoluciones, se procedió al cálculo de la vida nominal en horas de funcionamiento (L_{10h}), por medio de la expresión 2.5. Se obtuvo para la longevidad que se muestra en la tabla 3.7 y la velocidad de rotación del ventilador (893 min^{-1}), los resultados son mostrados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Vida nominal L_{10h} .

Variable	ecuación	valor	Unidad de medida
L_{10h}	2.5	120 488	horas de funcionamiento

Resulta evidente la elevada longevidad del rodamiento para las condiciones de trabajo, lo cual se debe fundamentalmente a la baja carga que soporta el rodamiento en

comparación con su capacidad de carga, lo que trae consigo un ligero contacto de las asperezas de los elementos rodantes con los aros interior, exterior y el retén.

3.12.3. Vida nominal ajustada

La vida nominal ajustada (L_{nm}) es 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 3.9 se muestran los resultados de L_{nm} , los cuales fueron calculados mediante la expresión 2.6, donde se realizó el cálculo para una probabilidad de falla del 10% ($a_1 = 1$). El factor de ajuste de la vida se determinó para un nivel de contaminación normal (0,7) propio de sistemas que realizan el filtrado del aceite, una carga límite a la fatiga de 146 kN y una carga equivalente de 105 kN. El cálculo de la relación de variables ($\eta_c \cdot P_u/P$) arrojó un valor de 0,97 que al hacer coincidir con la relación de viscosidad obtenida (1,18), el valor del factor a_{SKF} es igual a 1,1 como se refleja en la gráfica de la figura 3.6.

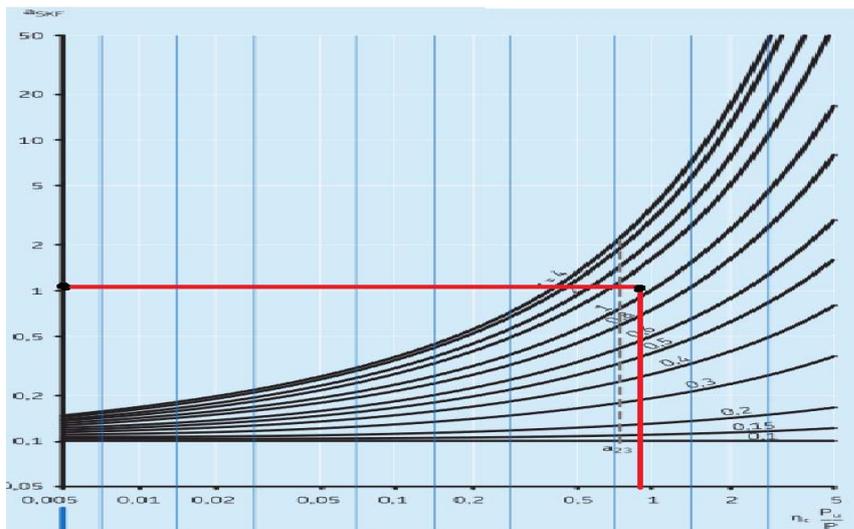


Figura 3.6. Obtención del valor del factor a_{skf} .

El valor de la vida nominal ajustada en millones de revoluciones aparece reflejado en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Vida nominal ajustada L_{nm} .

Variable	ecuación	valor	Unidad de medida
L_{nm}	2.6	7 103	millones de revoluciones

Los valores expuestos en la tabla 3.9 reflejan la marcada incidencia de la fiabilidad del rodamiento en su longevidad, evidenciándose como al incorporar este parámetro en el análisis y las condiciones de lubricación, aumenta la vida nominal ajustada respecto a la vida nominal.

Similar análisis se realizó para determinar la vida nominal ajustada en horas, la cual se obtuvo de la vida nominal ajustada en millones de revoluciones y la velocidad de operación, calculada por la ecuación 2.8. Los resultados son mostrados en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Vida nominal ajustada L_{nm} .

Variable	ecuación	valor	Unidad de medida
L_{nmh}	2.8	132 536	horas de funcionamiento

La vida nominal y la vida nominal ajustada en horas de funcionamiento mostradas en las tablas 3.8 y 3.10 respectivamente, arrojan valores que resultan superiores a los valores orientativos de vida nominal para la clase de máquina evaluada (ventilador para trabajo continuo), lo que refleja que la selección del rodamiento fue realizada de manera correcta, por lo que el diseño de este elemento del ventilador es adecuado.

3.13. Análisis económico

La correcta selección de la clase de aceite para la lubricación de los rodamientos influye determinantemente en su vida útil. Con una buena selección y una correcta lubricación se logra la vida máxima estimada para condiciones de viscosidad idónea, esto evita la compra de los rodamientos que día tras día incrementan más los precios, esto trae un considerable ahorro a la economía.

El bajo rendimiento de cualquier máquina producido por deficiente mantenimiento requiere más uso de combustible fósiles y consecuentemente más gastos para la economía nacional. Según el precio establecido por [FAG \(2014\)](#) el rodamiento 22330 está valorado en 3946,00 euros. De ahí que al garantizar una adecuada lubricación del rodamiento a través de aceites de la clase ISO VG 1000, se garantiza la longevidad requerida evitando el importe de nuevos rodamientos al precio fijado.

3.14. 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 3.11). 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 3.11. 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.

3.15. Conclusiones del capítulo

- La selección de aceite según el criterio de relación de viscosidad, demostró que la clase adecuada para la lubricación de los rodamientos es la ISO VG 100.
- La vida nominal del rodamiento arrojó valores de 120 488 horas de funcionamiento, garantizando una adecuada disponibilidad del ventilador.

CONCLUSIONES GENERALES

- Para lograr una lubricación eficaz en los rodamientos del ventilador centrífugo 121-02-UE-22, con la utilización de un aceite de índice de viscosidad 95, debe emplearse un aceite clase ISO VG 100.
- Se comprobó que la cantidad de aceite necesaria para la adecuada lubricación de del ventilador centrífugo, capaz de evacuar el calor generado por los rodamientos, empleando el método de circulación de aceite es de dos litros por minuto.
- La vida nominal ajustada en horas de funcionamiento resultó superior al valor orientativo de vida nominal para el ventilador, demostrando que el rodamiento es capaz de garantizar la disponibilidad del equipo en el periodo evaluado.

RECOMENDACIONES

- Implementar los resultados obtenidos, en aras de garantizar la disponibilidad del ventilador.
- Aplicar el procedimiento a otros equipos, que necesiten seleccionar la clase y tipo de aceite lubricante.
- Ampliar el procedimiento utilizado, al evaluar la clase de aceite para otros sistemas de lubricación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarracín, P; Pinzón, R. 2004.** *Cálculo del ahorro de energía por menor fricción.* No 144, Medellín, Colombia. pág137-149. ISSN 0012-7353.
- Álvarez, E. 2013.** Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Santa Clara, Cuba.
- BDC International S.A. 2010.** Seminario de rodamientos Tema: Lubricación y montaje. Moa. pág. 29.
- Church, A. H. 1976.** Bombas y máquinas soplantes centrífugas. Vedado, La Habana: Pueblo y educación.
- Delgado, J. 2006.** Sistemas de lubricación a bordo. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Tesis de grado.
- FAG. 1997.** Averías de los rodamientos. Alemania.
- FAG. 2014.** Lista de precios. Alemania.
- FAG. 2003.** Lubricación de rodamiento. SantCugat del Vallès, Barcelona: España.
- FAG. 2007.** Sealed FAG spherical roller bearings. Alemania.
- Farías, J. 2008.** Diseño e implantación de un plan de lubricación. Guayaquil Ecuador.
- Larrazabal, M. P. 2013.** Teoría de máquinas y mecanismos. Determinación de grados de libertad en los mecanismos de palancas (págs. 2-6). Moa- Holguín- Cuba: ISMM.
- Martín, F. 1968.** Teoría y práctica del rozamiento. La Habana, Cuba. ISPJAE.
- Mataix, C. 1986.** Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.
- Matos,R. 2010.** Lubricación industrial, tesis en opción al grado de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica. San Nicolás de los Garza, Chile: Universidad autónoma de Nuevo León.
- NTN. 2004.** *Rodamientos de bolas y rodillos.*
- NKE Bearings. 2010.** General catalogue. Steyr: D-36043 Fulda, 2010. 2000/05 DE.
- Ramos, N. P. 1994.** Bombas, Ventiladores y Compresores. La Habana: ISPJAE.

Sánchez, J. M. 2013. Análisis de comportamiento operacional de los ventiladores de tiro forzado de la termoeléctrica de Felton. Moa- Holguín- Cuba: ISMM.

SKF. 2008. Catálogo general. Suecia.

SKF. 2009. Manual de mantenimiento de Rodamiento. Suecia.

Shell. 2011. Introducción a los lubricantes y a la lubricación. Madrid, España.

Ramos, N. P. 1994. Bombas, Ventiladores y Compresores. La Habana: ISPJAE.

Widman. 2005. Fundamentos de la Lubricación, Fricción y Desgaste. Santa Cruz.

Wales, J. &Sears, F.W. 2013. Wikipedia. Consultado el 16 de septiembre de 2015. Disponible.

Widman. 2009. Cálculo de la curva de viscosidad. [En línea] 2009. [Citado el: 12 de Enero de 2014.] Disponible en: <http://www.widman.biz>.

