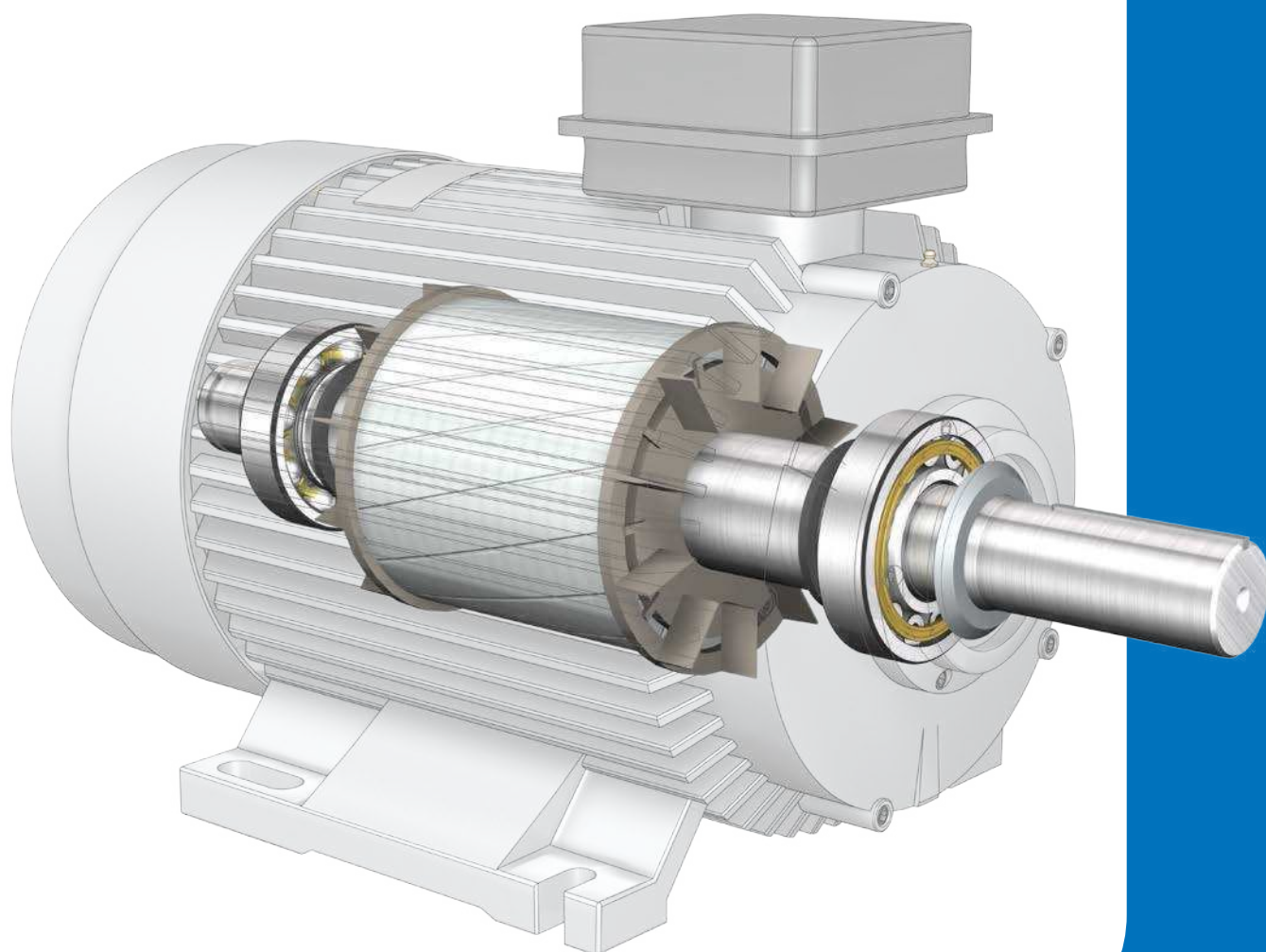


Rodamientos y sellos en motores eléctricos y generadores



© SKF, @PTITUDE, BAKER, CARB, DUOFLEX, DURATEMP, ICOS, INSOCOAT, MARLIN, MICROLOG, MONOFLEX, MULTILOG, SEAL JET, SKF EXPLORER, SYSTEM 24 y WAVE son marcas registradas del Grupo SKF.

© Grupo SKF 2016

El contenido de esta publicación es propiedad de los editores y no puede reproducirse (incluso parcialmente) sin autorización previa por escrito. Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de la información contenida en esta publicación, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicha información.

PUB 54/P7 13459 ES · Febrero 2016

Esta publicación sustituye a la publicación 5230 EN y 6230 EN.

Algunas imágenes se utilizan bajo licencia de Shutterstock.com

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

1

2 Sistemas de rodamientos

2

3 Sellos en máquinas eléctricas

3

4 Tolerancias y ajustes

4

5 Lubricación

5

6 Montaje y desmontaje de rodamientos,
y comprobación de motores

6

7 Daños en los rodamientos y medidas correctivas

7

8 Soluciones SKF

8

Rodamientos y sellos en motores eléctricos y generadores

Manual para el diseñador industrial y el usuario final

Prólogo

Este manual de aplicaciones, lubricación y mantenimiento de SKF para rodamientos y sellos de motores eléctricos y generadores ha sido desarrollado pensando en diversos especialistas de la industria. Para los diseñadores de máquinas eléctricas¹⁾, este manual proporciona la información necesaria para optimizar diferentes disposiciones de rodamientos. Para los especialistas de diversos sectores industriales que utilizan máquinas eléctricas, el manual incluye recomendaciones sobre cómo maximizar la vida útil de los rodamientos mediante un montaje, mantenimiento y lubricación adecuados.

Las recomendaciones se basan en la experiencia adquirida por SKF durante décadas de estrecha cooperación con fabricantes y usuarios de máquinas eléctricas de todo el mundo. Esta experiencia, junto con la opinión de los clientes, influye poderosamente en el desarrollo de productos en SKF, lo que da lugar a la introducción de nuevos productos y versiones.

La información general sobre la selección y el cálculo de rodamientos figura en el Catálogo de rodamientos SKF. Esta publicación trata cuestiones derivadas del uso de rodamientos en motores eléctricos y generadores. Los datos del Catálogo de rodamientos SKF se han repetido aquí únicamente cuando es necesario con fines aclaratorios.

¹⁾ En este manual, cuando se emplea el término "máquina eléctrica", se hace referencia tanto a un motor eléctrico industrial como a un generador. Cuando hablamos de motores en este manual, nos referimos también a los generadores.

Índice

SKF: la empresa del conocimiento industrial. . .	6	3 Sellos en máquinas eléctricas	52
Nuestros conocimientos, su éxito	7	Requisitos de diseño.	54
1 Rodamientos en máquinas eléctricas . . .	8	Sellos de rodamientos integrales	55
Requisitos de diseño.	9	Sellos de eje	57
Selección de rodamientos	15	Sellos especiales.	62
Ejemplo de cálculo	16	4 Tolerancias y ajustes	64
Rodamientos rígidos de bolas	20	Tolerancias del eje y del soporte	66
Rodamientos de rodillos cilíndricos.	24	Ajustes recomendados	68
Rodamientos INSOCOAT	26	5 Lubricación	72
Rodamientos híbridos	28	Lubricación	73
Rodamientos de bolas de contacto angular	30	Lubricación con grasa	74
Rodamientos de rodillos a rótula.	32	Selección de la grasa	76
Rodamientos de rodillos toroidales CARB.	34	Intervalos de relubricación	80
Rodamientos axiales de rodillos a rótula	36	Vida útil de la grasa en rodamientos tapados.	86
2 Sistemas de rodamientos	38	Lubricación con aceite	88
Selección de un sistema de rodamientos	39		
Precarga mediante muelles.	49		

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores 92

Montaje 94

Métodos de montaje 96

Desmontaje 101

Comprobación de motores y preparación para el transporte 105

7 Daños en los rodamientos y medidas correctivas. 108

Daños en los rodamientos 110

Análisis de la causa raíz 110

Fatiga 111

Desgaste 112

Corrosión 114

Erosión eléctrica 116

Deformación plástica 121

Fracturas y agrietamiento 122

8 Soluciones SKF 124

Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services 126

Herramientas de cálculo de SKF 127

Soluciones específicas de aplicación 128

Tecnologías y servicio de monitoreo de la condición 135

Programa de certificación para empresas de mantenimiento de motores eléctricos. 141

SKF: la empresa del conocimiento industrial

Desde sus comienzos en 1907, con quince empleados que ofrecían una solución simple, a la vez que acertada, a un problema de desalineación en un molino de Suecia, SKF ha crecido hasta convertirse en líder mundial de conocimiento industrial. Con el paso de los años, hemos adquirido un vasto conocimiento sobre rodamientos, que hemos ampliado a sellos, mecatrónica, servicios y sistemas de lubricación. Nuestra red de conocimiento industrial incluye a 46.000 empleados, 15.000 distribuidores, oficinas en más de 130 países y un número cada vez mayor de centros SKF Solution Factory en todo el mundo.

Investigación y desarrollo

Contamos con experiencia práctica en más de cuarenta industrias, que se basa en el conocimiento de nuestros empleados acerca de las condiciones de funcionamiento reales. Además, nuestros especialistas líderes a nivel mundial, así como las universidades con las que colaboramos, son precursores en investi-



gación y desarrollo teórico en áreas que incluyen la tribología, el monitoreo de condición, la gestión de activos y el cálculo de la vida útil de los rodamientos. Nuestro continuo compromiso con la investigación y el desarrollo nos ayuda a mantener a nuestros clientes a la vanguardia de sus industrias.

Afrontamos los desafíos más exigentes

Nuestra red de conocimientos y experiencia, junto con nuestro enfoque de combinar nuestras tecnologías clave, nos permite crear soluciones innovadoras para abordar los desafíos más exigentes. Trabajamos estrechamente con nuestros clientes a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, y les ayudamos a desarrollar su negocio de manera responsable y rentable.

Trabajamos por un futuro sostenible

Desde 2005, en SKF hemos trabajado para reducir el impacto ambiental de nuestras operaciones y de las de nuestros proveedores. El continuo desarrollo de nuestras tecnologías nos ha permitido lanzar la cartera de productos y servicios SKF BeyondZero, que mejora la eficiencia, reduce las pérdidas de energía y potencia el uso de nuevas tecnologías que aprovechan la energía eólica, solar y oceánica. Este enfoque combinado ayuda a reducir el impacto ambiental de nuestras operaciones y de las de nuestros clientes.

Los centros SKF Solution Factory permiten el acceso, de manera local, a los conocimientos industriales y a la experiencia en fabricación de SKF, lo cual nos permite ofrecer soluciones y servicios únicos a nuestros clientes.

Los Distribuidores Autorizados SKF, asistidos por los sistemas informáticos y logísticos y los especialistas de aplicaciones de SKF, ofrecen una valiosa combinación de conocimientos sobre productos y aplicaciones a clientes de todo el mundo.



Nuestros conocimientos: su éxito

La gestión del ciclo de vida SKF es la manera en que combinamos nuestras plataformas tecnológicas con servicios avanzados, y las aplicamos en cada etapa del ciclo de vida del activo a fin de ayudar a nuestros clientes a tener más éxito y a ser más sostenibles y rentables.



Trabajamos cerca de usted

Nuestro objetivo es ayudar a nuestros clientes a aumentar su productividad, a minimizar sus necesidades de mantenimiento, a lograr una mayor eficiencia energética y un mejor aprovechamiento de los recursos, así como a optimizar los diseños para obtener una mayor vida útil y confiabilidad.



Rodamientos

SKF es líder mundial en el diseño, desarrollo y fabricación de rodamientos, rótulas, unidades y soportes de rodamientos de alto rendimiento.

Soluciones innovadoras

Tanto si la aplicación es lineal, giratoria, o una combinación de ambas, los ingenieros de SKF trabajan con usted en cada etapa del ciclo de vida del activo, y examinan el conjunto completo de la aplicación para mejorar el rendimiento de su maquinaria. Este enfoque no se centra exclusivamente en los componentes individuales, como sellos o rodamientos, sino que examina la aplicación en su totalidad, para tener en cuenta cómo interactúa cada uno de los componentes con los demás.



Mantenimiento de maquinaria

Las tecnologías de monitoreo de condición y los servicios de mantenimiento de SKF pueden ayudar a minimizar las paradas no planificadas, mejorar la eficacia operativa y reducir los costos de mantenimiento.

Verificación y optimización del diseño

SKF puede ayudarle a optimizar sus nuevos diseños o los existentes con el software de modelado en 3D propio, que también se puede utilizar como banco de ensayos virtual para confirmar la integridad del diseño.



Soluciones de sellado

SKF ofrece sellos estándares y soluciones de sellado a medida que permiten aumentar el tiempo productivo, mejorar la confiabilidad de las máquinas, reducir la fricción y las pérdidas de energía, y prolongar la duración del lubricante.



Mecatrónica

Los sistemas de SKF de control por cable "Fly-by-wire" para la industria aeroespacial y de conducción por cable "Drive-by-wire" para aplicaciones de maquinaria pesada, agrícolas y carretillas elevadoras, reemplazan a los pesados sistemas mecánicos e hidráulicos que consumen grasa o aceite.



Soluciones de lubricación

Las soluciones de lubricación de SKF, que ofrecen desde lubricantes especializados hasta sistemas de lubricación avanzados, pueden ayudarle a reducir las paradas relacionadas con la lubricación y el consumo de lubricantes.

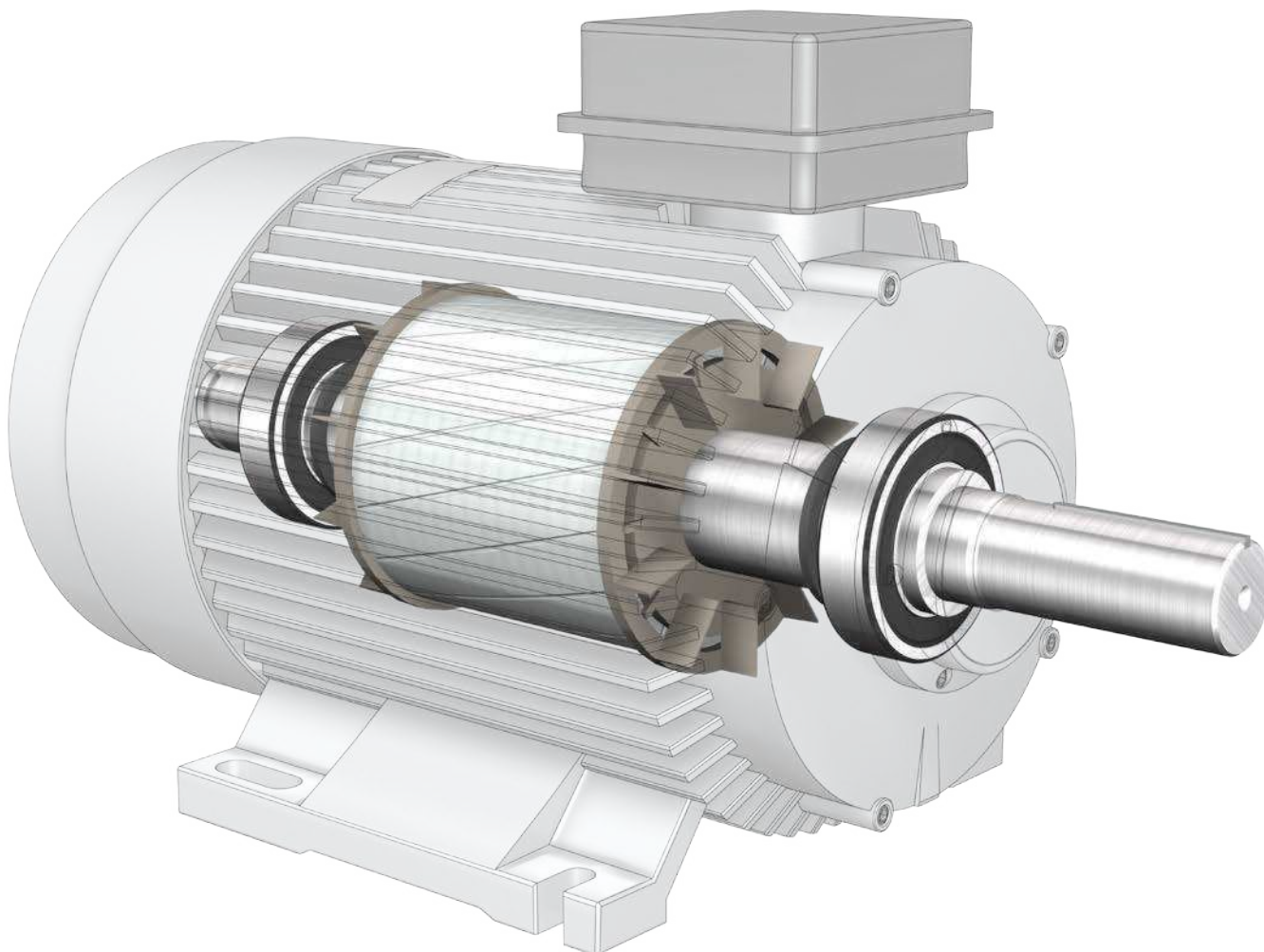


Actuación y control del movimiento

Con una amplia gama de productos, desde actuadores y husillos de bolas hasta guías con patines, SKF puede ayudarle a solucionar los desafíos más exigentes de su sistema lineal.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Requisitos de diseño	9	Rodamientos de rodillos toroidales CARB	34
Selección de rodamientos	15	Rodamientos axiales de rodillos a rótula	36
Ejemplo de cálculo	16		
Rodamientos rígidos de bolas	20		
Rodamientos de rodillos cilíndricos	24		
Rodamientos INSOCOAT	26		
Rodamientos híbridos	28		
Rodamientos de bolas de contacto angular	30		
Rodamientos de rodillos a rótula	32		



Rodamientos en máquinas eléctricas

El objetivo de usar rodamientos en máquinas eléctricas es sujetar y fijar el rotor, mantener una holgura pequeña y constante, y transferir las cargas del eje al bastidor del motor. Los rodamientos deben permitir el funcionamiento a alta y baja velocidad, minimizar la fricción y ahorrar energía. Al seleccionar el tipo de rodamiento y la disposición para cumplir los requisitos de una aplicación de motor determinada, el diseñador ha de tener en cuenta muchos parámetros diferentes. En todas las circunstancias, el diseño deberá ser económico tanto en el aspecto de fabricación como en el de mantenimiento.

Requisitos de diseño

Los parámetros de diseño de una máquina eléctrica son, generalmente, la potencia de salida, las dimensiones principales, y los materiales del eje y el soporte. En el caso de un motor de inducción, el número de polos requerido es también un importante parámetro de diseño.

Otras importantes consideraciones son las condiciones de funcionamiento previstas, el tiempo productivo o disponibilidad requeridos, los requisitos de mantenimiento y los métodos de fabricación (→ **fig. 1, página 10**).

En la fase de diseño, hay que tener en cuenta los procedimientos de montaje y desmontaje (→ **capítulo 6, página 93**).

La selección del lubricante y el método de lubricación adecuados (→ **capítulo 5, página 73**) puede tener también un impacto significativo en la vida útil de los rodamientos.

El monitoreo de la condición (→ **capítulo 8, página 135**) puede reducir las averías imprevistas y mejorar la confiabilidad.

Las páginas siguientes presentan las consideraciones más importantes y los pasos que hay que recordar durante el proceso de diseño (→ **tabla 1, página 11**). También se incluye un ejemplo del proceso de diseño de un motor eléctrico.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Requisitos de diseño

Dimensiones

En la mayoría de los casos, la potencia de salida determina el tamaño del eje, y este, a su vez, determina el diámetro del agujero de los rodamientos. En los últimos años, ha habido una tendencia a usar rodamientos con secciones transversales más pequeñas, ya que requieren menos espacio.

Cargas

Para seleccionar el mejor rodamiento para una aplicación determinada, se deberán tener en cuenta todas las cargas operativas. Además del peso de los componentes, se deberán tener en cuenta también las fuerzas derivadas de la potencia transmitida, como las indicadas a continuación:

- atracción magnética resultante de la presencia de holguras asimétricas
- fuerzas dinámicas producidas por desalineación
- fuerzas de desequilibrio
- fuerzas producidas por errores de paso de los engranajes
- cargas axiales

Las cargas pueden ser radiales, axiales o una combinación de ambas. Normalmente, se emplean rodamientos de rodillos para soportar cargas pesadas. En general, se emplean rodamientos de bolas para las cargas más ligeras.

Algunos rodamientos, como los de rodillos cilíndricos de tipo N y NU, soportan únicamente cargas radiales, mientras que otros, como los de bolas de contacto angular, son más adecuados para cargas combinadas.

Para conseguir un funcionamiento satisfactorio, los rodamientos de bolas y de rodillos deberán estar siempre sometidos a una carga mínima determinada. Consulte el tipo de rodamiento específico en la sección de tablas del *Catálogo de rodamientos SKF*.

Parámetros que hay que tener en cuenta al diseñar una máquina eléctrica

NDE = Lado opuesto al accionamiento

DE = Lado de accionamiento

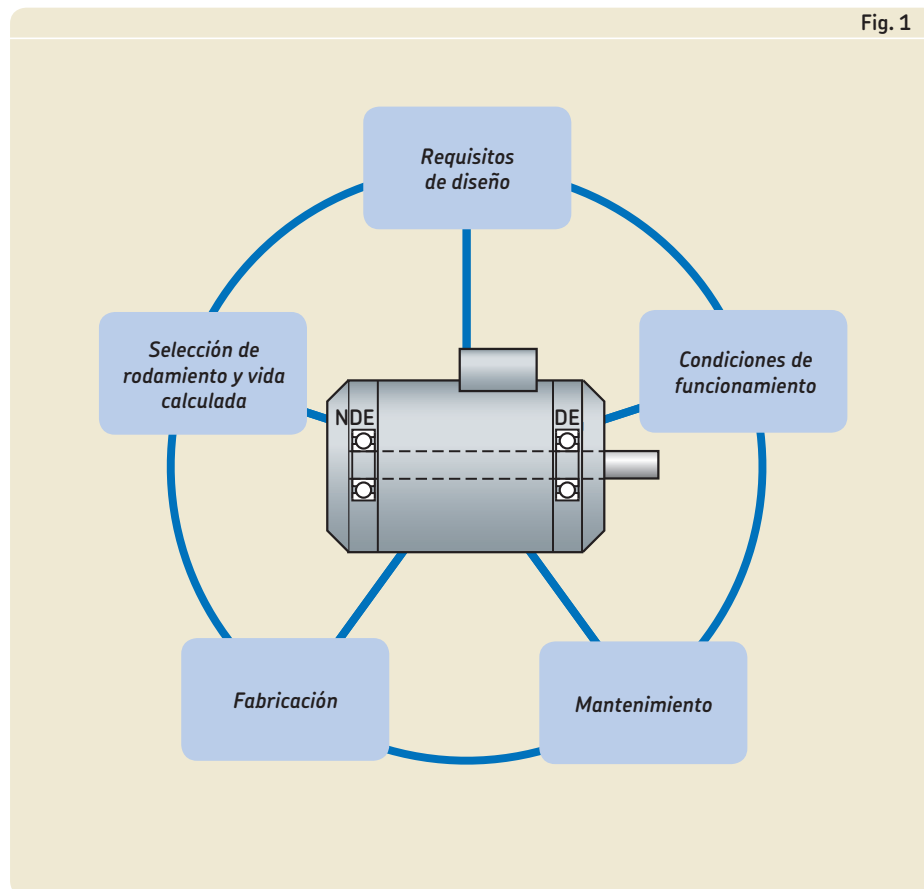


Tabla 1

**Consideraciones de diseño
y condiciones de funcionamiento**

- Dimensiones principales
- Magnitud y dirección de las cargas
- Velocidad: fija, variable o alta
- Material del eje y del soporte
- Transmisión por acoplamiento, correas o engranajes
- Montaje horizontal o vertical
- Ambiente
- Nivel de vibración
- Nivel de ruido
- Temperatura
- Vida requerida del rodamiento
- Lubricación: grasa o aceite
- Mantenimiento
- Monitoreo de la condición
- Sellado (integral y/o externo)

Fabricación

- Disponibilidad de los productos
- Precisión requerida
- Manipulación y transporte
- Herramientas de montaje

Parámetros importantes que hay que tener en cuenta al seleccionar los rodamientos apropiados para un motor eléctrico o un generador

Velocidad

La velocidad de funcionamiento afecta tanto a la vida útil del rodamiento como a la del lubricante. Al seleccionar el rodamiento, habrá que tener en cuenta el tamaño, el diseño de la jaula, la lubricación, el juego y el tipo de sello.

Velocidad fija

En un motor de inducción, el número de polos y su frecuencia de alimentación determinan la velocidad. Por ejemplo, la velocidad máxima para un motor bipolar a 50 Hz es de 3 000 r. p. m. y, a 60 Hz, de 3 600 r. p. m.

Velocidad variable

Si la máquina tiene que funcionar a distintas velocidades durante su ciclo de servicio, habrá que tener en cuenta todos los intervalos de velocidad al calcular las dimensiones y la vida útil del rodamiento.

Los motores de inducción que usan convertidores de frecuencia para variar su velocidad requieren una consideración especial en la selección del rodamiento. Los convertidores de frecuencia modernos que emplean modulación por ancho de impulsos (pulse width modulation, PWM) y tecnología de semiconductores de conmutación rápida suelen ocasionar problemas de erosión eléctrica en los rodamientos (→ capítulo 7, página 116).

Alta velocidad

Normalmente, para aplicaciones de alta velocidad, los rodamientos de bolas son más adecuados que los de rodillos. En aplicaciones con velocidades muy altas, pueden ser adecuados los rodamientos de alta precisión o los rodamientos híbridos. Para decidirlo, será necesario llevar a cabo un análisis minucioso del rendimiento dinámico de la máquina. Algunos de los factores que influyen en la vida útil del rodamiento a altas velocidades son la jaula, el lubricante, la precisión de giro y el juego de los rodamientos, la frecuencia de resonancia del sistema y el equilibrado de los componentes giratorios.

Material del eje y el soporte

Dado que los materiales se dilatan y se contraen cuando están expuestos a cambios de temperatura, al seleccionar los materiales del eje y el soporte, es importante tener en cuenta el coeficiente de dilatación térmica. La dilatación (y la contracción) térmica puede afectar directamente al ajuste del eje y el soporte (→ capítulo 4, página 65), así como al juego interno del rodamiento.

Transmisiones por acoplamiento, correas y engranajes

El tipo de conexión que se use entre la unidad conductora y la unidad conducida influye directamente en las cargas de los rodamientos.

Existen dos tipos de acoplamientos: flexibles y rígidos. En ambos casos, es importante que haya una buena alineación; de lo contrario, se podrían inducir fuerzas adicionales en el sistema de rodamientos que reducirían la vida útil. Con acoplamientos rígidos, es especialmente importante la alineación correcta cuando se emplea una disposición típica de tres rodamientos en un eje. Cuando los acoplamientos rígidos están alineados con gran precisión, por ejemplo, mediante equipos de alineación por láser, el rodamiento del lado de accionamiento puede quedar relativamente descargado. En ese caso, la carga se comparte entre los rodamientos del lado opuesto al accionamiento y el eje acoplado, y se recomienda un rodamiento rígido de bolas en el lado de accionamiento.

Las transmisiones por correas o por engranajes normalmente cargarán más los rodamientos del motor que una transmisión por acoplamiento. Por lo tanto, las transmisiones por correas y engranajes casi siempre llevan rodamientos de rodillos cilíndricos en el lado de accionamiento. En aplicaciones con cargas pesadas y posibilidad de desalineación y/o flexión del eje, se deberá tener en cuenta el uso de rodamientos de rodillos toroidales CARB.

Consulte también las disposiciones típicas para transmisiones por acoplamiento y por correa (→ **capítulo 2, página 39**).

Montaje vertical

Las máquinas de montaje vertical requieren una consideración especial a la hora de seleccionar la disposición de rodamientos adecuada (→ **capítulo 2, página 39**). Consulte también las soluciones de sellado (→ **capítulo 3, página 53**) y el cálculo de la vida útil de la grasa (→ **capítulo 5, página 73**). La estabilidad mecánica de la grasa es especialmente importante en las aplicaciones de eje vertical. De acuerdo con las pruebas y la experiencia práctica, SKF recomienda la grasa LGHP 2 para ejes verticales en condiciones de funcionamiento normales. Como norma general, el intervalo de relubricación y la vida útil de la grasa correspondientes a ejes horizontales deberán reducirse a la mitad en los ejes verticales.

Se deben usar sellos de contacto, ya que son muy eficaces para mantener el lubricante dentro y los contaminantes fuera de la cavidad del rodamiento.

Ambiente

En ambientes húmedos y polvorientos, deberán usarse sellos y placas de protección para proteger los rodamientos. Los motores que se usen en lugares apartados podrían requerir también el uso de sellos y placas de protección para crear una versión de bajo mantenimiento o libre de mantenimiento. El tipo de sello o placa de protección empleado determinará los requisitos de mantenimiento y la vida útil del rodamiento. En el **capítulo 3, página 53**, se analizan diversos tipos de opciones de placas de protección y sellos.

Temperatura

Para seleccionar o diseñar correctamente una máquina eléctrica, es importante conocer el rango de temperaturas ambiente y la temperatura de funcionamiento normal de la máquina. Conocer esos rangos de temperatura ayudará a determinar el método de refrigeración más eficaz: aire, aceite o agua.

Las temperaturas de funcionamiento normales para los rodamientos de un motor eléctrico van de 70 a 110 °C (de 160 a 230 °F). En consecuencia, SKF recomienda usar una grasa que tenga buenas características de rendimiento en un amplio rango de temperaturas. Para aplicaciones en las cuales las temperaturas sobrepasen los 110 °C (230 °F), SKF ofrece grasas de altas temperaturas (→ **capítulo 5, página 73**).

En las aplicaciones en que las temperaturas ambiente difieran significativamente de las temperaturas de funcionamiento de los rodamientos, se puede producir una diferencia de temperatura en ellos. Si la diferencia es significativa, se deberá comprobar el juego interno del rodamiento resultante para evitar una precarga innecesaria del rodamiento. Para calcular la reducción de juego producida por la diferencia de temperatura, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Vibración

En ambientes en que la maquinaria esté sometida a vibraciones producidas por una fuente externa, normalmente se recomienda usar rodamientos de bolas siempre que sea posible. Los rodamientos de bolas, sobre todo cuando están precargados mediante muelles, son menos sensibles a los daños (→ capítulo 7, página 109) producidos por vibraciones externas.

Funcionamiento silencioso

Los motores y generadores han de funcionar de forma silenciosa. Por lo tanto, es importante seleccionar un rodamiento con la mejor combinación de material de la jaula, lubricante y juego interno. Los rodamientos SKF ofrecen ya niveles de ruido muy bajos. No obstante, estos niveles se pueden reducir aún más precargando la disposición de rodamientos con muelles (→ capítulo 2, *Precarga mediante muelles*, página 49). Unas tolerancias dimensionales y geométricas adecuadas para el eje del motor, el soporte y las tapas, que limiten la desalineación de los rodamientos, permiten reducir aún más los niveles de ruido.

Vida útil de los rodamientos

En condiciones de laboratorio controladas, rodamientos aparentemente idénticos que funcionan en idénticas condiciones tienen vidas útiles diferentes. Por tanto, es esencial una definición más clara del término “vida útil de los rodamientos” para calcular el tamaño del rodamiento. Toda la información que presenta SKF sobre capacidades de carga y vida útil de los rodamientos está basada en la vida útil alcanzada o sobrepasada por el 90% de los rodamientos en apariencia idénticos de un grupo suficientemente representativo.

La vida útil de un rodamiento se define como la cantidad de revoluciones o la cantidad de horas de funcionamiento a una velocidad determinada que el rodamiento es capaz de soportar antes de que aparezca el primer síntoma de fatiga del metal (descascarillado) en el camino de rodadura del aro interior o exterior, o en un elemento rodante.

La vida nominal basada en la definición anterior debe cumplir las expectativas de vida útil requeridas de la aplicación del rodamiento.

La vida observada de un rodamiento en una aplicación determinada depende, en gran medida, de las condiciones de funcionamiento. Los fallos pueden estar provocados por cualquiera de las siguientes causas:

- régimen eléctrico causante de erosión eléctrica, por ejemplo
- errores mecánicos causados, por ejemplo, por ajustes inadecuados del eje o el soporte, desalineación o procedimientos de montaje incorrectos
- entrada de contaminantes provocada, por ejemplo, por un sistema de sellado inadecuado y sellos desgastados o dañados, que dan lugar a un desgaste abrasivo, condiciones de lubricación deficiente y corrosión
- condiciones de carga imprevistas causadas, por ejemplo, por un desequilibrio que provoca cargas excesivas, o cargas muy ligeras, que pueden provocar el deslizamiento de los elementos rodantes
- malas condiciones de lubricación derivadas del tipo de grasa incorrecto, cantidad de grasa incorrecta, temperaturas de funcionamiento demasiado bajas o demasiado altas

Si un rodamiento falla de forma prematura, se lo deberá examinar detenidamente para determinar la causa raíz del fallo. Al hacerlo, se podrán adoptar medidas correctivas.

La vida especificada por el fabricante de un motor suele estar basada en datos hipotéticos de carga y velocidad. Por ejemplo, la vida nominal con la carga máxima admisible es de 20 000 horas como mínimo.

En condiciones de funcionamiento específicas, los rodamientos SKF pueden alcanzar una vida útil mucho más larga que la prevista por los métodos de cálculo de vida útil tradicionales, en particular cuando las cargas son ligeras. Estas condiciones específicas prevalecen cuando una película de lubricante separa de forma eficaz las superficies de rodadura (caminos de rodadura y elementos rodantes) y cuando se limitan los daños superficiales causados por contaminantes.

Cuando existen cargas de choque o picos de carga pronunciados, se debe evaluar el factor de seguridad estática.

Los métodos de cálculo adecuados se pueden consultar en la **página 63 ff** del *Catálogo de rodamientos SKF* o en las herramientas de cálculo en línea, en skf.com.

Cuando se seleccionan rodamientos engrasados de por vida en máquinas eléctricas, la vida útil del sistema está limitada, en la mayoría de los casos, por la vida útil de la grasa (→ capítulo 5, página 86 ff). Por lo tanto, habrá que verificar la vida útil del rodamiento y la vida útil de la grasa.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Requisitos de diseño

Lubricación: grasa o aceite

La elección entre lubricación con grasa y lubricación con aceite está determinada principalmente por ciertos requisitos de la aplicación.

La grasa deberá usarse en aplicaciones con los siguientes requisitos:

- mantenimiento simple y sencillo
- riesgo limitado de fugas de lubricante
- protección adicional contra los contaminantes

La lubricación con aceite deberá usarse en aplicaciones en que se requiera una refrigeración adicional para alcanzar las temperaturas de funcionamiento normales debido a una fuente de calor externa o un exceso de calor generado por la máquina o sus rodamientos a alta velocidad.

Nota

Un aumento de temperatura producido por fricción en el rodamiento es generalmente más bajo con grasa que con un baño de aceite, siempre que se usen el tipo y la cantidad de grasa correctos, y que esta se suministre al rodamiento de forma adecuada.

La lubricación con aceite deberá usarse cuando el intervalo de relubricación (→ capítulo 5, página 80) con grasa sea corto.

Mantenimiento

El mantenimiento de los motores eléctricos incluye, generalmente, la lubricación de los rodamientos, el mantenimiento de los devanados del estátor, en caso de que este sea necesario, y el monitoreo del rendimiento del motor.

En motores equipados con rodamientos sellados y lubricados de por vida, la relubricación no es posible, y el motor se considera libre de mantenimiento en términos de lubricación de los rodamientos. En ese caso, se debe tener en cuenta, naturalmente, la vida útil de la grasa del rodamiento.

Monitoreo de la condición

Con los métodos y equipos disponibles en la actualidad, se puede monitorear y diagnosticar eficazmente la condición de los rodamientos. Los procedimientos adecuados para el monitoreo de la condición de los motores eléctricos son:

- Las mediciones comparativas en varios motores idénticos que funcionan en las mismas condiciones de trabajo. Además de la condición de los rodamientos, SKF ofrece una gama completa de equipos de prueba estática, dinámica y en línea de motores, así como equipos de monitoreo. Encontrará más información en el **capítulo 8, página 135**.
- Las mediciones de tendencias en un motor con unos intervalos determinados para observar los cambios en la condición de los rodamientos.

SKF ha desarrollado las herramientas y la base de conocimientos para medir de forma eficaz las tendencias y diagnosticar la condición de los rodamientos, los fallos en el aislamiento y los circuitos, y los problemas de salud y rendimiento del motor.

Disponibilidad de los productos

Durante la fase de diseño, SKF recomienda comprobar la disponibilidad de los productos con su representante SKF local.

Manipulación, herramientas y transporte

Los rodamientos son productos de precisión que deben manipularse con cuidado para que puedan funcionar correctamente. Al montar o desmontar los rodamientos, es importante usar las herramientas y los métodos correctos. Encontrará más información en el **capítulo 6, página 93**.

Para evitar los fallos prematuros de los rodamientos, también es importante preparar el motor correctamente para el transporte (→ capítulo 6, página 105).

Precisión

La precisión requerida de cualquier máquina determina la precisión requerida de los rodamientos. Suministramos rodamientos de alta precisión para maquinaria de alta precisión/alta velocidad. Sin embargo, para que una máquina pueda beneficiarse de la precisión de giro de sus rodamientos, la precisión de los asientos cilíndricos en los ejes y en los agujeros de los soportes, y sobre las superficies de apoyo (topes para los rodamientos proporcionados por el reborde de los soportes y ejes, etc.) deberá corresponder con la precisión de los rodamientos utilizados. Las tolerancias geométricas de los asientos de rodamientos sobre los ejes y en los soportes se indican en el **capítulo 4, página 65**.

Selección de rodamientos

Los motores eléctricos y los generadores emplean una amplia variedad de tipos de rodamientos, que incluye rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de bolas de contacto angular, rodamientos de rodillos cilíndricos, rodamientos de rodillos a rótula, rodamientos de rodillos toroidales CARB y rodamientos axiales de rodillos a rótula.

En pequeñas máquinas horizontales, la disposición más común consta de dos rodamientos rígidos de bolas. En las máquinas de mayor tamaño o con cargas pesadas, se suelen usar rodamientos de rodillos.

En las máquinas verticales, se usan normalmente rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de bolas de contacto angular o rodamientos axiales de rodillos a rótula, según las cargas, las velocidades, la temperatura y el entorno de la aplicación.

Como hemos dicho anteriormente, los requisitos de diseño y las condiciones de funcionamiento de la aplicación afectarán al sistema de rodamientos. Se pueden encontrar datos actualizados de los rodamientos en línea, en skf.com/bearings. En el **capítulo 2, página 39**, se muestran diversos ejemplos de sistemas de rodamientos para máquinas eléctricas.

Juego interno de los rodamientos

El juego interno de los rodamientos se define como la distancia total que se puede desplazar uno de los aros del rodamiento con respecto al otro en dirección radial (juego radial interno) o en dirección axial (juego axial interno).

En los rodamientos de bolas (no en los rodamientos de bolas de contacto angular), de rodillos cilíndricos, de rodillos a rótula y de rodillos toroidales CARB, el juego interno se mide siempre en dirección radial. El juego inicial del rodamiento se selecciona para soportar:

- la expansión del aro interior causada por su ajuste de interferencia en el eje
- si es de aplicación, la compresión del aro exterior causada por su ajuste de interferencia en el soporte
- la reducción del juego radial producida por la diferencia de temperatura entre los aros interior y exterior durante el funcionamiento, incluidas las condiciones de puesta en marcha
- el juego interno necesario durante el funcionamiento

Es importante seleccionar el juego inicial correcto, ya que un juego de funcionamiento inadecuado puede provocar el fallo prematuro del rodamiento. El juego radial de los rodamientos rígidos de bolas en las máquinas eléctricas es, generalmente, una clase superior a la Normal (sufijo C3).

Cuando se usen tipos de rodamientos distintos de los rígidos de bolas en aplicaciones de alta velocidad (con velocidades del 70% o más respecto de la velocidad de referencia del rodamiento), se deberá seleccionar un juego C3. También se deberá usar un juego C3 cuando la diferencia de temperatura entre los aros interior y exterior sea superior a 10 °C (20 °F). También pueden ser necesarios juegos mayores cuando se requiera un ajuste de interferencia en ambos aros del rodamiento (normalmente en los rodamientos de rodillos cilíndricos).

El nivel de ruido del rodamiento aumenta a medida que aumenta el juego radial interno. Por ello, los juegos deberán seleccionarse cuidadosamente.

Si una aplicación está diseñada para un rodamiento con juego C3, no use un rodamiento con juego Normal. Los rodamientos con juego Normal no tienen marcado el juego en el aro exterior.

Las tablas de juego interno de los rodamientos se pueden encontrar en el *Catálogo de rodamientos SKF* o en línea, en skf.com/bearings.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Ejemplo de cálculo

Precarga correcta

Al seleccionar la fuerza de precarga de un sistema de rodamientos, se debe recordar que la rigidez aumenta ligeramente cuando la precarga excede de un valor óptimo determinado, y que la fricción y el calor resultantes reducirán significativamente la vida útil del rodamiento. El **diagrama 1** indica la relación entre la vida útil del rodamiento y la precarga o el juego. En las máquinas eléctricas, la disipación del calor del rotor o en las bobinas del estátor afectará en gran medida al juego del rodamiento o a la precarga. Debido al riesgo que supone una precarga excesiva para la confiabilidad del funcionamiento de una disposición de rodamientos y dada la complejidad de los cálculos que normalmente se necesitan para determinar la fuerza de precarga adecuada, se aconseja comunicarse con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF para pedir asistencia.

Jaulas

Los rodamientos están disponibles con una variedad de jaulas y materiales de jaulas. Cada una es adecuada para distintas aplicaciones y condiciones de funcionamiento. En el análisis de los tipos de rodamientos, se ofrece información sobre algunos tipos de jaulas y materiales (*Catálogo de rodamientos SKF*, **página 26**). Se puede encontrar más información sobre las jaulas y sus materiales en el *Catálogo de rodamientos SKF*, **página 37**.

Ejemplo de cálculo

Servomotor eléctrico

Selección de rodamientos para un servomotor con transmisión por engranajes para montaje horizontal ($\rightarrow$ **fig. 2**). La vida útil mínima requerida del rodamiento es de 30 000 h. El diámetro del agujero del rodamiento tiene que medir 25 mm en el lado de accionamiento y 20 mm en el lado opuesto al accionamiento. Se requiere un mínimo mantenimiento, ya que el ambiente contiene partículas de polvo procedentes de un freno montado cerca del rodamiento en el lado opuesto al accionamiento. Por lo tanto, se deberán seleccionar rodamientos con un sello integral muy eficaz.

Use las herramientas de cálculo en línea, en skf.com o las ecuaciones del *Catálogo de rodamientos SKF*, **página 64 ff**.

El programa calculará la vida nominal básica según la norma ISO, L_{10h} , y la vida nominal SKF L_{10mh} . La vida nominal SKF tiene en cuenta las cargas límite de fatiga, las condiciones de lubricación y los niveles de contaminación. Dado que los rodamientos sellados están engrasados de por vida, asegúrese de comprobar que la vida útil de la grasa de los rodamientos es igual o superior a la vida requerida de los rodamientos en el motor. Tenga en cuenta que la vida útil del motor suele depender de la vida útil del lubricante de los rodamientos engrasados de por vida de los motores eléctricos.

Diagrama 1

Relación entre la vida útil del rodamiento y la precarga o el juego

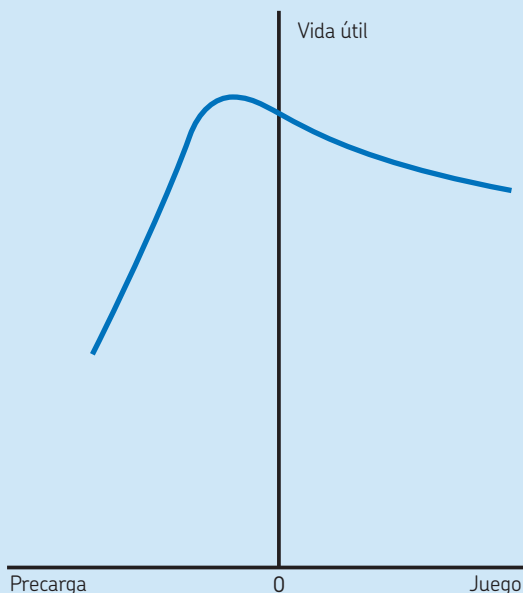
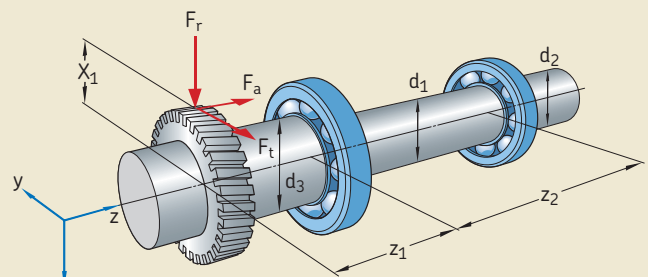


Fig. 2



$x_1 = 24 \text{ mm}$	$d_1 = 25 \text{ mm}$
$z_1 = 55 \text{ mm}$	$d_2 = 20 \text{ mm}$
$z_2 = 230 \text{ mm}$	$d_3 = 30 \text{ mm}$

Selección de rodamientos

El sistema de rodamientos más común para los motores eléctricos emplea dos rodamientos rígidos de bolas (→ capítulo 2, página 39). Uno de los rodamientos está situado para fijar el rotor axialmente y soportar la carga axial. El rodamiento libre soporta la elongación térmica del eje con relación al soporte. En este ejemplo, el rodamiento del lado de accionamiento fija el eje. Suponiendo que existe una diferencia de temperatura entre los aros interior y exterior del rodamiento producida por el calor generado en el rotor, seleccione un juego del rodamiento superior al Normal, C3.

Al seleccionar el lubricante para un rodamiento sellado, lo primero que se debe hacer es verificar si será adecuada la grasa estándar SKF. Esta grasa tiene una viscosidad de 70 mm²/s a 40 °C (100 °F) y un rango de temperaturas de -30 a +110 °C (de -20 a +230 °F). Consulte las temperaturas de funcionamiento seguras en la sección *Rango de temperaturas: el concepto del semáforo de SKF*, capítulo 5, página 75. Para conseguir un sello eficaz, se deberán seleccionar rodamientos con un sello de contacto en ambos lados.

Cálculos de vida

Use el cálculo de vida nominal SKF para seleccionar los rodamientos adecuados para la aplicación. Al calcular la vida de los rodamientos sellados, el factor de contaminación η_c se puede establecer, generalmente, en 0,8. Nota: En este cálculo, se deberán usar los valores para los rodamientos con juego Normal, puesto que el juego C3 ya soporta la reducción del juego derivada de la diferencia de temperatura.

La vida requerida es de 30 000 h.

Vida nominal SKF

Los cálculos se pueden realizar mediante las herramientas de cálculo en línea, en skf.com o las ecuaciones del *Catálogo de rodamientos SKF*, página 64 ff. Los resultados se pueden encontrar en las tablas 2 y 3 en la página 19.

Para el lado de accionamiento, la vida nominal SKF de 25 200 h de un rodamiento SKF Explorer 6205-2RSH/C3 es insuficiente. Por ello, se ha seleccionado un rodamiento SKF Explorer 6305-2RS1/C3, con una vida nominal SKF de 236 600 h.

Para el lado opuesto al accionamiento, la vida nominal SKF de 128 900 h de un rodamiento SKF Explorer 6204-2RSH/C3 es más que suficiente.

Datos conocidos				
Fuerzas del engranaje				
carga radial	F_r	kN	dinámica	estática
carga tangencial	F_t	kN	0,50	2,20
carga axial	F_a	kN	1,25	5,45
			0,55	2,40
Velocidad	n	r. p. m.	3 000	
Temperatura de funcionamiento	t	°C (°F)	80 (175)	
Cálculo de la carga del rodamiento				
Rodamiento del lado de accionamiento				
carga radial	F_r	kN	dinámica	estática
carga axial	F_a	kN	1,65	7,19
			0	0
Rodamiento del lado opuesto al accionamiento				
carga radial	F_r	kN	0,31	1,35
carga axial	F_a	kN	0,55	2,40

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Ejemplo de cálculo

Vida útil de la grasa

Los cálculos de vida útil de la grasa se han realizado de acuerdo con el método descrito en la sección del **capítulo 5** titulada *Vida útil de la grasa en rodamientos tapados* en la **página 86**. Los cálculos de vida útil de la grasa se pueden hacer también con las herramientas de cálculo disponibles en línea, en skf.com.

Rodamiento del lado de accionamiento: 6305-2RS1/C3. Se han determinado los siguientes valores:

- A partir del **diagrama 5a, capítulo 5, página 87**, la vida útil de la grasa para unas condiciones de carga $C/P = 20$ o $P = 0,05 C$. Con un factor de rendimiento de la grasa $GPF = 1$, una temperatura de funcionamiento $t = 80\text{ °C}$ (175 °F) y un valor $n \times d_m$ de 130 500, se obtiene un valor de vida útil de la grasa de 24 500 h.
- A partir de la **tabla 6, capítulo 5, página 86**, el factor de ajuste para cargas mayores. Con $C/P = 14,18$, se obtiene un factor de ajuste de 0,83.

Por lo tanto, la vida útil de la grasa será de $24\,500 \times 0,83 \approx 20\,300$ h.

Rodamiento del lado opuesto al accionamiento: 6204-2RSH/C3. Se han determinado los siguientes valores:

- A partir del **diagrama 5a, capítulo 5, página 87**, la vida útil de la grasa para unas condiciones de carga $C/P = 20$ o $P = 0,05 C$. Con $GPF = 1$, una temperatura de funcionamiento $t = 80\text{ °C}$ (175 °F) y un valor $n \times d_m$ de 100 500, se obtiene un valor de vida útil de la grasa de 29 000 h.
- A partir de la **tabla 6, capítulo 5, página 86**, el factor de ajuste para cargas mayores. Con $C/P = 13,37$, se obtiene un factor de ajuste de 0,80.

Por lo tanto, la vida útil de la grasa será de $29\,000 \times 0,80 \approx 23\,200$ h.

Otras consideraciones

Los cálculos dan como resultado una vida nominal SKF más que adecuada para ambos rodamientos. Sin embargo, la vida útil de la grasa es el factor limitante.

Por lo tanto, se pueden hacer cálculos alternativos para los mismos rodamientos con grasa formulada específicamente para aplicaciones como motores eléctricos, con el sufijo de designación GJN o WT.

Los resultados de estos cálculos se pueden encontrar en las **tablas 2 y 3** en la **página 19**.

Tanto los rodamientos SKF Explorer con grasa GJN como con grasa WT cumplen los requisitos.

Conclusión

El uso de rodamientos sellados con relleno de grasa estándar en esta aplicación no ofrece las 30 000 h de vida nominal requeridas debido a que la vida útil de la grasa es insuficiente. Al usar los mismos rodamientos, pero con grasas específicas para motores eléctricos, con el sufijo de designación GJN o WT, se cumplen los requisitos.

El uso de rodamientos SKF Explorer ofrece otra posibilidad muy interesante: la reducción de tamaño. Se puede reducir el tamaño de ambos rodamientos. Los cálculos con:

- un rodamiento SKF Explorer 6205-2RSH/C3 en el lado de accionamiento
- un rodamiento SKF Explorer 6004-2RSH/C3 en el lado opuesto al accionamiento
- ambos rodamientos con un relleno de grasa específica para motores eléctricos, con el sufijo de designación GJN o WT

También cumplen los requisitos (→ resultados en la **tabla 3, página 19**).

Los rodamientos de las series 62 y 63 se usan normalmente en motores eléctricos. Sin embargo, según los cálculos anteriores, es evidente que, cuando los diseñadores de motores eléctricos quieren reducir el tamaño, pueden conseguirlo usando rodamientos SKF Explorer tapados, junto con una grasa apropiada. La reducción del tamaño puede suponer no solo un tamaño menor del motor, sino también un ahorro de material, ya que se puede reducir el ancho de las tapas del motor.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Ejemplo de cálculo

Tabla 2

Resultados del cálculo ¹⁾			Lado de accionamiento			Lado opuesto al accionamiento		
Rodamientos			6305- 2RS1/ C3	6305- 2RS1/ C3GJN	6305- 2RS1/ C3WT	6204- 2RSH/ C3	6204- 2RSH/ C3GJN	6204- 2RSH/ C3WT
Condiciones dinámicas								
Carga equivalente del rodamiento	P	kN	1,65	1,65	1,65	1,01	1,01	1,01
Capacidad de carga dinámica	C	kN	23,4	23,4	23,4	13,5	13,5	13,5
C/P			14,18	14,18	14,18	13,37	13,37	13,37
Vida nominal básica	L ₁₀	10 ⁶	2 850	2 850	2 850	2 390	2 390	2 390
Vida nominal básica	L _{10h}	h	15 800	15 800	15 800	13 300	13 300	13 300
Carga límite de fatiga	P _u	kN	0,49	0,49	0,49	0,28	0,28	0,28
Factor de contaminación	η _c		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
P _u /P × η _c			0,238	0,238	0,238	0,222	0,222	0,222
Diámetro medio del rodamiento	d _m	mm	43,5	43,5	43,5	33,5	33,5	33,5
n × d _m		mm/min	130 500	130 500	130 500	100 500	100 500	100 500
Viscosidad requerida	v ₁	mm ² /s	10,5	10,5	10,5	11,9	11,9	11,9
Viscosidad de la grasa a 80 °C	v	mm ² /s	12,9	21,7	15,8	12,9	21,7	15,8
Valor kappa	κ		1,23	2,07	1,51	1,08	1,82	1,32
Factor de modificación de la vida	a _{SKF}		14,9	40,5	22,8	9,71	27,1	15,0
Vida nominal SKF	L_{10mh}	h	236 600	641 400	361 100	128 900	359 200	198 500
Condiciones estáticas								
Carga equivalente del rodamiento	P ₀	kN	7,19	7,19	7,19	2,00	2,00	2,00
Capacidad de carga estática	C ₀	kN	11,6	11,6	11,6	6,55	6,55	6,55
Factor de seguridad estática	s₀		1,61	1,61	1,61	3,26	3,26	3,26
Lubricación²⁾								
Valor del diagrama	L _{10h}	h	24 500	49 000	78 000	29 000	58 000	92 000
Factor de ajuste de carga			0,83	0,83	0,83	0,80	0,80	0,80
Vida útil de la grasa	L_{10h}	h	20 300	40 600	64 700	23 200	46 400	73 600

¹⁾ Todos los cálculos se han realizado mediante las herramientas de cálculo disponibles en línea, en skf.com. No obstante, los valores de vida útil de la grasa se han tomado del **diagrama 5a** en la **página 87**. Los valores se han redondeado considerablemente.

²⁾ Consulte el **capítulo 5, diagrama 5a, página 87** y la **tabla 6, página 86**.

Tabla 3

Resultados del cálculo ¹⁾ : reducción de tamaño:			Lado de accionamiento			Lado opuesto al accionamiento		
Rodamientos			6205- 2RSH/ C3	6205- 2RSH/ C3GJN	6205- 2RSH/ C3WT	6004- 2RSH/ C3	6004- 2RSH/ C3GJN	6004- 2RSH/ C3WT
Condiciones dinámicas								
Carga equivalente del rodamiento	P	kN	1,65	1,65	1,65	0,951	0,951	0,951
Capacidad de carga dinámica	C	kN	14,80	14,80	14,80	9,95	9,95	9,95
C/P			8,97	8,97	8,97	10,46	10,46	10,46
Vida nominal básica	L ₁₀	10 ⁶	720	720	720	1 150	1 150	1 150
Vida nominal básica	L _{10h}	h	4 010	4 010	4 010	6 360	6 360	6 360
Carga límite de fatiga	P _u	kN	0,335	0,335	0,335	0,212	0,212	0,212
Factor de contaminación	η _c		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
P _u /P × η _c			0,162	0,162	0,162	0,178	0,178	0,178
Diámetro medio del rodamiento	d _m	mm	38,50	38,50	38,50	31	31	31
n × d _m		mm/min	115 500	115 500	115 500	93 000	93 000	93 000
Viscosidad requerida	v ₁	mm ² /s	11,1	11,1	11,1	12,4	12,4	12,4
Viscosidad de la grasa a 80 °C	v	mm ² /s	12,9	21,7	15,8	12,9	21,7	15,8
Valor kappa	κ		1,16	1,95	1,42	1,04	1,75	1,27
Factor de modificación de la vida	a _{SKF}		6,28	14,40	8,93	5,99	15,10	8,86
Vida nominal SKF	L_{10mh}	h	25 200	57 700	35 800	38 100	96 200	56 400
Condiciones estáticas								
Carga equivalente del rodamiento	P ₀	kN	7,19	7,19	7,19	2,00	2,00	2,00
Capacidad de carga estática	C ₀	kN	7,8	7,8	7,8	5,0	5,0	5,0
Factor de seguridad estática	s₀		1,08	1,08	1,08	2,50	2,50	2,50
Lubricación²⁾								
Valor del diagrama	L _{10h}	h	26 500	53 000	84 000	31 500	63 000	100 000
Factor de ajuste de carga			0,60	0,60	0,60	0,72	0,72	0,72
Vida útil de la grasa	L_{10h}	h	15 900	31 800	50 500	22 700	45 300	72 000

¹⁾ Todos los cálculos se han realizado mediante las herramientas de cálculo disponibles en línea, en skf.com. No obstante, los valores de vida útil de la grasa se han tomado del **diagrama 5a** en la **página 87**. Los valores se han redondeado considerablemente.

²⁾ Consulte el **capítulo 5, diagrama 5a, página 87** y la **tabla 6, página 86**.



Rodamientos rígidos de bolas

Los rodamientos rígidos de bolas se encuentran normalmente en las posiciones fija y libre en motores eléctricos pequeños o medianos, y en la posición fija de motores eléctricos y generadores medianos o grandes. El funcionamiento silencioso es una de las ventajas más importantes de los rodamientos rígidos de bolas con respecto a otros tipos de rodamientos. La amplia gama de modelos y su rentabilidad también contribuyen a hacer populares los rodamientos rígidos de bolas.

Hay muchas otras características que hacen que los rodamientos rígidos de bolas sean una opción habitual para motores eléctricos. Los rodamientos rígidos de bolas presentan baja fricción, y capacidad para funcionar a altas velocidades. Pueden soportar cargas radiales, axiales y combinadas, lo que los hace adecuados para su uso en las posiciones fija y libre del motor. Con los rodamientos rígidos de bolas libres se pueden usar muelles axiales

para reducir aún más los niveles de ruido y vibración.

Los rodamientos rígidos de bolas con sellos o placas de protección en ambos lados están engrasados de por vida y no requieren mantenimiento.

Características y beneficios

Las características y beneficios de los rodamientos rígidos de bolas SKF incluyen:

- baja fricción y sensibilidad reducida a la desalineación gracias a su geometría interna optimizada
- además del juego C3 recomendado para los rodamientos rígidos de bolas en los motores eléctricos, existen otras clases de juego disponibles

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos rígidos de bolas

- amplia gama de rodamientos engrasados de por vida, junto con una variedad de grasas de alto rendimiento, incluida una grasa SKF para funcionamiento ultrasilencioso y grasas especializadas SKF para aplicaciones específicas
- opciones de sellado de alta eficacia, que incluyen sellos de contacto, sellos de baja fricción y placas de protección
- Rodamientos rígidos de bolas SKF de funcionamiento silencioso, diseñados para reducir los niveles de ruido y vibración, especialmente en los generadores de turbinas eólicas

SKF dispone de rodamientos tapados para motores eléctricos de alto rendimiento, como los motores con variadores de frecuencia, que contienen una grasa para altas temperaturas especialmente formulada (sufijo de designación WT). Esta grasa altamente eficaz, basada en un espesante de poliurea con un aceite base de éster, se puede usar a temperaturas de -40 a $+160$ °C (de -40 a $+320$ °F). Para obtener más información sobre grasas (o lubricación), consulte el **capítulo 5, página 73**.

Los rodamientos de motores eléctricos y generadores han de funcionar de manera confiable en condiciones muy diversas. Por ello, SKF ofrece los siguientes rodamientos rígidos de bolas con distintas características de rendimiento:

- Rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer para un rendimiento excelente
- Rodamientos rígidos de bolas SKF energéticamente eficientes, que reducen la fricción en el rodamiento y prolongan su rendimiento
- mayor capacidad de carga dinámica
- reducción en los niveles de ruido y vibración
- menor calor por fricción
- una vida útil del rodamiento mucho más prolongada

Rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer

En respuesta a los requisitos de rendimiento cada vez más exigentes de la maquinaria moderna, SKF ha creado la clase de rodamientos SKF Explorer.

Los rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer han logrado esta importante mejora de su rendimiento gracias a la optimización de su geometría interna y del acabado de todas sus superficies de contacto, el rediseño de su jaula, la combinación de un tipo de acero extremadamente limpio y homogéneo con un tratamiento térmico exclusivo, y la mejora de la calidad y consistencia de las bolas.

Los rodamientos rígidos de bolas de esta clase de rendimiento ofrecen un rendimiento superior, especialmente en aplicaciones como motores eléctricos, vehículos de dos ruedas y transmisiones. Estas mejoras aportan los siguientes beneficios:



1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos rígidos de bolas

Rodamientos rígidos de bolas SKF energéticamente eficientes (E2)

Con el fin de satisfacer la siempre creciente demanda de reducir la fricción y el consumo energético, SKF ha creado los rodamientos de la clase de rendimiento SKF energéticamente eficientes (E2).

Los rodamientos rígidos de bolas de esta clase de rendimiento se caracterizan por un momento de fricción en el rodamiento que es, como mínimo, un 30% inferior al de los rodamientos SKF Explorer del mismo tamaño cuando funcionan en las siguientes condiciones:

- velocidad $n > 1\,000$ r. p. m
- carga $P \leq 0,125 C$

Además de esta reducción de la fricción, los rodamientos rígidos de bolas SKF E2 han demostrado un funcionamiento con menor temperatura que los rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer comparables. Las pruebas han demostrado que los rodamientos rígidos de bolas SKF E2 duran hasta el doble que los rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer tapados comparables.

Para conseguir estas mejoras, los rodamientos SKF E2 incorporan un sello y grasa

especial de baja fricción, una optimización de la geometría interna, acabado superficial y jaula.

Este diseño permite a los rodamientos rígidos de bolas SKF E2 funcionar a velocidades significativamente mayores que los rodamientos rígidos de bolas SKF Explorer tapados de tamaño comparable.

Los rodamientos rígidos de bolas SKF E2 están disponibles en las series de dimensiones 60, 62 y 63.

Están equipados con una placa de protección o un sello a ambos lados para los tamaños específicos y presentan de forma estándar un juego radial interno C3.

Las dimensiones principales de los rodamientos rígidos de bolas SKF E2 cumplen la norma ISO 15, por lo que son intercambiables con los rodamientos rígidos de bolas del mismo tamaño y serie de dimensiones.

Para obtener más detalles, comuníquese con su representante SKF local o con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.



1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos rígidos de bolas

Rodamientos rígidos de bolas SKF de funcionamiento silencioso, diseñados y fabricados especialmente para generadores de turbinas eólicas

Los rodamientos rígidos de bolas SKF de funcionamiento silencioso han sido diseñados para aplicaciones con estrictos requisitos de ruido, como los generadores de turbinas eólicas.

Estos rodamientos, menos sensibles a las condiciones de funcionamiento variables que se encuentran en las turbinas eólicas, ofrecen un rendimiento constante y un alto grado de confiabilidad.

La especificación de los rodamientos incluye jaulas de latón y de acero. Los diseños de estas jaulas facilitan la relubricación, al hacer más sencilla la introducción de más grasa en el espacio libre del rodamiento. Su diseño maximiza además los efectos del lubricante. Gracias a ello, se puede duplicar la duración de los intervalos de relubricación y aumenta la vida útil del rodamiento.

Los rodamientos SKF de funcionamiento silencioso son intercambiables con los rodamientos rígidos de bolas existentes, por lo que se pueden utilizar sin modificar el eje del rotor ni la placa de protección del extremo.

Los rodamientos rígidos de bolas SKF de funcionamiento silencioso se identifican mediante el sufijo de designación VQ658. La gama incluye los tamaños de rodamientos utilizados habitualmente en los generadores de turbinas eólicas.

Para obtener más información, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.





Rodamientos de rodillos cilíndricos

Los rodamientos de rodillos cilíndricos se usan normalmente en motores eléctricos medianos o grandes con transmisión por correa o engranajes, sometidos a cargas radiales pesadas. Estos rodamientos se suelen usar como rodamientos libres en la posición del lado de accionamiento en combinación con un rodamiento rígido de bolas en la posición fija del lado opuesto al accionamiento. Los rodamientos de rodillos cilíndricos de diseño NU y N (→ **fig. 3**) se utilizan habitualmente en

motores eléctricos y generadores. Estos rodamientos llevan dos pestañas integrales en uno de los aros y ninguna en el otro. El aro con pestañas guía el conjunto de rodillos y jaula, mientras que el aro sin pestañas soporta el desplazamiento axial del eje con relación al soporte. Otros tipos de rodamientos de rodillos cilíndricos, como los diseños NJ y NUP (→ **fig. 4**), llevan dos pestañas integrales en el aro exterior y una o dos pestañas en el aro interior, por lo que pueden soportar cargas axiales ligeras en una o ambas direcciones. Estos diseños se usan habitualmente en motores vibratorios.

Fig. 3

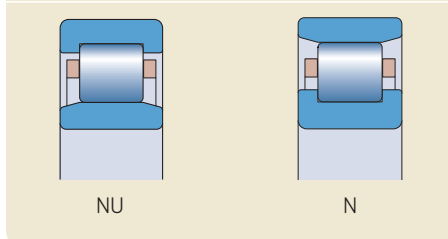
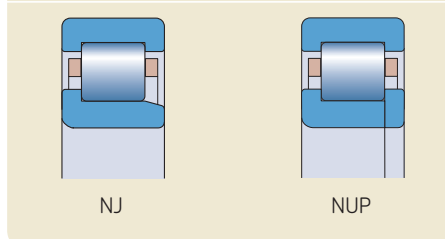


Fig. 4



1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos de rodillos cilíndricos

Características y beneficios

Los rodamientos de rodillos cilíndricos SKF tienen una gran capacidad de carga radial, así como una capacidad de velocidad relativamente alta. Los rodamientos de rodillos cilíndricos son desmontables; el aro de doble pestaña con el conjunto de rodillos y jaula se puede separar del otro aro, lo que simplifica el montaje y permite un ajuste apretado del eje y los soportes en ambos aros.

Opciones

El número de configuraciones de rodamientos de rodillos cilíndricos es grande en comparación con otros tipos de rodamientos. Las diferentes configuraciones de pestañas (diseños N, NU, NJ y NUP) hacen que los rodamientos sean adecuados para muchas aplicaciones. Los rodamientos de rodillos cilíndricos están disponibles con una variedad de jaulas diferentes. Los rodamientos pequeños llevan una jaula de poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio como estándar (sufijo de designación P). Las jaulas de baja fricción son elásticas y presentan buenas propiedades de deslizamiento. Los rodamientos medianos tienen una jaula de acero de tipo ventana como estándar (sufijo de designación J). Estas jaulas soportan altas temperaturas y resisten niveles de vibración moderados. Los rodamientos grandes tienen una jaula de latón guiada por rodillos como estándar (sufijo de designación M). Estas jaulas pueden soportar altas velocidades, así como altos niveles de vibración y aceleración. Los rodamientos de rodillos cilíndricos con jaulas de latón guiadas por el reborde (sufijos de designación MA, MB y ML) deben lubricarse con aceite. Para aplicaciones a alta temperatura o aplicaciones que requieren un alto grado de resistencia química, existen jaulas de polietereftercetona (polyetheretherketone, PEEK) reforzada con fibra de vidrio centradas en los rodillos (sufijo de designación PH).

Juego interno

Los rodamientos de rodillos cilíndricos admiten cargas radiales más pesadas que los rodamientos de bolas. Por ello, requieren un ajuste del eje y del soporte más apretado y tienen unos valores de juego interno inicial más altos. Para compensar la consiguiente reducción del juego tras el montaje, se suele preferir el juego Normal (CN) al C3. Con un juego Normal y un ajuste normal, el alcance de la zona cargada debe ser adecuado para reducir el ruido y el riesgo de adherencias. Para reducir aún más los niveles de ruido, SKF puede suministrar rodamientos con juego C2H (la gama superior de C2).

Rodamientos de rodillos cilíndricos SKF Explorer

Los avances en las áreas de producción de acero, tratamiento térmico, fabricación y diseño han aumentado considerablemente el rendimiento de los rodamientos de rodillos cilíndricos SKF. Los rodamientos de rodillos cilíndricos SKF Explorer ofrecen:

- mayor capacidad de carga
- diseños de máquina más compactos usando rodamientos más pequeños
- mayor vida útil y confiabilidad de las máquinas existentes
- funcionamiento más silencioso



Rodamientos INSOCOAT

SKF suministra rodamientos aislados eléctricamente, denominados INSOCOAT. Los rodamientos INSOCOAT están diseñados para evitar el paso de corriente a través del rodamiento. Los rodamientos son una solución muy rentable en comparación con otros métodos de aislamiento. Al integrar en el rodamiento las propiedades aislantes, los rodamientos INSOCOAT permiten mejorar la confiabilidad y aumentar el tiempo productivo de la máquina eliminando prácticamente el problema de la erosión eléctrica.

Los rodamientos INSOCOAT son normalmente:

- rodamientos rígidos de una hilera de bolas
- rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos

El recubrimiento del aro exterior se puede aplicar a los rodamientos con diámetro exterior >80 mm. El recubrimiento del aro interior se puede aplicar a los rodamientos con diámetro del agujero >70 mm.

Características del diseño

Un rodamiento INSOCOAT es un rodamiento estándar cuyas superficies exteriores del aro interior (agujero y caras laterales, identificado por el sufijo de designación VL2071) o del aro exterior (diámetro exterior y caras laterales, identificado por el sufijo de designación VL0241) tienen un recubrimiento de óxido de aluminio mediante pulverización de plasma. El recubrimiento se sella con una resina para proteger el rodamiento de los efectos conductores del agua y la humedad.

El recubrimiento básico puede soportar voltajes de hasta 1 000 V CC. No obstante, se pueden suministrar, a pedido, versiones de recubrimientos que resistan voltajes mayores (→ tabla 4).

SKF ejecuta pruebas al 100% con un voltaje de 1 000 V CC. Las pruebas de laboratorio demuestran que la disrupción eléctrica se produce por encima de 3 000 V CC. Los rodamientos INSOCOAT tienen una resistencia óhmica mínima de 50 MΩ.

Montaje y mantenimiento

Los rodamientos INSOCOAT deben manipularse del mismo modo que los rodamientos estándares en términos de montaje, ajustes, lubricación y mantenimiento.

Cuando se utilice un calentador de inducción, la capa INSOCOAT no se deberá dañar por la vibración del calentador. Para los rodamientos con aro interior recubierto (sufijo de designación VL2071), utilice un casquillo de protección o un bloque de apoyo adicional de protección. En aquellos casos en que se utilizan muelles para aplicar una precarga o tuercas de fijación para la fijación axial, SKF recomienda insertar un anillo distanciador de acero entre el rodamiento y el dispositivo de fijación o precarga (→ fig. 5).

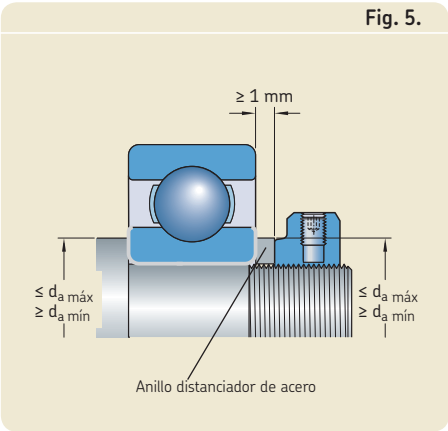


Tabla 4

Especificaciones INSOCOAT		Sin disrupción eléctrica hasta el voltaje de funcionamiento	Resistencia eléctrica
Sufijo de designación de especificación SKF		[V] CC	mín. [MΩ]
Aro exterior recubierto	Aro interior recubierto		
VL0241	VL2071	1 000	50
VL0244	VL2074	2 000	150
VL0246	VL2076	3 000	150



Rodamientos híbridos

Los rodamientos híbridos ofrecen una nueva mejora en las propiedades de aislamiento eléctrico, especialmente para aplicaciones que utilizan un convertidor de alta frecuencia.

Características del diseño

Los aros de los rodamientos híbridos están hechos de acero para rodamientos y, los elementos rodantes, de nitruro de silicio para rodamientos (Si_3N_4). Debido a que el material cerámico de nitruro de silicio es un excelente aislante eléctrico, los rodamientos híbridos se pueden utilizar para aislar eficazmente el soporte del eje tanto en motores de CA como de CC, así como en generadores (→ capítulo 7, *Erosión eléctrica* a partir de la página 116).

Además de ser un excelente aislante, los rodamientos híbridos pueden funcionar a mayores velocidades y ofrecen una vida útil más larga en las mismas condiciones de funcionamiento que los rodamientos del mismo tamaño fabricados totalmente de acero. Los rodamientos híbridos funcionan asimismo extremadamente bien en condiciones vibratorias u oscilantes.

Los tipos de rodamientos híbridos SKF utilizados principalmente en motores eléctricos y generadores incluyen:

- rodamientos rígidos de una hilera de bolas
- rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos

El rendimiento de los rodamientos no solo está determinado por la carga o las velocidades nominales. Existen otros factores que afectan a su rendimiento. Algunos de los principales factores que mejoran el rendimiento de los rodamientos híbridos SKF en comparación con los rodamientos totalmente de acero del mismo tamaño son:

- **Propiedades aislantes**

Los elementos rodantes de nitruro de silicio no conductores protegen el rodamiento del paso de la corriente eléctrica, por lo que pueden prolongar la vida útil del rodamiento en aquellas aplicaciones en las cuales las corrientes eléctricas perjudiciales reducirían de otro modo la vida útil del rodamiento.

- **Menor densidad**

La densidad de un elemento rodante de nitruro de silicio para rodamientos es un 60% menor que la de un elemento rodante del mismo tamaño de acero para rodamientos. Un menor peso significa menor inercia, y eso se traduce en un rendimiento superior durante arranques y paradas rápidos, así como una mayor capacidad de velocidad.

- **Menor fricción**

La menor densidad de los elementos rodantes de nitruro de silicio, junto con su menor coeficiente de fricción, reduce de manera significativa la temperatura del rodamiento a altas velocidades. Un funcionamiento a menor temperatura prolonga la vida útil del rodamiento y del lubricante.

- **Gran dureza y elevado módulo de elasticidad**

El alto grado de dureza de los elementos rodantes de nitruro de silicio proporciona una alta resistencia al desgaste, mayor rigidez del rodamiento y una vida útil del rodamiento más larga en entornos contaminados.

Beneficios del diseño

Resistencia a la vibrocorrosión

Si un rodamiento fijo está sometido a vibraciones, existe el riesgo de vibrocorrosión. La vibrocorrosión es la formación de depresiones poco profundas en los caminos de rodadura que acaban produciendo descascarillado y el fallo prematuro del rodamiento. En aquellos casos en que los elementos rodantes de acero han sido sustituidos por elementos rodantes cerámicos, los rodamientos han resultado mucho menos susceptibles a la vibrocorrosión.

Reducción del riesgo de adherencias entre las superficies de nitruro de silicio y de acero

Aun en caso de lubricación inadecuada, existe un riesgo reducido de adherencias entre las superficies de nitruro de silicio y de acero. Esto permite a los rodamientos híbridos durar mucho más tiempo en aplicaciones con altas velocidades y aceleraciones rápidas, o en aplicaciones con una película de aceite hidrodinámica insuficiente (es decir, $\kappa < 1$). Para los rodamientos híbridos, es habitual aplicar $\kappa = 1$ para el cálculo de la vida útil del rodamiento en condiciones en las cuales $\kappa < 1$.

Rueda más, dura más

Si combinamos la menor densidad del nitruro de silicio con su menor coeficiente de fricción, alta dureza y el hecho de que el nitruro de

silicio no se adhiere a los caminos de rodadura en condiciones de lubricación deficiente, el resultado es un rodamiento que rueda más y dura más incluso en las condiciones de funcionamiento más difíciles.

Bajo coeficiente de dilatación térmica

Los elementos rodantes de nitruro de silicio presentan un menor coeficiente de dilatación térmica que los elementos rodantes del mismo tamaño de acero para rodamientos. Esto implica una menor sensibilidad a los gradientes de temperatura dentro del rodamiento y un control más preciso de la precarga o el juego.

Capacidad de velocidad

En general, los rodamientos híbridos presentan una mayor capacidad de velocidad que los rodamientos totalmente de acero del mismo tamaño, aunque en algunos casos la versión de la jaula puede limitar la velocidad admisible.

Mayor vida útil de la grasa

Los rodamientos híbridos generan menos calor por fricción que los rodamientos totalmente de acero del mismo tamaño, sobre todo a alta velocidad. Las temperaturas de funcionamiento del rodamiento más bajas tienen un efecto beneficioso en la vida útil del rodamiento y en los intervalos de relubricación. Según la aplicación y las condiciones de funcionamiento, la grasa puede durar, al menos, 2 veces más.

Resistencia al desgaste por contaminación de partículas sólidas

Cuando los elementos rodantes de acero ruedan en forma excesiva sobre contaminantes sólidos, se forman indentaciones con bordes levantados, debido a la deformación plástica, en los caminos de rodadura y en los elementos rodantes. Al continuar rodando en forma excesiva los elementos rodantes sobre los bordes levantados, el aumento de las tensiones locales producirá descascarillado, que dará lugar al fallo prematuro del rodamiento.

Sin embargo, los rodamientos híbridos reaccionan de manera distinta al rodamiento excesivo en el área dañada. Como el nitruro de silicio es tan duro, los bordes levantados de la indentación se aplanan con cada paso de los elementos rodantes hasta que el camino de rodadura vuelve a quedar liso. Esto reduce las tensiones locales y la posibilidad de descascarillado, lo que permite prolongar significativamente la vida útil del rodamiento.

Para obtener más información, comuníquese con su representante SKF local o con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.



Rodamientos de bolas de contacto angular

Los rodamientos de bolas de contacto angular se usan principalmente como rodamientos fijos en motores eléctricos verticales cuando los rodamientos rígidos de bolas no pueden soportar cargas axiales pesadas. Los rodamientos de bolas de contacto angular están disponibles en diseños de una o dos hileras, y tienen una gran capacidad de carga axial, así como capacidad de funcionamiento a alta velocidad. Para aplicaciones de velocidades muy altas, los rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular están disponibles también con bolas cerámicas como rodamientos híbridos (sufijo HC5).

Un rodamiento de dos hileras de bolas de contacto angular o un par de rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular con emparejamiento universal también pueden soportar mayores cargas radiales que los rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular.

Rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular

Según su tamaño y serie, los rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular SKF están equipados, como estándar, con una de las siguientes jaulas:

- una jaula de poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio, moldeada por inyección, de tipo ventana, centrada respecto de las bolas (sufijo de designación P)

- una jaula de polietereftercetona (PEEK) reforzada con fibra de vidrio, moldeada por inyección, de tipo ventana, centrada respecto de las bolas (sufijo de designación PH)
- una jaula de latón prensado de tipo ventana, centrada respecto de las bolas (sufijo de designación Y)
- una jaula mecanizada de latón de tipo ventana, centrada respecto de las bolas (sufijo de designación M)

En los tamaños más populares, SKF fabrica, como estándar, rodamientos con emparejamiento universal, que proporcionan un juego o precarga muy controlados cuando los rodamientos se montan espalda con espalda o cara a cara (→ *Catálogo de rodamientos SKF*, para el juego, **tabla 5, página 488**, y para la precarga, **tabla 6, página 489**).

Rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular SKF sellados

Existe una gama de rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular sellados y engrasados de por vida, y equipados con sellos no rozantes RZ. Están disponibles, a pedido, versiones con sellos de contacto RS. Los sellos no rozantes RZ generan menos fricción y calor por fricción que los sellos de contacto RS. Esto favorece normalmente una vida útil más larga de la grasa y una reducción de las fugas de grasa.

Para conocer casos de referencia o información detallada, comuníquese con su representante SKF local.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos de bolas de contacto angular

Rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular de superprecisión

Estos rodamientos, fabricados en distintos diseños y clases de alta precisión, están disponibles con jaula de resina fenólica reforzada con fibra de algodón o polietereftercetona (PEEK) reforzada con fibra de vidrio y bolas de acero o de cerámica. Se pueden seleccionar diversos ángulos de contacto y niveles de precarga, y también están disponibles como rodamientos sellados. Estos rodamientos se usan normalmente en aplicaciones de alta velocidad, como los motores de husillo.

Para obtener más información, visite skf.com/bearings o comuníquese con su representante SKF local.

Rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular

Con o sin sellos o placas de protección, los rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular se fabrican tanto con juego axial interno Normal como C3. Según la serie y el tamaño, los rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular SKF se suministran, como estándar, con dos de cada una de las siguientes jaulas:

- una jaula de poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio de montaje a presión y moldeada por inyección, centrada respecto de las bolas (sufijo de designación TN9)
- una jaula de chapa de acero prensado en forma de corona de montaje a presión, centrada respecto de las bolas (sin sufijo de designación o con sufijo de designación J1)

Rodamientos de bolas de contacto angular SKF Explorer: diseñados para un rodaje más rápido, frío, suave y duradero

Los rodamientos de la clase de rendimiento superior SKF Explorer combinan innovaciones de materiales y diseño que permiten hasta triplicar la vida útil del rodamiento.

Se caracterizan por:

- acero extremadamente limpio y proceso de tratamiento térmico exclusivo
- capacidad para cargas elevadas y altas velocidades
- alto nivel de precisión de giro
- bajos niveles de fricción, vibración y ruido

Los rodamientos de bolas de contacto angular SKF Explorer no son una ampliación de la gama, sino que sustituyen a las versiones finales de los tipos anteriores.

Rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular SKF energéticamente eficientes (E2)

Los rodamientos de bolas de contacto angular de esta clase de rendimiento se caracterizan por un momento de fricción en el rodamiento que es, como mínimo, un 30% inferior al de los rodamientos SKF estándares del mismo tamaño. Debido a la reducción del momento de fricción, los rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular SKF E2 funcionan a una temperatura de hasta 30 °C (54 °F) menos que los rodamientos estándares. Esto aumenta la vida útil de la grasa y prolonga potencialmente la vida útil del rodamiento. Esta gran reducción del momento de fricción en los rodamientos se ha logrado mediante la optimización de su geometría interna y la aplicación de una nueva grasa de baja fricción. Los rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular SKF E2 están disponibles en las series de dimensiones 32 y 33 (→ *Catálogo de rodamientos SKF, matriz 2, página 501*). Los rodamientos están provistos de una placa de protección a ambos lados y van lubricados de por vida. Son intercambiables con los rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular SKF Explorer en términos de dimensiones principales, carga y velocidad nominal.





Rodamientos de rodillos a rótula

Los rodamientos de rodillos a rótula se usan habitualmente en grandes motores eléctricos y generadores lubricados con aceite (→ **capítulo 8, Máquinas eléctricas grandes y muy grandes** en la **página 131**). Los rodamientos de rodillos a rótula se encuentran también en grandes motores y generadores que utilizan soportes de pie.

Características y beneficios

Los rodamientos de rodillos a rótula SKF tienen una capacidad de carga muy alta. Incorporan características especiales, como los rodillos autoguiados (exclusivamente en rodamientos de rodillos a rótula SKF, realizados, entre otras cosas, a través de un anillo guía flotante que guía los rodillos no cargados para que entren en la zona de carga en la posición óptima), que permiten a los rodamientos generar menos calor durante el funciona-

miento. Los rodamientos son autoalineables y, por lo tanto, son insensibles a la desalineación. Los rodamientos de rodillos a rótula SKF están disponibles con agujero cilíndrico o cónico, y se pueden montar en soportes estándares y en soportes especiales diseñados para grandes motores y generadores (→ **capítulo 8, Unidades de soportes con pestaña equipados con rodamientos SKF** en la **página 131**).

SKF cuenta también con un surtido estándar de rodamientos de rodillos a rótula sellados que pueden simplificar considerablemente la disposición de sellado en la máquina eléctrica.

Juego interno

Los rodamientos de rodillos a rótula soportan cargas más pesadas que los rodamientos de bolas. Por ello, requieren un ajuste del eje más apretado y tienen unos valores de juego interno inicial más altos. Para compensar la consiguiente reducción del juego tras el mon-

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos de rodillos a rótula

taje, se suele preferir el juego Normal (CN) al juego C3 para los rodamientos de rodillos a rótula utilizados en máquinas eléctricas, a menos que existan requisitos especiales de ajuste del eje y del soporte. Con un juego Normal y un ajuste normal, el alcance de la zona cargada debe ser adecuado para reducir el ruido y el riesgo de adherencias.

Rodamientos de rodillos a rótula SKF Explorer

En respuesta a los requisitos de rendimiento cada vez más exigentes de la maquinaria moderna, SKF ha creado la clase de rodamientos SKF Explorer. Los rodamientos de rodillos a rótula SKF Explorer han logrado esta importante mejora de su rendimiento gracias a la optimización de su geometría interna y del acabado de todas sus superficies de contacto, la combinación de un tipo de acero extremadamente limpio y homogéneo con un tratamiento térmico exclusivo y la mejora de la jaula, el perfil de los rodillos y la geometría de los caminos de rodadura. Estas mejoras aportan los siguientes beneficios:

- mayor capacidad de carga dinámica que los rodamientos de diseño convencional
- mejora de la resistencia al desgaste
- reducción en los niveles de ruido y vibración
- menor calor por fricción
- vida útil del rodamiento mucho más larga

SKF trabaja constantemente para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los rodamientos SKF Explorer. El último avance consiste en un tratamiento del acero mejorado que proporciona una resistencia al desgaste aún mayor. Esta característica es especialmente favorable en condiciones de funcionamiento difíciles con contaminación o lubricación deficiente.

Rodamientos SKF energéticamente eficientes (E2)

Con el fin de satisfacer la siempre creciente demanda de reducir la fricción y el consumo energético, SKF ha creado los rodamientos de la clase de rendimiento SKF energéticamente eficientes (E2). Los rodamientos de rodillos a rótula de esta clase de rendimiento se caracterizan por un momento de fricción en el rodamiento que es, como mínimo, un 30% inferior al de los rodamientos SKF Explorer del mismo tamaño. La reducción de las temperaturas de funcionamiento mejora las condiciones de lubricación y permite unos intervalos de lubricación prolongados o mayores velocidades.

Las características de rendimiento mejoradas requieren las siguientes condiciones:

- velocidad superior a la velocidad mínima recomendada de 500 r. p. m.
- temperatura de funcionamiento $\leq 110^{\circ}\text{C}$ (230°F)
- carga $P \leq 0,067 C$
- lubricación y relubricación con grasa SKF LESA 2 únicamente (→ *Catálogo de rodamientos SKF, tabla 2, página 889*)

Para cargas $P > 0,067 C$, son más convenientes los rodamientos SKF Explorer.



Rodamientos de rodillos toroidales CARB

El rodamiento de rodillos toroidales CARB puede soportar cargas radiales muy pesadas. Está concebido exclusivamente como rodamiento libre y, como tal, constituye una elección excelente por su combinación de propiedades de autoalineación y alineación axial. Los rodillos de los rodamientos de rodillos toroidales CARB son autoguiados, y siempre adoptan la posición en que la carga se distribuye uniformemente en toda la longitud del rodillo, independientemente de si el aro interior se ha desplazado axialmente y/o se ha desalineado con respecto al aro exterior. El rodamiento de rodillos toroidales CARB se adapta simultáneamente tanto a la desalineación angular como al desplazamiento axial. Estas excelentes características hacen que los rodamientos de rodillos toroidales CARB sean capaces de prolongar la vida útil, aumentar el tiempo productivo y reducir los costos de mantenimiento en aplicaciones en que los

rodamientos convencionales podrían experimentar fallos prematuros.

Características y beneficios

Los rodamientos de rodillos toroidales CARB se usan en motores eléctricos y generadores pequeños, medianos y grandes como rodamiento libre, para absorber la dilatación axial del eje. En motores con transmisión por correa o engranaje, los rodamientos de rodillos toroidales CARB también absorben cargas radiales pesadas. El rodamiento de rodillos toroidales CARB tiene un diseño único, ya que puede absorber la elongación axial del eje internamente como un rodamiento de rodillos cilíndricos, y la desalineación como un rodamiento de rodillos a rótula. Además, el rodamiento de rodillos toroidales CARB tiene una gran capacidad de carga, baja fricción y puede presentar también la sección transversal compacta asociada normalmente a los rodamientos de agujas. El diseño exclusivo de sus rodillos hace a los rodamientos de rodillos

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos de rodillos toroidales CARB

toroidales CARB menos sensibles al deslizamiento con cargas ligeras, lo que permite su uso en motores acoplados con cargas relativamente ligeras.

Desalineación y desplazamiento axial

Los rodamientos de rodillos toroidales CARB pueden absorber hasta 0,5 grados de desalineación sin que se vea afectado el rendimiento del rodamiento. La capacidad de desplazamiento axial va en función del juego radial en el rodamiento y la desalineación entre los aros interior y exterior.

Juego interno

El juego radial interno de un rodamiento de rodillos toroidales CARB es mayor que los niveles de juego de los rodamientos de rodillos a rótula y los rodamientos de rodillos cilíndricos equivalentes con la misma clase de juego. Ello se debe a que el desplazamiento axial de un aro en relación con el otro reducirá el juego radial en los rodamientos de rodillos toroidales CARB. Como los niveles son superiores a los correspondientes a otros rodamientos, el nivel de juego preferido para los rodamientos de rodillos toroidales CARB en motores eléctricos y generadores será el juego Normal.

Rodamientos de rodillos toroidales CARB de la clase de rendimiento SKF Explorer

Todos los rodamientos de rodillos toroidales CARB se fabrican según la clase de rendimiento SKF Explorer.

En respuesta a los requisitos de rendimiento cada vez más exigentes de la maquinaria moderna, SKF ha creado la clase de rodamientos SKF Explorer. Los rodamientos de rodillos toroidales CARB de la clase de rendimiento SKF Explorer han logrado esta importante mejora de su rendimiento gracias a la optimización de su geometría interna y el acabado de todas sus superficies de contacto, la combinación de un tipo de acero extremadamente limpio y homogéneo con un tratamiento térmico exclusivo y la mejora de la jaula, el perfil de los rodillos y la geometría de los caminos de rodadura. Estas mejoras aportan los siguientes beneficios:

- mayor capacidad de carga dinámica que los rodamientos de diseño convencional
- mejora de la resistencia al desgaste
- reducción en los niveles de ruido y vibración
- menor calor por fricción
- vida útil del rodamiento mucho más larga

SKF trabaja constantemente para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los rodamientos SKF Explorer. El último avance consiste en un tratamiento del acero mejorado que proporciona una resistencia al desgaste aún mayor. Esta característica es especialmente favorable en condiciones de funcionamiento difíciles con contaminación o lubricación deficiente.



Rodamientos axiales de rodillos a rótula

Los rodamientos axiales de rodillos a rótula son los que tienen la mayor capacidad de carga de todos los rodamientos axiales de rodillos. Además de cargas axiales muy pesadas, también pueden soportar grandes cargas radiales de acción simultánea. Esta cualidad, junto con su autoalineación inherente, hace que estos rodamientos sean la elección natural para máquinas eléctricas sometidas a grandes cargas axiales. Un buen ejemplo de ello son las turbinas de energía verticales.

Los rodamientos axiales de rodillos a rótula se pueden usar también en sustitución de los rodamientos hidrostáticos o hidrodinámicos.

Características y beneficios

La característica principal de los rodamientos axiales de rodillos a rótula es su capacidad de soportar cargas axiales muy pesadas, cargas radiales de acción simultánea, desalineación y velocidades relativamente altas.

Además, los rodamientos axiales de rodillos a rótula son desmontables, es decir, la arandela del eje con el conjunto de jaula y rodillos se pueden montar por separado de la arandela del soporte, lo que simplifica el montaje.

La capacidad de maximizar los efectos del baño de aceite generando una acción de bombeo interno hace de los rodamientos axiales de rodillos a rótula una opción muy rentable en comparación con los rodamientos hidrostáticos, que requieren un sistema de presión de aceite. También es posible la lubricación con grasa en aplicaciones con velocidades moderadas.

Gracias a su capacidad de autoalineación, los rodamientos axiales de rodillos a rótula pueden absorber la desalineación del eje con relación al soporte, y la flexión o curvatura del eje.

1 Rodamientos en máquinas eléctricas

Rodamientos axiales de rodillos a rótula

Rodamientos axiales de rodillos a rótula SKF Explorer

En respuesta a los requisitos de rendimiento cada vez más exigentes de la maquinaria moderna, SKF ha creado la clase de rodamientos SKF Explorer. Los rodamientos axiales de rodillos a rótula SKF Explorer han logrado esta importante mejora de su rendimiento gracias a la optimización de su geometría interna y el acabado de todas sus superficies de contacto, la combinación de un tipo de acero extremadamente limpio y homogéneo con un tratamiento térmico exclusivo y la mejora de la jaula, el perfil de los rodillos y la geometría de los caminos de rodadura. Estas mejoras aportan los siguientes beneficios:

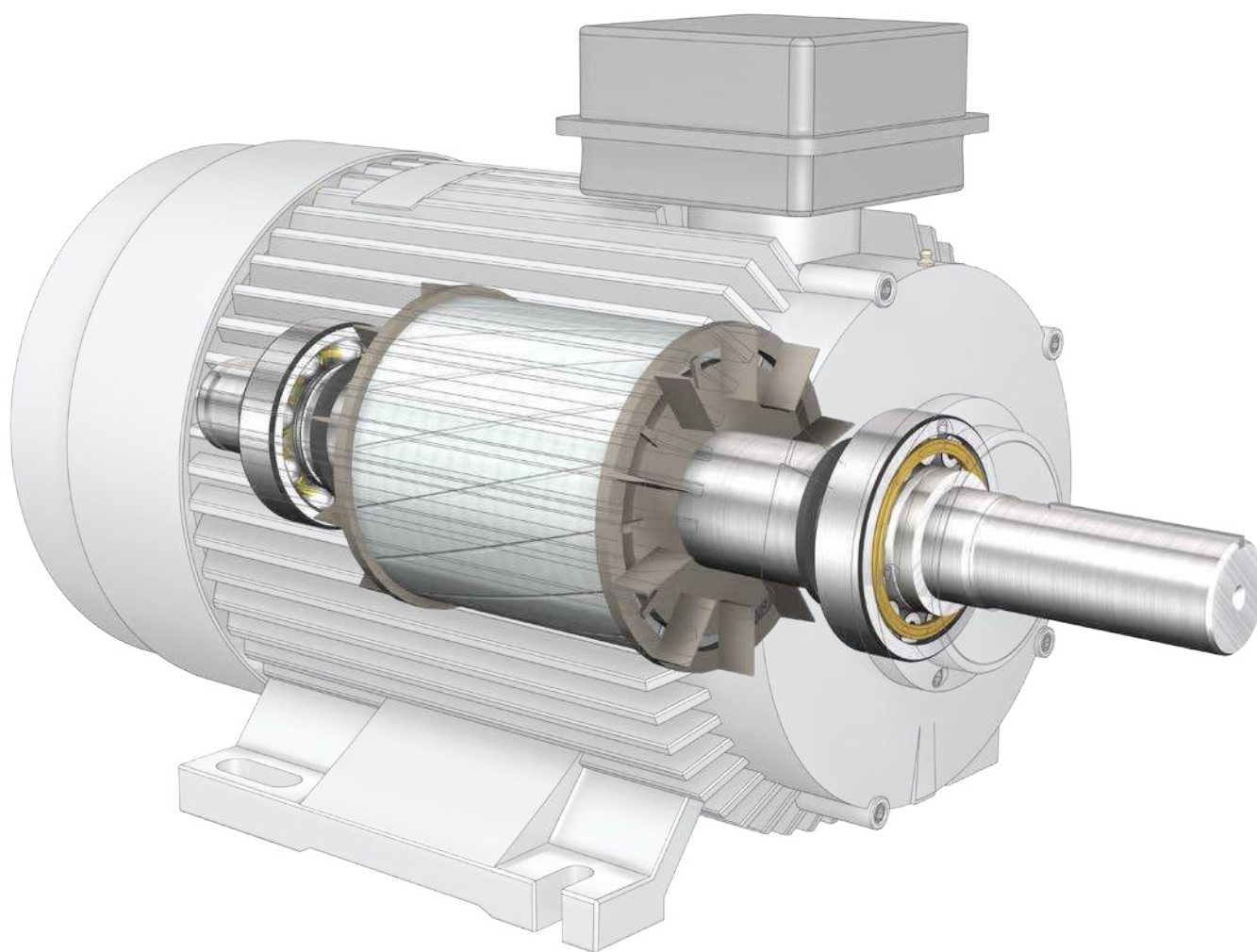
- mayor capacidad de carga dinámica que los rodamientos de diseño convencional
- mejora de la resistencia al desgaste
- reducción en los niveles de ruido y vibración
- menor calor por fricción
- vida útil del rodamiento mucho más larga

SKF trabaja constantemente para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los rodamientos SKF Explorer. El último avance consiste en un tratamiento del acero mejorado que proporciona una resistencia al desgaste aún mayor. Esta característica es especialmente favorable en condiciones de funcionamiento difíciles con contaminación o lubricación deficiente.

2 Sistemas de rodamientos

Selección de un sistema de
rodamientos 39

Precarga mediante muelles 49



Sistemas de rodamientos

Los rodamientos de los motores eléctricos y generadores deben sostener el rotor en sentido radial y fijarlo axialmente con respecto al estátor. Los sistemas de rodamientos típicos constan de un rodamiento fijo y otro libre. En la mayoría de los motores y generadores medianos y grandes, el rodamiento fijo es un rodamiento rígido de bolas, y el rodamiento libre puede ser un rodamiento rígido de bolas, un rodamiento de rodillos cilíndricos de diseño N o NU, o un rodamiento de rodillos toroidales CARB.

Los motores más pequeños, equipados con dos rodamientos rígidos de bolas montados en un eje corto, generalmente tienen un sistema de rodamientos de fijación cruzada.

Selección de un sistema de rodamientos

La mayoría de los motores están diseñados con un sistema de rodamientos fijo y libre. El rodamiento fijo sujeta el eje axialmente. El rodamiento libre está diseñado para absorber la elongación térmica del eje para evitar las cargas axiales inducidas.

Para la posición del rodamiento fijo, se utilizan rodamientos radiales capaces de absorber cargas combinadas (radiales y axiales). Estos incluyen rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular emparejados, rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular y rodamientos de rodillos a rótula.

Existen dos formas de absorber el desplazamiento térmico del eje en la posición del rodamiento libre: la primera es el uso de un rodamiento que absorba solo las cargas radiales y permita el desplazamiento axial dentro del rodamiento. Esto incluye los rodamientos de rodillos toroidales CARB y aquellos rodamientos de rodillos cilíndricos que tienen un aro sin pestañas (→ fig. 6, página 43). El otro método es el uso de un rodamiento radial montado con un ajuste flojo en el soporte

(→ fig. 2, página 41), de manera que el aro exterior quede libre para moverse axialmente.

Al diseñar el sistema de rodamientos de un motor eléctrico, hay que tener en cuenta diversos requisitos de la aplicación, como la vida útil, los niveles de ruido y el mantenimiento. A veces, puede suceder que estos requisitos impliquen ciertos condicionantes. Por ejemplo, si una aplicación tiene altas temperaturas de funcionamiento, quizá no sea posible usar rodamientos engrasados de por vida con sellos o placas de protección. En su lugar, puede que sea necesario disponer de funciones de relubricación.

2 Sistemas de rodamientos

Selección de un sistema de rodamientos

Sistema para transmisiones acopladas

Motores pequeños

Los motores pequeños con ejes cortos suelen usar un sistema de fijación cruzada con dos rodamientos rígidos de bolas. Uno de los rodamientos fija el eje en sentido axial en una dirección, y el otro rodamiento lo fija en la dirección opuesta (→ **fig. 1**). La elongación térmica del eje en la aplicación mostrada es absorbida por el juego axial del sistema de rodamientos.

Si el eje es demasiado largo para un sistema de fijación cruzada, se suele usar un sistema fijo/libre con dos rodamientos rígidos de bolas.

Para cumplir los requisitos de bajo nivel de ruido, las disposiciones de rodamientos rígidos de bolas se suelen precargar axialmente con un muelle, véase la **fig. 2** en la **página 41**, rodamiento de la derecha, y la **fig. 17** en la **página 49**. La carga axial del muelle satisface los requisitos de carga mínima de los rodamientos (→ *Precarga mediante muelles*, **página 49**). La carga mediante muelle también centra y guía al rotor para reducir la vibración y el ruido y conseguir que el motor funcione de forma más silenciosa.

Los soportes típicos de motores pequeños usan un sello de intersticio. Para aumentar la protección, los rodamientos cuentan con placas de protección y están engrasados de por vida. Este tipo de solución de sellado es adecuada para ambientes secos y limpios.

En ambientes más contaminados, se recomiendan sellos de baja fricción.

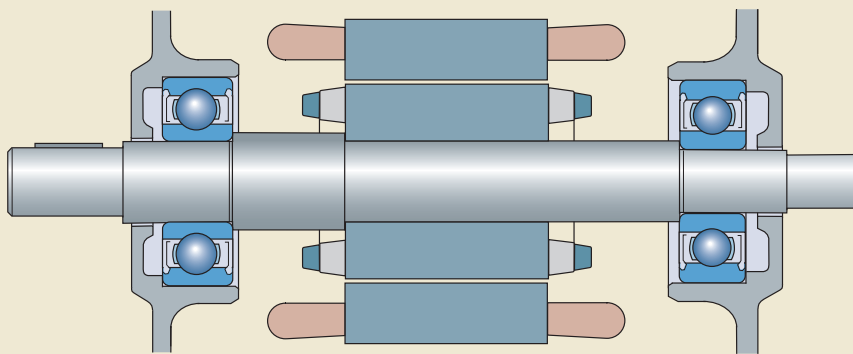
Motores medianos o grandes

El sistema de rodamientos típico en motores medianos o grandes emplea dos rodamientos rígidos de bolas, donde el rodamiento en el lado de accionamiento (DE) es el rodamiento fijo y el rodamiento en el lado opuesto al accionamiento (NDE) es el rodamiento libre. El aro exterior del rodamiento de la posición libre deberá poder desplazarse axialmente para absorber la elongación térmica del eje. Ello requiere un ajuste flojo en el soporte.

Los motores medianos o grandes suelen estar equipados con rodamientos abiertos que requieren relubricación. Si los rodamientos requieren relubricación frecuente, el motor deberá estar dotado de una válvula de escape de grasa (→ **fig. 3**, **capítulo 5**, **página 84**). Un disco giratorio recoge el exceso de grasa, la descarga en una cavidad de la tapa lateral por acción de la fuerza centrífuga y la expulsa por una abertura en la parte inferior de la tapa.

Una solución de sellado típica para el sistema de rodamientos es un sello laberíntico en el lado de accionamiento y un sello de contacto de baja fricción (por ejemplo, un anillo en V) en el lado opuesto al accionamiento (NDE). Para evitar las fugas de grasa en la zona del rotor, se pueden montar sellos de fieltro en las tapas internas.

Fig. 1.



Sistema de rodamientos de fijación cruzada para motores pequeños

2 Sistemas de rodamientos

Selección de un sistema de rodamientos

Sistemas para transmisiones por correa

Motores pequeños

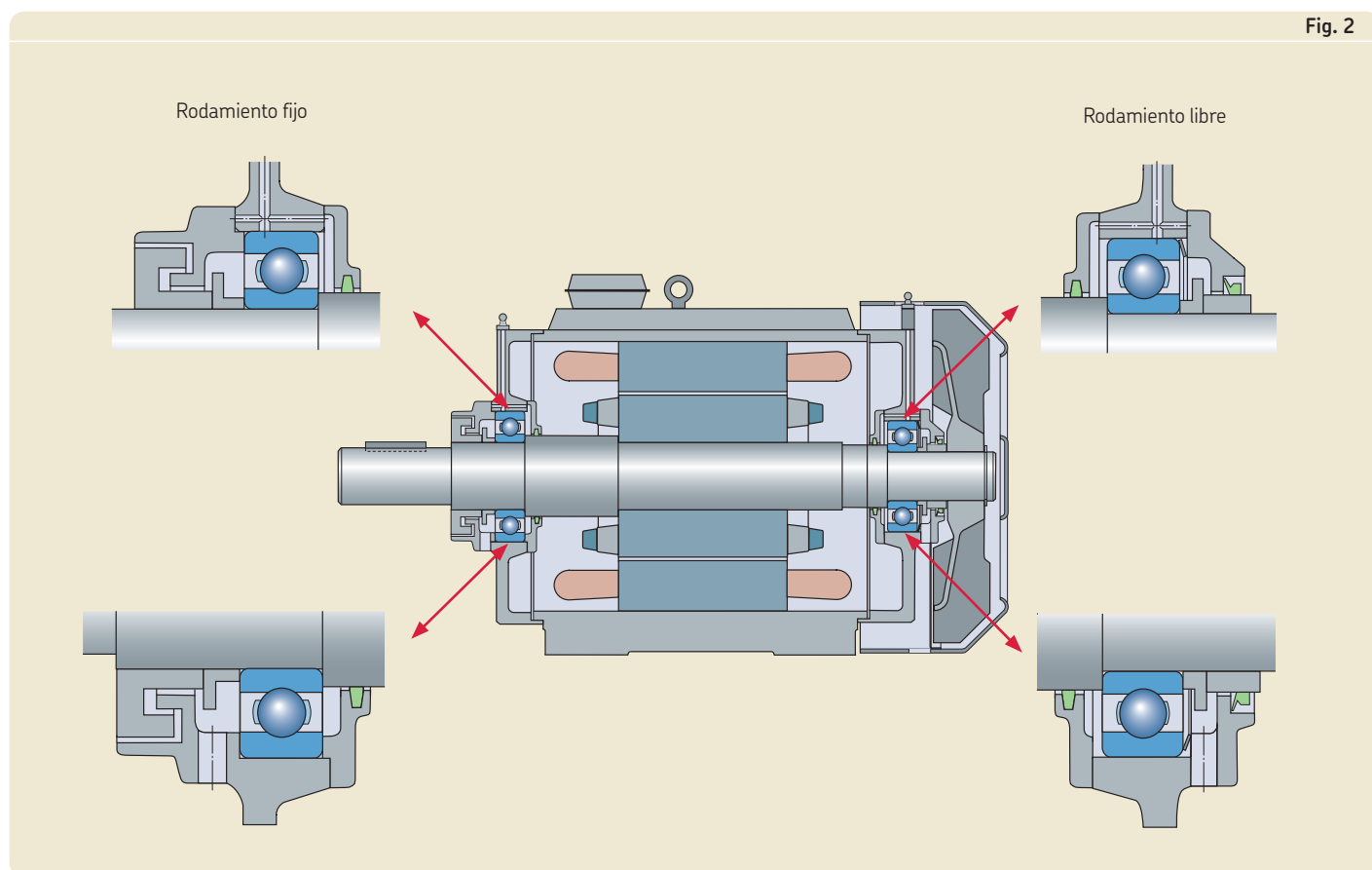
Los motores pequeños, hasta un tamaño de bastidor IEC de 132, suelen estar equipados con dos rodamientos rígidos de bolas (→ *Sistemas para transmisiones acopladas: Motores pequeños, página 40*).

Motores medianos o grandes

Los motores eléctricos diseñados para transmisiones por correa pueden usar un rodamiento de rodillos cilíndricos N o NU o un rodamiento CARB en posición libre en el lado de accionamiento (DE) para absorber las cargas radiales generadas por la tensión de la correa. Dado que estos rodamientos absorben la elongación térmica del eje con relación al soporte dentro del rodamiento, sus aros deben fijarse axialmente sobre el eje y en el soporte.

Hay que tener presente que un ajuste de interferencia por sí solo no es suficiente para fijar el aro del rodamiento axialmente.

Motor eléctrico trifásico mediano con características de relubricación y válvulas de escape de grasa



2 Sistemas de rodamientos

Selección de un sistema de rodamientos

Soportes de aluminio

El coeficiente de dilatación térmica del aluminio es más del doble del coeficiente de la fundición o el acero. A temperatura de funcionamiento normal, según las condiciones de carga y de los ajustes seleccionados, el aro exterior del rodamiento puede deslizarse en su asiento en el soporte. El resultado es el desgaste y deterioro del asiento del rodamiento. Para evitar el deslizamiento del aro exterior, corte una ranura para junta tórica en el asiento del rodamiento en el soporte e instale una junta tórica de caucho. Si el diseño es correcto, la junta tórica ejercerá una presión suficiente en el aro exterior para evitar que gire en el agujero del soporte (→ fig. 3).

Directrices de diseño de ranuras para junta tórica

Para evitar que el rodamiento corte la junta tórica durante la instalación, la ranura de la junta debe estar lo suficientemente rebajada. En la fig. 4, se pueden ver las directrices para el cálculo de dimensiones. La ranura deberá diseñarse de acuerdo con los valores estándares para aplicación estática de juntas tóricas y deberá situarse descentrada con relación al rodamiento.

La dureza de la junta tórica deberá ser aproximadamente de 70° shore A.

Ejemplos de disposiciones de rodamientos típicas

En las páginas 43 a 48, se muestran disposiciones de rodamientos típicas empleadas en motores eléctricos y generadores industriales.

Sistema con soportes de aluminio dotado de juntas tóricas para evitar el deslizamiento del aro exterior

Directrices para el cálculo de dimensiones de ranuras para junta tórica

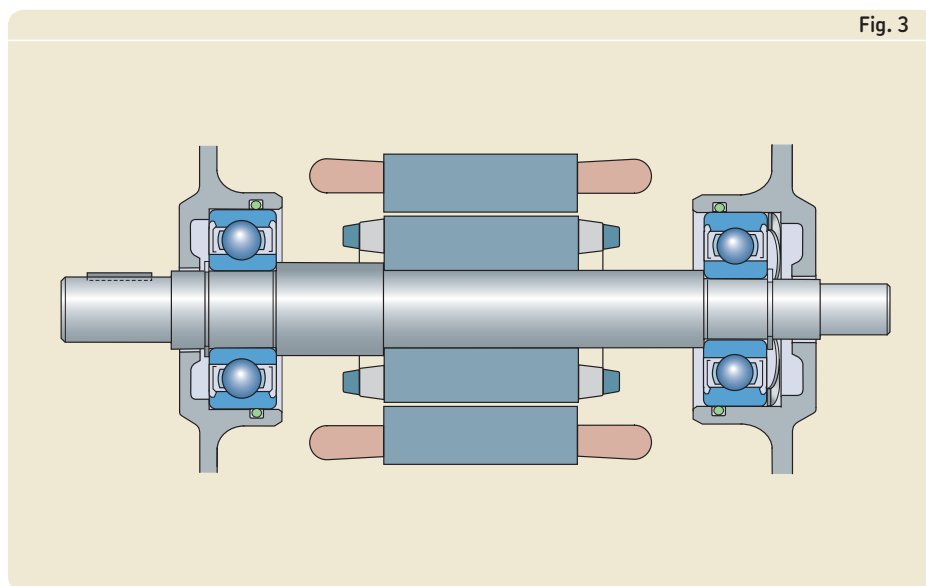


Fig. 3

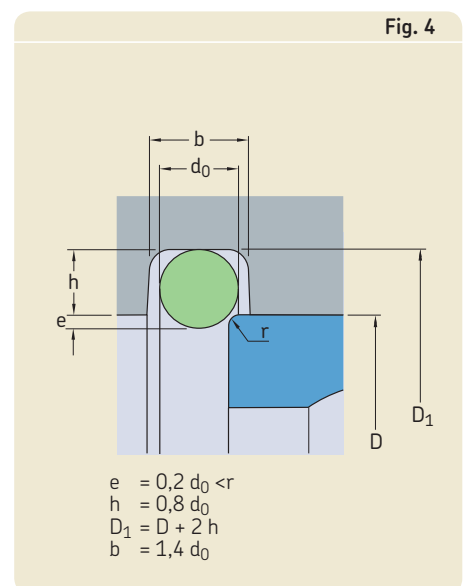
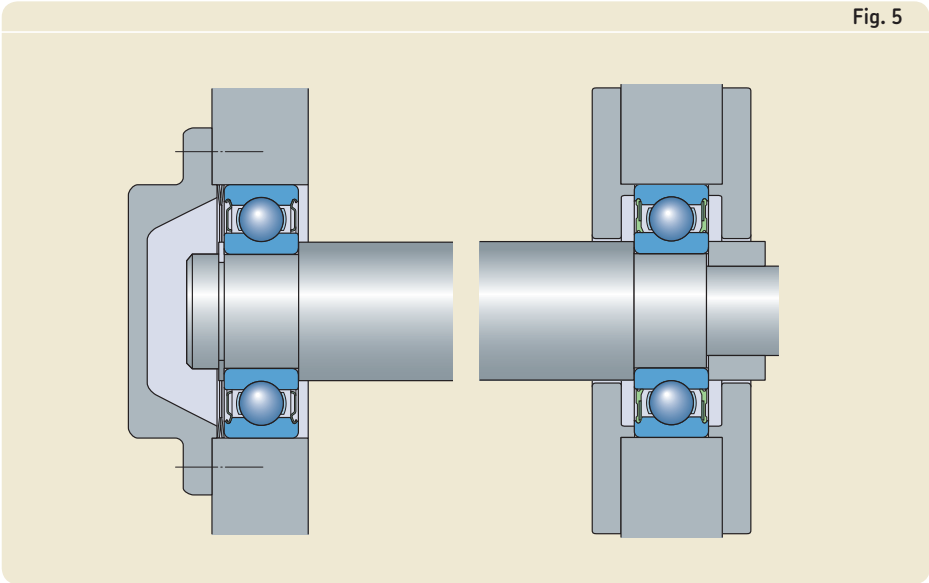
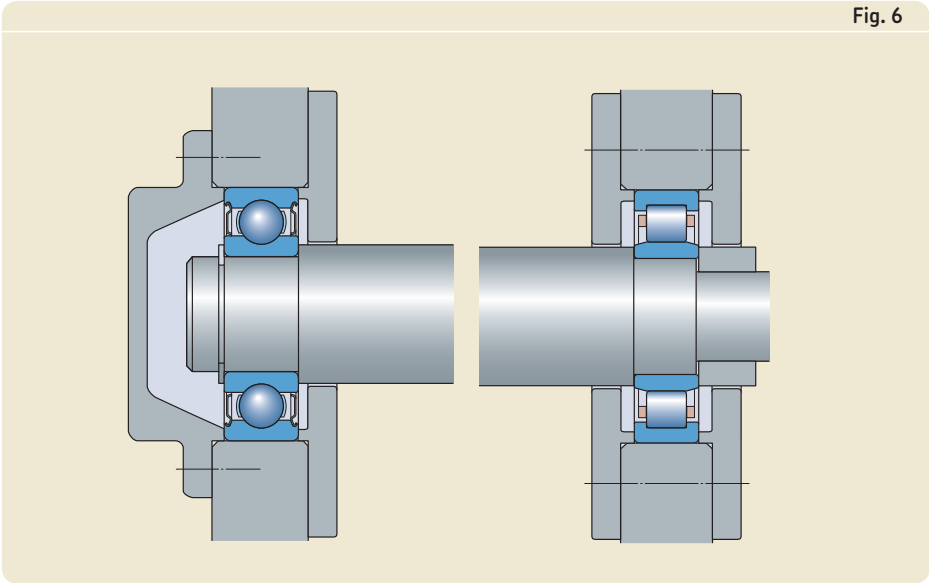


Fig. 4

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos



Rodamiento rígido de bolas con placas de protección + rodamiento rígido de bolas sellado



Rodamiento rígido de bolas con placas de protección + rodamiento de rodillos cilíndricos

Tabla 1a									
Tipo de disposición de rodamientos		Requisitos		Mantenimiento	Guiado		Cargas		Observaciones
		Ruido	Velocidad		Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones horizontales									
Rodamiento rígido de bolas tapado + rodamiento rígido de bolas tapado (→ fig. 5) – con placas de protección y sellos de baja fricción – sellos de contacto		5	5	5	5	3	3	3	Para motores eléctricos pequeños o medianos. Mantenimiento reducido. El guiado axial no es un parámetro clave.
		5	4	5	5	3	3	3	Rodamiento libre precargado mediante muelles.
Rodamiento rígido de bolas tapado + rodamiento de rodillos cilíndricos (→ fig.6)		3	4	3	3	3	5	3	Para motores eléctricos medianos o grandes, con grandes cargas radiales en el lado de accionamiento. Absorbe la elongación térmica del eje con relación al soporte dentro del rodamiento.
5 = Excelente	4 = Muy buena	3 = Buena		2 = Aceptable	1 = No se recomienda				

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos

Rodamiento de rodillos cilíndricos + dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal montados cara a cara

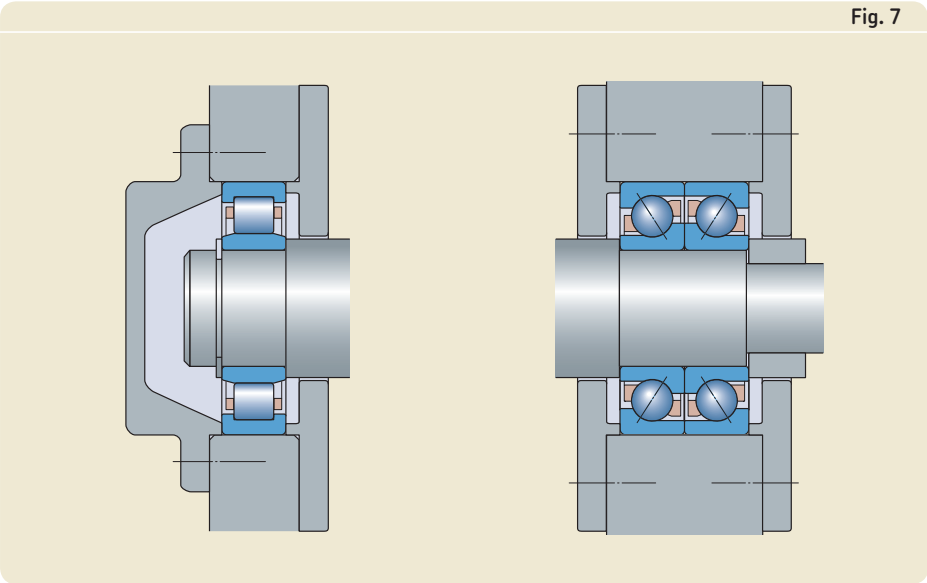


Fig. 7

Rodamiento rígido de bolas + dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal montados cara a cara

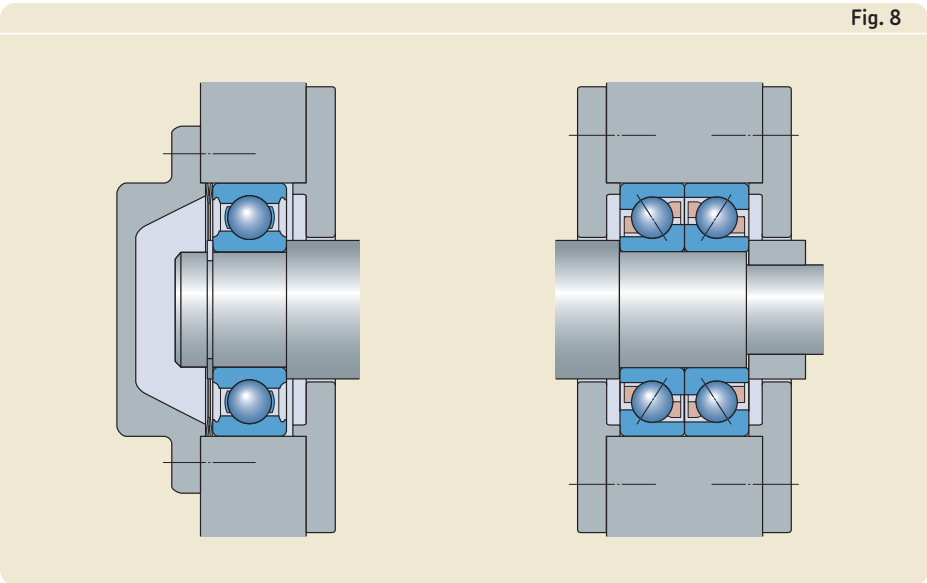
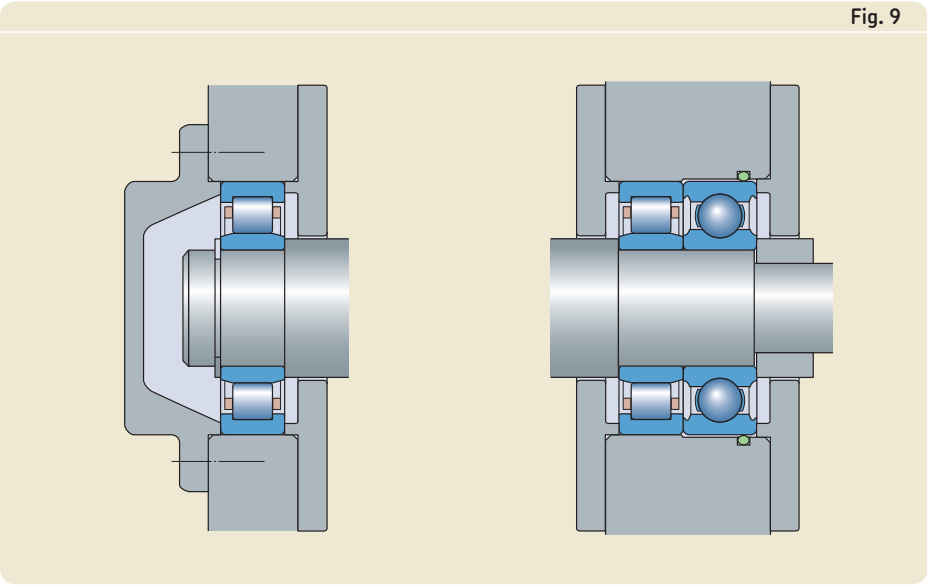


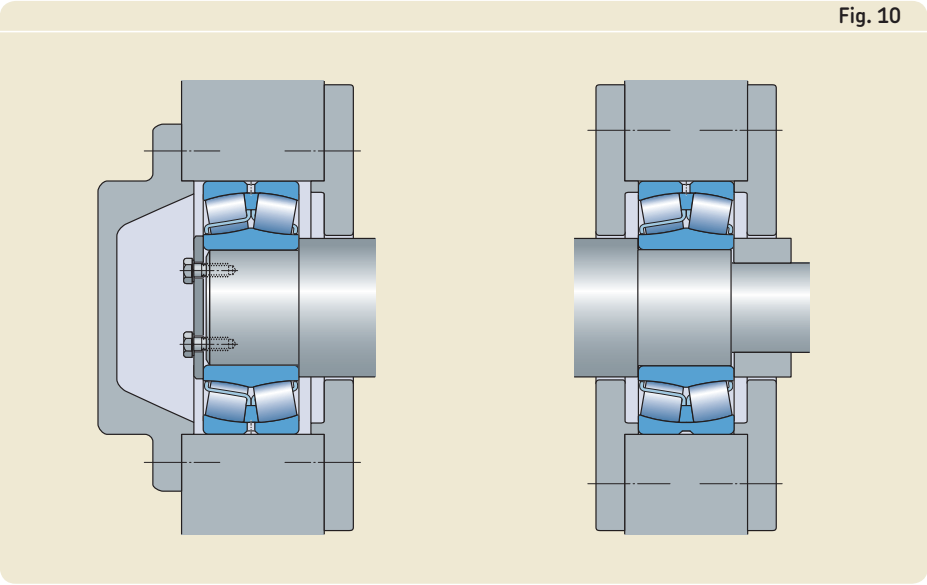
Fig. 8

Tabla 1b								
Tipo de disposición de rodamientos	Requisitos			Guiado		Cargas		Observaciones
	Ruido	Velocidad	Mantenimiento	Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones horizontales								
Rodamiento de rodillos cilíndricos + dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal montados cara a cara (→ fig. 7)	3	4	3	5	5	5	5	Motores eléctricos con cargas axiales que actúan en ambas direcciones y grandes cargas radiales, o cuando el guiado axial es importante.
Rodamiento rígido de bolas + dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal montados cara a cara (→ fig. 8)	5	4	4	5	5	5	5	Motores eléctricos pequeños con cargas axiales que actúan en ambas direcciones y cargas radiales moderadas, o cuando el guiado axial es importante. Rodamiento en la posición libre precargado mediante muelles.
5 = Excelente	4 = Muy buena		3 = Buena	2 = Aceptable	1 = No se recomienda			

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos



Rodamiento de rodillos cilíndricos + rodamiento de rodillos cilíndricos y rodamiento rígido de bolas con montaje libre radialmente



Rodamiento de rodillos a rótula + rodamiento de rodillos a rótula

Tabla 1c								
Tipo de disposición de rodamientos	Requisitos			Guiado		Cargas		Observaciones
	Ruido	Velocidad	Mantenimiento	Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones horizontales								
Rodamiento de rodillos cilíndricos + rodamiento de rodillos cilíndricos y rodamiento rígido de bolas (→ fig. 9)	3	4	3	3	3	5	3	Para grandes máquinas eléctricas. El rodamiento rígido de bolas soporta únicamente las cargas axiales y fija el eje en sentido axial. Está libre radialmente y usa una junta tórica para evitar el deslizamiento del aro exterior.
Rodamiento de rodillos a rótula + rodamiento de rodillos a rótula (→ fig. 10)	3	3	3	3	3	5	4	Para máquinas eléctricas muy grandes y cargas muy pesadas.
5 = Excelente	4 = Muy buena		3 = Buena	2 = Aceptable	1 = No se recomienda			

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos

Rodamiento de rodillos a rótula + rodamiento de rodillos toroidales CARB

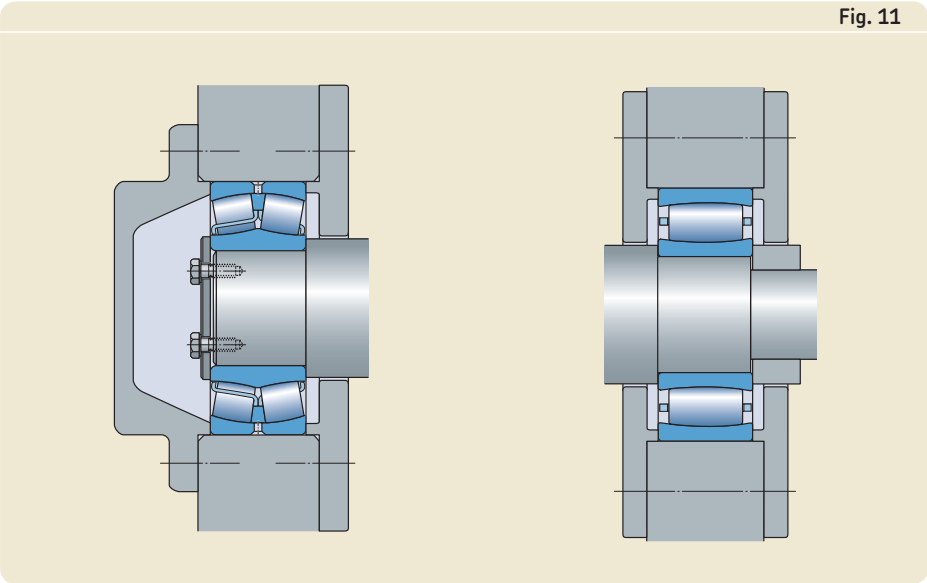


Fig. 11

Rodamiento rígido de bolas sellado + rodamiento rígido de bolas sellado

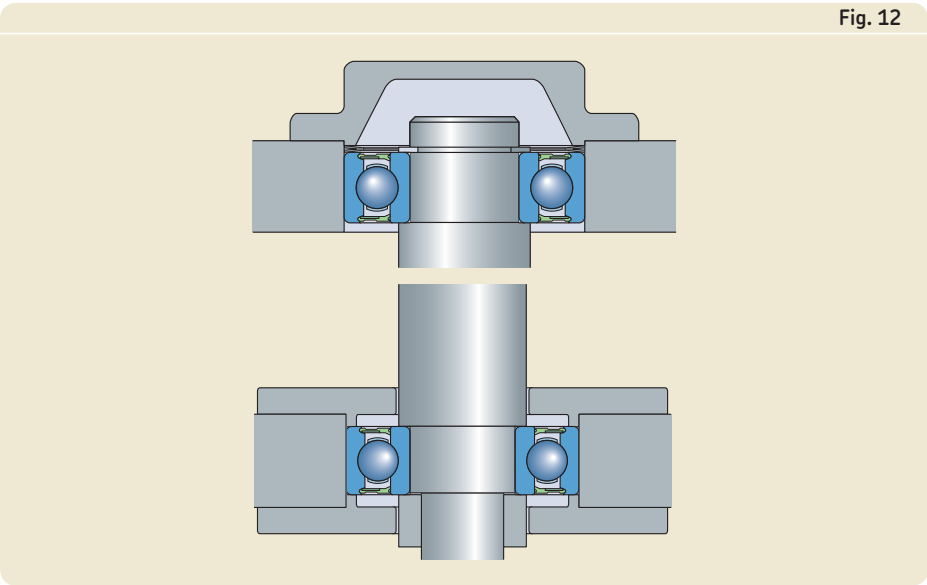
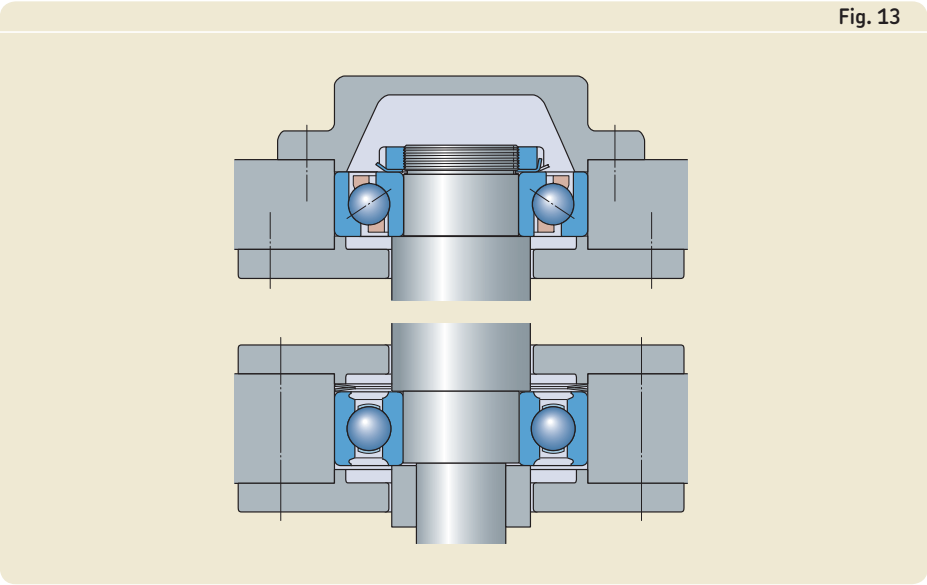


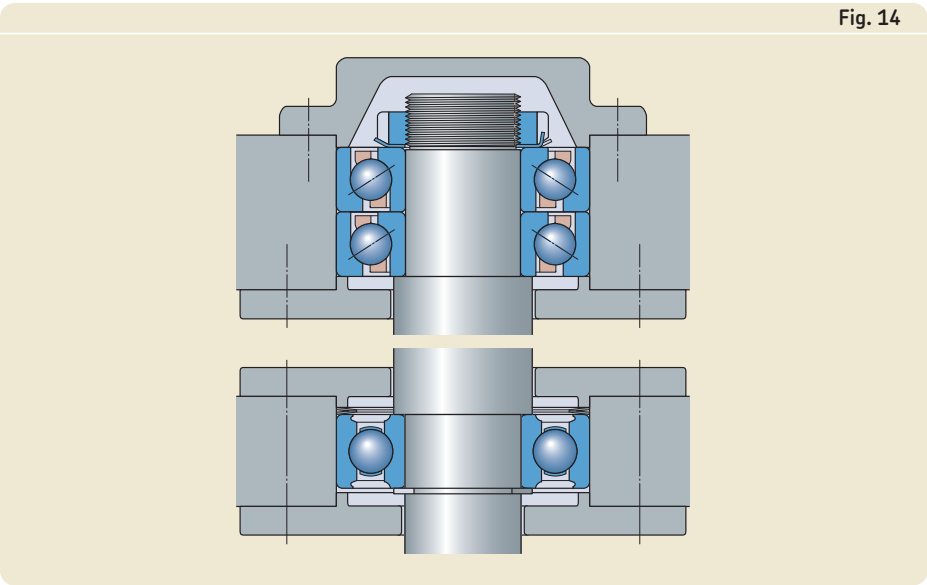
Fig. 12

Tabla 1d								
Tipo de disposición de rodamientos	Requisitos			Guiado		Cargas		Observaciones
	Ruido	Velocidad	Mantenimiento	Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones horizontales								
Rodamiento de rodillos a rótula + rodamiento de rodillos toroidales CARB (→ fig. 11)	3	3	3	3	3	5	4	Para máquinas eléctricas muy grandes y cargas muy pesadas. El rodamiento de rodillos toroidales CARB se usa en la posición libre para absorber la elongación térmica del eje en el interior del rodamiento.
Disposiciones verticales								
Rodamiento rígido de bolas sellado + rodamiento rígido de bolas sellado (→ fig. 12)								Disposición estándar para motores eléctricos pequeños y medianos. Pequeñas cargas axiales en ambas direcciones. Rodamiento libre superior cargado mediante muelles.
– sellos de baja fricción	5	5	5	5	3	3	2	
– sellos de contacto	5	4	5	5	3	3	2	
5 = Excelente	4 = Muy buena		3 = Buena	2 = Aceptable	1 = No se recomienda			

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos



Rodamiento de bolas de contacto angular + rodamiento rígido de bolas



Dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal dispuestos en tándem + rodamiento rígido de bolas

Tabla 1e								
Tipo de disposición de rodamientos	Requisitos			Guiado		Cargas		Observaciones
	Ruido	Velocidad	Mantenimiento	Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones verticales								
Rodamiento de bolas de contacto angular + rodamiento rígido de bolas (→ fig. 13)	5	4	5	5	5	3	4	Disposición estándar para motores eléctricos grandes con cargas axiales moderadas en una dirección (hacia abajo). Rodamiento libre precargado mediante muelles.
Dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal dispuestos en tándem + rodamiento rígido de bolas (→ fig. 14)	5	3	4	5	5	3	5	Disposición estándar para motores eléctricos grandes con cargas axiales pesadas en una dirección (hacia abajo). Rodamiento libre precargado mediante muelles.
5 = Excelente	4 = Muy buena	3 = Buena	2 = Aceptable	1 = No se recomienda				

2 Sistemas de rodamientos
Selección de un sistema de rodamientos

Dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal dispuestos cara a cara + rodamiento rígido de bolas

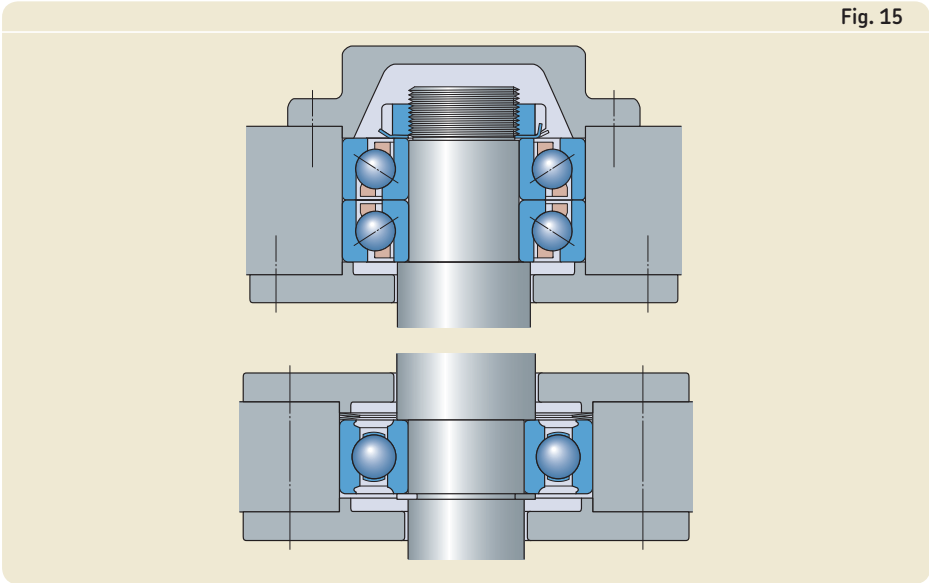


Fig. 15

Rodamiento de rodillos cilíndricos + rodamiento axial de rodillos a rótula

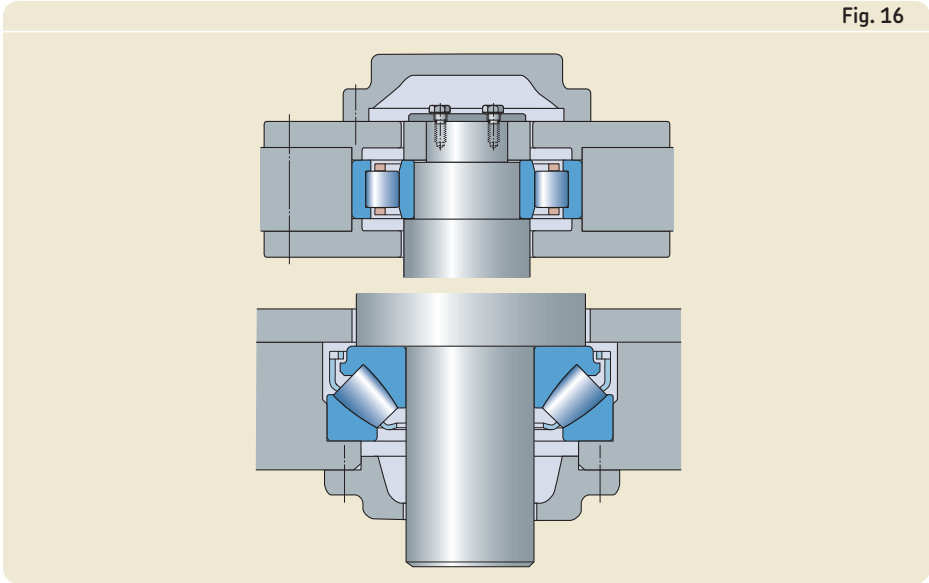


Fig. 16

Tabla 1f								
Tipo de disposición de rodamientos	Requisitos			Guiado		Cargas		Observaciones
	Ruido	Velocidad	Mantenimiento	Radial	Axial	Radial	Axial	
Disposiciones verticales								
Dos rodamientos de bolas de contacto angular con emparejamiento universal dispuestos cara a cara + rodamiento rígido de bolas (→ fig. 15)	5	3	4	5	5	4	4	Disposición estándar para motores eléctricos grandes con cargas axiales moderadas en ambas direcciones. Rodamiento libre precargado mediante muelles.
Rodamiento de rodillos cilíndricos + rodamiento axial de rodillos a rótula (→ fig. 16)	3	3	4	3	3	5	5	Para grandes máquinas eléctricas verticales. Gran carga axial hacia abajo.
5 = Excelente 4 = Muy buena 3 = Buena 2 = Aceptable 1 = No se recomienda								

Precarga mediante muelles

Una forma sencilla de precargar un rodamiento de bolas en sentido axial es usando una arandela de muelle o un juego de muelles helicoidales para aplicar presión en la cara lateral del aro exterior del rodamiento libre (→ fig. 17). Para hacerlo, el aro exterior deberá tener un ajuste flojo y poder moverse en su asiento en sentido axial. Con los muelles, la fuerza de precarga permanece relativamente constante aunque se produzca un desplazamiento del eje con respecto al soporte por elongación térmica del eje.

Para pequeñas máquinas eléctricas (masa del rotor ligera) equipadas con rodamientos rígidos de bolas, la fuerza de precarga requerida se puede calcular con la fórmula

$$F = k d$$

donde

F = fuerza de precarga [kN]

k = un factor (→ recomendaciones en las secciones *Funcionamiento silencioso*, **página 49**, y *Prevención de la vibrocorrosión*, **página 50**)

d = diámetro del agujero del rodamiento [mm]

Funcionamiento silencioso

Para reducir el ruido de funcionamiento en un motor eléctrico equipado con rodamientos rígidos de bolas, se deberá aplicar una precarga axial en el aro exterior del rodamiento libre. Esta precarga generará una carga axial distribuida uniformemente en todas las bolas de ambos rodamientos, lo que reducirá de manera considerable los niveles de ruido y vibración. Para calcular la precarga requerida, se consideran apropiados los valores del factor k entre 0,005 y 0,01. Para ajustar el valor del factor k con mayor precisión, será necesario efectuar pruebas a fin de comprobar la influencia de las tolerancias de los componentes en los niveles de ruido.

Sistema de rodamientos rígidos de bolas precargados mediante muelles

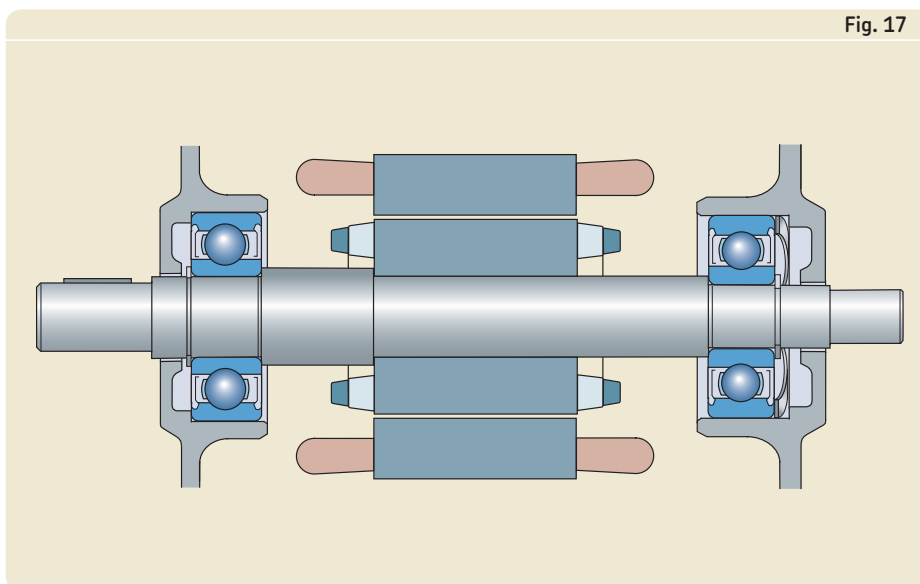


Fig. 17

Prevención de la vibrocorrosión

Los daños por vibrocorrosión se pueden producir si los rodamientos se ven sometidos a vibraciones en la aplicación o durante el transporte. Este tipo de daño se describe en el **capítulo 7**, a partir de la **página 109**.

La precarga axial mediante muelles puede reducir considerablemente el riesgo de vibrocorrosión. Si los rodamientos se cargan mediante muelles para reducir la vibrocorrosión y no para reducir el ruido, se deberá emplear un valor del factor k de 0,02 para calcular la precarga requerida con la fórmula indicada en la **página 49**.

Carga mínima

Con el fin de lograr un funcionamiento satisfactorio, los rodamientos de bolas y de rodillos deben estar siempre sometidos a una carga mínima, en particular si han de funcionar a altas velocidades o están expuestos a grandes aceleraciones o cambios rápidos en la dirección de una carga. En tales condiciones, las fuerzas de inercia de los elementos rodantes y la jaula, y la fricción generada por el lubricante, pueden tener una influencia perjudicial en las condiciones de giro del rodamiento, y pueden causar movimientos deslizantes dañinos entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura. La fórmula para calcular la carga mínima requerida para diferentes tipos de rodamientos se puede encontrar en las secciones de productos correspondientes del *Catálogo de rodamientos SKF* o en línea, en skf.com.

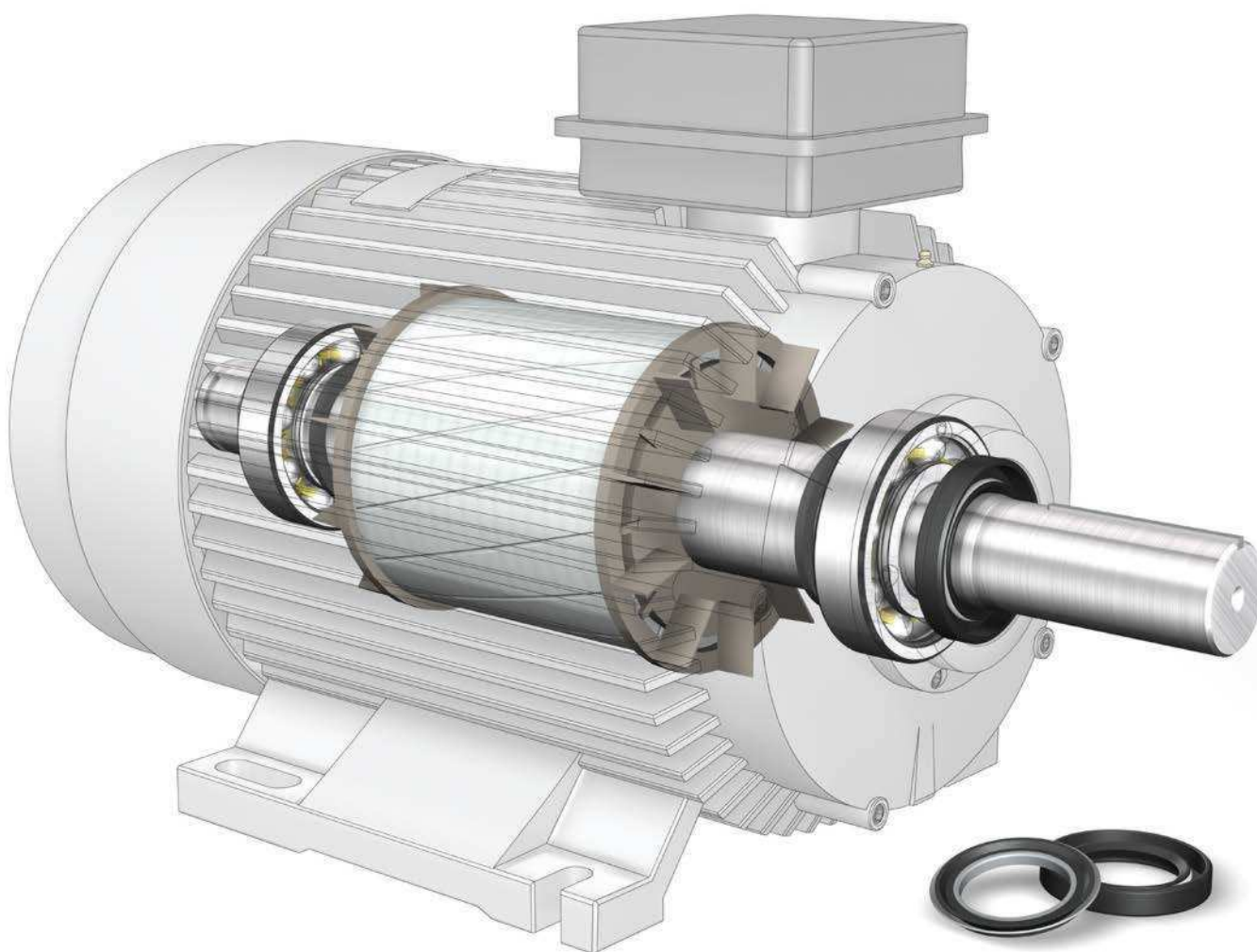
Al iniciar el funcionamiento con bajas temperaturas, o cuando el lubricante sea muy viscoso, pueden requerirse cargas mínimas aún mayores. El peso de los componentes soportados por el rodamiento, junto con las cargas externas, generalmente excede la carga mínima requerida. Si no es el caso, el rodamiento debe someterse a una carga adicional.

En aplicaciones en las que se usen rodamientos rígidos de bolas, esto se puede conseguir aplicando una precarga axial mediante muelles.

Cuando se usa un acoplamiento rígido y la alineación es extremadamente precisa, el rodamiento del lado de accionamiento puede quedar descargado. En tales casos, la carga es soportada por el rodamiento del lado opuesto al accionamiento en el motor y por el rodamiento que sostiene el eje acoplado. Para este tipo de aplicaciones, SKF recomienda el uso de un rodamiento rígido de bolas cargado mediante muelles en la posición libre.

3 Sellos en máquinas eléctricas

Requisitos de diseño.	54
Sellos de rodamientos integrales .	55
Sellos de eje	57
Sellos especiales.	62



Sellos en máquinas eléctricas

La finalidad de un sistema de sellado en las máquinas eléctricas es sellar el intersticio entre el eje del rotor y el soporte del estátor, y proteger el interior de la máquina de diversos contaminantes, al mismo tiempo que se protege el entorno externo de la máquina. Los sellos deben proporcionar la máxima protección con una mínima cantidad de fricción y desgaste, incluso en las condiciones de funcionamiento más difíciles. El sistema de sellado debe permitir velocidades altas y bajas, y minimizar la fricción y el consumo energético. El sistema de sellado puede estar formado por sellos laberínticos no rozantes externos y/o sellos de contacto (p. ej., sellos radiales de eje), y se puede complementar con el uso de sellos de rodamientos integrales.

Al seleccionar el tipo de sellos y su disposición con el fin de cumplir los requisitos de una aplicación de motor determinada, el diseñador del sistema de sellado ha de tener en cuenta muchos parámetros diferentes. El diseño elegido debe ser siempre el más económico desde el punto de vista del ciclo de vida total.

Requisitos de diseño

Los parámetros de diseño del sistema de sellado de una máquina eléctrica pueden variar. Los parámetros pueden incluir las condiciones mecánicas, contaminantes sólidos, líquidos y químicos, así como las velocidades y la temperatura ambiente. El sistema de sellado debe proporcionar el rendimiento de sellado requerido conforme a lo especificado por el tipo de carcasa y su clase de protección.

Las máquinas eléctricas corresponden normalmente a uno de estos dos tipos de carcasa:

- máquinas abiertas con aberturas de ventilación que permiten el paso del aire y la refrigeración directa de los devanados
- máquinas totalmente cerradas cuyo diseño prohíbe el intercambio libre de aire entre el interior y el exterior de la caja

El grado de protección ofrecido por una carcasa de máquinas eléctricas se clasifica con su valor de Protección Interna (IPxy) establecido en la norma IEC 60034-5.

El valor X representa el grado de protección de las personas y de los componentes del motor en el interior de la carcasa.

El valor Y representa el grado de protección ofrecido por la carcasa contra los efectos perjudiciales de la entrada de agua.

Cuando aumenta el valor X o Y, aumentan también los requisitos del sistema de sellado.

El rendimiento de sellado requerido de una máquina eléctrica se puede conseguir con sellos de rodamientos integrales, sellos externos (p. ej., de eje o laberínticos) o una combinación de ambos.

Para motores pequeños en un entorno seco y limpio, puede bastar y se utiliza habitualmente la combinación de un sello de intersticio entre el eje y el soporte y los rodamientos tapados (→ **fig. 1**).

Los motores medianos o grandes con rodamientos abiertos reengrasables pueden requerir combinaciones de sellos radiales, axiales y/o laberínticos.

Este capítulo es una breve introducción a los rodamientos sellados SKF y a los sellos de eje industriales SKF que se utilizan habitualmente en las máquinas eléctricas. Debido a la complejidad de las soluciones de sellado, se ofrece tan solo información básica. Para obtener más información, consulte el *Catálogo de rodamientos SKF* y el *Catálogo de sellos de eje industriales SKF*. Ambos se encuentran disponibles en línea, en skf.com. También puede comunicarse con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Valores orientativos

Debido a que existen varios factores que afectan simultáneamente al sistema de sellado y al rendimiento de los sellos, todos los valores indicados en los gráficos y las tablas de este capítulo se deberán considerar únicamente orientativos y no valores absolutos para aplicaciones prácticas.

Sistema de sellado de un motor pequeño en un entorno seco y limpio

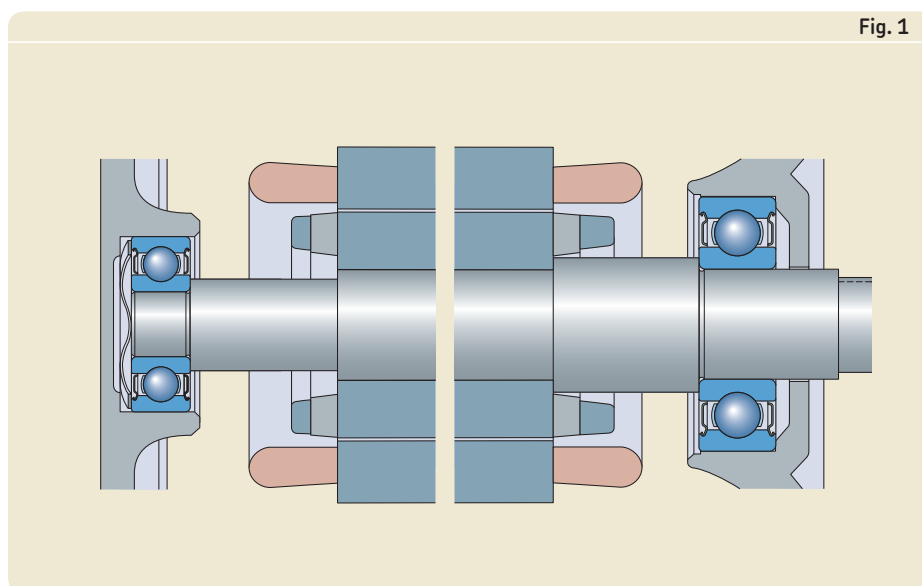


Fig. 1

Sellos de rodamientos integrales

El objetivo de un sello de rodamiento integral es mantener el lubricante dentro del rodamiento, y los contaminantes, como la suciedad y el agua, fuera del rodamiento.

Los sellos para disposiciones de rodamientos deben proporcionar la máxima protección con una mínima cantidad de fricción y desgaste, incluso en las condiciones de funcionamiento más difíciles. Dado que el rendimiento y la vida útil de un rodamiento están tan relacionados con la efectividad y limpieza del lubricante, el sello es un componente fundamental en un sistema de rodamientos.

Rodamientos rígidos de bolas tapados

SKF suministra los tamaños más populares de rodamientos rígidos de bolas tapados con un sello o una placa de protección a uno o ambos lados. En la **tabla 1**, se recogen las directrices de selección de las distintas soluciones de sellado en diversas condiciones de funcionamiento.

No obstante, estas directrices no pueden sustituir la comprobación de un sello en su aplicación. Las disposiciones tapadas estándares son:

Placas de protección metálicas (sufijo Z)

Los rodamientos con placas de protección se usan mucho en los motores cuando los niveles de contaminación son relativamente bajos y se necesita una buena retención de la grasa durante el funcionamiento.

Las placas de protección están hechas de chapa de acero. Van instaladas en el aro exterior y no hacen contacto con el aro interior.

Las velocidades alcanzables y los límites de temperatura están determinados por la jaula y la grasa, y no por la placa de protección.

Sellos no rozantes (sufijo RZ)

Los rodamientos con sellos no rozantes se pueden utilizar a las mismas velocidades que los rodamientos con placas de protección, pero con una efectividad de sellado mejorada.

Estos sellos forman un intersticio extremadamente estrecho con el cordón del reborde del aro interior para conseguir un buen sellado sin afectar a los límites de velocidad del rodamiento. La temperatura de funcionamiento está limitada por la jaula, la grasa y el material del labio de sellado.

Sellos de baja fricción (sufijo RSL)

Los rodamientos con sellos de baja fricción admiten las mismas velocidades que los rodamientos con placas de protección, pero con una efectividad de sellado mejorada.

Estos sellos son prácticamente no rozantes, con un rebaje en el reborde del aro interior. La temperatura de funcionamiento está limitada por la jaula, la grasa y el material del labio de sellado.

Tabla 1

Directrices de selección de soluciones de sellado SKF					
Requisito	Placas de protección		Sellos no rozantes	Sellos de baja fricción	Sellos de contacto
	Z	RZ	RSL	RSH	RS1
Baja fricción	+++	+++	++	○	○
Alta velocidad	+++	+++	+++	○	○
Retención de la grasa	○	+	+++	+++	++
Protección contra el polvo	○	+	++	+++	+++
Protección contra el agua					
estática	—	—	○	+++	++
dinámica	—	—	○	+	+
alta presión	—	—	○	+++	○
Símbolos: +++ = óptima ++ = muy buena + = buena ○ = aceptable — = no recomendada					

3 Sellos en máquinas eléctricas

Sellos de rodamientos integrales

Sellos de contacto (sufijo RSH o RS1 para rodamientos con un diámetro exterior superior a 52 mm)

Los rodamientos con sellos de contacto se pueden utilizar en entornos difíciles que requieren protección contra los contaminantes sólidos y líquidos. Debido a la presión de contacto entre el labio de sellado y el aro interior, la velocidad límite de estos rodamientos se reduce en comparación con otras versiones tapadas. La temperatura de funcionamiento está limitada por la jaula, la grasa y el material del labio de sellado.

Materiales de sellado de rodamientos

Hay una variedad de materiales de sellado disponibles para satisfacer los requisitos específicos de cada aplicación, como la temperatura de funcionamiento y la compatibilidad con grasas, aceites y otros medios.

El sello estándar de los rodamientos rígidos de bolas SKF es de caucho de acrilonitrilo butadieno (acrylo-nitrile-butadiene rubber, NBR).

Otro material de sellado que se usa habitualmente en entornos más agresivos (químicos) y aplicaciones a altas temperaturas es el caucho de fluorocarbono (FKM); véase también la advertencia en la **página 60** y la **tabla 3, página 61**.

Para obtener más información sobre sellos de rodamientos, consulte el *Catálogo de rodamientos SKF* (→ en skf.com/bearings).

Sellos de eje

Los sellos de eje en las máquinas eléctricas están diseñados para sellar el intersticio entre el eje del rotor y el soporte del estátor. Algunas de las principales funciones de los sellos son:

- retener el lubricante
- excluir los contaminantes
- sellar bajo presión

Para ser efectivos, los sellos de eje deben funcionar, incluso en condiciones de funcionamiento desfavorables, con un mínimo de fricción y desgaste. Para satisfacer los requisitos de una gran variedad de condiciones de funcionamiento, los sellos de eje industriales SKF se fabrican en muchos diseños y materiales diferentes.

La selección del diseño y el material del sello adecuados depende de las condiciones de funcionamiento de la aplicación, tales como:

- tipo de lubricante
- orientación vertical u horizontal del eje
- velocidad
- diferencial de presión
- temperatura
- variación y desalineación entre el eje y el agujero
- entorno externo

Debido a que la influencia de una única condición de funcionamiento suele dominar el proceso de selección del sello, no existen reglas universales para determinar el tipo o el diseño del sello adecuados para una aplicación determinada.

Selección del diseño del sello

A la hora de diseñar un sistema de sellado, se puede elegir entre distintos tipos de sellos. A continuación, se presenta una breve lista de los sellos utilizados principalmente en las máquinas eléctricas.

Sellos de intersticio

El sello externo más sencillo es un sello de intersticio, que crea un pequeño intersticio entre el eje y el soporte (→ **fig. 2**). Este tipo de sello es adecuado para las aplicaciones lubricadas con grasa utilizadas en entornos secos y sin polvo.

Sellos laberínticos

Los sellos laberínticos en una o múltiples etapas (→ **fig. 3**), utilizados normalmente con lubricación mediante grasa, son considerablemente más efectivos que los sellos sencillos de intersticio, pero también son más costosos. Su efectividad se puede mejorar aún más mediante la aplicación periódica de una grasa insoluble en agua, como una grasa con un espesante de litio-calcio, a través de un conducto a los pasadizos del laberinto.

Sello de intersticio

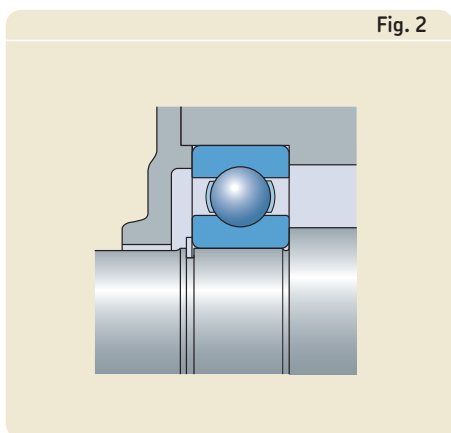


Fig. 2

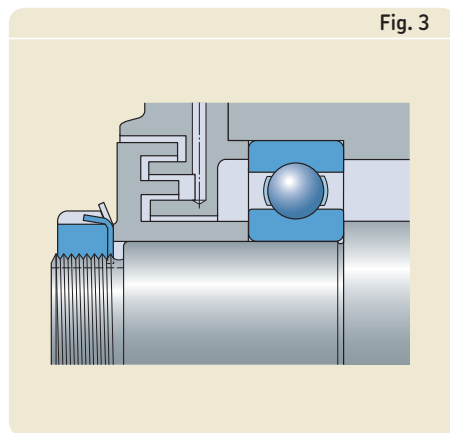


Fig. 3

Sello laberíntico para rodamiento lubricado con grasa

Sellos de fieltro

Los sellos de fieltro se usan generalmente con la lubricación con grasa. Este tipo de sello es sencillo, rentable y adecuado para velocidades periféricas de hasta 4 m/s y temperaturas de funcionamiento de hasta 100 °C (205 °F). La superficie de contacto del sello debe estar mecanizada con una rugosidad superficial $R_a \leq 3,2 \mu\text{m}$. La efectividad de un sello de fieltro puede mejorarse considerablemente si se instala un sello laberíntico sencillo como sello secundario. Antes de insertarlos en su ranura del soporte, los sellos de fieltro deben sumergirse en aceite a aproximadamente 80 °C (175 °F) antes del montaje.

En los motores eléctricos, se usan sellos de fieltro para proteger el interior del motor de la grasa del rodamiento (→ fig. 4).

Sellos de anillo en V

Los sellos de anillo en V (→ fig. 5) son sellos únicos para ejes giratorios fabricados totalmente de caucho. Los anillos en V actúan como deflectores, giran con el eje y sellan contra una superficie perpendicular al eje.

Se pueden utilizar para la retención de lubricante o para excluir los contaminantes. Los anillos en V se utilizan a menudo como

sellos secundarios para proteger a los sellos primarios frente a los contaminantes sólidos.

Se recomienda una rugosidad superficial máxima de $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ para velocidades periféricas inferiores a 1 m/s. A velocidades superiores, el valor R_a debe ser inferior.

A velocidades periféricas de más de 8 m/s, el anillo en V debe estar fijado axialmente por un anillo de apoyo. A velocidades superiores a 12 m/s, el anillo en V necesita un apoyo axial. Se puede utilizar para ello un anillo de apoyo de chapa metálica. Cuando la velocidad periférica supera los 15 m/s, el labio de sellado se levanta de la superficie de contacto del sello y el sello de anillo en V se convierte en un sello de intersticio.

Sellos axiales de eje MVR

Para una mayor protección en aplicaciones extremadamente contaminadas, se pueden utilizar sellos MVR (→ fig. 6). Al igual que los sellos de anillo en V, los sellos MVR sellan axialmente y funcionan mediante la combinación del contacto del labio con una acción centrífuga "esparcidora". Sin embargo, los sellos MVR se diferencian de los sellos de anillo en V en que su elemento de caucho se estira para ajustarse dentro de una carcasa metálica. A continuación, la carcasa metálica se coloca

Sello de fieltro

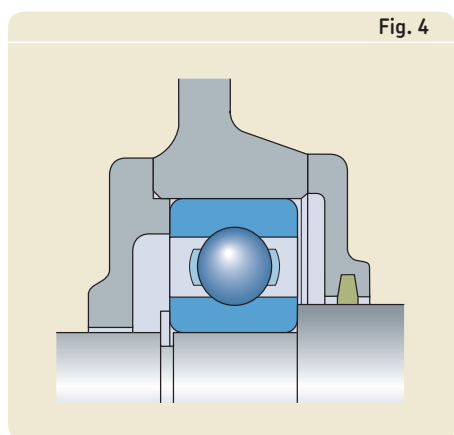


Fig. 4

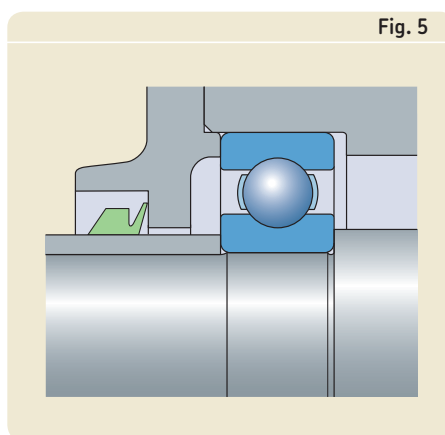


Fig. 5

Sello de anillo en V

Sellos MVR

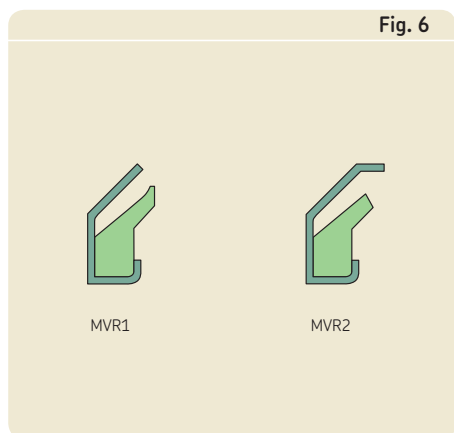


Fig. 6

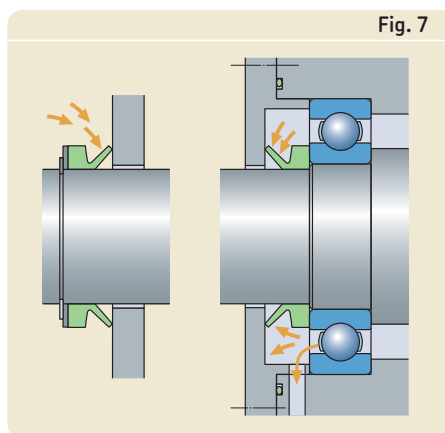


Fig. 7

Sello de anillo en V utilizado para excluir los contaminantes (izquierda) y para la retención del lubricante (derecha)

3 Sellos en máquinas eléctricas

Sellos de eje

con un ajuste a presión sobre un eje. La carcasa ofrece una excelente protección contra los escombros pesados y permite al sello soportar altas velocidades de giro sin necesidad de dispositivos de fijación auxiliares.

Los sellos MVR se utilizan en aquellas aplicaciones de máquinas eléctricas cuyos altos niveles de contaminación reducen la vida útil de los sellos radiales de eje y los rodamientos.

Para obtener el mejor rendimiento, el labio de sellado de los sellos de anillo en V y MVR debe apuntar hacia la zona que se desea proteger, es decir, los anillos en V utilizados para la exclusión de la contaminación deben instalarse fuera del soporte (→ fig. 7 en la **página 58, izquierda**), mientras que los anillos en V para la retención del lubricante deben instalarse dentro del soporte, (→ fig. 7 en la **página 58, derecha**).

Sellos radiales de eje

Los sellos radiales de eje (→ figs. 8 y 9) son sellos de contacto utilizados en aplicaciones lubricadas con grasa o aceite. Estos sellos constan normalmente de una carcasa o refuerzo metálico, un cuerpo de caucho sintético, un labio de sellado y un muelle toroidal. El labio de sellado es presionado contra el eje por el muelle toroidal. Según el material de

sellado y el medio retenido y/o excluido, se pueden utilizar sellos radiales de eje a temperaturas comprendidas entre -60 y $+190$ °C (entre -75 y $+375$ °F).

El borde del labio de sellado y la superficie de contacto del eje constituyen el área de funcionamiento más importante para el sellado radial del eje.

El diseño de sello SKF Wave representa un importante avance en el diseño de sellos radiales de eje. El labio de sellado está moldeado con una forma sinusoidal que amplía considerablemente el área de contacto (→ fig. 10 y 11) sobre la superficie de contacto. La forma sinusoidal crea además un efecto de bombeo para bombear el lubricante de vuelta al sistema de rodamientos y expulsar los contaminantes.

La dureza de la superficie de contacto del sello, es decir, la parte del eje donde hace contacto el labio de sellado, debe ser como mínimo de 55 HRC a una profundidad de, al menos, 0,3 mm. En las aplicaciones con bajas velocidades, una buena lubricación y una contaminación mínima, se puede aceptar una menor dureza. La rugosidad de la superficie debe ajustarse a la norma ISO 6194-1, dentro de los valores orientativos de $R_a = 0,2$ a $0,5$ μm . Para evitar el efecto de bombeo inducido por

Sello de eje utilizado para la retención del lubricante

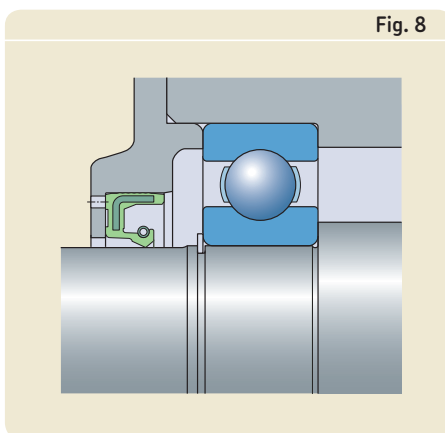


Fig. 8

Sello de eje utilizado para la exclusión de contaminantes

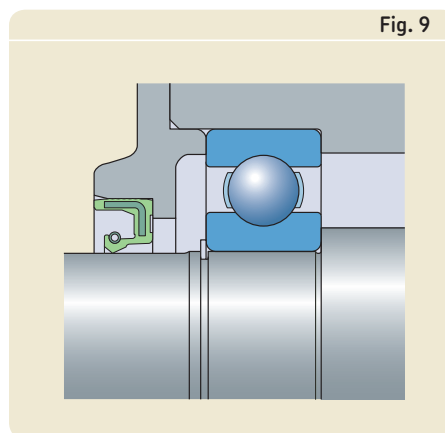


Fig. 9

Labio de sellado convencional con borde recto

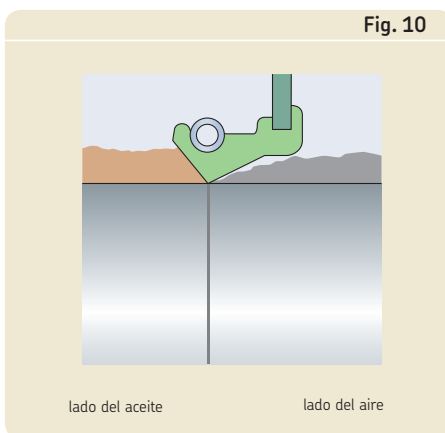


Fig. 10

Labio de sellado SKF Wave con borde del labio de sellado sinusoidal

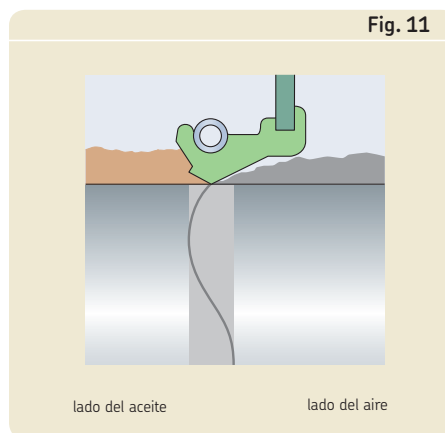


Fig. 11

3 Sellos en máquinas eléctricas

Sellos de eje

los canales del eje, SKF recomienda rectificar en profundidad la superficie de contacto.

Si el propósito principal del sello radial de eje es la retención del lubricante, este debe montarse con el labio hacia el interior (→ **fig. 8**). Si su propósito principal es evitar la entrada de contaminantes, el labio deberá montarse hacia el exterior, en dirección contraria al rodamiento (→ **fig. 9**).

La **tabla 2, página 61**, ofrece un resumen del rendimiento relativo de distintos tipos de sellos. La combinación de sellos de rodamientos con distintos diseños de sellos del eje aumenta el número de barreras y mejora la eficiencia total de sellado que puede requerirse en entornos muy difíciles.

Selección del material de sellado de eje

Además de su diseño, el material del labio de sellado puede tener un impacto significativo en el rendimiento y la confiabilidad del sello.

Los sellos SKF están disponibles en diversos materiales para responder a las necesidades de las distintas aplicaciones de máquinas eléctricas.

Caucho de silicona (sufijo S)

Los sellos de caucho de silicona son especialmente adecuados para aplicaciones a temperaturas muy altas o muy bajas. Deben protegerse de las sustancias abrasivas y no se deben exponer al funcionamiento en seco.

Caucho de nitrilo (sufijo R)

El caucho de nitrilo (NBR), un elastómero resistente al aceite y al desgaste, es un material de uso general para el labio de sellado.

El caucho de nitrilo tolera el funcionamiento en seco del labio de sellado durante breves intervalos de tiempo.

SKF Duralip (sufijo D)

SKF Duralip combina las buenas propiedades técnicas del NBR con una resistencia mejorada al desgaste. Se deben elegir sellos fabricados de este material cuando puedan llegar al labio de sellado contaminantes abrasivos, como arena, tierra y óxido.

SKF Duratemp (sufijo H)

SKF Duratemp combina la mayor resistencia al desgaste de SKF Duralip con un mayor límite superior de temperatura. SKF Duratemp también es más resistente a las sustancias químicas, la intemperie, el envejecimiento y el ozono. No obstante, las mezclas de aceite en el aire pueden tener un efecto negativo. Los sellos de SKF Duratemp se utilizan nor-

malmente en aplicaciones de la industria pesada que requieren una mayor vida útil.

SKF Duralife (sufijo V)

SKF Duralife se caracteriza por su muy buena resistencia al desgaste, térmica y química. Su resistencia a la intemperie y al envejecimiento provocado por la luz ultravioleta y el ozono también es muy buena, y su permeabilidad a los gases es muy ligera.

SKF Duralife presenta unas propiedades excepcionales incluso en condiciones ambientales difíciles. A pedido, se pueden suministrar compuestos de caucho fluorado especiales para bajas temperaturas.

Los sellos fabricados de SKF Duralife también pueden tolerar el funcionamiento en seco del labio durante breves períodos.

Politetrafluoroetileno (PTFE)

El PTFE es un polímero termoplástico compactible con una amplia variedad de lubricantes y presenta una resistencia química muy supe-

¡ADVERTENCIA!

Precauciones de seguridad para el caucho fluorado y el politetrafluoroetileno

El caucho fluorado (FKM) y el politetrafluoroetileno (PTFE) son muy estables e inofensivos hasta una temperatura de funcionamiento normal de 200 °C (390 °F). No obstante, si se exponen a temperaturas extremas superiores a 300 °C (570 °F), como en el caso del fuego o la llama abierta de un soplete de corte, el FKM y el PTFE producen humos peligrosos. Estos humos pueden ser perjudiciales si se inhalan o si entran en contacto con los ojos. Además, una vez que se han calentado los sellos a esas temperaturas, son peligrosos de manipular incluso después de enfriarse. Por consiguiente, nunca deben entrar en contacto con la piel. Si es necesario manipular rodamientos con sellos que hayan sido sometidos a altas temperaturas (por ejemplo, al desmontar el rodamiento, por ejemplo), se deberán adoptar las siguientes precauciones de seguridad:

- Utilice siempre gafas protectoras, guantes y un aparato respiratorio apropiado
- Introduzca los restos de los sellos en un recipiente de plástico hermético señalizado con un símbolo que indique "material con ácidos peligrosos"
- Siga las precauciones de seguridad indicadas en la hoja de datos de seguridad del material correspondiente

Si se produce un contacto involuntario con los sellos, lávese las manos con jabón y abundante agua, enjuáguese los ojos con abundante agua y consulte inmediatamente al médico. Si se han inhalado los humos, consulte inmediatamente al médico. El usuario es el responsable del uso correcto del producto durante su vida útil y de su eliminación correcta. SKF no se responsabiliza de la manipulación inadecuada de los sellos de FKM o PTFE ni de los daños personales derivados de su uso.

3 Sellos en máquinas eléctricas

Sellos de eje

rior a la de cualquier otro material de sellado. El PTFE tiene una superficie lisa resistente a la suciedad. Los sellos fabricados con PTFE pueden soportar altas velocidades periféricas y ofrecen una vida útil prolongada. Los sellos pueden tolerar el funcionamiento en seco y son especialmente útiles en aplicaciones altamente contaminadas, debido a su excelente capacidad de exclusión. El PTFE se utiliza en

elementos auxiliares del sello o en labios de sellado primarios para aplicaciones especiales. Para un rendimiento óptimo, los elementos del sello de PTFE requieren una superficie de contacto del sello de alta calidad y un cuidado adicional durante la instalación.

La **tabla 3, página 61**, ofrece un breve resumen del rendimiento de los materiales utilizados habitualmente para los sellos de eje.

Tabla 2

Diseños de sellos y su rendimiento relativo						
						
Tipo	radial	axial/radial	radial	axial	axial	radial
Aplicación						
Grasa	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Aceite	Sí	Sí	Sí	Niebla	Niebla	Sí
Horizontal	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Vertical	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Rendimiento						
Baja fricción	+++	+++	+	++	++	+
Velocidad	+++	+++	+	++	++	+
Resistencia/duración	+++	+++	+	++	++	+
Retención del lubricante	–	–	○	++	++	++ (+++) ¹⁾
Protección contra el polvo	–	–	+	++	++	+++
Protección contra el agua						
• Estática	–	–	–	+	+	++
• Dinámica	–	–	–	○	○	++ (+++) ¹⁾
• Alta presión	–	–	–	–	○	+
Símbolos: +++ = óptima ++ = muy buena + = buena ○ = aceptable – = no recomendada						
¹⁾ Para la configuración del labio de sellado SKF Wave.						

Tabla 3

Resumen del rendimiento de los materiales de sellado						
	Caucho de silicona	Caucho de nitrilo	SKF Duralip	SKF Duratemp	SKF Duralife	Politretetrafluoroetileno
Designación según						
• ISO	MVQ	NBR	XNBR	HNBR	FPM	PTFE
• ASTM	VMQ	NBR	XNBR	HNBR	FKM	PTFE
• SKF	S	R	D	H	V	T
Temperatura [°C]						
• baja	–70	–40	–40	–40	–40	–80
• alta	+160	+100	+100	+150	+200	+250
Resistencia al desgaste	–	○	+	+	++	+++
Símbolos: +++ = óptima ++ = muy buena + = buena ○ = aceptable – = no recomendada						

Sellos especiales

Los motores específicos, como los motores de engranajes o los motores utilizados en aplicaciones con normas industriales estrictas, como la industria farmacéutica, requieren soluciones de sellado especiales.

Para los motores de engranajes, SKF ha creado la unidad ICOS, formada por un rodamiento rígido de bolas con un sello de aceite integral. Para obtener más información, consulte el **capítulo 8, página 134**.

Sellos mecanizados a medida

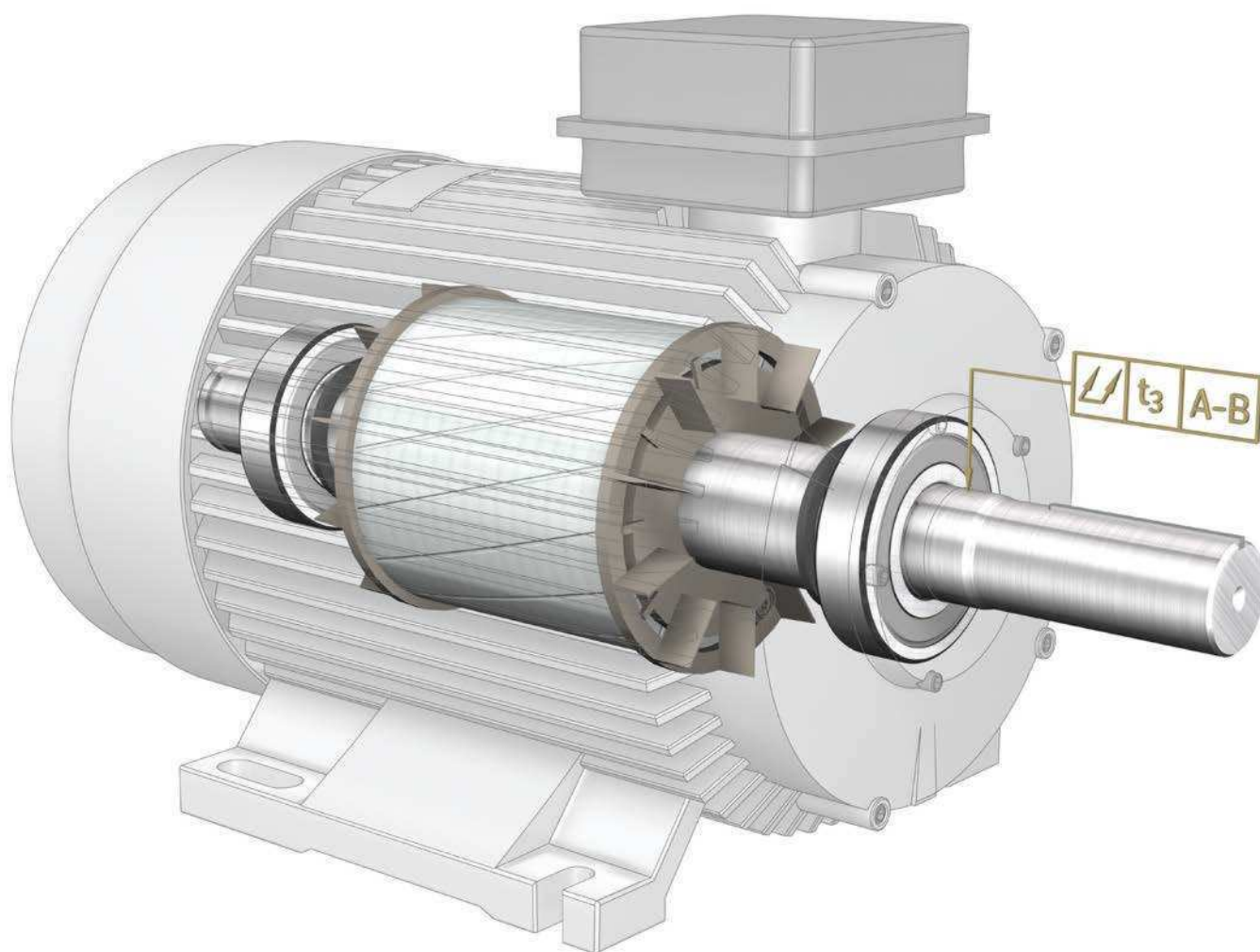
Para requisitos especiales (p. ej., aplicaciones, tamaños y cantidades de fabricación), existe una amplia gama de diseños de sellos en materiales de propiedad exclusiva de alto rendimiento. Estos sellos se fabrican con el sistema de producción SKF SEAL JET, que hace posibles soluciones de sellado a medida económicas.

Para obtener más información sobre los sellos SKF, consulte las publicaciones de SKF *Sellos de eje industriales* y *Sellos mecanizados a medida – Gama de productos* o comuníquese con su representante SKF local. Encontrará también información en skf.com.

4 Tolerancias y ajustes

Tolerancias del eje y del soporte. 66

Ajustes recomendados 68



Tolerancias y ajustes

Un rodamiento es un producto de precisión. Para poder aprovechar al máximo la capacidad de carga del rodamiento, su aro exterior debe estar apoyado en toda su circunferencia y en todo el ancho del camino de rodadura. Este apoyo o asiento del rodamiento deberá ser rígido y parejo, y lo suficientemente preciso para cumplir los objetivos de la aplicación. Lo mismo se puede decir del eje. Deberá ser recto y liso, estar equilibrado y tener las dimensiones correctas.

Tolerancias del eje y del soporte

Para evitar el movimiento del aro interior con respecto al eje, y del aro exterior con respecto al soporte, se deberán aplicar los ajustes correctos en el eje y el soporte. Al mismo tiempo, se deberá mantener el juego interno del rodamiento en funcionamiento dentro de los límites aceptables.

En las aplicaciones de rodamientos, se emplea un número limitado de grados de tolerancia ISO.

La **fig. 1** ilustra la posición de los grados de tolerancia empleados con mayor frecuencia con relación al diámetro del agujero y al diámetro exterior del rodamiento. Las áreas de color azul claro del rodamiento indican la tolerancia del diámetro del agujero y del diámetro exterior respectivamente. Las barras rojas indican el rango de tolerancia de los ejes y los soportes.

Condiciones de carga

A la hora de seleccionar el ajuste para el aro de un rodamiento, se deben tener en cuenta las condiciones de carga existentes. Las condiciones de carga más frecuentes para los

motores eléctricos se muestran en la **fig. 2** en la **página 67**.

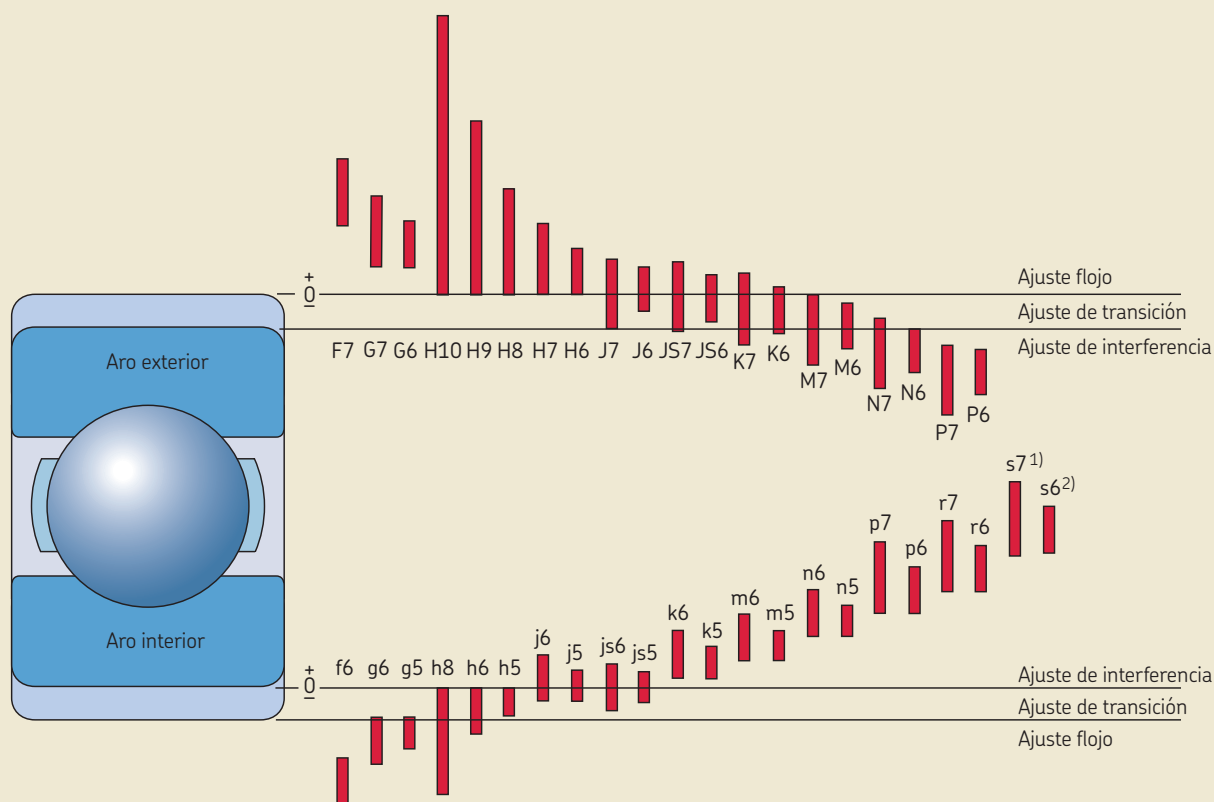
Se dice que una carga es giratoria cuando el aro del rodamiento gira y la carga está fija, o viceversa. El aro sometido a la carga giratoria deberá tener un ajuste de interferencia. El grado de interferencia depende del tipo de rodamiento, el tamaño y las condiciones de funcionamiento, como la temperatura de funcionamiento, el lubricante y la velocidad.

Se dice que una carga es fija cuando tanto el aro del rodamiento como la carga permanecen fijos, o cuando el aro y la carga giran a la misma velocidad y en la misma dirección, de forma que se mantiene constante la zona de carga. En estas condiciones, el aro del rodamiento tiene normalmente un ajuste flojo.

Cuando la dirección de la carga es indeterminada, especialmente si existen cargas pesadas, SKF recomienda un ajuste de interferencia para ambos aros. Se recomienda aplicar el mismo ajuste del aro interior que para una carga giratoria. El aro exterior puede tener un ajuste ligeramente más flojo. Los rodamientos que pueden absorber el desplazamiento axial internamente (como los rodamientos de rodillos toroidales CARB y algunos rodamientos de rodillos cilíndricos) suelen tener un ajuste de interferencia en ambos aros.

Tolerancias

Fig. 1



¹⁾ $s7_{\min} \pm IT7/2$
²⁾ $s6_{\min} \pm IT6/2$

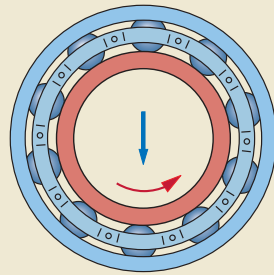
4 Tolerancias y ajustes

Tolerancias del eje y del soporte

Condiciones de carga
en motores eléctricos

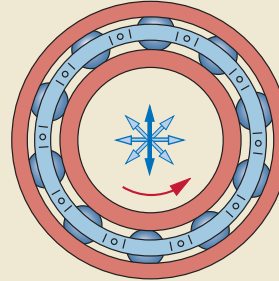
Fig. 2

Transmisión por correa o masa del rotor
pesada, pequeño desequilibrio



Aro interior:
Carga giratoria; se recomienda
ajuste de interferencia
Aro exterior:
Carga fija; se recomienda ajuste flojo¹⁾

Acoplamiento o masa de rotor ligera,
desequilibrio significativo



Aro interior:
Carga indeterminada; se recomienda
ajuste de interferencia
Aro exterior:
Carga indeterminada; se recomienda
ajuste de interferencia

¹⁾ Los rodamientos que pueden absorber el desplazamiento axial en su interior, como los rodamientos de rodillos toroidales CARB, suelen instalarse con un ajuste de interferencia en los dos aros.

Influencia de la magnitud de la carga

Para evitar el deslizamiento (movimiento giratorio muy lento de un aro sobre su asiento o en el interior de este), el ajuste deberá seleccionarse en función de la carga y el tamaño del rodamiento. Cuanto más pesada sea la carga o mayor sea el rodamiento, más apretado deberá ser el ajuste de interferencia.

Importancia de aplicar ajustes apropiados

Unos ajustes adecuados del rodamiento en el eje y el soporte son esenciales para conseguir

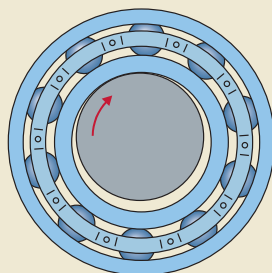
una larga vida útil del rodamiento. Si los ajustes están demasiado flojos, se puede producir corrosión de contacto, adherencias y desgaste (→ fig. 3). Si hay cargas pesadas, existe incluso riesgo de fractura de los aros.

Si los ajustes son demasiado apretados, la reducción del juego interno del rodamiento puede provocar un juego interno de funcionamiento demasiado pequeño. Esto puede aumentar significativamente las temperaturas de funcionamiento, acelerar el deterioro del lubricante y provocar un fallo prematuro del rodamiento. En los casos graves, se puede fracturar el aro.

Consecuencias
derivadas de los
ajustes incorrectos

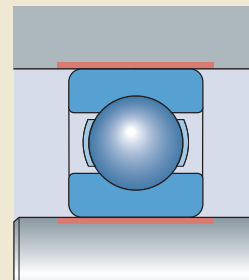
Fig. 3

Demasiado flojo



- El movimiento relativo puede generar
 - desgaste
 - corrosión de contacto
 - adherencia
- Riesgo de fractura del aro

Demasiado apretado



- Una reducción excesiva del juego interno puede
 - aumentar significativamente la temperatura de funcionamiento
 - acelerar el deterioro del lubricante
- La dilatación térmica puede provocar la fractura del aro

Ajustes recomendados

Las recomendaciones de ajustes de rodamientos para ejes macizos de motores eléctricos se pueden encontrar en

Tabla 1: rodamientos radiales con agujero cilíndrico

Tabla 2 en la **página 69:** rodamientos axiales

y para soportes de fundición y acero, en:

Tabla 3 en la **página 69:** rodamientos radiales, soportes enterizos.

Estas recomendaciones se basan en las directrices generales de selección de rodamientos, el desarrollo del diseño de los rodamientos y años de experiencia con una amplia gama de

rodamientos para aplicaciones de motores eléctricos. Los rodamientos modernos pueden soportar cargas considerablemente mayores que los rodamientos convencionales anteriores, y las recomendaciones reflejan estas condiciones más exigentes.

Se ofrece más información sobre los ajustes recomendados en el *Catálogo de rodamientos SKF* o en línea, en skf.com.

Nota

Si se tienen que aplicar ajustes apretados y hay riesgo de que el juego interno del rodamiento se vea reducido significativamente debido a ese ajuste apretado y/o a la diferencia de temperatura entre el aro interior y exterior, deberá utilizarse un rodamiento con

Tabla 1

Ajustes para ejes macizos de acero

Rodamientos radiales con agujero cilíndrico

Condiciones	Diámetro del eje [mm] Rodamientos de bolas ²⁾	Rodamientos de rodillos cilíndricos	Rodamientos de rodillos a rótula y toroidales CARB	Clase de tolerancia ¹⁾
Carga giratoria sobre el aro interior o dirección indeterminada de la carga				
Cargas ligeras o variables ($P \leq 0,05 C$)	≤ 17 >17 a 100 >100 a 140 –	– ≤ 25 >25 a 60 >60 a 140	– – – –	js5 j6 k6 m6
Cargas normales o pesadas ($P > 0,05 C$)	≤ 10 >10 a 17 >17 a 100 – >100 a 140 >140 a 200 – >200 a 500 – >500	– – – ≤ 30 >30 a 50 – >50 a 65 >65 a 100 >100 a 280 – >280 a 500 >500	– – – – >40 a 60 >60 a 100 >100 a 200 – >200 a 500 >500	js5 j5 k5 k6 m5 m6 n5 ³⁾ n6 ³⁾ p6 ⁴⁾ p7 ³⁾ r6 ³⁾ r7 ³⁾
Cargas pesadas o muy pesadas y cargas de choque con condiciones de trabajo difíciles ($P > 0,1 C$)	– – – – –	>50 a 65 >65 a 85 >85 a 140 >140 a 300 >300 a 500 >500	>50 a 70 – >70 a 140 >140 a 280 >280 a 400 >400	n5 ³⁾ n6 ³⁾ p6 ⁵⁾ r6 ⁶⁾ $s6 \min \pm IT6/2^{5)7)}$ $s7 \min \pm IT7/2^{5)7)}$

¹⁾ Todas las clases de tolerancia ISO son válidas con el requisito de recubrimiento (como H7/E) según la norma ISO 14405-1.

²⁾ Los rodamientos de bolas bajo cargas normales o pesadas ($P > 0,05 C$) a menudo requieren un juego radial interno superior al Normal cuando se aplican las clases de tolerancia del eje indicadas más arriba. Si el juego radial es superior al Normal pero las condiciones de funcionamiento requieren ajustes más apretados para evitar que el aro interior se deslice, aplique las siguientes clases de tolerancia:

- k4/E para diámetros de eje de 10 a 17 mm
- k5/E para diámetros de eje >17 a 25 mm
- m5/E para diámetros de eje >25 a 140 mm
- n6/E para diámetros de eje >140 a 300 mm
- p6/E para diámetros de eje >300 a 500 mm

Para obtener más información, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

³⁾ Pueden ser necesarios rodamientos con un juego radial interno superior al Normal.

⁴⁾ Los rodamientos con juego radial interno superior al Normal se recomiendan para $d \leq 150$ mm. Cuando $d > 150$ mm, puede ser necesario usar rodamientos con un juego radial interno superior al Normal.

⁵⁾ Se recomienda el uso de rodamientos con juego radial interno superior al Normal.

⁶⁾ Pueden ser necesarios rodamientos con un juego radial interno superior al Normal. Para rodamientos de rodillos cilíndricos, se recomienda un juego radial interno superior al Normal.

⁷⁾ Para los valores de tolerancia, consulte la **tabla 5, página 71**.

4 Tolerancias y ajustes

Ajustes recomendados

un juego interno mayor del que se usaría normalmente (→ **capítulo 1, Selección de rodamientos, página 15**).

Cuando haya que cambiar un rodamiento de un motor eléctrico, deben verificarse los asientos del eje y del soporte. El manual de mantenimiento del fabricante del motor debería incluir información sobre los ajustes aplicados. Si no dispone de esa información,

consulte la **tabla 1** en la **página 68** y las **tablas 2 y 3** en la **página 69**.

Tabla 2

Ajustes para ejes de acero macizos (para rodamientos axiales)

Condiciones	Diámetro del eje [mm]	Clase de tolerancia ¹⁾
Cargas radiales y axiales combinadas sobre rodamientos axiales de rodillos a rótula		
Carga fija sobre la arandela de eje	≤250	j6
	>250	js6
Carga giratoria sobre la arandela de eje, o dirección de carga indeterminada	≤200	k6
	>200 a 400	m6
	>400	n6

¹⁾ Todas las clases de tolerancia ISO son válidas con el requisito de recubrimiento (como H $\oplus$) según la norma ISO 14405-1.

Tabla 3

Ajustes para soportes enterizos de fundición y acero (para rodamientos radiales)

Condiciones	Ejemplos	Clase de tolerancia ¹⁾²⁾	Desplazamiento del aro exterior
Carga fija sobre el aro exterior			
Cargas de todas clases	Motores eléctricos catalogados	H6 (H7³⁾)	Es posible el desplazamiento
Conducción de calor a través del eje, refrigeración eficiente del estátor	Grandes máquinas eléctricas con rodamientos de rodillos a rótula. Motores de inducción	G6 (G7⁴⁾)	Es posible el desplazamiento
Funcionamiento preciso y silencioso	Motores eléctricos pequeños	J6⁵⁾	En la mayoría de los casos, es posible el desplazamiento
Dirección indeterminada de la carga			
Cargas ligeras y normales (P ≤ 0,1 C), desplazamiento axial del aro exterior deseable	Máquinas eléctricas medianas	J7⁶⁾	En la mayoría de los casos, es posible el desplazamiento
Cargas normales y pesadas (P > 0,05 C), desplazamiento axial del aro exterior innecesario	Máquinas eléctricas de tamaño medianas o grandes con rodamientos de rodillos cilíndricos o rodamientos de rodillos toroidales CARB	K7	En la mayoría de los casos, no es posible el desplazamiento
Grandes cargas de choque	Grandes motores de tracción	M7	No es posible el desplazamiento

¹⁾ Todas las clases de tolerancia ISO son válidas con el requisito de recubrimiento (como H7 $\oplus$) según la norma ISO 14405-1.

²⁾ Para todos los rodamientos, cuando D ≤ 100 mm, a menudo se prefiere el grado de tolerancia IT6, el cual está recomendado para los rodamientos con aros de paredes finas, como en las series de diámetros 7, 8 o 9. Para estas series, también se recomiendan las tolerancias de variación radial total IT4.

³⁾ Para rodamientos grandes (D > 250 mm). Si hay diferencias de temperatura entre el aro exterior y el soporte superiores a 10 °C, se deberá aplicar G7 en lugar de H7.

⁴⁾ Para rodamientos grandes (D > 250 mm). Si hay diferencias de temperatura entre el aro exterior y el soporte superiores a 10 °C, se deberá aplicar F7 en lugar de G7.

⁵⁾ Cuando se precise un desplazamiento fácil, se deberá usar H6 en lugar de J6.

⁶⁾ Cuando se precise un desplazamiento fácil, se deberá usar H7 en lugar de J7.

Ajustes para soportes de aluminio

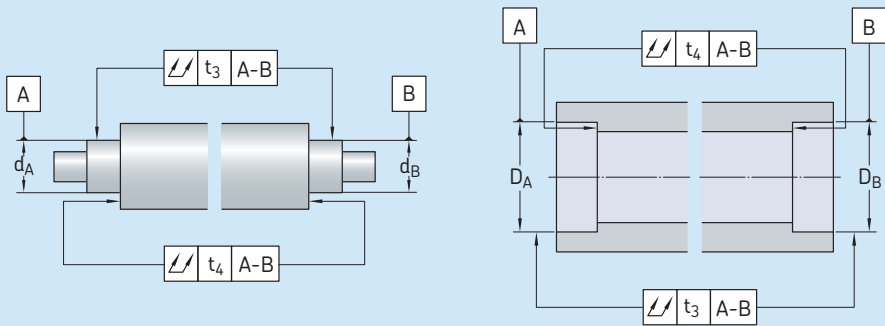
El coeficiente de dilatación del aluminio es más del doble del coeficiente de la fundición o el acero. Debido a ello, en especial en los motores con soportes de aluminio, se deberán adoptar medidas para sostener el aro exterior y evitar que gire en su asiento. Para ello, comience seleccionando una tolerancia más apretada para el soporte; por ejemplo, use J7 en lugar de H7. Una forma más efectiva de evitar el giro del aro exterior es cortar una ranura para junta tórica en el asiento del rodamiento e instalar una junta tórica de caucho. Si el diseño es correcto, la junta tórica ejercerá una presión suficiente para que el aro exterior del rodamiento se mantenga en su posición y no pueda girar en el agujero del soporte (→ fig. 4, capítulo 2 en la página 42).

Influencia de la diferencia de temperatura al seleccionar el ajuste del soporte

Los motores eléctricos y los generadores producen calor en el rotor y en las bobinas del estátor, y suelen estar dotados de un ventilador interno para la refrigeración. El flujo de aire forzado disipa el calor no deseado del soporte (placa de protección del extremo del motor) y puede crear una diferencia de temperatura entre el soporte y el aro exterior del rodamiento. Esto puede causar un problema en el rodamiento libre si tiene que desplazarse en sentido axial en su asiento para absorber la elongación térmica del eje. Para corregir el problema, cambie a un ajuste del soporte más flojo (por ejemplo, de H7 a G6) o coloque el rodamiento libre en sentido axial en una posición en la que haya un flujo de aire caliente contra la placa de protección del extremo.

Tabla 4

Tolerancias geométricas de los asientos de rodamientos sobre los ejes y en los soportes



Superficie Característica	Símbolo de característica geométrica	zona de tolerancia	Desviaciones admisibles		
			Rodamientos de la clase de tolerancia ¹⁾ Normal	P6	P5

Asiento cilíndrico						
Variación radial total		t ₃	IT5/2	IT4/2	IT3/2	IT2/2
Tope plano						
Variación axial total		t ₄	IT5	IT4	IT3	IT2

Explicación	
Para requisitos normales	Para requisitos especiales de precisión de giro o apoyo uniforme

¹⁾ Para rodamientos con una clase de tolerancia superior a la Normal (clase de tolerancia P4, etc.), consulte Rodamientos de superprecisión (→ skf.com/super-precision).

¹⁾ Para rodamientos con una clase de tolerancia superior a la Normal (clase de tolerancia P4, etc.), consulte Rodamientos de superprecisión (→ skf.com/super-precision).

Cargas giratorias o vibraciones y ajuste flojo del aro exterior

En algunas aplicaciones, la dirección de la carga es indeterminada, como en:

- pequeños motores con masa del rotor ligera y desequilibrio
- motores con fuertes e intensos niveles de vibración, como los generadores conectados a motores de combustión

En estas condiciones, si se usa un rodamiento no desmontable, como los rodamientos rígidos de bolas, en la posición libre, existe un riesgo de que el aro exterior se deslice en su asiento, y que cause un desgaste excesivo. Un ejemplo de este caso son las aplicaciones navales, en las que los motores están sometidos a vibraciones relativamente grandes.

Existen dos formas sencillas de mantener el aro exterior en su posición y eliminar prácticamente el desgaste causado por el deslizamiento del aro en su asiento.

La solución más sencilla es precargar los rodamientos mediante muelles en sentido axial (aplicada a motores pequeños). Otro método es instalar una junta tórica en una ranura en el soporte. Según la aplicación, se puede usar uno de estos métodos para mantener el aro exterior en su posición.

Si ninguno de ellos es suficiente, se puede someter el asiento del soporte a un tratamiento térmico o un tratamiento superficial, o se puede usar una inserción endurecida.

Aumentar la dureza superficial de 30 a 35 HRC ha demostrado ser una solución eficaz.

Agente anticorrosión SKF LGAF 3E

SKF ofrece un agente anticorrosión de alto rendimiento: SKF LGAF 3E. Es una pasta gris y suave desarrollada especialmente para evitar la corrosión de contacto entre superficies metálicas en disposiciones con ajuste flojo.

Tolerancias geométricas de los asientos y topes de rodamientos

El asiento de un rodamiento cilíndrico y el reborde del tope, ya sea en el eje o en el soporte, deberán corresponderse con la clase de tolerancia del rodamiento seleccionado (→ **tabla 4** en la **página 70** y **tabla 5** en la **página 71**). Las tolerancias que hay que considerar incluyen:

- tolerancias de variación radial total (t_3)
- tolerancias de variación axial total (t_4)

Para obtener más información sobre tolerancias y ajustes, así como tolerancias geométricas para los asientos y topes de rodamientos en los ejes y soportes, visite skf.com o consulte el *Catálogo de rodamientos SKF*.

Tabla 5

Grados de tolerancia ISO para dimensiones		Grado de tolerancia				
Dimensión nominal						
más de	incl.	IT4 máx.	IT5	IT6	IT7	IT8
mm		μm				
1	3	3	4	6	10	14
3	6	4	5	8	12	18
6	10	4	6	9	15	22
10	18	5	8	11	18	27
18	30	6	9	13	21	33
30	50	7	11	16	25	39
50	80	8	13	19	30	46
80	120	10	15	22	35	54
120	180	12	18	25	40	63
180	250	14	20	29	46	72
250	315	16	23	32	52	81
315	400	18	25	36	57	89
400	500	20	27	40	63	97
500	630	—	32	44	70	110
630	800	—	36	50	80	125

5 Lubricación

Lubricación	73
Lubricación con grasa	74
Selección de la grasa	76
Intervalos de relubricación	80
Vida útil de la grasa en rodamientos tapados	86
Lubricación con aceite	88



Lubricación

Para que los rodamientos funcionen de forma confiable y alcancen su vida útil potencial completa, deben lubricarse adecuadamente. La función del lubricante es formar una película de aceite protectora que separe las superficies de contacto de rodadura y evite el contacto entre metales. El lubricante también protege al rodamiento y sus componentes asociados contra la corrosión. Cuando se usa grasa como lubricante, esta también puede ayudar a proteger el rodamiento contra los contaminantes como la suciedad, el polvo y el agua. Los sistemas de lubricación por recirculación de aceite suelen tener un sistema de filtrado que elimina los contaminantes del fluido, lo que prolonga la vida útil del lubricante y de los rodamientos.

Lubricación

Algunas de las importantes propiedades de un lubricante son la viscosidad, la capacidad de formación de película y la consistencia (para la grasa). Los factores más importantes para la determinación del espesor de la película son:

- el tamaño del rodamiento
- la velocidad de giro
- la temperatura del rodamiento
- la carga
- la viscosidad del aceite base

Condiciones de lubricación: la relación de viscosidad κ

La eficacia de un lubricante viene determinada fundamentalmente por el grado de separación entre las superficies de contacto de rodadura. Para que se forme una película de lubricante adecuada, este debe tener una viscosidad mínima determinada cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento. Las condiciones del lubricante se describen según la relación de viscosidad κ como la relación entre la viscosidad real ν y la viscosidad nominal ν_1 necesaria para una

lubricación adecuada, cuando el lubricante está a una temperatura de funcionamiento normal. Esto se deriva de la aplicación de

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1}$$

donde

κ = relación de viscosidad

ν = viscosidad de funcionamiento real del lubricante [mm²/s]

ν_1 = viscosidad nominal del lubricante según el diámetro medio del rodamiento y la velocidad de giro [mm²/s].

Véanse los **diagramas 6 y 7** de la **página 89**.

Esta información también es válida para la viscosidad del aceite base de las grasas y aceites lubricantes.

Para los motores eléctricos en condiciones de funcionamiento normales, la relación de viscosidad κ deberá ser superior a 1.

Lubricación con grasa

En condiciones de velocidad y temperatura normales, los rodamientos de los motores eléctricos se suelen lubricar con grasa. La grasa ofrece numerosas ventajas en comparación con el aceite. Permite unos diseños de soportes y sellado más sencillos y rentables, y ofrece a la vez mejor adherencia y protección contra los contaminantes.

Los mecanismos típicos de lubricación con grasa en los rodamientos se muestran en la **fig. 1**.

¿Qué es la grasa?

Las grasas lubricantes están compuestas por un aceite base mineral o sintético combinado con un espesante, por lo general un jabón metálico. Pero también se pueden usar otros espesantes, como la poliurea, para conseguir un rendimiento excepcional a altas temperaturas. El aceite base constituye el 85%–90% de la grasa, y el espesante, alrededor del 10%. También se incluirán aditivos para mejorar algunas propiedades de la grasa.

Consistencia

Las grasas se dividen en diferentes clases de consistencia de acuerdo con la escala del Instituto Nacional de Grasas Lubricantes (National Lubricating Grease Institute, NLGI). La consistencia de la grasa usada para la lubricación de un rodamiento no deberá experimentar cambios drásticos al funcionar dentro del rango de temperaturas especificado después del trabajo mecánico. Las grasas que se ablandan a elevadas temperaturas pueden escapar de la disposición de rodamientos. Las grasas que se endurecen a bajas temperaturas pueden restringir el giro del rodamiento u ofrecer una separación de aceite insuficiente.

En los rodamientos de motores eléctricos y generadores se usan normalmente dos grados:

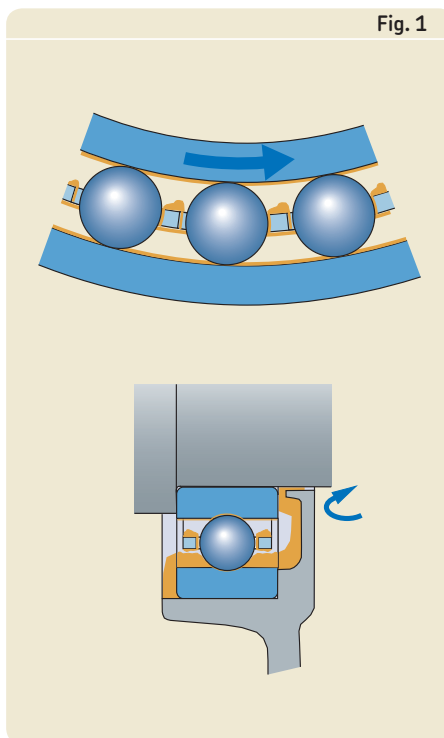
Grasa blanda: baja consistencia, grado NLGI 2.

Grasa dura: alta consistencia, grado NLGI 3.

Rango de temperaturas: el concepto del semáforo de SKF

El rango de temperaturas dentro del cual se puede usar una grasa depende principalmente del tipo de aceite base y espesante empleados, así como de los aditivos. En el **diagrama 1, página 75**, se ilustran de un modo esquemático las temperaturas correspondientes, en forma de “doble semáforo”.

Fig. 1



Mecanismos de lubricación en un rodamiento

Los límites de temperatura extremos, es decir, el límite inferior de temperatura y el superior, están bien definidos:

- El límite inferior de temperatura (low temperature limit, LTL) es la temperatura más baja a la que la grasa permitirá que el rodamiento se ponga en funcionamiento sin dificultad. Está determinado en gran medida por el tipo de aceite base y su viscosidad.
- El límite superior de temperatura (high temperature limit, HTL) está determinado por el tipo de espesante, y para las grasas con una base de jabón, coincide con el punto de goteo. El punto de goteo indica la temperatura a la cual la grasa pierde su consistencia y se fluidifica.

Evidentemente, no se recomienda el funcionamiento por debajo del límite inferior de temperatura ni por encima del límite superior, tal como se muestra en el **diagrama 1** por medio de las zonas rojas. Aunque los proveedores de grasa indican los valores específicos de los límites de temperatura inferior y superior en su información del producto, las temperaturas verdaderamente importantes para un funcionamiento confiable están determinadas por los valores de SKF para:

5 Lubricación

Lubricación con grasa

- el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (low temperature performance limit, LTPL)
- el límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz (high temperature performance limit, HTPL)

Es dentro de estos dos límites, la zona verde del **diagrama 1**, donde la grasa tendrá un funcionamiento confiable y se podrá calcular su vida útil. Debido a que la definición del límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz no está estandarizada internacionalmente, se debe tener precaución a la hora de interpretar los datos del proveedor.

A temperaturas por encima del límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz (HTPL), la grasa envejecerá y se oxidará con mayor rapidez, y los derivados de la oxidación perjudicarán la lubricación. Por lo tanto, el funcionamiento a temperaturas de la zona ámbar, entre el límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz (HTPL) y el límite superior de temperatura (HTL), solo debe alcanzarse durante períodos breves.

Existe también una zona ámbar para las bajas temperaturas. Al descender la temperatura, se reduce la tendencia a la separación de grasa y el espesor (la consistencia) de la grasa aumenta. Esto provocará finalmente un suministro insuficiente de lubricante a las superficies de contacto de los elementos rodantes y

los caminos de rodadura. En el **diagrama 1**, esta temperatura se encuentra indicada por el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (LTPL). Los valores para el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz son diferentes para los rodamientos de rodillos y de bolas. Debido a que los rodamientos de bolas son más fáciles de lubricar que los de rodillos, el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz es menos importante para los rodamientos de bolas.

Importante

No obstante, se pueden producir graves daños en los rodamientos de rodillos cuando estos funcionan continuamente por debajo de este límite.

Los cortos períodos en esta zona, p. ej., durante el arranque en frío, no son perjudiciales, ya que el calor originado por la fricción hará que la temperatura del rodamiento alcance la zona verde.

Las grasas SKF utilizadas habitualmente aparecen indicadas en el **diagrama 2**.

Diagrama 1

El concepto del semáforo de SKF

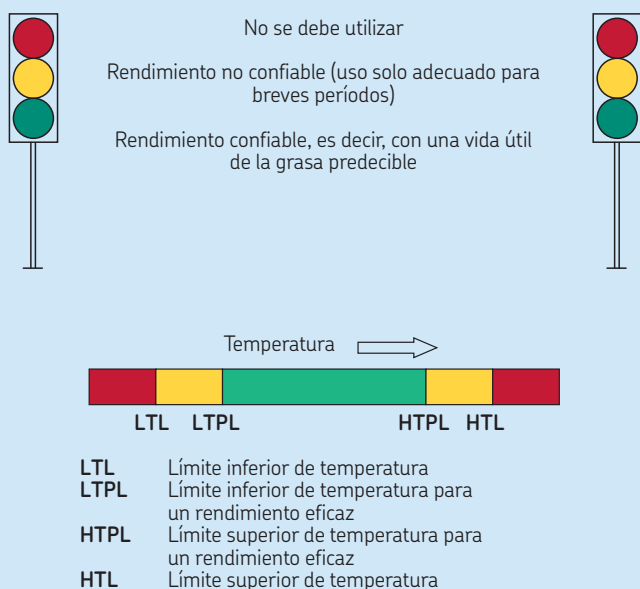
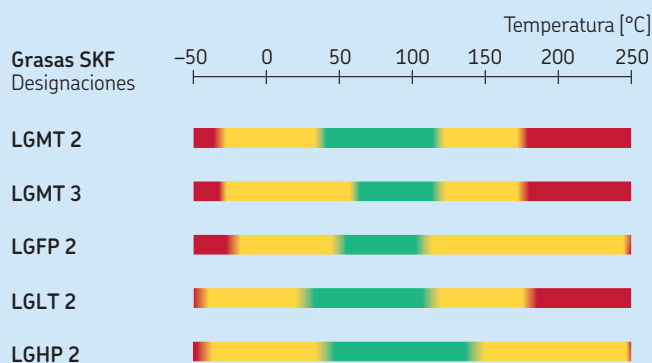


Diagrama 2

El concepto del semáforo de SKF: grasas SKF en motores eléctricos



Para temperaturas de funcionamiento por encima de 150 °C, se recomienda usar SKF LGET 2

Aditivos

Para obtener una grasa con propiedades especiales, se incluyen uno o varios aditivos. A continuación, se citan algunos de los más usados:

- Aditivo anticorrosivo para mejorar la protección contra la corrosión.
- Antioxidantes para retrasar la degradación de las grasas.
- Aditivos de presión extrema (extreme pressure, EP) para aumentar la capacidad de carga de la película de aceite. Hay que tener en cuenta que los aditivos EP pueden ser perjudiciales para los rodamientos por encima de 80 °C (176 °F). En aplicaciones de motores eléctricos, los aditivos EP no se recomiendan casi nunca, debido a las cargas moderadas que se aplican y a las temperaturas de funcionamiento relativamente altas.

Selección de la grasa

Usar el mejor lubricante y el más adecuado para las condiciones de funcionamiento específicas tiene una importancia esencial para obtener un rendimiento y una confiabilidad del motor apropiados. Para una correcta selección, se deberán considerar los siguientes aspectos:

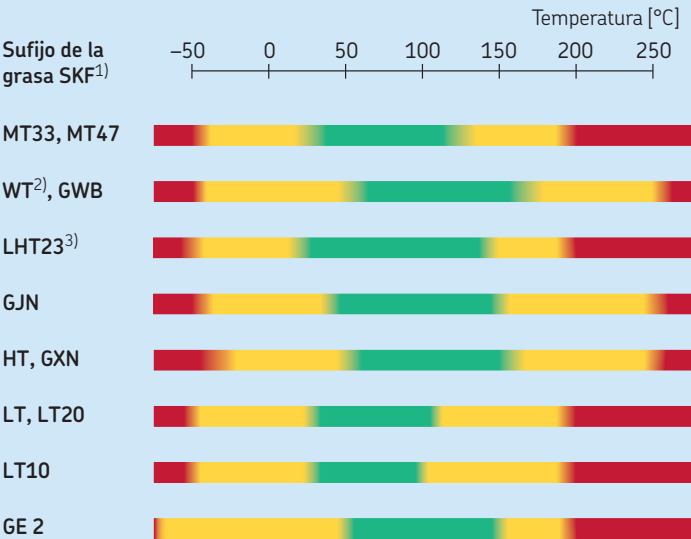
- tipo y tamaño del rodamiento
- temperatura de funcionamiento
- carga
- rango de velocidades
- condiciones de funcionamiento, por ejemplo, niveles de vibración, orientación del eje (horizontal o vertical)
- refrigeración
- eficacia de sellado
- ambiente

Grasas SKF

En los rodamientos pequeños y medianos, en los que la vida útil de la grasa es superior a la vida nominal SKF calculada de los rodamientos, una sola carga de grasa es suficiente. En este caso, la grasa se deberá retener en el rodamiento y evitar que salga.

Diagrama 3

Grasas SKF estándares y específicas de la aplicación para rodamientos rígidos de bolas engrasados de por vida en motores eléctricos



¹⁾ Sufijo de la grasa en la designación del rodamiento, por ejemplo 6204-2Z/C3WT. Los rodamientos con grasas estándares no tienen sufijo de designación. La información sobre la grasa estándar figura en la **tabla 1, página 77**.
²⁾ Grasa de alto rendimiento para motores eléctricos pequeños y medianos. Amplio rango de temperaturas
³⁾ Grasa de baja fricción, muy silenciosa, para motores eléctricos pequeños. Amplio rango de temperaturas
⁴⁾ GE 2 es la grasa estándar para el llenado de fábrica de rodamientos rígidos de bolas energéticamente eficientes (diseño E2) de baja fricción

5 Lubricación

Selección de la grasa

En los rodamientos sellados y engrasados de por vida en aplicaciones de motores eléctricos, SKF recomienda las grasas que se indican en el **diagrama 3, página 76**.

La **tabla 2** indica las grasas SKF adecuadas para relubricación de rodamientos abiertos en motores eléctricos.

Nunca se deben mezclar grasas de distintos tipos, pues podrían no ser compatibles (→ **tabla 3, página 78**). Mezclar diferentes tipos de grasa puede provocar una reducción del rendimiento.

También es importante tener en cuenta la compatibilidad de la grasa con los sellos de caucho y los diferentes materiales de la jaula:

- En general, las grasas con contenido de aceites de éster no son compatibles con el caucho ACM (el ACM, copolímero de alquilacrilato, es un tipo de caucho con una excelente resistencia al aceite caliente y la oxidación).

- Las mezclas de caucho SKF estándar son compatibles con las grasas SKF estándares.
- Los aditivos EP que contienen azufre son agresivos para las jaulas de latón a temperaturas superiores a 100 °C (210 °F).
- Los aditivos EP pueden ser agresivos para el material de las jaulas estándares de poliamida 66 (sufijo de designación TN9 o P) a temperaturas superiores a 110 °C (230 °F).

La **tabla 1** muestra las grasas estándares SKF para rodamientos rígidos de bolas con placas de protección o sellados rellenos de fábrica, según la serie del rodamiento y los valores del diámetro del agujero y el diámetro exterior del rodamiento.

Tabla 1

Grasas SKF estándares para rodamientos rígidos de bolas sellados o con placas de protección				
Rodamientos de serie de diámetros	Grasas SKF estándares en rodamientos con diámetro exterior			
	D ≤ 30 mm d < 10 mm	d ≥ 10 mm	30 < D ≤ 62 mm	D > 62 mm
8, 9	LHT23	LT10	MT47	MT33
0, 1, 2, 3	MT47	MT 47	MT47	MT33

Tabla 2

Grasas SKF adecuadas para relubricación de rodamientos en motores eléctricos	
Designación de grasa SKF	Uso, propiedades
LGMT 2	Rodamientos pequeños (diámetro exterior hasta aprox. 62 mm) Cargas ligeras a moderadas Temperaturas moderadas Baja fricción, silenciosa, buena protección contra la corrosión
LGMT 3	Rodamientos medianos (diámetro exterior >62 mm hasta aprox. 240 mm) Cargas moderadas Temperaturas moderadas Grasa multiuso, buena protección contra la corrosión Ejes verticales
LGLT 2	Rodamientos pequeños con cargas ligeras a altas velocidades Bajas temperaturas Baja fricción, hidrófuga
LGFP 2	Bajas temperaturas Compatible con alimentos Hidrófuga
LGHP 2	Amplio rango de temperaturas Baja fricción en el arranque, silenciosa, buena protección contra la corrosión Altas velocidades Ejes verticales Vida útil muy larga a altas temperaturas

Parámetros de funcionamiento de los rodamientos: explicación de las descripciones de la tabla 2

Temperatura

EH = Extremadamente alta	>150 °C (300 °F)
H = Alta	>100 °C (210 °F)
M = Media, moderada	de 50 a 100 °C (de 120 a 210 °F)
L = Baja	< 50 °C (120 °F)

Carga

H = Alta	C/P ~4
M = Media, moderada	C/P ~8
L = Baja	C/P ≥15

Velocidad de los rodamientos de bolas

EH = Extremadamente alta	n d _m superior a 700 000
VH = Muy alta	n d _m hasta 700 000
H = Alta	n d _m hasta 500 000
M = Media, moderada	n d _m hasta 300 000
L = Ligera	n d _m inferior a 100 000

Velocidad de los rodamientos de rodillos

H = Alta
M = Media, moderada
L = Baja

Rodamientos de agujas, de rodillos a rótula, de rodillos cónicos, de rodillos toroidales CARB

n d _m superior a 210 000
n d _m hasta 210 000
n d _m hasta 75 000

Rodamientos de rodillos cilíndricos

n d _m superior a 270 000
n d _m hasta 270 000
n d _m hasta 75 000

n d_m = velocidad de giro, r. p. m. × 0,5 (D + d), mm

Cómo engrasar un rodamiento

Las técnicas de engrase varían en función del diseño del rodamiento y su soporte. Sin embargo, hay un factor que permanece constante en todos los tipos de rodamiento, y es que un llenado excesivo de la cavidad del rodamiento con grasa provocará un aumento de temperaturas y, posiblemente, el fallo del rodamiento. Cuando engrase un rodamiento, asegúrese de dejar espacio suficiente en el soporte para que la grasa pueda ser expulsada del rodamiento durante la puesta en marcha. En los motores de gran velocidad, la cantidad de grasa deberá mantenerse en un nivel bajo. Para obtener más información, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Siempre que sea posible, los rodamientos abiertos deberán engrasarse después de montarlos (→ fig. 2). Los rodamientos no desmontables, como los rodamientos rígidos de bolas, los rodamientos de bolas de contacto angular, los rodamientos de rodillos a rótula y los rodamientos de rodillos toroidales CARB, deberán llenarse con grasa por ambos lados, si es posible. En muchos casos, el espacio es tan limitado que no se puede engrasar el rodamiento por el lado en que está montado en el rotor. En ese caso, deberá engrasarse por la parte delantera con una pistola engrasadora (por ejemplo, SKF 1077600) o una herramienta engrasadora (por ejemplo, SKF LAGP 400). Compruebe que el rodamiento está

totalmente lleno y que la grasa ha penetrado en el rodamiento y sale por el otro lado. De los tipos de rodamientos que se usan en aplicaciones de motores eléctricos, los rodamientos de rodillos cilíndricos son desmontables, y el diseño utilizado con más frecuencia es el NU (dos pestañas en el aro exterior y ninguna en el aro interior). El aro exterior con la jaula y los elementos rodantes puede y debe engrasarse cuando está separado durante la operación de montaje. Monte el aro interior en el eje y aplique una fina capa de grasa en el camino de rodadura, con el fin de evitar rayar el aro interior durante el montaje (→ capítulo 6, página 93).

Aplique grasa en el aro exterior, la jaula y los elementos rodantes, y verifique que todos los espacios estén bien llenos. Monte el aro exterior en el soporte (placa de protección del motor). A continuación, proceda al montaje de la placa de protección del motor en el soporte del motor. Por último, gire el rotor manualmente varias veces a baja velocidad para asegurarse de engrasar el camino de rodadura del aro exterior.

Engrase de un rodamiento rígido de bolas montado en un eje de rotor

Tabla 3

Compatibilidad de la grasa						
Aceites base	Aceite mineral	Aceite de éster	Poliglicol	Silicona: mentilo	Silicona: fenilo	Éter de polifenilo
Aceite mineral	+	+	–	–	+	•
Aceite de éster	+	+	+	–	+	•
Poliglicol	–	+	+	–	–	–
Silicona: mentilo	–	–	–	+	+	–
Silicona: fenilo	+	+	–	+	+	+
Éter de polifenilo	•	•	–	–	+	+

+ = compatible, – = incompatible, • = se requieren pruebas individuales

El tipo de aceite base correspondiente de las grasas SKF figura en la hoja de especificaciones de la grasa SKF.



Vida útil de la grasa

La vida prevista de la grasa depende de varios factores, que incluyen el tipo de rodamiento, el tipo de grasa, la orientación y velocidad del motor y la temperatura de funcionamiento de los rodamientos. Por ejemplo, los rodamientos de rodillos tienen intervalos de relubricación más cortos que los de bolas. Otros factores que hay que tener en cuenta son la disposición de sellado, el entorno de funcionamiento y la contaminación.

En los rodamientos de bolas pequeños, la vida útil de la grasa suele ser superior a la vida útil del motor. En consecuencia, estos rodamientos suelen estar dotados de sellos o placas de protección y engrasados de por vida.

Sin embargo, si la vida útil de la grasa es más corta que la vida requerida del rodamiento del motor, habrá que relubricar los rodamientos cuando la grasa todavía esté actuando de forma satisfactoria.

Reposición

Para rellenar los rodamientos lubricados con grasa en motores eléctricos, observe las recomendaciones del fabricante del motor; si están disponibles. Si no es así, se pueden calcular las cantidades adecuadas para la reposición desde el lateral de un rodamiento (como para rodamientos rígidos de bolas o rodamientos de rodillos cilíndricos) con la fórmula

$$G_p = 0,005 D B$$

y para la reposición a través de la ranura anular y los orificios de lubricación del aro exterior del rodamiento (como para rodamientos de rodillos a rótula SKF) con la fórmula

$$G_p = 0,002 D B$$

donde

G_p = cantidad de grasa que se debe añadir durante la reposición [g]

D = diámetro exterior del rodamiento [mm]

B = ancho del rodamiento [mm].

Intervalos de relubricación

Las recomendaciones solo se pueden basar en reglas estadísticas. Los intervalos de relubricación de SKF se definen como el período al final del cual un 99% de los rodamientos siguen lubricados de manera confiable. Esto representa la vida L_1 de las grasas.

Los intervalos de relubricación t_f para rodamientos en ejes horizontales, en condiciones de funcionamiento normales y limpias, y con una temperatura de funcionamiento de 70 °C, se pueden obtener en el **diagrama 4** en función de lo siguiente:

- el factor de velocidad A multiplicado por el factor b_f correspondiente al rodamiento, donde

$$A = n d_m$$

n = velocidad de giro [r. p. m.]

d_m = diámetro medio del rodamiento

$$= 0,5 (d + D) \text{ [mm]}$$

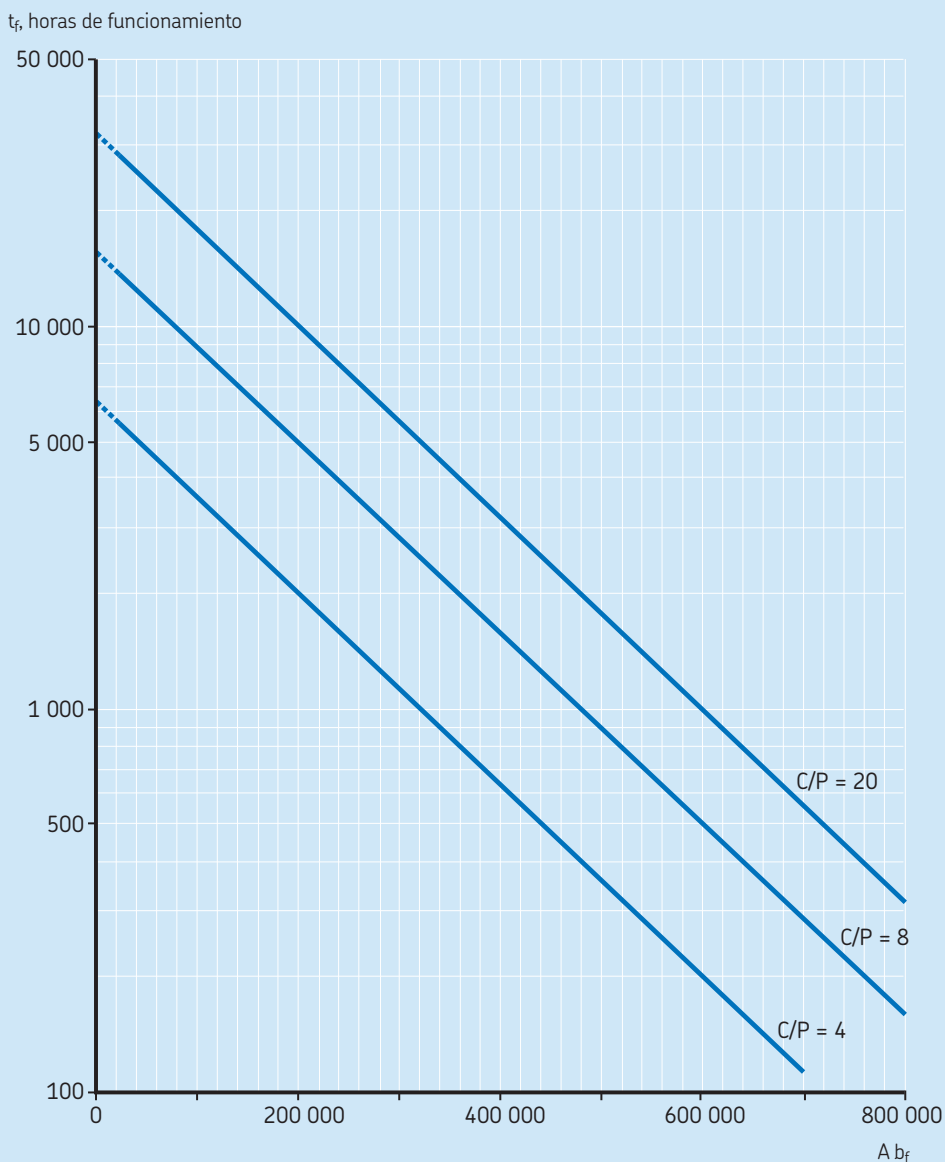
El factor b_f depende del tipo de rodamiento.

Los límites recomendados del factor de velocidad A , en función de la relación de carga y los valores de b_f , se indican en la **tabla 4, página 81**.

- la relación de carga C/P

Diagrama 4

Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70 °C (160 °F)



5 Lubricación

Intervalos de relubricación

El intervalo de relubricación t_r es un valor estimado, válido para una temperatura de funcionamiento de 70 °C, usando grasas con espesante de litio y de aceite mineral de buena calidad. Si las condiciones de funcionamiento del rodamiento son distintas, se deberán ajustar los intervalos de relubricación obtenidos en el **diagrama 4, página 80**, de acuerdo con la información proporcionada en *Desviaciones en las condiciones de funcionamiento y tipos de rodamiento, página 82*.

Si el factor de velocidad A supera el valor del 70% del límite recomendado en la **tabla 4**, o si las temperaturas ambiente son elevadas,

SKF recomienda verificar la temperatura de funcionamiento y si se está empleando un lubricante apropiado (→ **diagrama 2, página 75**).

Si se usan grasas de alto rendimiento, se puede conseguir un mayor intervalo de relubricación y una mayor duración de la grasa. Para obtener más información, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF. Véase también la sección *Vida útil de la grasa en rodamientos tapados*, a partir de la **página 86**.

Tabla 4

Factores de rodamientos y límites recomendados para el factor de velocidad A

Tipo de rodamiento ¹⁾	Factor del rodamiento b_f	Límites recomendados para el factor de velocidad A para relación de carga		
		C/P ≥ 15	C/P ≈ 8	C/P ≈ 4
—	—	mm/min		
Rodamientos rígidos de bolas	1	500 000	400 000	300 000
Rodamientos de bolas de contacto angular	1	500 000	400 000	300 000
Rodamientos de rodillos cilíndricos				
– rodamiento libre	1,5	450 000	300 000	150 000
– rodamiento fijo, sin cargas axiales externas o con cargas axiales ligeras pero alternantes	2	300 000	200 000	100 000
– rodamiento fijo, con carga axial ligera constante	4	200 000	120 000	60 000
Rodamientos de rodillos a rótula				
– si la relación de carga $F_a/F_r < e$ y $d_m \leq 800$ mm				
series 213, 222, 238, 239	2	350 000	200 000	100 000
series 223, 230, 231, 232, 240, 248, 249	2	250 000	150 000	80 000
serie 241	2	150 000	80 000 ²⁾	50 000 ²⁾
– si la relación de carga $F_a/F_r < e$ y $d_m > 800$ mm				
series 238, 239	2	230 000	130 000	65 000
series 230, 231, 232, 240, 248, 249	2	170 000	100 000	50 000
serie 241	2	100 000	50 000 ²⁾	30 000 ²⁾
– si la relación de carga $F_a/F_r > e$				
todas las series	6	150 000	50 000 ²⁾	30 000 ²⁾
Rodamientos de rodillos toroidales CARB				
– con jaula	2	350 000	200 000	100 000
Rodamientos axiales de rodillos a rótula				
– carga axial pura y arandela de eje giratoria	4	200 000	120 000	60 000

¹⁾ Los factores de los rodamientos y los límites recomendados para los factores de velocidad corresponden a los rodamientos con geometría interna estándar y una jaula estándar. Para otros diseños de rodamientos internos y jaulas especiales, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

²⁾ Para mayores velocidades se recomienda una lubricación con aceite.

Desviaciones en las condiciones de funcionamiento y tipos de rodamiento

Temperatura de funcionamiento

Para tener en cuenta el envejecimiento acelerado de la grasa con el aumento de las temperaturas, SKF recomienda reducir a la mitad los intervalos obtenidos en el **diagrama 4, página 80**, por cada 15 °C (27 °F) de aumento de la temperatura de funcionamiento por encima de 70 °C (160 °F), y recordar que no se debe exceder el límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz de la grasa (→ **diagramas 1 y 2, página 75**, HTPL).

El intervalo de relubricación t_r se puede prolongar a temperaturas inferiores a 70 °C (160 °F) si la temperatura no está cerca del límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (→ **diagrama 1, página 75**, LTPL). En ningún caso se recomienda una ampliación total del intervalo de lubricación t_r en más del doble. En el caso de los rodamientos axiales de rodillos, no se deben ampliar los valores de t_r obtenidos en el **diagrama 4, página 80**.

En muchas aplicaciones, existe un límite práctico para la lubricación con grasa, cuando el aro del rodamiento con la temperatura más elevada supera una temperatura de funcionamiento de 100 °C (210 °F). Por encima de esta temperatura, se deben usar grasas especiales. Asimismo, debe tenerse en cuenta el límite de temperatura de la jaula o los sellos del rodamiento. En las máquinas eléctricas, los rodamientos funcionan con frecuencia a temperaturas cercanas a los 100 °C (210 °F). Para temperaturas de funcionamiento superiores a 100 °C (210 °F), la grasa SKF LGHP 2 es una opción adecuada (→ **diagrama 2, página 75**).

Para las aplicaciones a altas temperaturas, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Ejes verticales

Para los rodamientos montados en ejes verticales, los intervalos obtenidos en el **diagrama 4, página 80** se deben reducir a la mitad. Se requiere usar un buen sello o placa de retención para evitar que la grasa se fugue de la disposición de rodamientos.

Vibración

Una vibración moderada no perjudicará la duración de la grasa, pero unos niveles altos de vibración y de choque, como los que se producen en las cribas vibratorias, harán que la grasa se agite. En estos casos se debe reducir el intervalo de relubricación. Si la grasa se ablanda demasiado, se debe utilizar otra con mejor estabilidad mecánica o con una dureza superior, hasta NLGI 3.

Giro del aro exterior

En las aplicaciones en las que el aro exterior gira y se plantea el uso de rodamientos radiales, el factor de velocidad A se calcula de un modo diferente: en este caso, se debe usar el diámetro exterior del rodamiento D, en lugar de d_m . Se requiere usar un buen mecanismo de sellado para evitar las pérdidas de grasa.

En aplicaciones con altas velocidades del aro exterior (es decir, >40% de la velocidad de referencia del rodamiento), se deben seleccionar grasas con una menor tendencia a la separación.

Para los rodamientos axiales de rodillos a rótula con una arandela del soporte giratoria, se recomienda la lubricación con aceite.

Contaminación

En caso de entrada de contaminantes, una relubricación más frecuente que la indicada en el intervalo de relubricación reducirá el número de partículas extrañas y, de esta forma, se reducirán los efectos perjudiciales causados por el rodamiento excesivo de estas partículas. Los contaminantes líquidos (agua, líquidos de proceso) también requieren un intervalo de relubricación reducido. Si la contaminación es grave, se debe considerar la aplicación de una lubricación continua. Los lubricadores automáticos como SKF SYSTEM 24 son lo más adecuado en estas condiciones.

Velocidades muy bajas

Seleccionar el tipo y la cantidad de grasa apropiados es muy importante en las aplicaciones con bajas velocidades.

Los rodamientos que funcionan a velocidades muy bajas con cargas ligeras requieren una grasa de baja consistencia. Los rodamientos que funcionan a bajas velocidades con grandes cargas requieren una grasa de alta viscosidad y muy buenas características EP. La viscosidad de la grasa se deberá seleccionar según los procedimientos descritos en el *Catálogo de rodamientos SKF*.

Altas velocidades

Los intervalos de relubricación para los rodamientos usados a altas velocidades, es decir, por encima del factor de velocidad A recomendado que se indica en la **tabla 4, página 81**, solo son válidos cuando se usan grasas especiales o versiones de rodamientos modificados, por ejemplo, rodamientos híbridos. Para velocidades más altas, las técnicas de lubricación continua, como la circulación de aceite, niebla de aceite, etc. son más adecuadas que la lubricación con grasa.

Rodamientos de rodillos cilíndricos

Los intervalos de relubricación que se indican en el **diagrama 4, página 80**, son válidos para los rodamientos de rodillos cilíndricos equipados con:

- una jaula moldeada por inyección de poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio, con sufijo de designación P
- una jaula mecanizada de latón de dos piezas, guiada por los rodillos, con sufijo de designación M

En los rodamientos con jaula de acero prensado (sufijo de designación J) o con jaulas guiadas por el reborde (sufijos de designación MA, ML y MP), el valor del intervalo de relubricación que se indica en el **diagrama 4, página 80**, se debe reducir a la mitad. Asimismo, se debe aplicar una grasa con unas buenas propiedades de separación de aceite.

Observaciones

Si el valor determinado para el intervalo de relubricación t_r es demasiado pequeño para una aplicación recién diseñada, SKF recomienda lo siguiente:

- Comprobar la temperatura calculada del rodamiento.
- Adoptar medidas para disipar el calor excesivo.
- Usar una grasa con un mayor límite de temperatura.

Si la experiencia indica que el intervalo de relubricación t_r es demasiado corto:

- Comprobar la temperatura de funcionamiento del rodamiento y considerar formas de disipar el calor excesivo o usar una grasa más adecuada con un mayor límite de temperatura.
- Comprobar si existen contaminantes en la grasa.
- Comprobar las condiciones de funcionamiento del rodamiento, como la carga o la desalineación.

Por último, pero no menos importante, se debe considerar el uso de un método de lubricación más adecuado (p. ej., lubricadores automáticos SKF).

Válvula de escape de grasa

Cuando un rodamiento gira a alta velocidad y requiere relubricación frecuente, se puede acumular un exceso de grasa en el soporte, lo que provoca picos de temperatura que tendrán un efecto perjudicial en la grasa, así como en la vida útil del rodamiento. En estos casos, se aconseja utilizar una válvula de escape de grasa. De este modo, se evita la lubricación excesiva del rodamiento y se permite su relubricación mientras la máquina está en funcionamiento. La válvula típica consta de un disco que gira con el eje, y se forma un estrecho intersticio en la tapa lateral del soporte.

El disco recoge el exceso de grasa, la descarga en una cavidad de la tapa lateral y la expulsa a través de una abertura situada en la parte inferior del soporte del rodamiento. El principio de la válvula de grasa se muestra en la **fig. 3**, y la **tabla 5** proporciona las recomendaciones de dimensiones.

Válvula de escape de
grasa

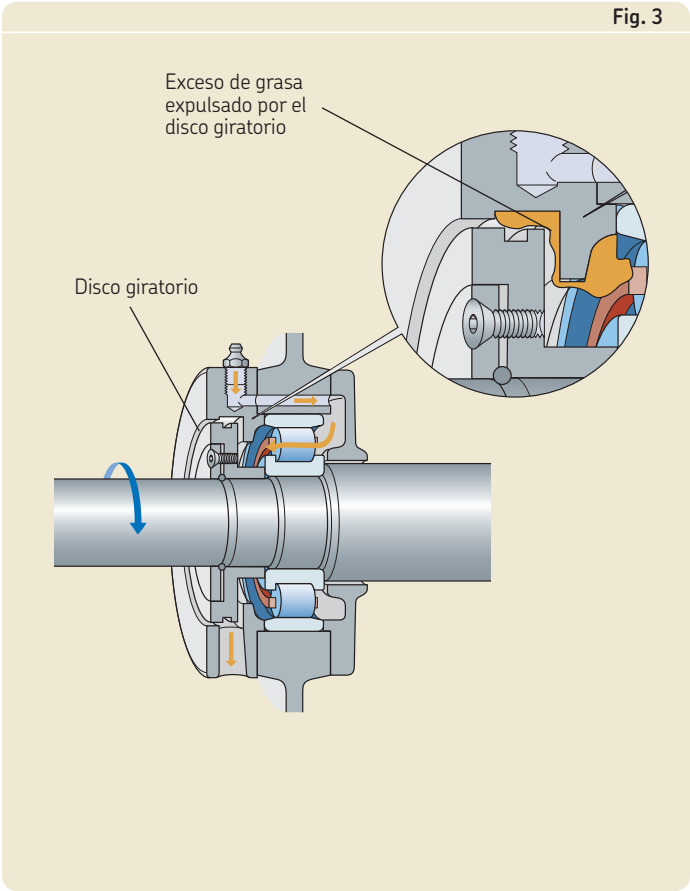
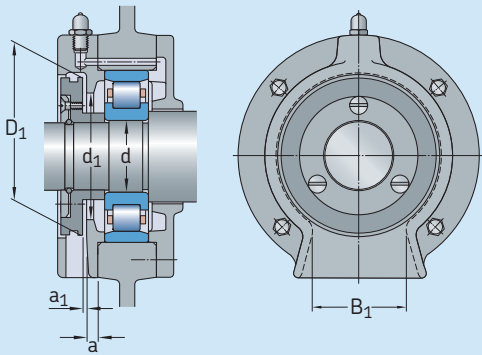


Tabla 5

Soporte de rodamiento con válvula de escape de grasa



Diámetro del agujero d Dimensiones

Series de diámetros

2 3

d1 D1 B1 a a1

mm mm

30	25	46	58	30	6 – 12	1,5
35	30	53	65	34	6 – 12	1,5
40	35	60	75	38	6 – 12	1,5
45	40	65	80	40	6 – 12	1,5
50	45	72	88	45	8 – 15	2
55	50	80	98	50	8 – 15	2
60	55	87	105	55	8 – 15	2
65	60	95	115	60	8 – 15	2
70	–	98	120	60	10 – 20	2
75	65	103	125	65	10 – 20	2
80	70	110	135	70	10 – 20	2
85	75	120	145	75	10 – 20	2
90	80	125	150	75	10 – 20	2
95	85	135	165	85	10 – 20	2
100	90	140	170	85	12 – 25	2,5
105	95	150	180	90	12 – 25	2,5
110	100	155	190	95	12 – 25	2,5
120	105	165	200	100	12 – 25	2,5
–	110	175	210	105	12 – 25	2,5
130	–	180	220	110	15 – 30	2,5
140	120	195	240	120	15 – 30	2,5
150	130	210	260	130	15 – 30	2,5
160	140	225	270	135	15 – 30	2,5
170	150	240	290	145	15 – 30	2,5
180	160	250	300	150	20 – 35	3
190	170	265	320	160	20 – 35	3
200	180	280	340	170	20 – 35	3
–	190	295	360	180	20 – 40	3
220	200	310	380	190	20 – 40	3
240	220	340	410	205	20 – 40	3
260	240	370	450	225	25 – 50	3
280	260	395	480	240	25 – 50	3
300	280	425	510	255	25 – 50	3

Lubricadores automáticos de un solo punto SKF SYSTEM 24

SKF SYSTEM 24 es un lubricador automático que suministra un flujo de grasa constante que se puede ajustar mediante un mando para conseguir el caudal de lubricante deseado. Ha sido especialmente diseñado para ofrecer una alternativa confiable y rentable al método de engrase manual tradicional. SKF SYSTEM 24 está disponible en versión accionada por gas (serie LAGD) y electromecánica (serie TLSD) (→ fig. 4).

Lubricadores automáticos SKF MultiPoint

LAGD 400 y LAGD 1000 son dispositivos electromecánicos que pueden alimentar hasta 20 líneas (→ fig. 5a y 5b). También son apropiados para aplicaciones que necesitan líneas de alimentación más largas o mayores presiones de alimentación. Entre las aplicaciones típicas están los motores eléctricos grandes y las combinaciones de bomba y motor, o conjuntos de estas máquinas.

Sistemas de lubricación automática

A menudo, se pasa por alto el verdadero potencial de la lubricación automática para prolongar los intervalos de mantenimiento o garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los activos críticos. Dado que la lubricación tiene lugar de forma automática, el operario o el personal de mantenimiento no necesitan hacer nada manualmente.

SKF es líder en el mercado en soluciones de sistemas automáticos y centralizados para prácticamente cualquier aplicación de maquinaria con equipos giratorios, fábricas, vehículos y equipos todoterreno.

El profundo conocimiento de SKF sobre cómo abordar la reducción de la fricción y sobre tribología ayuda a los clientes situados en primera línea, al proporcionarles las soluciones adecuadas.

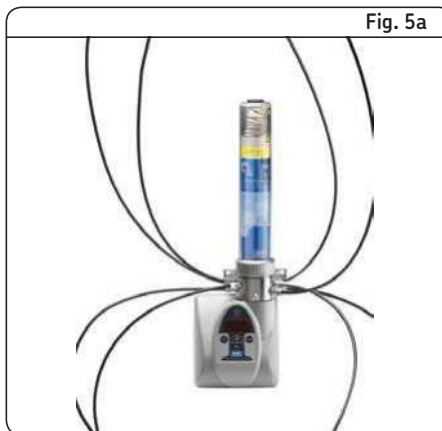
Ejemplos de aplicaciones: La gama SKF Monoflex y SKF Duoflex de sistemas de lubricación automática de línea simple o multilínea (→ fig. 5c) garantiza la lubricación con aceite, grasa semifluida y grasa dura de los rodamientos en máquinas pequeñas, medianas o grandes, como generadores eléctricos, engranajes o sistemas de refrigeración.

Fig. 4



Lubricador automático SKF SYSTEM 24, serie TLSD

Fig. 5a



Lubricador automático SKF MultiPoint LAGD 400

Fig. 5b



Lubricador automático SKF MultiPoint LAGD 1000

Fig. 5c



Bomba de grasa automática SKF

Vida útil de la grasa en rodamientos tapados

La vida útil de la grasa en rodamientos tapados se indica como L_{10} , es decir, el período al final del cual el 90% de los rodamientos sigue estando lubricado de forma confiable.

El método para calcular los intervalos de relubricación (→ **página 80**) representa la vida útil de la grasa L_{01} y no debe utilizarse.

La vida útil de la grasa en rodamientos tapados depende de la temperatura de funcionamiento y del factor de velocidad. Se puede obtener en el **diagrama 5a, página 87**, válido para rodamientos rígidos de bolas estándares tapados. El factor de rendimiento de la grasa (grease performance factor, GPF) se indica en la **tabla 7**.

El **diagrama 5b, página 87**, es válido para los rodamientos rígidos de bolas SKF energéticamente eficientes.

La vida útil de la grasa es válida en las siguientes condiciones de funcionamiento:

- eje horizontal
- giro del aro interior
- carga ligera ($P \leq 0,05 C$)
- temperatura de funcionamiento dentro de la zona verde de temperatura de la grasa (→ **diagrama 3, página 76**)
- máquina fija
- bajos niveles de vibración

La vibración moderada no tiene un efecto negativo en la vida útil de la grasa. Sin embargo, unos altos niveles de vibración y choque, como los de las aplicaciones de cribas vibratorias, pueden hacer que la grasa se agite. En esos casos, se reducirá la vida útil de la grasa.

Si las condiciones de funcionamiento varían, será necesario ajustar la vida útil de la grasa obtenida en los diagramas:

- Para ejes verticales, aplique el 50% del valor indicado en el diagrama.
- Para cargas más pesadas ($P > 0,05 C$), aplique el factor de reducción indicado en la **tabla 6**.

Factor de rendimiento de la grasa

En los **diagramas 5a y 5b** en la **página 87**, se presenta un factor de rendimiento de la grasa (GPF) que permite tener en cuenta una mayor capacidad de funcionamiento a alta velocidad y mejor rendimiento a alta temperatura de la grasa. La grasa SKF estándar para rodamientos rígidos de bolas tiene un factor GPF = 1.

En los casos en que no se pueda alcanzar la vida útil de la grasa requerida mediante la grasa SKF estándar, se deberá emplear una grasa SKF específica para la aplicación con un GPF superior.

El diagrama de vida útil de la grasa da la opción de evaluar la vida útil de grasas específicas para la aplicación con GPF = 2 o GPF = 4, usando las escalas de temperatura correspondientes en el eje horizontal del **diagrama 5a, página 87**. Los factores de rendimiento de la grasa de los rodamientos rígidos de bolas SKF con relleno de fábrica se pueden consultar en la **tabla 7**.

Es importante tener en cuenta que los factores de rendimiento de la grasa solo son válidos para las gamas de temperatura y velocidad especificadas para esa grasa (→ **tabla 1, página 77**). Las grasas con GPF >1 ofrecen una ventaja a temperaturas elevadas, pero podrían no liberar las cantidades de aceite adecuadas a temperaturas más bajas. Por este motivo, no se recomienda aplicar un GPF fuera de la gama de los **diagramas 5a y 5b, página 87**.

Tabla 6

Factor de reducción de la vida útil de la grasa, según la carga

Carga P	Factor de reducción
---------	---------------------

$\leq 0,05 C$	1,0
0,1 C	0,7
0,125 C	0,5
0,25 C	0,2

Nota: El factor de reducción para la carga P entre los valores aquí indicados se debe interpolar.

Tabla 7

Especificación de factores de rendimiento de la grasa para rodamientos SKF con relleno de fábrica

Factor	Sufijos de grasa	Máximo de $n \times d_m$
--------	------------------	--------------------------

GPF = 1	sin sufijo ¹⁾	500 000
GPF = 1	MT47, MT33	500 000
GPF = 1	LT	700 000
GPF = 2	GJN, LHT23, HT	500 000
GPF = 4	WT	700 000

¹⁾ Los rodamientos pequeños de las series de diámetros 8 y 9 con $D < 30$ mm están rellenos con LHT23 (GPF = 2) cuando $d < 10$ mm o LT10 cuando $d \geq 10$ mm (GPF = 1)

5 Lubricación

Vida útil de la grasa en rodamientos tapados

Diagrama 5a

Vida útil de la grasa en rodamientos rígidos de bolas tapados

donde $P = 0,05 \text{ C}$

Vida útil de la grasa L_{10} [h]

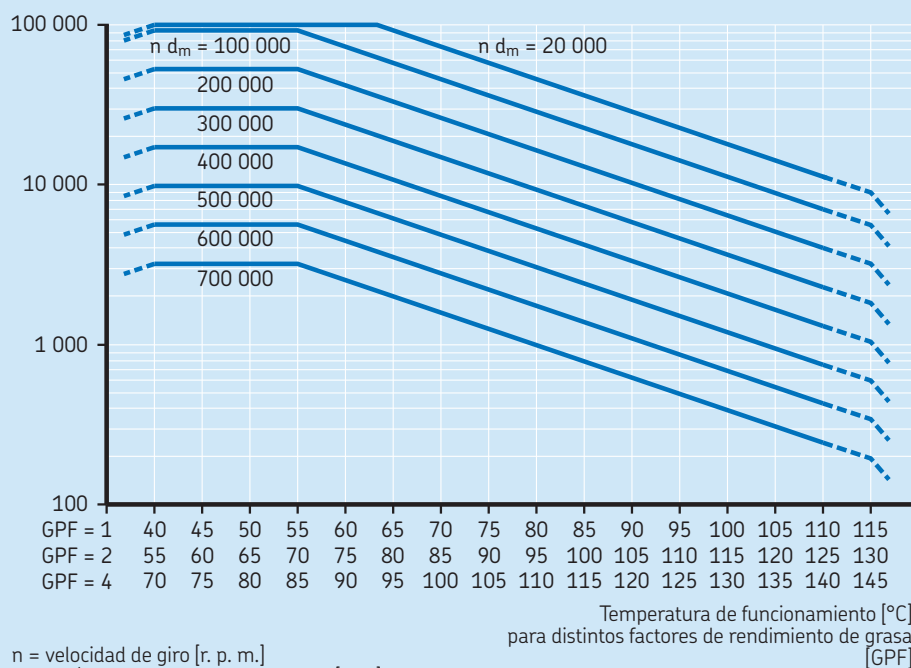
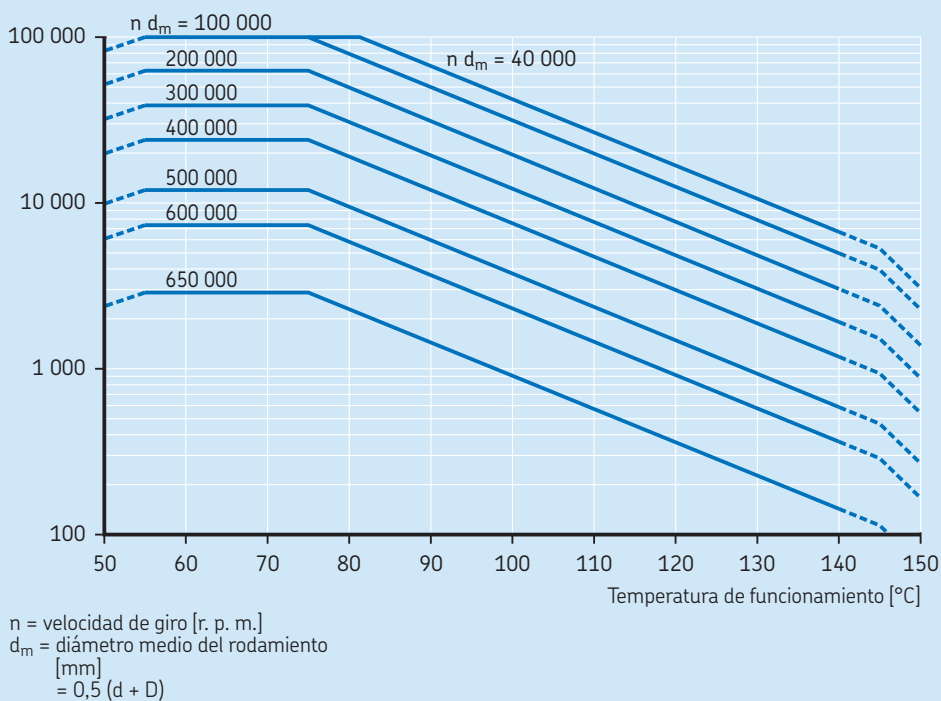


Diagrama 5b

Vida útil de la grasa en rodamientos rígidos de bolas SKF energéticamente eficientes

donde $P = 0,05 \text{ C}$

Vida útil de la grasa L_{10} [h]



Lubricación con aceite

Se suele elegir el aceite como lubricante cuando las velocidades de giro o las temperaturas de funcionamiento hacen impracticable o imposible el uso de la grasa. En aplicaciones con altas temperaturas de funcionamiento, se usan sistemas de recirculación de aceite para disipar el calor. Los sistemas de recirculación se pueden usar también para eliminar y filtrar los contaminantes.

La lubricación con aceite requiere sellos más sofisticados y, si no se eligen e instalan los sellos adecuados, puede existir un riesgo de fugas.

En general, solo se lubrican con aceite los motores eléctricos y generadores grandes.

Lubricación con baño de aceite

El método de lubricación con aceite más sencillo es el baño de aceite (→ **fig. 6, página 91**).

El aceite, recogido por los componentes giratorios del rodamiento, se distribuye por el interior del rodamiento y, después, vuelve a caer al colector en el soporte. Cuando el rodamiento no gira, el aceite deberá tener un nivel ligeramente inferior al centro del elemento rodante que ocupe la posición más baja. Para mantener el nivel de aceite adecuado, SKF recomienda utilizar niveladores de aceite, como el SKF LAHD 500.

En caso de funcionamiento a altas velocidades, el nivel del aceite puede descender significativamente y el nivelador de aceite puede llenar excesivamente el soporte. Si esto ocurre, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Circulación de aceite

El funcionamiento a alta velocidad eleva la temperatura de funcionamiento y acelera el envejecimiento del aceite. Para evitar los frecuentes cambios de aceite y conseguir una lubricación adecuada, normalmente se prefiere el método de lubricación por circulación de aceite. La circulación suele estar controlada por una bomba. Después de pasar por el rodamiento, el aceite generalmente se asienta en un tanque en el que se filtra y, en caso necesario, se enfría antes de volver al rodamiento. Una filtración correcta reduce el nivel de contaminación y prolonga la vida útil del rodamiento.

Selección del aceite lubricante

La selección del aceite está basada fundamentalmente en la viscosidad requerida para formar una película hidrodinámica bastante espesa a la temperatura de funcionamiento normal. La viscosidad del aceite depende de la temperatura, y la relación entre la viscosidad y la temperatura del aceite está determinada por el índice de viscosidad (viscosity index, VI). En los rodamientos, se recomienda el uso de aceites con un índice de viscosidad elevado, de al menos 95.

Para conseguir una película de aceite bastante espesa en el área de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura, el aceite debe mantener una viscosidad mínima a la temperatura de funcionamiento normal. La viscosidad cinemática nominal requerida a la temperatura de funcionamiento normal se puede determinar mediante el **diagrama 6, página 89**, siempre que se use aceite mineral. Cuando la temperatura de funcionamiento se ha determinado a partir de la experiencia o de simulación, la viscosidad correspondiente a la temperatura de referencia estandarizada internacionalmente de 40 °C (105 °F) se puede obtener mediante el **diagrama 7, página 89**, que está preparado para un índice de viscosidad de 95.

Diagrama 6

Cálculo de la viscosidad cinemática mínima v_1 a la temperatura de funcionamiento

Viscosidad requerida v_1 a la temperatura de funcionamiento [mm^2/s]

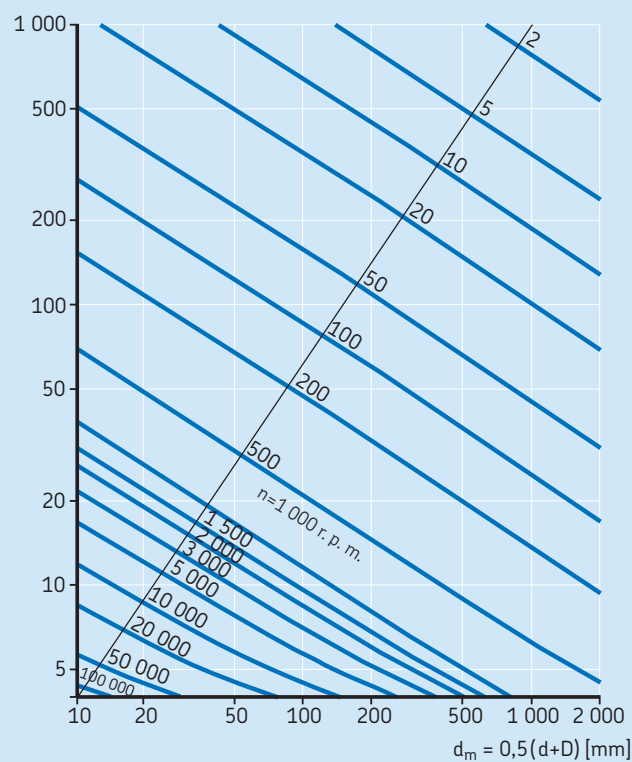
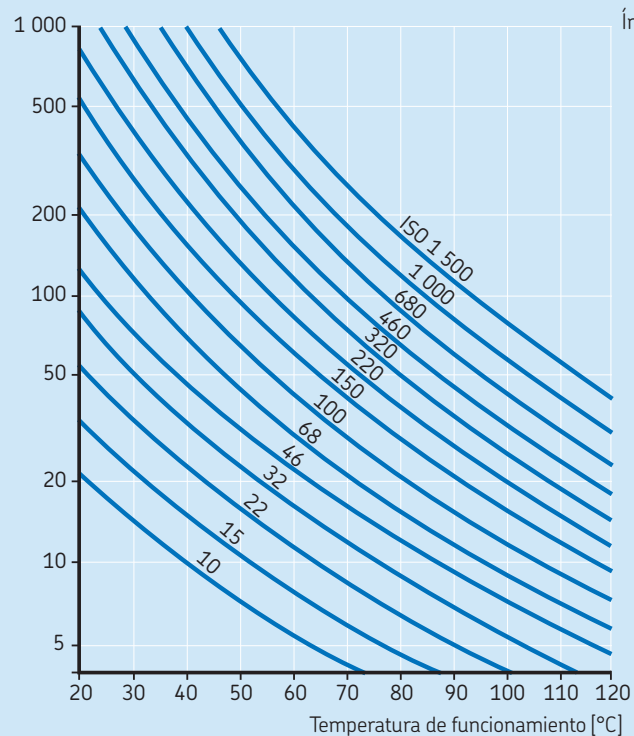


Diagrama 7

Conversión a viscosidad cinemática v a la temperatura de referencia (clasificación ISO VG)

Viscosidad requerida v_1 a la temperatura de funcionamiento [mm^2/s]

Índice de viscosidad VI = 95



Aditivos

A los aceites base se les añaden productos químicos, conocidos como aditivos, con el fin de conseguir o mejorar determinadas características de rendimiento. Los aditivos se suelen agrupar de acuerdo con su función, es decir, rendimiento, protectores del lubricante o protectores de la superficie. Algunos tipos de aditivos frecuentes se recogen en la tabla 8.

Cambio de aceite

La frecuencia con la que se debe cambiar el aceite depende principalmente del sistema de lubricación con aceite, las condiciones de funcionamiento y la cantidad de aceite. Para todos los métodos de lubricación, es recomendable realizar un análisis del aceite con el fin de ayudar a establecer un programa de cambio de aceite adecuado. En la tabla 9, se ofrecen valores orientativos para los intervalos de cambio de aceite. En general, cuanto más arduas sean las condiciones, con mayor frecuencia se deberá analizar y cambiar el aceite.

Tabla 8

Aditivos del aceite	
Aditivo	Función
Anticorrosivo	Mejora la protección de las superficies del rodamiento ofrecida por el aceite (soluble en agua o aceite)
Antioxidante	Retarda la descomposición del aceite base a altas temperaturas, lo que prolonga la vida útil del lubricante
Antiespumante	Evita la formación de burbujas
Presión extrema (EP)	Reduce los efectos perjudiciales del contacto entre metales
Antidesgaste (Anti-wear, AW)	Evita el contacto entre metales
Aditivo sólido	Proporciona lubricación cuando el aceite base deja de ser efectivo

Tabla 9

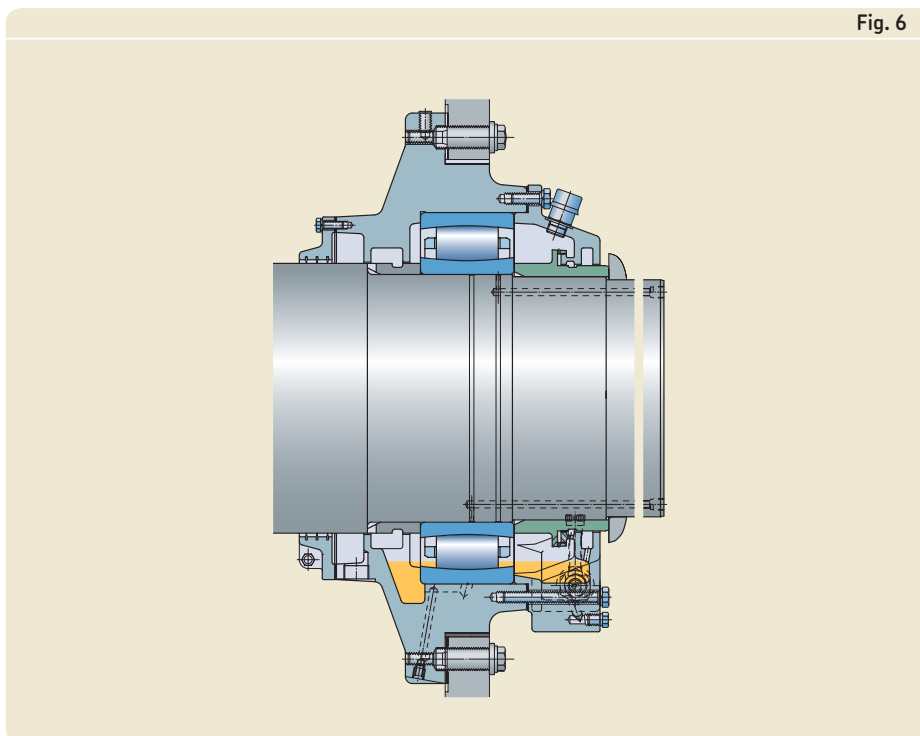
Intervalos de cambio de aceite		
Sistema de lubricación con aceite	Condiciones de funcionamiento típicas	Intervalo aproximado de cambio de aceite 1)
Baño de aceite	Temperatura de funcionamiento < 50 °C (120 °F). Bajo riesgo de contaminación	12 meses
	Temperatura de funcionamiento de 50 a 100 °C (de 120 a 210 °F). Algo de contaminación	de 3 a 12 meses
	Temperatura de funcionamiento >100 °C (210 °F). Entornos contaminados	3 meses
Circulación de aceite o chorro de aceite	Todas	Se determina por medio de pruebas y de la inspección regular de la condición del aceite. Según la frecuencia de circulación de la cantidad total de aceite y de si este se refrigera o no.

1) Se necesitan cambios de aceite más frecuentes si las operaciones de funcionamiento son más exigentes.

**Unidades de soportes con pestaña
SKF: serie AFC con lubricación con
baño de aceite**

Para las máquinas eléctricas de gran tamaño, SKF ha creado una serie de unidades de soportes con pestaña (→ *Máquinas eléctricas grandes y muy grandes*, **página 131**) equipadas con rodamientos (→ **fig. 6.**). Se aplica una lubricación con baño de aceite y, si es necesario, el soporte puede ir equipado con un nivelador de aceite para mantener el nivel de aceite correcto en los rodamientos.

*Unidad de soportes
con pestaña SKF con
un rodamiento de
rodillos toroidales
CARB*



6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Montaje..... 94

Métodos de montaje..... 96

Desmontaje..... 101

Comprobación de motores y
preparación para el transporte. . 105



Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Los rodamientos son productos de precisión que deben manipularse con cuidado durante el montaje para que puedan funcionar correctamente. Por ello, un buen conocimiento de las técnicas de montaje y desmontaje es tan importante para los diseñadores de motores como para el personal de mantenimiento.

Existen diversos factores, como unos procedimientos de montaje incorrectos, un entorno de trabajo sucio y la contaminación de la grasa o el aceite, que pueden provocar el fallo prematuro de los rodamientos.

Para facilitar la reparación de los motores, el ingeniero de diseño debe prestar especial atención al desmontaje de los rodamientos. El uso de las herramientas y procedimientos correctos no solo minimiza el impacto negativo en los componentes adyacentes, sino que además el desmontaje apropiado de los rodamientos puede ser el punto de partida de un análisis de la causa raíz del fallo, un paso esencial para reducir el costo total de propiedad de un motor.

Las buenas prácticas durante el montaje y la instalación del motor son el requisito básico para superar con éxito la comprobación de las propiedades eléctricas y mecánicas del motor.

Montaje

Los rodamientos son componentes confiables de máquinas que pueden alcanzar una larga vida útil si son instalados y mantenidos correctamente.

El montaje correcto requiere experiencia, precisión, un entorno de trabajo limpio y las herramientas adecuadas.

La información de la siguiente sección es de carácter general y su objetivo principal es señalar los aspectos que deben tener en cuenta los diseñadores de máquinas y equipos con el fin de facilitar el montaje y desmontaje de los rodamientos. Se ofrece también información básica para la persona encargada de montar efectivamente el rodamiento.

Para obtener más información sobre procedimientos de montaje y desmontaje, consulte el *Manual de Mantenimiento de los Rodamientos SKF* disponible en línea, en skf.com.

Dónde montar rodamientos

Los rodamientos se deben montar en un lugar seco, limpio y libre de polvo, alejados de máquinas que produzcan virutas y polvo. Cuando es necesario montar los rodamientos en un lugar no protegido, deben tomarse las medidas necesarias para proteger el rodamiento y su posición de montaje de contaminantes como el polvo, la suciedad y la humedad. Esto se puede realizar tapando o envolviendo los rodamientos, los componen-

tes de la máquina, etc. con plástico o papel metalizado (→ **fig. 1**).

Preparativos antes del montaje o desmontaje

Antes del montaje, asegúrese de tener disponibles todas las piezas, herramientas, equipos y datos necesarios. Se recomienda también revisar los dibujos o instrucciones para determinar el orden y dirección correctos de los componentes que se van a montar.

Comprobación de los componentes asociados

Se debe comprobar que los soportes, ejes, sellos y otros componentes del sistema de rodamientos estén limpios. Esto es especialmente importante en el caso de los orificios roscados, bordes de entrada o ranuras donde puedan haberse acumulado restos de operaciones de mecanizado anteriores. Asegúrese también de que todas las superficies sin pintar de los soportes de fundición estén libres de arena para machos y de eliminar todas las rebabas.

Asegúrese de que los asientos de ejes y soportes se ajusten a las especificaciones de dimensiones y tolerancias de forma (→ **capítulo 4, página 65**).

El diámetro de los asientos cilíndricos en ejes y soportes se suele comprobar con un micrómetro o un calibre para juego interno en dos secciones transversales y en cuatro direcciones (→ **fig. 2, página 95**).

Mantenga limpia el área de trabajo

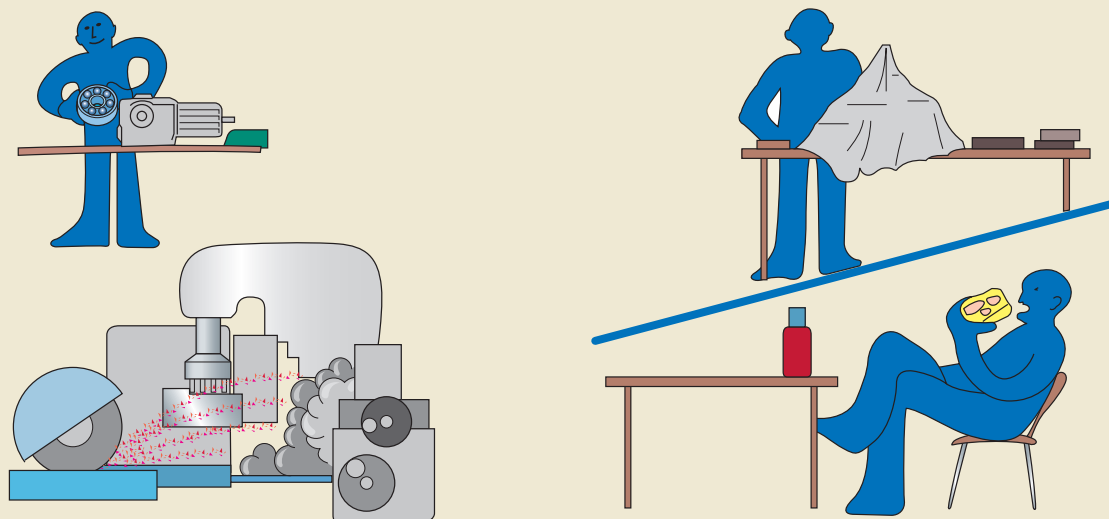


Fig. 1

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores
Montaje

Se recomienda registrar los valores medidos del diámetro del eje y del agujero para futuras consultas en un formulario de informe de medición. Al realizar la medición, es importante que los componentes y los instrumentos de medición estén a la misma temperatura aproximadamente.
Si el proceso de montaje se interrumpe por cualquier motivo, se deberá proteger inmediatamente el rodamiento para que no entre polvo ni suciedad en su cavidad (→ fig. 1, página 94).

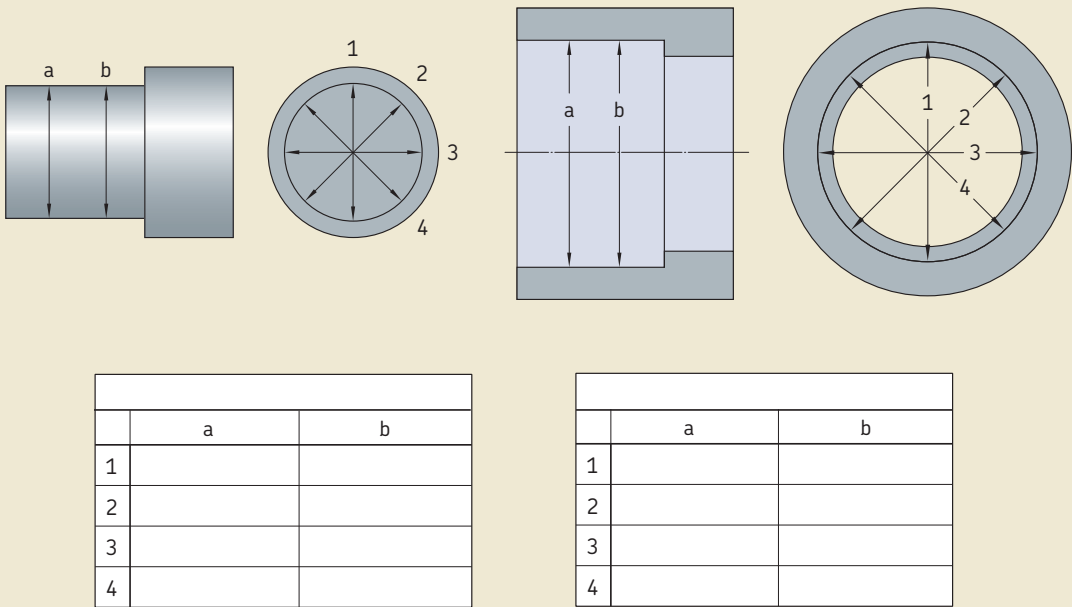
Manipulación de los rodamientos
Los rodamientos SKF nuevos están bien protegidos en su embalaje y no se deben sacar del embalaje hasta inmediatamente antes de montarlos.

Todas las superficies de los rodamientos nuevos están recubiertas con un conservante anticorrosivo que no deberá retirarse, a menos que sea incompatible con la grasa o el aceite que se esté usando. Justo antes del montaje, limpie el conservante del agujero y del diámetro exterior del rodamiento. Si el conservante no es compatible con el lubricante, lave y seque cuidadosamente el rodamiento.
Los rodamientos tapados con sellos o placas de protección van llenos de grasa y no deben lavarse antes del montaje.

SKF recomienda utilizar guantes, así como herramientas de transporte y elevación especialmente diseñadas para la manipulación de rodamientos más pesados. El uso de las

herramientas adecuadas mejora la seguridad, y esto ahorra tiempo y esfuerzo. Para la manipulación de rodamientos calientes o aceitosos, SKF recomienda el uso de guantes adecuados resistentes al calor o al aceite.
Importante
SKF no recomienda montar rodamientos montados con anterioridad.

Medición de los asientos del rodamiento



Métodos de montaje

El método (mecánico, térmico o hidráulico) usado para montar un rodamiento depende del tipo y del tamaño del rodamiento.

En cualquier caso, es importante que los aros, las jaulas y los elementos rodantes o sellos del rodamiento nunca se golpeen directamente contra objetos duros y que la fuerza de montaje no se aplique nunca a través de los elementos rodantes. Para un ajuste de interferencia, las superficies en contacto deben recubrirse con una fina capa de aceite ligero. Para un ajuste flojo, las superficies en contacto deben recubrirse con un agente anticorrosión SKF.

Montaje en frío

Los rodamientos hasta un diámetro del agujero de aproximadamente 100 mm se pueden montar en el eje sin calor. Montar un rodamiento en frío no es difícil y no afectará a la vida útil del rodamiento, siempre que se haga correctamente y con las herramientas adecuadas.

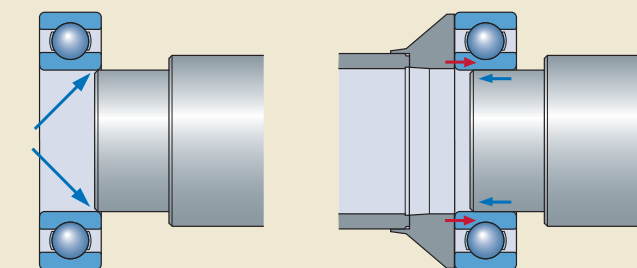
Método apropiado

Para montar un rodamiento en frío, aplique una fina película de aceite ligero al asiento del rodamiento. A continuación, coloque el rodamiento con cuidado de forma que quede alineado con el elemento correspondiente. Sitúe la herramienta de montaje y aplique la fuerza de montaje al aro del rodamiento que se está instalando con un ajuste de interferencia (→ fig. 3).

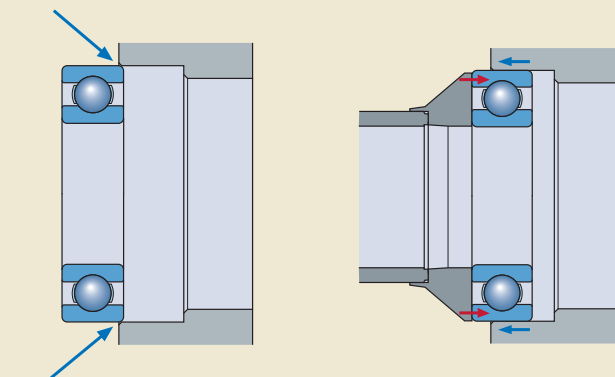
Si se aplica la fuerza de montaje únicamente al otro aro, se transferirá la fuerza de montaje a través de los elementos rodantes, y se dañará el rodamiento (→ capítulo 7, página 109), lo cual provocará, en último término, el fallo prematuro del rodamiento.

Método correcto para montar rodamientos en frío con un ajuste de interferencia

Fig. 3



Montaje de un rodamiento con un ajuste de interferencia en el aro interior.



Montaje de un rodamiento con un ajuste de interferencia en el aro exterior.

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Métodos de montaje

Herramientas apropiadas

Los rodamientos pequeños, con diámetro del agujero hasta aproximadamente 50 mm, se pueden montar en frío con ayuda de las herramientas de montaje SKF TMFT (→ figs. 4 y 5).

Los rodamientos medianos, con diámetro del agujero de menos de 100 mm, se suelen montar en frío con una prensa mecánica o hidráulica. Para ello, se deberá colocar un casquillo entre la prensa y el aro del rodamiento que se está montando con un ajuste de interferencia (→ fig. 6).

Montaje en caliente

La fuerza necesaria para montar un rodamiento aumenta rápidamente con su tamaño. Los rodamientos más grandes no se pueden introducir a presión con facilidad en un eje o en un soporte por la fuerza de montaje que ello requiere. Por lo tanto, si hay un ajuste de interferencia entre el rodamiento y el eje, se deberá calentar el rodamiento. Si el ajuste de interferencia está entre el rodamiento y el soporte, habrá que calentar el soporte.

La diferencia de temperatura necesaria entre el rodamiento y su asiento dependerá de la magnitud del ajuste de interferencia y el tamaño del rodamiento. Normalmente, una temperatura del rodamiento de 80 a 90 °C (de 175 a 195 °F) superior a la del eje será suficiente para el montaje.

Los rodamientos abiertos no se deben calentar a más de 120 °C (250 °F). SKF no recomienda calentar los rodamientos tapados con sellos o placas de protección por encima de 80 °C (175 °F). No obstante, en caso de que sean necesarias temperaturas superiores, asegúrese de que la temperatura no supere la temperatura admisible del sello o la grasa (la que sea menor entre estas dos). Si esa temperatura menor admisible no basta para alcanzar la diferencia de temperatura requerida, deberá enfriar el eje.

Nunca caliente un rodamiento a más de 120 °C (250 °F). El calentamiento excesivo puede alterar las propiedades metalúrgicas y dimensionales del rodamiento. Se debe evitar el sobrecalentamiento localizado.

Para montar un rodamiento caliente, póngase siempre guantes de protección. Un mecanismo elevador (de izada) puede facilitar el montaje. Empuje el rodamiento en el eje o el soporte hasta que quede firmemente presionado contra el tope. Sujete el rodamiento en su posición contra el tope hasta que las partes calientes se enfríen y formen un ajuste apretado.

Fig. 4

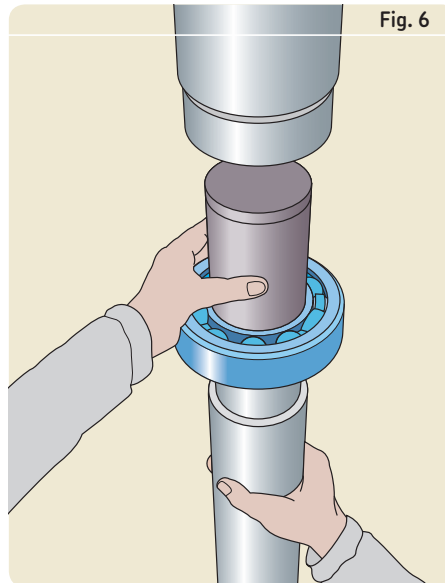


Herramientas apropiadas para montaje en frío: herramientas de montaje de la serie SKF TMFT, figs. 4 y 5

Fig. 5



Fig. 6



Montaje en frío con una prensa

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Métodos de montaje

Herramientas apropiadas

SKF cuenta con una línea completa de herramientas de calentamiento, como placas de calentamiento eléctricas y calentadores de inducción. Para los rodamientos más pequeños se usa una placa de calentamiento eléctrica (→ **fig. 7**), con termostato ajustable y tapa. Para rodamientos medianos y grandes, se usa un calentador de inducción (→ **fig. 8**). Los calentadores de inducción, que normalmente están equipados con termostatos ajustables y desmagnetización automática, son muy fáciles de usar.

Cuando se requiere un ajuste de interferencia entre el rodamiento y el soporte, es necesario aumentar moderadamente la temperatura del soporte. En la mayoría de los casos, un aumento de temperatura de 20 a 50 °C (de 70 a 120 °F) será suficiente, ya que el ajuste de interferencia suele ser ligero. Otra opción es enfriar el rodamiento antes de montarlo en el soporte.

Importante:

- No caliente los rodamientos con llamas abiertas.
- Los rodamientos sellados (con sellos de contacto o placas de protección) no se deben calentar por encima de 80 °C (175 °F), debido a que están rellenos de grasa y a que se puede dañar el material de sellado.



Fig. 7

Placa eléctrica de calentamiento

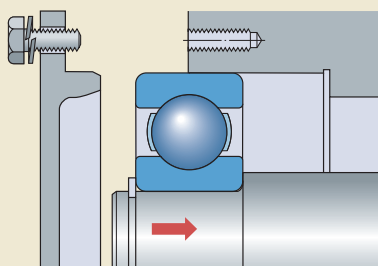


Fig. 8

Calentador de inducción

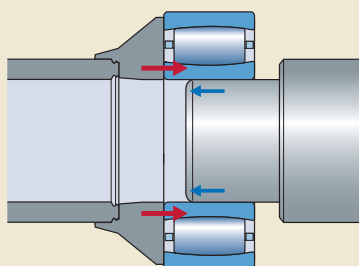
Montaje de rodamientos no desmontables

Fig. 9



a

Los rodamientos no desmontables con un ajuste de interferencia en el aro interior se montan primero en el eje. A continuación, se instala cuidadosamente el conjunto de rodamiento y eje en el soporte o la placa de protección del soporte.



b

Para montar un rodamiento de rodillos toroidales CARB en un eje con un ajuste de interferencia, se deberán sujetar ambos aros.

Consideraciones adicionales

Hay diversos aspectos que se deben tener en cuenta al montar los rodamientos. A continuación, se citan algunos de los más básicos:

- Mantener el rodamiento limpio.
- Manipular el rodamiento con cuidado.
- Comprobar que el rodamiento se monta en ángulo recto en el eje o en el soporte.
- Aplicar la fuerza de montaje al aro apropiado.

Rodamientos no desmontables

Los rodamientos no desmontables que se usan generalmente en motores eléctricos son los rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular, rodamientos de rodillos toroidales CARB y rodamientos de rodillos a rótula.

Cuando se requiera un ajuste de interferencia en el aro interior, monte en primer lugar el rodamiento en el eje. A continuación, monte cuidadosamente el soporte y el conjunto de rodamiento y eje (→ **fig. 9a**, página 98).

Los rodamientos INSOCOAT y los rodamientos híbridos se montan igual que los rodamientos estándares.

Debido al diseño de los rodamientos de rodillos toroidales CARB, los aros y los rodillos se pueden desplazar axialmente respecto a su posición normal durante la manipulación. Por ello, SKF recomienda montar los rodamientos CARB cuando el eje o el soporte estén en posición horizontal. Asimismo, siempre que sea posible, gire el aro interior o exterior para alinear los rodillos durante el montaje. Para montar un rodamiento de rodillos toroidales CARB con un ajuste de interferencia en un eje, use una herramienta que sujete tanto el aro interior como el exterior (→ **fig. 9b**, página 98).

Rodamientos desmontables

Los rodamientos de rodillos cilíndricos son rodamientos radiales desmontables que se usan en motores eléctricos (→ **fig. 10**). Dado que estos rodamientos se suelen montar con un ajuste de interferencia tanto en el eje como en el soporte, los aros se montan normalmente por separado.

Los rodillos en los rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos son guiados en sentido axial por pestañas integrales en uno de los aros del rodamiento. El aro con pestañas y el conjunto de rodillos y jaula forman una unidad que se puede separar del otro aro. Esta característica facilita el montaje. Monte en primer lugar el aro desmontable.

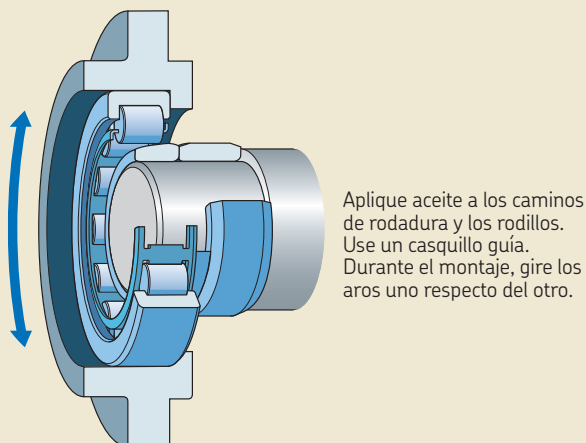
Para montar el aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos, podría ser necesario usar un calentador de inducción. Por lo general, el aro exterior se introduce simplemente a presión en el soporte.

Aplique lubricante al conjunto de rodillos y jaula. Verifique que el lubricante también llega al camino de rodadura. Aplique también una fina capa de lubricante al camino de rodadura del otro aro.

En el montaje, compruebe que el conjunto de rodillos no está en ángulo con el otro aro. Si se monta alguna parte del rodamiento en ángulo, se puede dañar fácilmente alguno de los aros o los rodillos, en especial si los rodillos o los caminos de rodadura no están lubricados. Para evitar este tipo de problemas se recomienda usar un casquillo guía (→ **fig. 10**). A fin de evitar que los rodillos rayen el camino de rodadura del otro aro, habrá que girar los aros uno respecto del otro durante el montaje del rodamiento.

Montaje de
rodamientos
desmontables

Fig. 10



6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Métodos de montaje

Comprobación de la alineación

La desalineación entre el eje y el soporte debe evitarse con el fin de alcanzar la máxima vida útil de los rodamientos utilizados habitualmente en las máquinas eléctricas, como los rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de bolas de contacto angular y rodamientos de rodillos cilíndricos.

En los rodamientos grandes, la alineación entre los aros interior y exterior se puede comprobar con la herramienta que se muestra en la **fig. 11**, una vez instalado correctamente el conjunto de rodamiento y eje en el soporte. La herramienta consta de un reloj comparador montado en un segmento de acero.

El segmento de acero tiene dos prisioneros para ajustar la altura y proporcionar dos puntos de contacto sólidos con el eje. El segmento de acero está presionado contra la cara lateral del aro interior y el eje. El calibre se dirige contra la superficie lateral del aro exterior del rodamiento.

Para obtener el valor de la desalineación, determine en primer lugar la desviación máxima d_x midiendo los dos puntos con los valores más altos en la cara lateral del aro exterior que se encuentre a 180 grados. A continuación, se puede calcular el ángulo de desalineación mediante la fórmula

$$\beta = 3\,438\, d_x / D$$

donde

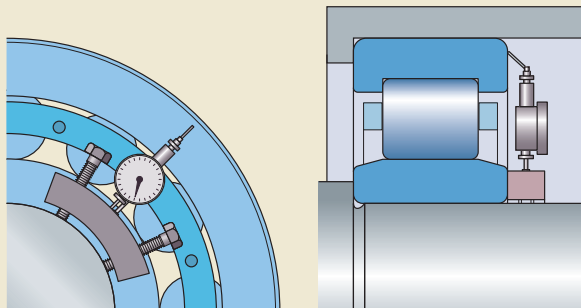
β = ángulo de desalineación, minutos de arco

d_x = desviación máxima [mm]

D = diámetro exterior del rodamiento [mm]

Herramienta para verificar la alineación

Fig. 11



La desalineación angular admisible entre los aros interior y exterior de un rodamiento depende del tamaño y del diseño interno del rodamiento, del juego radial interno durante el funcionamiento, y de las fuerzas y momentos que actúan sobre el rodamiento. Cualquier desalineación incrementa el ruido del rodamiento y reduce su vida útil.

El valor máximo admisible del ángulo de desalineación β para el rodamiento en cuestión se indica en el *Catálogo de rodamientos SKF*.

Lubricación de los rodamientos

Los rodamientos abiertos lubricados con grasa se deben engrasar después de montarlos en el rotor (→ **fig. 12**):

- En los rodamientos de rodillos cilíndricos, el espacio interior del conjunto de jaula y rodillos deberá llenarse inmediatamente después del montaje. La grasa se aplica también al camino de rodadura del aro libre inmediatamente después de instalarlo sobre el eje. Solo entonces deberá montarse el rodamiento.
- Debido a la falta de espacio, los rodamientos no desmontables se llenan de grasa desde la parte delantera. Use una herramienta engrasadora SKF, por ejemplo, y compruebe que la grasa ha penetrado a través del rodamiento, para estar seguro de que la cavidad del rodamiento está completamente llena.
- No llene todo el espacio libre del soporte. El llenado de grasa no deberá exceder del 30% al 50% del espacio libre.
- Compruebe que la grasa no contiene contaminantes.

Engrase de rodamientos

Fig. 12



- En los rodamientos lubricados con aceite, llene el soporte con aceite limpio y nuevo hasta el nivel especificado.

Más información sobre el montaje

La información general sobre el montaje de los rodamientos se puede encontrar en el *Catálogo de rodamientos SKF* o en línea, en skf.com. También se puede encontrar más información en el *Manual de Mantenimiento de rodamientos SKF*. Puede obtener información sobre el montaje de un tipo de rodamiento determinado en skf.com/mount.

Desmontaje

Al desmontar los rodamientos, se deben observar diversos puntos:

- 1 Estudie los planos de montaje para determinar la disposición de rodamientos y asegurarse de que cuenta con las herramientas de desmontaje apropiadas.
- 2 Revise los documentos para determinar la causa de la reparación.
- 3 Antes de comenzar el procedimiento de desmontaje, inspeccione el motor para ver si presenta señales de daños, por ejemplo, fugas, arcos o aletas rotas.
- 4 Limpie el exterior del motor y asegúrese de que el área de trabajo está limpia.
- 5 Desmonte el motor sin desmontar aún los rodamientos.
- 6 Inspeccione los rodamientos y los sellos para ver si presentan desgaste o daños.
Importante
Si es posible, se deberá evitar desmontar los rodamientos que no estén dañados, ya que un desmontaje incorrecto podría causar daños internos en el rodamiento. SKF no recomienda montar rodamientos montados con anterioridad.
- 7 Aunque hubiera que cambiar el rodamiento, el desmontaje se deberá hacer con cuidado para no dañar el rodamiento ni los componentes adyacentes. Antes del desmontaje, marque la orientación y posición del rodamiento con respecto al eje y al soporte. Esta información resultará útil más tarde en el análisis del rodamiento.
- 8 Después del desmontaje, examine el rodamiento para determinar la causa raíz del daño y adoptar una medida correctiva que evite su repetición (→ capítulo 7, página 109).

Métodos de desmontaje

Para desmontar un rodamiento, aplique la fuerza de desmontaje al aro que se ha de extraer, es decir, al que tiene un ajuste apretado.

Para los rodamientos de motores eléctricos, hay cuatro métodos de desmontaje:

- mediante un extractor mecánico
- mediante un extractor hidráulico
- mediante una prensa
- mediante calor

El método apropiado puede depender del tamaño del rodamiento. Si el rodamiento es relativamente pequeño, se puede usar un extractor de rodamientos. En cambio, los rodamientos medianos y grandes pueden requerir un extractor hidráulico.

El uso de calor es apropiado para extraer el aro interior de los rodamientos de rodillos cilíndricos (→ figs. 22 y 23, página 104).

Herramientas de desmontaje

Es esencial elegir las herramientas de desmontaje adecuadas. Para conseguir un desmontaje satisfactorio, se deberá emplear la herramienta más adecuada para cada caso.

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Desmontaje

Extractores mecánicos

Los rodamientos pequeños y medianos montados con un ajuste de interferencia en el eje se pueden desmontar utilizando un extractor convencional (→ **fig. 13, página 103**). El uso de extractores con autocentrado elimina prácticamente el riesgo de dañar el rodamiento y/o su asiento por aplicar una presión desigual durante la extracción. Por ello, para un desmontaje seguro y fácil, SKF recomienda el uso de un extractor de la serie TMMA. Estos extractores tienen autocentrado y sus brazos exclusivos accionados por muelles facilitan la operación de desmontaje (→ **fig. 14, página 103**).

Si es posible, deje que el extractor enganche el aro interior. Esto resulta más fácil si el eje está provisto de muescas para enganchar el extractor (→ **fig. 15, página 103**). Extraiga el rodamiento con una fuerza de extracción uniforme hasta que esté completamente fuera de su asiento.

En las aplicaciones en las cuales no se pueda acceder al aro interior con los extractores de garras normales, el rodamiento se puede extraer con un extractor de cuchillas (→ **fig. 18, página 103**). Hay que tener en cuenta, no obstante, que un extractor de cuchillas requiere cierto espacio libre detrás del rodamiento.

Si no se puede aplicar fuerza a través del aro interior, el rodamiento se puede extraer por el aro exterior. Si el rodamiento va a ser analizado posteriormente o si existe cualquier otra razón para minimizar los daños en el rodamiento, se deberá girar el aro exterior durante el desmontaje (→ **fig. 17, página 103**). Esto se puede hacer bloqueando el tornillo y aplicando la fuerza de extracción girando continuamente el extractor hasta liberar el rodamiento.

En ocasiones, es difícil extraer el aro exterior del soporte por la presencia de corrosión de contacto o deformación del soporte. En estos casos, el desmontaje resulta más fácil si el soporte está provisto de orificios roscados, como se muestra en la **fig. 16, página 103**.

A veces, no se puede acceder al aro interior ni al exterior. En esos casos, se deberán emplear extractores de rodamientos internos especiales, como un extractor de rodamientos rígidos de bolas SKF TMMD 100 (→ **fig. 19, página 103**), un extractor interno SKF TMIP o un extractor para soportes ciegos SKF TMBP20E.

Extractores hidráulicos

La fuerza necesaria para desmontar los rodamientos que tienen un ajuste de interferencia en el eje aumenta rápidamente con el tamaño del rodamiento. Para facilitar el desmontaje, se pueden usar herramientas hidráulicas para rodamientos medianos y grandes (→ **fig. 20, página 103**).

El uso de un extractor con cilindro hidráulico y bomba integrados facilitará más aún el proceso de desmontaje.

¡ADVERTENCIA!

Es peligroso situarse directamente detrás de un extractor hidráulico. Cuando el rodamiento se afloja, el extractor puede desplazarse repentinamente hacia atrás. Por este motivo, es más seguro situarse en un lateral.

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

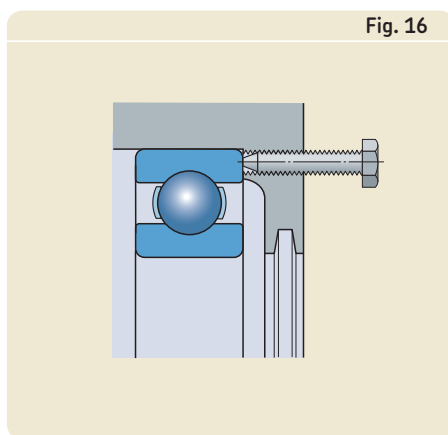
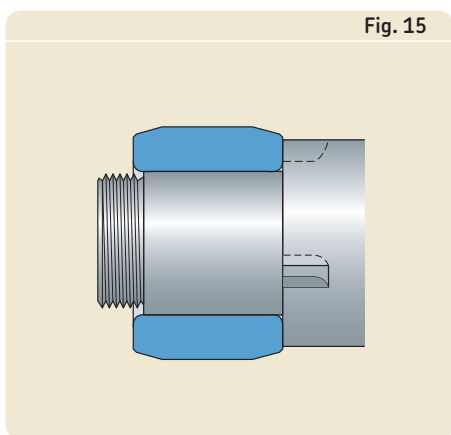
Desmontaje

Extractor de garras estándar



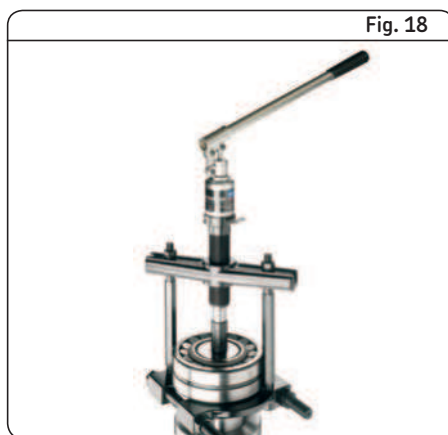
Extractor de garras mecánico con brazos accionados por muelles

Las muescas en el eje facilitan el desmontaje



Los orificios roscados en el soporte facilitan el desmontaje del aro exterior

Minimice los daños girando el aro exterior



Extractor de cuchillas

Extractor de rodamientos rígidos de bolas SKF



Extractor hidráulico SKF

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Desmontaje

Prensas

Una forma práctica de extraer un rodamiento de su asiento en el eje del rotor es mediante el uso de una prensa (→ **fig. 21**). Sin embargo, compruebe que solo está sujeto el aro interior del rodamiento, que tiene el ajuste de interferencia.

Calentadores

El aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos se suele extraer aplicando calor. Para ello, SKF ha desarrollado un conjunto de herramientas especiales que incluyen aros de aluminio y que están disponibles para los rodamientos de las series NU, NJ y NUP (→ **fig. 22**).

El método de desmontaje es sencillo.

Extraiga el aro exterior y recubra el camino de rodadura del aro interior con un aceite antioxidante espeso. Coloque el aro de calentamiento, precalentado aproximadamente a 280 °C, alrededor del aro interior y junte las asas. Cuando el aro interior comience a aflojarse, retírelo del eje.

Si desmonta con frecuencia aros interiores de varios diámetros, puede ser más práctico usar un calentador de inducción ajustable SKF (→ **fig. 23**).

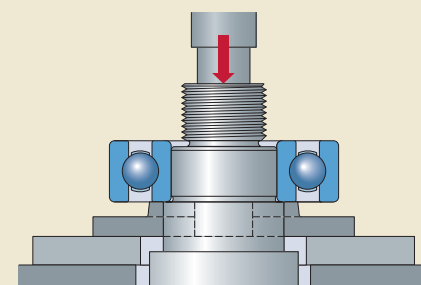
Desmontaje de rodamientos grandes

Para desmontar rodamientos grandes, normalmente se pueden aplicar los mismos métodos que para los rodamientos más pequeños.

Sin embargo, el uso del método de inyección de aceite facilita considerablemente el desmontaje. Esto presupone que se han incluido en el diseño de la disposición los conductos de suministro de aceite y las ranuras de distribución necesarios. También hay disponibles extractores de garras superpotentes asistidos hidráulicamente, capaces de ejercer fuerzas de extracción de hasta 500 kN.

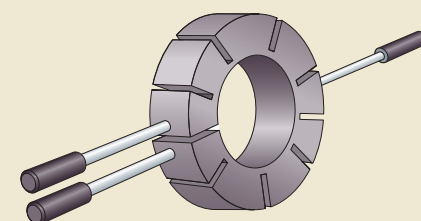
Puede encontrar más información sobre el montaje y desmontaje de rodamientos en el *Catálogo de rodamientos SKF*, el *Manual de mantenimiento de rodamientos SKF* y en línea, en skf.com/mount.

Fig. 21



Extracción del rodamiento usando una prensa

Fig. 22



Aro de calentamiento de aluminio

Fig. 23



Calentador de inducción ajustable SKF

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Comprobación de motores y preparación para el transporte

Comprobación de motores y preparación para el transporte

Comprobación de motores

Tras el montaje, se debe comprobar la conformidad del motor con las especificaciones eléctricas y mecánicas requeridas.

Preparación para las pruebas

En general, los motores requieren una carga externa (→ **fig. 24**) aplicada al eje para evitar posibles daños en los rodamientos debido a una carga insuficiente. Tan solo los motores eléctricos con una disposición de rodamientos rígidos de bolas precargados mediante muelles (véase *Requisitos de carga mínima* en el **capítulo 2, página 50**) pueden funcionar sin una carga externa aplicada al eje.

Comprobación del aislamiento del motor y de la calidad del circuito eléctrico

El motor se debe comprobar por si existiese alguna deficiencia en el aislamiento de la pared de tierra o el devanado, y también para validar la integridad del circuito, el estado de las barras del rotor y la capacidad del motor para producir el par nominal. Los Analizadores estáticos de motores SKF (→ **fig. 25**) utilizan pruebas de sobretensión, índice de polarización, tensión escalonada CC, megaohmios [$M\Omega$] y resistencia de los devanados para detectar cualquier deficiencia en el aislamiento que pueda provocar el fallo prematuro del motor. Los Analizadores dinámicos de motores SKF (→ **fig. 26**) se pueden utilizar para demostrar que el motor alcanza el par nominal, evaluar el estado de las barras del rotor y detectar cualquier desequilibrio que pueda poner en peligro la integridad del circuito.

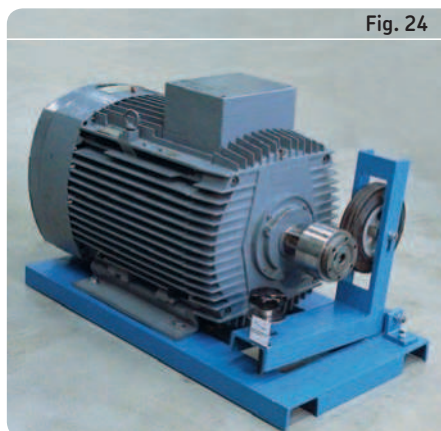


Fig. 24

Banco de pruebas del motor

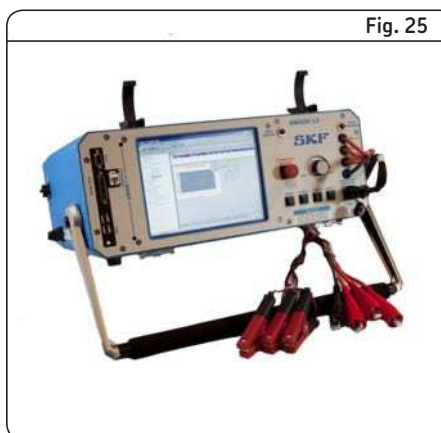


Fig. 25

Analizador estático de motores SKF – Baker AWA-IV



Fig. 26

Analizador dinámico de motores SKF – EXP4000

6 Montaje y desmontaje de rodamientos, y comprobación de motores

Comprobación de motores y preparación para el transporte

Comprobación de las propiedades mecánicas

Para hacer una comprobación final del montaje del motor y verificar los niveles de vibración en particular, SKF recomienda usar un equipo de monitoreo de la condición SKF (→ **fig. 27**).

Encontrará más información sobre la comprobación de motores eléctricos en línea, en skf.com.

Preparación para el transporte

Antes de transportar un motor, es necesario bloquear el eje para que los rodamientos no puedan moverse en dirección axial ni radial (→ **fig. 28**). Estas precauciones son necesarias para evitar los daños por vibrocorrosión en los caminos de rodadura (→ **capítulo 7, Vibrocorrosión, página 115**).

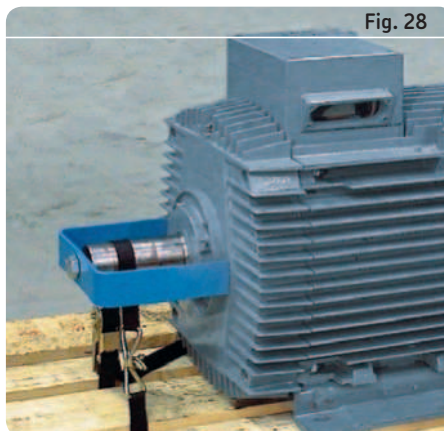
Envuelva minuciosamente el motor para protegerlo durante el transporte (→ **fig. 29**).

Fig. 27



Los niveles de vibración se pueden comprobar con el equipo de monitoreo de la condición SKF

Fig. 28



Bloquee el eje y los rodamientos antes del transporte

Fig. 29



Envuelva el motor

7 Daños en los rodamientos y medidas correctivas

Daños en los rodamientos	110
Análisis de la causa raíz	110
Fatiga	111
Desgaste	112
Corrosión	114
Erosión eléctrica	116
Deformación plástica	121
Fracturas y agrietamiento	122



Daños en los rodamientos y medidas correctivas

Los rodamientos son componentes clave de los motores eléctricos y, por ello, deberán cumplir unos estrictos criterios de rendimiento en cuanto a capacidad de carga, velocidad y confiabilidad.

En la actualidad, SKF dispone de los medios para calcular la vida nominal del rodamiento con una precisión considerable a partir de la fatiga del camino de rodadura, teniendo en cuenta los efectos de la carga, velocidad y lubricación en términos de relación de viscosidad y contaminación sólida. Esto permite estimar la vida potencial del rodamiento en términos de fatiga. No obstante, la vida real de cada rodamiento está relacionada con muchos factores y modos de fallo relevantes aparte de la fatiga. Estos incluyen, por ejemplo, el desgaste abrasivo, contaminación por humedad, corrosión, instalación incorrecta, ajuste incorrecto en el eje o el soporte, deslizamiento de los elementos rodantes o contaminación imprevista. Pueden guardar relación también con el fallo de la jaula o de los sistemas de sellado o lubricación. La erosión eléctrica, provocada por un voltaje excesivo o una fuga de corriente, es otra causa de fallo en las aplicaciones de máquinas eléctricas.

Los rodamientos de los motores eléctricos pueden fallar de forma prematura por diversas razones. Además de las causas anteriores, el fallo prematuro puede deberse también a daños durante el transporte o la inactividad, problemas de montaje o manipulación incorrecta.

Cada una de estas causas produce su propio tipo de daño y deja su huella particular en el rodamiento.

Por consiguiente, al examinar un rodamiento dañado, en la mayoría de los casos se puede determinar la causa raíz del daño, con el fin de adoptar las medidas adecuadas para evitar su reaparición.

Daños en los rodamientos

En teoría, sería una ventaja clasificar los daños en los rodamientos según la causa raíz principal del fallo. Sin embargo, en la práctica a menudo se solapan diferentes causas del fallo que, combinadas, pueden provocar importantes daños en los rodamientos, tales como:

- desgaste excesivo (p. ej., causado por lubricante contaminado) debido a un sellado inadecuado
- fatiga prematura (p. ej., pequeñas escamas) que puede dar lugar a un descascarillado importante y a fallos graves del motor en el funcionamiento (p. ej., aros y/o elementos rodantes agrietados)

Debido a la posibilidad de que existan múltiples causas del fallo, la investigación del fallo de los rodamientos puede ser bastante compleja y difícil.

Análisis de la causa raíz

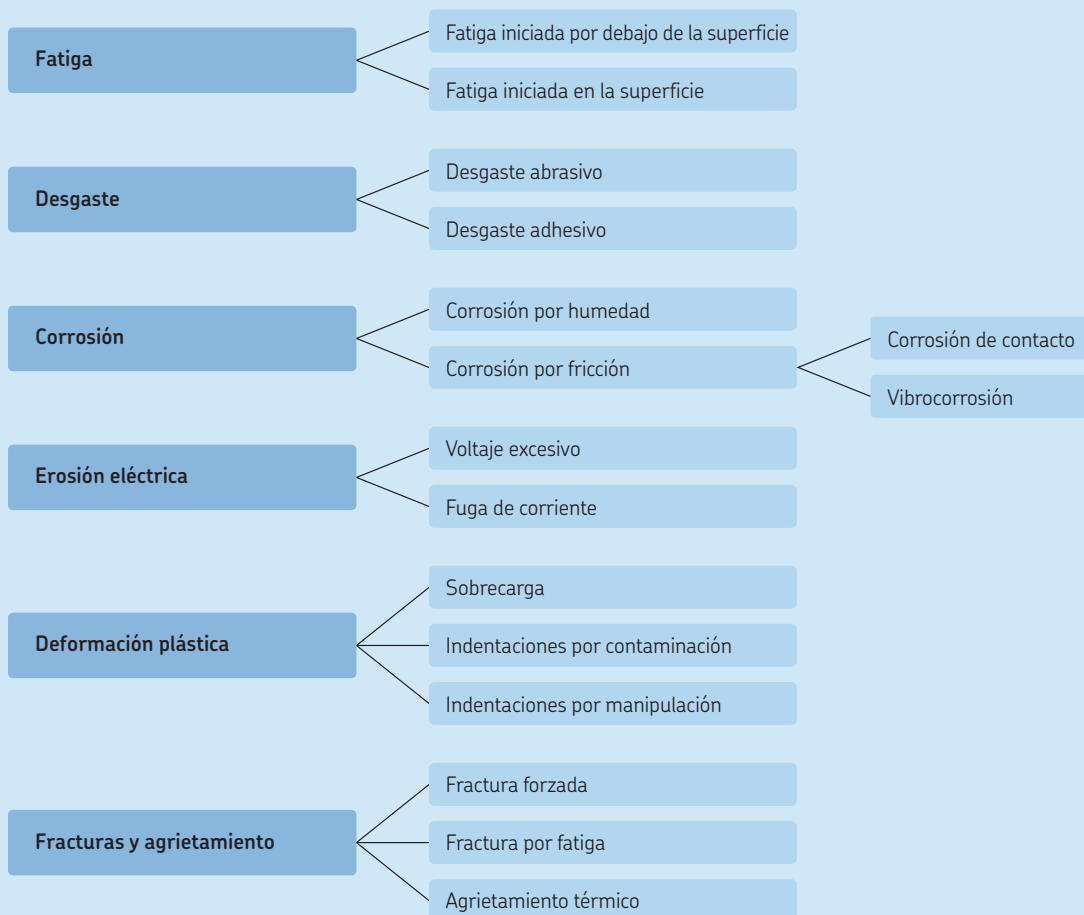
Normalmente se entiende que:

- Una causa de daños (fallo) da lugar a un cierto cambio característico.
- Un cierto mecanismo de fallo da lugar a un cierto modo de fallo (patrón).
- A partir del daño observado, se puede determinar posiblemente la causa raíz del fallo.

La ISO ha trabajado mucho para definir los distintos modos de fallo y clasificarlos. Ello ha dado lugar a la norma ISO 15243 (→ **diagrama 1**), publicada por primera vez en 2004. Si analizamos los fallos de los rodamientos, podemos observar un total de seis modos de fallo principales, que se pueden clasificar a su vez en diversos submodos.

Diagrama 1

ISO 15243: Clasificación de los daños en los rodamientos, con 6 modos de fallo principales y sus submodos.



La clasificación se basa en tres factores principales:

- daños y cambios ocurridos durante el funcionamiento (tan pronto como el rodamiento sale de la fábrica)
- formas de cambios características del aspecto que pueden atribuirse a una causa determinada
- clasificación según las características visibles (incluido el uso de equipos no destructivos para ampliación, como microscopios)

Fatiga

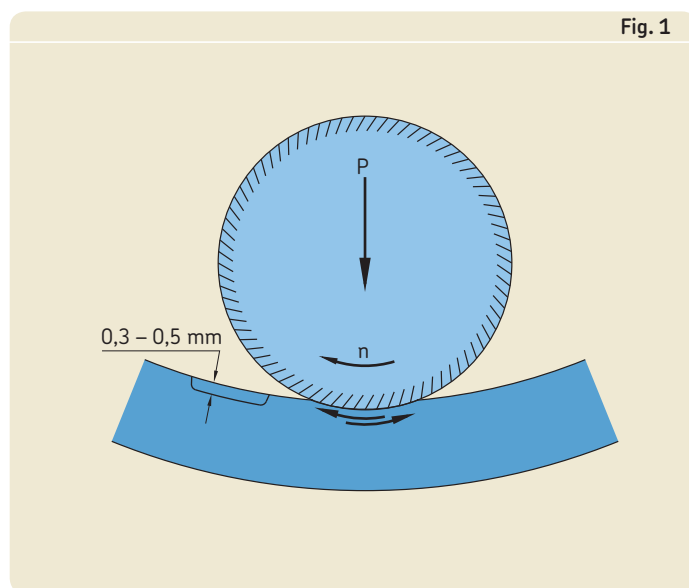
Fatiga iniciada por debajo de la superficie

El deterioro del material está causado por la carga cíclica y la acumulación de tensiones justo debajo de la superficie del camino de rodadura, lo que produce, en último término, el deterioro del material. Las grietas aparecen y se propagan por debajo de la superficie y, una vez que llegan a la superficie, se produce el descascarillado (→ fig. 1).

Fatiga iniciada en la superficie

Este tipo de fatiga se debe a unas condiciones de lubricación inadecuadas. La función del lubricante es formar una película de aceite que separe las piezas en movimiento. En condiciones de lubricación deficiente, por ejemplo, debido a la contaminación o a una viscosidad inadecuada, se produce el contacto entre metales. Las asperezas (picos) de las superficies producen un cizallamiento entre sí que provoca tensiones causantes de la fatiga

*Descascarillado
causado por la fatiga*



del material, lo que da lugar al final a la aparición de microescamas. Inicialmente, es posible que aparezca una superficie brillante, al reducirse su rugosidad, pero el proceso continúa y la superficie adquiere un aspecto mate y se rompe.

Medidas correctivas (contra la fatiga de las superficies)

La fatiga iniciada por debajo de la superficie fue un importante modo de fallo en el pasado. Sin embargo, con las mejoras actuales en la fabricación del acero de rodamientos, se ha descubierto que los fallos de fatiga comienzan con mayor frecuencia por daños en la superficie que por grietas formadas debajo de ella.

Para evitar la fatiga superficial, tenga especial cuidado en elegir una viscosidad adecuada del lubricante teniendo en cuenta la temperatura y las velocidades de funcionamiento, y tome las precauciones adecuadas para asegurarse de que la contaminación o polución se mantenga fuera de la cavidad del rodamiento.



*Fatiga iniciada por
debajo de la superficie
en el camino de
rodadura del aro
exterior de un
rodamiento de bolas
de contacto angular*



*Fatiga iniciada en la
superficie en el camino
de rodadura del aro
interior de un
rodamiento de rodillos
cónicos*

Desgaste

El desgaste es el daño típico que se produce en las zonas de contacto de los cuerpos en movimiento. En la mayoría de las ocasiones, el desgaste es inevitable. Sin embargo, las circunstancias pueden hacer que se produzca desgaste en una fase temprana del uso del rodamiento. El desgaste puede ser de dos tipos: desgaste abrasivo (→ fig. 2) o desgaste adhesivo (→ fig. 3). Estos se producen debido a diferencias en la velocidad de las superficies de contacto en movimiento. La causa de las diferencias de velocidad puede ser el deslizamiento cinemático, la aceleración y/o la desaceleración.

Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste se debe a la presencia de partículas abrasivas en el lubricante. Puede tratarse de partículas contaminantes procedentes del exterior o del interior. Las partículas abrasivas desgastan la superficie de los caminos de rodadura, los elementos rodantes y también las jaulas metálicas. Esto normalmente hace que las superficies adquieran un aspecto mate.

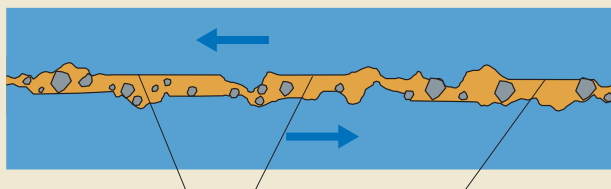
Por el contrario, si las partículas abrasivas son muy finas y duras, como el polvo de cemento, puede producirse un efecto de pulido y las superficies adquirirán un aspecto brillante.

A menudo una disposición de sellado inadecuada (o la ausencia de esta) provoca la penetración de contaminantes en la cavidad del rodamiento.

Un análisis del lubricante puede permitir descubrir el origen de la contaminación, lo que puede ayudar a encontrar una solución al problema.

Fig. 2

Desgaste abrasivo. El desgaste de pulido produce superficies brillantes



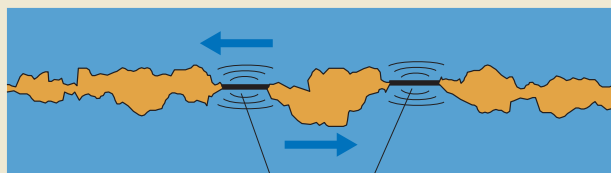
Superficies planas por el pulido y la deformación plástica de las asperezas de las superficies



Caminos de rodadura del aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula con desgaste abrasivo

Fig. 3

Desgaste adhesivo. Las diferencias de velocidad importantes y las cargas demasiado ligeras pueden causar deslizamiento, lo que produce temperaturas muy altas y adherencias



Material soldado



Desgaste adhesivo en el camino de rodadura del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos

Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo tiene lugar sobre todo en superficies en contacto sometidas a cargas ligeras, condiciones de lubricación deficiente e importantes diferencias de velocidad, lo que provoca el deslizamiento de los elementos rodantes.

Un ejemplo de ello es el paso de los elementos rodantes de la zona descargada a la zona cargada. Los elementos rodantes pueden perder velocidad en la zona descargada y acelerar al regresar a la zona cargada. Ello puede provocar una ruptura de la película lubricante, deslizamiento, aparición de calor y, posiblemente, transferencia de material del elemento rodante al camino de rodadura o viceversa. En una fase temprana, el aspecto de las superficies es brillante, pero pronto vuelve a ser mate con (más o menos) material adherido.

Medida correctiva (contra el desgaste abrasivo)

En primer lugar, compruebe si se está usando el lubricante apropiado y si el intervalo de reengrase y la cantidad son adecuados para la aplicación. Si el lubricante contiene contaminantes, compruebe los sellos para determinar si han de ser cambiados o mejorados. En algunos casos, según la aplicación, se puede necesitar un lubricante de viscosidad superior para aumentar la relación de viscosidad.

Medida correctiva (contra el desgaste adhesivo)

Seleccione el tipo y tamaño de rodamientos correctos para evitar situaciones de incumplimiento de los requisitos mínimos de carga de los rodamientos. Tenga en cuenta que la dirección de la atracción magnética entre el rotor y el estátor en los motores eléctricos industriales puede actuar contra la gravedad del rotor.

Asegúrese de aplicar una carga externa suficientemente grande a los rodamientos. Es sumamente importante recordar esto cuando se usen rodamientos de rodillos, ya que estos son los que se usan habitualmente para absorber cargas más pesadas.

Aplice cargas externas sobre el eje del rotor durante los procedimientos de prueba del motor; también se puede evitar el daño previo de los rodamientos por adherencias (→ capítulo 6, fig. 24 en la página 105).

Corrosión

Corrosión por humedad

A diferencia de otros procesos de deterioro, la corrosión puede producirse rápidamente y penetrar en profundidad en el material. Ello puede provocar daños graves en el rodamiento. La corrosión se produce en presencia de agua, líquidos corrosivos o humedad. Un alto nivel de humedad en el aire y el hecho de tocar los caminos de rodadura con los dedos pueden producir también este tipo de corrosión. Por ello, es importante contar con una buena protección. La corrosión a menudo tiene lugar durante la inactividad y entonces es visible por las marcas de corrosión a la distancia entre los elementos rodantes. El óxido profundo da lugar a los primeros daños en el rodamiento.

Corrosión por humedad en el aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos



Corrosión de contacto en el agujero de los rodamientos producida por un ajuste inadecuado en el eje

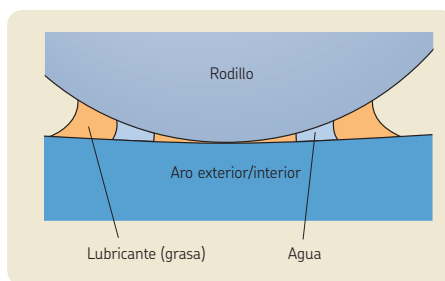


Corrosión de contacto en el diámetro exterior de un rodamiento



Corrosión de contacto

La causa raíz son los micromovimientos entre dos superficies cargadas. Esta corrosión por fricción se produce principalmente entre el diámetro exterior del rodamiento y el soporte y/o entre el agujero del rodamiento y el eje. Los micromovimientos están causados sobre todo por las cargas cíclicas con el paso de los elementos rodantes. Un ajuste inadecuado, la flexión del eje y/o imperfecciones en las superficies de contacto pueden ser la causa y/o acelerar su aparición. El aire puede entrar en contacto con las superficies no protegidas, y acelerar el avance de la corrosión. El óxido de hierro formado tiene un volumen mayor que el acero puro. Esto puede provocar la expansión del material y unas tensiones elevadas, incluso en el camino de rodadura del rodamiento, lo que da lugar a fatiga prematura. La



Esquema de la corrosión por humedad

Corrosión de contacto en el agujero de los rodamientos producida por un ajuste inadecuado en el eje



corrosión de contacto puede producir fácilmente el agrietamiento de los aros.

ácido u otras sustancias químicas agresivas por medio de un sellado adecuado.

Vibrocorrosión

La vibrocorrosión, llamada también daños por corrosión por fricción, se produce en las zonas de contacto entre los elementos rodantes y el camino de rodadura debido a micromovimientos y a la resiliencia del contacto elástico bajo las vibraciones cíclicas. Debido a que se produce cuando el rodamiento está fijo y cargado, el daño aparece al momento del paso de los elementos rodantes. Según la intensidad de la vibración, la condición del lubricante y la carga, tiene lugar una combinación de corrosión y desgaste, con la formación de depresiones poco profundas en los caminos de rodadura. Normalmente, la vibración provoca una ruptura local de la película lubricante (protectora), así como el contacto entre metales, corrosión de las superficies y desgaste abrasivo. El aspecto suele ser, por lo tanto, mate, a menudo descolorido y a veces rojizo debido a la aparición de corrosión. En ocasiones las depresiones pueden tener un aspecto brillante. Los daños por vibrocorrosión producen cavidades esféricas en los rodamientos de bolas y líneas en los rodamientos de rodillos.

Medida correctiva (contra la corrosión por humedad)

Conserve los rodamientos en un lugar seco en el cual se elimine prácticamente el riesgo de cambios considerables de temperatura, que pueden provocar una importante condensación de agua. Para el transporte en zonas tropicales, utilice envases tropicales seguros.

Mantenga el conservante en los rodamientos nuevos y no lo elimine durante el proceso de manipulación y montaje. Evite el contacto de los rodamientos con la humedad, agua,

Medida correctiva (contra la corrosión de contacto)

Según las condiciones de carga de los aros del rodamiento (giratoria o de dirección indeterminada, o fija), las cargas equivalentes del rodamiento (ligeras, normales o pesadas), el material y las temperaturas, elija el ajuste correcto del eje o del soporte (→ **capítulo 4, página 65**).

Medida correctiva (contra la vibrocorrosión)

La vibrocorrosión durante el transporte se puede evitar. Fije los rodamientos durante el transporte tal como se explica a continuación. En primer lugar, bloquee el eje en sentido axial mediante una pieza de acero plana doblada en U, precargando cuidadosamente el rodamiento de bolas en el lado opuesto al accionamiento. A continuación, cargue radialmente el rodamiento en el lado de accionamiento con una correa (→ **capítulo 6, fig. 28 en la página 106**). Al hacerlo, los elementos rodantes quedan bloqueados en su posición y no se puede producir ningún movimiento relativo. Así se evitan los daños por vibración.

En caso de períodos de inactividad prolongados de los motores montados *in situ*, gire el eje de vez en cuando. La vibrocorrosión se puede evitar también instalando motores con rodamientos precargados mediante muelles (→ **capítulo 2, Precarga mediante muelles en la página 49**).

No coloque un motor eléctrico no giratorio cerca de máquinas vibratorias o en un entorno donde se produzcan vibraciones importantes.

Daños por vibrocorrosión en el aro interior y exterior de un rodamiento de rodillos cilíndricos.
Los daños por vibrocorrosión se producen durante la inactividad y se caracterizan por daños a la distancia entre los elementos rodantes



Erosión eléctrica

La erosión eléctrica se puede producir cuando pasa una corriente de un aro al otro a través de los elementos rodantes de un rodamiento. El *Voltaje excesivo* (alta densidad de corriente) y la *Fuga de corriente* (baja intensidad de corriente) son dos submodos de fallo (→ **página 119**).

Mientras que el “voltaje excesivo” es un fenómeno eléctrico frecuente y conocido, es preciso analizar de forma más detenida la causa raíz de las corrientes en el rodamiento por “fugas de corriente”.

Existen tres causas principales para el paso de corriente a través de los rodamientos en los motores eléctricos y generadores:

- carga electrostática
- asimetrías de flujo magnético
- corrientes de alta frecuencia debidas al voltaje de modo común junto con impulsos de voltaje de alta velocidad de rotación

Los dos primeros fenómenos (carga electrostática y asimetrías de flujo magnético) se conocen desde hace décadas y representan los motivos clásicos de corrientes en los rodamientos. El voltaje de modo común sin desvanecimiento junto con impulsos de voltaje de alta velocidad de rotación se ha convertido en un problema debido a la introducción de los modernos convertidores de frecuencia de conmutación rápida.

Corrientes por carga electrostática

En las aplicaciones de ventiladores accionados por correa, por ejemplo, se pueden producir efectos de carga electrostática debido a la electricidad por fricción. Se puede acumular voltaje CC en el eje (referido al bastidor o a tierra, respectivamente) o entre los rodamientos, por lo que puede pasar corriente eléctrica a través de los rodamientos.

Corrientes por asimetrías de flujo magnético

Con los voltajes de línea sinusoidal, la corriente en los rodamientos se genera debido a asimetrías en el circuito magnético del motor. A causa de las limitaciones de fabricación, es imposible conseguir una simetría electromagnética perfecta. La distribución asimétrica del flujo dentro del motor induce un voltaje axial en el eje, lo cual produce a su vez una circulación de corriente de baja frecuencia que pasa a través de los rodamientos. El problema se da en particular en los motores grandes con un número reducido de pares de polos (por ejemplo, motores bipolares). Estos presentan mayores asimetrías de flujo que los motores pequeños o los motores con muchos polos. Se han desarrollado algunas medidas contra ello, normalmente medios de aislamiento diferentes, pero el principal enfoque para minimizar el problema ha sido un mejor diseño de los motores.

Corrientes de alta frecuencia

En la década del noventa, el uso creciente de transmisiones de velocidad variable (variable speed drives, VSD) tuvo un enorme efecto en el número de fallos de rodamientos identificados. El motivo fue que los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia utilizados en los convertidores de frecuencia habían cambiado los tiristores por transistores de desactivación de puerta (gate turn off transistors, GTO) y luego por transistores bipolares de puerta aislada (insulated gate bipolar transistors, IGBT), que predominan actualmente en el mercado de las VSD. Estos IGBT se utilizan para crear la forma de onda del voltaje de salida modulada por ancho de impulsos (PWM) (→ **diagrama 2**) y mejorar así la eficiencia y el rendimiento dinámico de la transmisión. Sin embargo, toda ventaja tiene su contraprestación. Así, aparte de los voltajes clásicos y corrientes generadas por el propio motor, se han observado nuevos efectos cuando el motor recibe alimentación desde un convertidor PWM.

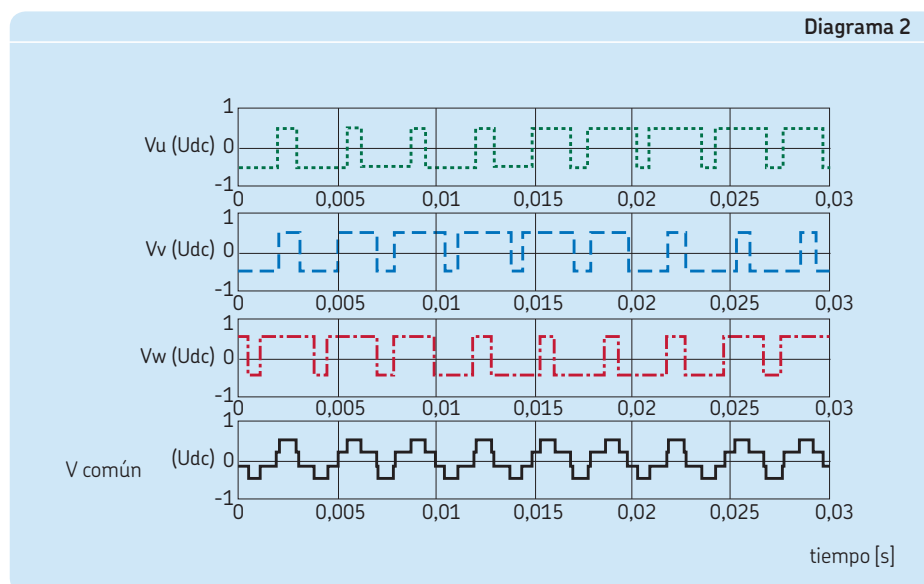
Uno de los motivos de las corrientes parásitas de alta frecuencia es el hecho de que los voltajes de salida trifásicos del convertidor tienen la forma de una serie de impulsos cuadrados. La media aritmética de los voltajes trifásicos (referidos a tierra) no es cero, lo que crea un voltaje de modo común (→ **diagrama 2**).

Asimismo, las señales de voltaje PWM no solo cambian con una alta frecuencia de conmutación (impulsos frecuentes), sino además muy rápido, en un período muy breve (impulsos de gran intensidad). Debido a la alta velocidad de rotación de las señales de voltaje (→ **diagrama 3, página 118**), surgen las llamadas corrientes dV/dt y efectos parásitos asociados.

Estos dos fenómenos inherentes a los convertidores de frecuencia dan lugar a corrientes parásitas de alta frecuencia en los rodamientos que se pueden clasificar como:

- corrientes de puesta a tierra del eje de alta frecuencia
- corrientes de circulación de alta frecuencia
- corrientes de descarga capacitiva

Las tres fases: su suma vectorial no es igual a cero, pero crea el voltaje de modo común



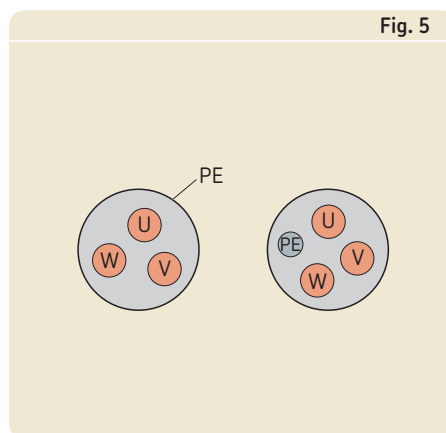
Las corrientes de puesta a tierra del eje de alta frecuencia están relacionadas sobre todo con una deficiencia en el cableado (→ **fig. 5**), p. ej., cables no apantallados y asimétricos. Debido al voltaje de modo común procedente del convertidor, se puede inducir un voltaje de puesta a tierra protector de alta frecuencia. Si la impedancia del cable de retorno entre el terminal del motor y el convertidor de frecuencia es demasiado alta y la puesta a tierra del estátor es incorrecta, la corriente seguirá un recorrido desde el estátor a través de los rodamientos y el eje a través de la toma de tierra para regresar al convertidor.

El voltaje de modo común provoca una perturbación de modo común, que produce una asimetría de corriente entre las tres fases en los devanados del estátor. La suma de la corriente en la circunferencia del estátor no es cero. Existe una variación de flujo de alta frecuencia alrededor del eje, lo que crea un voltaje de alta frecuencia en el eje. Ello genera un riesgo potencial de corrientes de circulación de alta frecuencia que fluyen axialmente a lo largo del rotor, atraviesan un rodamiento y regresan a través del otro rodamiento.

Cuando un rodamiento está funcionando correctamente, una película de aceite separa los elementos rodantes de los caminos de rodadura del aro. Desde el punto de vista eléctrico, esta película actúa como resistencia dieléctrica, cargada por el voltaje del rotor. Para altas frecuencias, forma un condensador en el cual la capacitancia depende de diversos parámetros, como el tipo de lubricante, la temperatura y la viscosidad, además del espesor de la película. Si el voltaje alcanza un cierto límite, llamado voltaje disruptivo o umbral del lubricante, el condensador se descargará y se

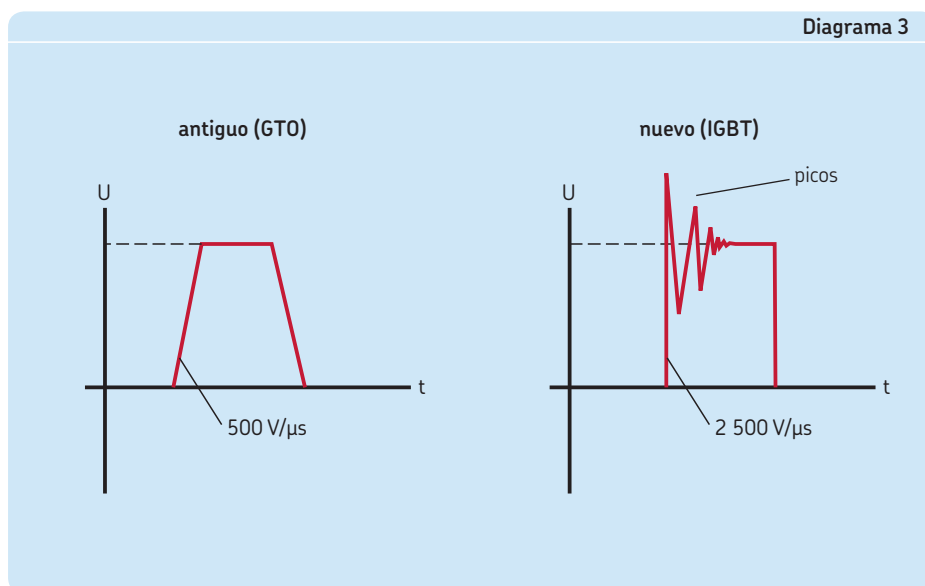
producirá una corriente de descarga capacitiva de alta frecuencia. En tal caso, la corriente está limitada por las capacitancias parásitas internas del motor, pero se producirá cada vez que el convertidor conmute.

Evidentemente, un motor de inducción alimentado por un convertidor de frecuencia es un sistema de transmisión muy complejo en el que influyen muchos parámetros. El conjunto de la transmisión, incluida la alimentación, conexión de CC, elementos de conmutación, cables, motor y carga, debe considerarse un sistema total formado por inductancias y capacitancias distribuidas.



Comparación de cable apantallado y simétrico con cable no apantallado y asimétrico (PE = Toma de tierra [Power Earth])

Impulso de voltaje de un tiristor GTO en comparación con un transistor IGBT



Procesos de erosión eléctrica

Voltaje excesivo

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un rodamiento pasando de un aro al otro a través de los elementos rodantes, pueden producirse daños. En las superficies de contacto, el proceso es similar a la soldadura por arco eléctrico, donde existe una alta densidad de corriente sobre una superficie de contacto pequeña. El material se calienta hasta temperaturas que van desde los niveles de templado hasta los de fundición. Esto provoca la aparición de áreas descoloridas, de tamaño variable, en las que el material se ha templado, se ha vuelto a endurecer o se ha fundido. En los lugares donde el material se ha fundido, se forman cráteres.

Aspecto: cráteres únicos en los elementos rodantes y/o los caminos de rodadura. Quemaduras localizadas en los elementos rodantes y los caminos de rodadura.

Fuga de corriente

Cuando la corriente circula continuamente en forma de arcos a través del rodamiento en servicio, incluso con una baja intensidad, las superficies del camino de rodadura se ven afectadas por el calor y se erosionan, y se forman miles de microcráteres, la mayoría de ellos en la superficie de contacto de rodadura. Estos cráteres están situados cerca unos de otros y son de pequeño diámetro en comparación con los daños producidos por un voltaje excesivo. A partir de los cráteres, aparecerán estrías (ondulaciones) con el paso del tiempo como efecto secundario en los caminos de rodadura de los aros y los rodillos.

El alcance de los daños depende de diversos factores:

- tipo de rodamiento
- tamaño del rodamiento
- régimen eléctrico
- carga del rodamiento
- velocidad y lubricante

Además de los daños en la superficie de acero de los rodamientos, la grasa próxima a los daños puede carbonizarse, y provocar un deterioro de las condiciones de lubricación, con la consiguiente deformación superficial y descascarillado.

Microcraterización

Debido a que el uso de convertidores de frecuencia está más extendido en la actualidad, la microcraterización es, por lejos, el efecto más común del paso de la corriente eléctrica. El daño se caracteriza por marcas de picaduras por fundición. El aspecto es el de una superficie gris mate. Múltiples microcráteres cubren las superficies del elemento rodante y de los caminos de rodadura. El tamaño de los cráteres es sumamente pequeño, en la mayoría de los casos de 5 a 8 μm de diámetro, independientemente de si se encuentran en el aro interior, en la zona cargada del aro exterior o en los elementos rodantes. La forma real de estos cráteres solo se puede ver con un microscopio empleando un gran aumento.

Estrías u ondulaciones

Las estrías u ondulaciones tienen el aspecto de múltiples líneas grises a lo ancho de los caminos de rodadura. Las estrías se forman por efecto de la vibración de resonancia

Voltaje excesivo

Camino de rodadura del aro exterior de un rodamiento rígido de bolas.
1 Cráteres sucesivos en forma de cuentas
2 Forma de zigzag en el aro exterior y en la bola



Estrías u ondulaciones en un camino de rodadura causadas por el paso de una corriente eléctrica perjudicial.

Camino de rodadura del aro interior de un rodamiento rígido de bolas



Fuga de corriente

El aspecto gris mate de la superficie de los elementos rodantes puede ser un signo de microcraterización

Estrías u ondulaciones en un camino de rodadura causadas por el paso de una corriente eléctrica perjudicial.

Camino de rodadura del aro exterior de un rodamiento rígido de bolas



7 Daños en los rodamientos y medidas correctivas

Erosión eléctrica

mecánica que se produce al pasar los elementos rodantes sobre los microcráteres.

Las estrías no se consideran un modo de fallo principal, sino que se consideran un daño secundario del rodamiento, algo que se hace visible con el paso del tiempo.

Degradación del lubricante

Las temperaturas locales elevadas hacen que los aditivos del lubricante se carbonicen o quemen el aceite base. Ello hace que los aditivos se consuman más rápidamente. En caso de lubricación con grasa, esta se vuelve negra y dura. Esta avería rápida acorta drásticamente la vida útil de la grasa y del rodamiento.

Si no se lleva a cabo una relubricación a tiempo, se pueden producir daños secundarios por lubricación deficiente.

Medida correctiva: una solución a la erosión eléctrica

Una clave para solucionar el problema de la erosión eléctrica en los rodamientos de motores es aislar el eje del soporte, de forma que las corrientes parásitas no “busquen la tierra” a través de los rodamientos. A pesar de que no existe una única manera ideal de conseguirlo, algunas soluciones, como los recubrimientos especiales del eje o las placas de protección de extremo aisladas, pueden ser más caras que otras.

Una solución muy rentable para resolver el problema es el uso de rodamientos aislados. Se puede aplicar un recubrimiento cerámico a uno de los aros – INSOCOAT (→ **capítulo 1, página 26**) – o usar elementos rodantes cerámicos y crear un rodamiento híbrido (→ **capítulo 1, página 28**). Cualquiera de estas

soluciones cumplirá dos funciones, al actuar a la vez como rodamiento y como aislante.

Los rodamientos aislados de SKF tienen unas dimensiones principales estándares conformes con la norma ISO 15. Se deben manipular con el mismo cuidado que los rodamientos estándares.



Degradación del lubricante

Grasa negra y descolorida en las barras de la jaula por el paso de la corriente

Deformación plástica

Se produce una deformación permanente cuando se supera el límite elástico del material.

Sobrecarga

La sobrecarga se debe a cargas estáticas o de choque y provoca una deformación plástica. Esto se puede identificar por depresiones a la distancia entre los elementos rodantes. El motivo del problema suelen ser unos procedimientos de montaje incorrectos, es decir, aplicar la fuerza de montaje al aro equivocado, lo que produce una carga de choque sobre los elementos rodantes.

Indentaciones por contaminación

Esto se debe a (→ fig. 6) la penetración de partículas extrañas (contaminantes) en el rodamiento, introducidas en los caminos de rodadura por los elementos rodantes. El tamaño y la forma de las mellas dependen de la naturaleza de las partículas. La geometría del camino de rodadura en la mella queda destruida y se deteriora la lubricación. Aparecen tensiones en la superficie y la fatiga provoca el descascarillado prematuro de la superficie.

Indentaciones por manipulación

Pueden aparecer indentaciones por manipulación cuando las superficies de los rodamientos son abiertas por objetos duros y afilados. Por ello, los rodamientos deben manipularse siempre con cuidado. Aunque están fabricados en acero de la máxima calidad, las sobrecargas localizadas, p. ej., por la caída de un rodamiento, podrían producir mellas en las superficies, y dejar inservible el rodamiento.

Medida correctiva (contra la sobrecarga)

Use herramientas y métodos de montaje apropiados. Con los rodamientos de rodillos cilíndricos, se recomienda especialmente usar un casquillo guía (→ capítulo 6, fig. 10 en la página 99).

Medida correctiva (contra las indentaciones por contaminación y por manipulación):

- No desembale el rodamiento hasta inmediatamente antes del montaje.
- Mantenga el taller y las herramientas limpios.
- Use lubricante limpio.
- Al efectuar la relubricación, compruebe que la boquilla de grasa está limpia.
- Asegúrese de que los sellos y las superficies de contacto estén en buena condición.
- Manipule los rodamientos con cuidado.



Sobrecarga

La fuerza de montaje se ha transmitido sobre los elementos rodantes, lo que produjo mellas a la distancia entre los elementos rodantes, con desplazamiento axial



Sobrecarga

Se produce la rodadura excesiva sobre las mellas, provocadas por un montaje incorrecto, y aparecen rápidamente escamas

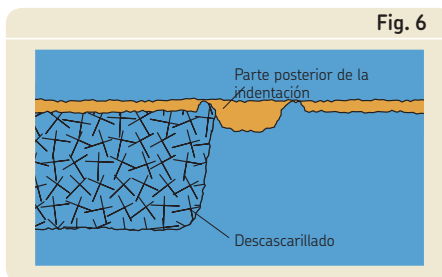
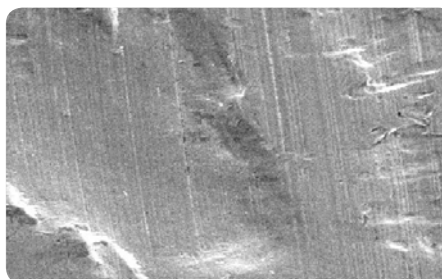


Fig. 6

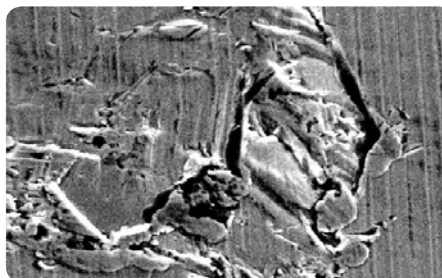
Indentaciones por contaminación

Las mellas destruyen la geometría y provocan la fatiga iniciada en la superficie en la zona situada detrás de la escama



Indentaciones por contaminación

de partículas blandas



Indentaciones por contaminación

de partículas duras



Indentaciones por manipulación

Daños en el aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos por un montaje incorrecto

Fracturas y agrietamiento

Las fracturas (o agrietamiento) se producen cuando se supera la resistencia máxima a la tensión del material.

Fractura forzada

La fractura forzada está provocada por una concentración de tensión superior a la resistencia a la tensión del material a causa de un impacto local o un esfuerzo excesivo. Dos de las causas frecuentes son:

- Manipulación brusca (impacto) al montar o desmontar un rodamiento. Los golpes de mazo aplicados a un cincel templado directamente contra el aro pueden producir la formación de grietas finas, lo que puede provocar el desprendimiento de trozos de material del aro al poner en funcionamiento el rodamiento.
- Calado excesivo sobre un casquillo o asiento cónico. Las consiguientes tensiones de tracción (tensiones circulares) que se generan en los aros producen grietas cuando se pone en funcionamiento el rodamiento.

Fractura por fatiga

Este tipo de fractura se inicia cuando se supera la resistencia a la fatiga. Aparece entonces una grieta que se irá extendiendo. Finalmente se agrietará el aro o jaula completos. La fractura por fatiga puede producirse cuando se ha aplicado un ajuste apretado, causante de elevadas tensiones circulares. Después, las tensiones circulares y hercianas combinadas pueden dar lugar a la fatiga prematura y el agrietamiento completo del aro.

Agrietamiento térmico

El agrietamiento térmico puede tener lugar cuando dos superficies son sometidas a un roce fuerte entre sí. El calor por fricción producido provoca grietas, generalmente en ángulo recto respecto de la dirección de deslizamiento.

Medidas correctivas (contra la fractura y el agrietamiento)

Aplique los ajustes conforme a lo indicado en el **capítulo 4, página 66 ff**, y utilice las herramientas y métodos de montaje apropiados. Manipule los rodamientos con cuidado. No exponga nunca los rodamientos a impactos de su entorno.



Fractura forzada
Bridas agrietadas del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos a causa de una carga de impacto



Fractura por fatiga
Fractura por fatiga del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos



Agrietamiento térmico
Agrietamiento térmico del reborde del aro exterior de un rodamiento de rodillos cilíndricos



Agrietamiento térmico
Agrietamiento térmico del reborde del aro exterior de un rodamiento de rodillos cilíndricos

7 Daños en los rodamientos y medidas correctivas

Fracturas y agrietamiento

8 Soluciones SKF

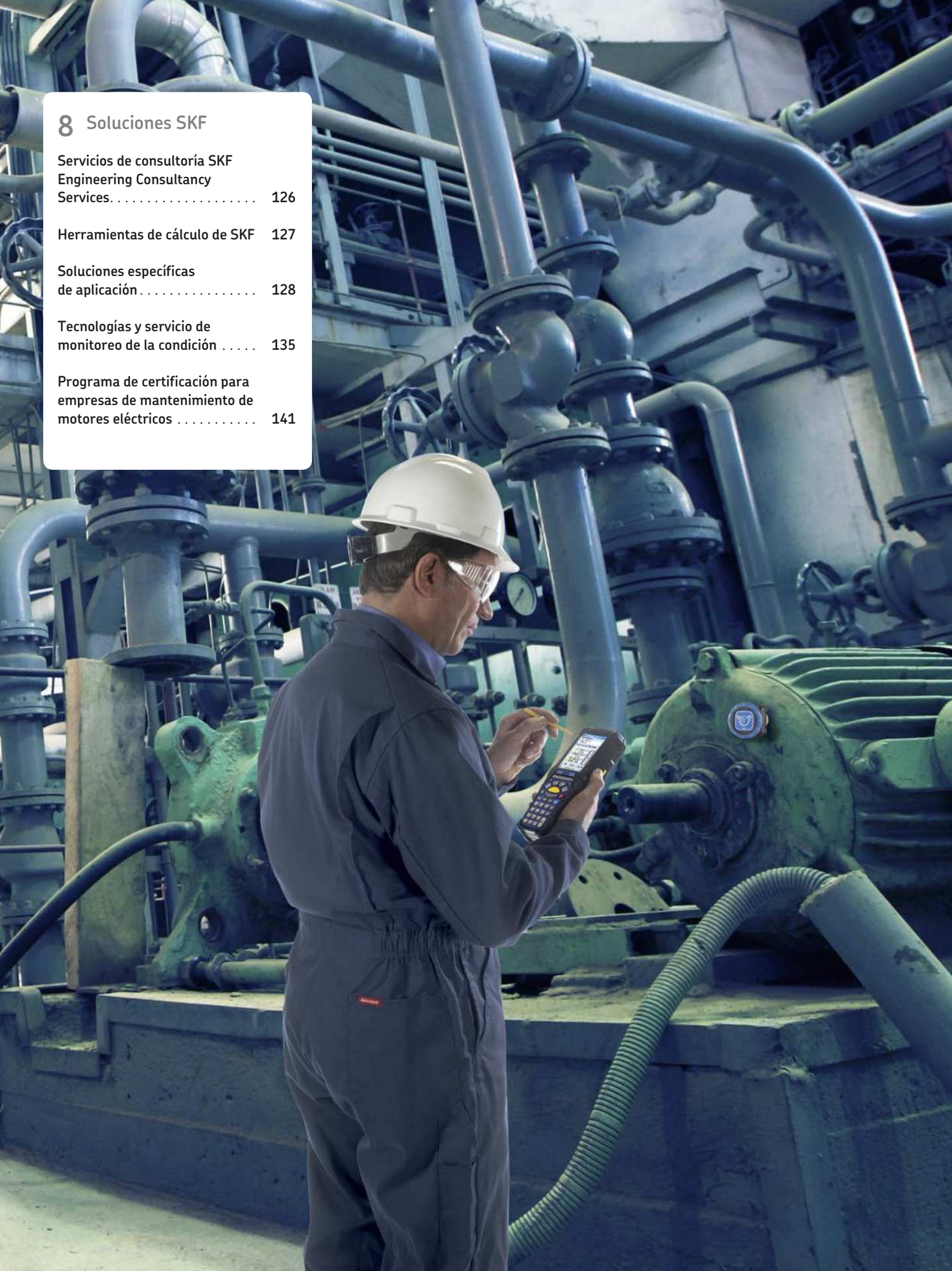
Servicios de consultoría SKF
Engineering Consultancy
Services. 126

Herramientas de cálculo de SKF 127

Soluciones específicas
de aplicación. 128

Tecnologías y servicio de
monitoreo de la condición 135

Programa de certificación para
empresas de mantenimiento de
motores eléctricos 141



Soluciones SKF

SKF ha empleado su amplio conocimiento de las aplicaciones industriales para desarrollar soluciones de sistemas que ofrezcan resultados rentables.

Estas soluciones, algunas de las cuales ni siquiera incorporan rodamientos, ponen de relieve el continuo esfuerzo de SKF para aplicar sus competencias principales en las áreas del futuro: mecatrónica y electrónica.

En este capítulo, se presentan algunas soluciones que podrían ofrecerse para cumplir las condiciones reales de las aplicaciones típicas de motores eléctricos y generadores.

Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services

En este manual, se puede encontrar la información básica necesaria para calcular y diseñar disposiciones de rodamientos para motores eléctricos. No obstante, para determinadas situaciones, es conveniente predecir con la máxima precisión posible el rendimiento previsto del rodamiento, ya sea porque no se dispone de suficiente experiencia con disposiciones de rodamientos similares o porque los costos y/o la confiabilidad operativa son de extrema importancia. En estos casos, por ejemplo, se recomienda consultar a los Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services. Estos servicios ofrecen cálculos y simulaciones utilizando programas informáticos de tecnología avanzada, junto con los conocimientos completos sobre aplicaciones de SKF basados en cien años de experiencia acumulada en el ámbito de los componentes para máquinas giratorias.

Los especialistas en ingeniería de aplicaciones de SKF pueden ayudarlo con los siguientes servicios:

- analizar los problemas técnicos relacionados con las aplicaciones
- sugerir las soluciones de sistemas adecuadas
- seleccionar el lubricante y el método de lubricación adecuados, las soluciones de sellado y un programa de mantenimiento optimizado

Los Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services ofrecen un nuevo enfoque de los servicios relacionados con máquinas e instalaciones para fabricantes de equipos originales y usuarios finales. Entre estos beneficios, se encuentran:

- procesos de desarrollo más rápidos y menor tiempo de salida al mercado

- reducción de los costos de implementación mediante pruebas virtuales antes del inicio de la producción
- mejora del sistema de rodamientos mediante la reducción de los niveles de ruido y vibración
- prolongación de la vida útil mediante la mejora del sistema de lubricación o sellado

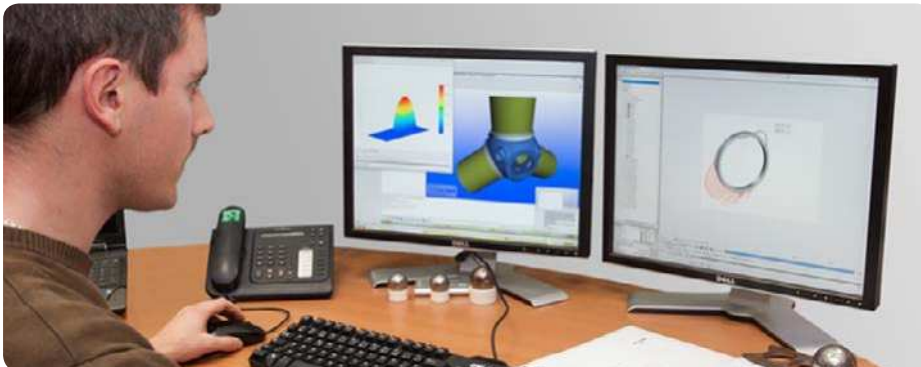
Programas informáticos avanzados

Los Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services cuentan con programas informáticos muy avanzados que se pueden utilizar para lo siguiente:

- modelado analítico de sistemas de rodamientos completos, compuestos por eje, soporte, engranajes, acoplamientos, etc.
- análisis estadístico para determinar las deformaciones elásticas y las tensiones que se producen en los componentes de los sistemas mecánicos
- análisis dinámico para determinar el comportamiento vibratorio de los sistemas en condiciones de trabajo (prueba virtual)
- presentación visual y animada de la flexión estructural y de componentes
- optimización de la resistencia del sistema, con lo que se consigue, por ejemplo, una reducción de las temperaturas, menores niveles de ruido y vibración, y menor consumo energético
- optimización de los costos del sistema

Los programas informáticos estándares utilizados por los Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services para cálculos y simulaciones se describen de manera breve en Herramientas de cálculo de SKF (→ **página 127**).

Para obtener más información sobre los Servicios de consultoría SKF Engineering Consultancy Services, comuníquese con su representante SKF local.



Herramientas de cálculo de SKF

SKF cuenta con uno de los conjuntos de paquetes de modelado y simulación más completos y potentes de la industria de los rodamientos. Estos incluyen desde herramientas fáciles de usar basadas en las fórmulas del *Catálogo de rodamientos SKF* hasta los más sofisticados sistemas de cálculo y simulación ejecutados en computadoras paralelas.

SKF ha desarrollado una variedad de programas para satisfacer las diversas necesidades de los clientes: desde simples comprobaciones de diseños, pasando por investigaciones moderadamente complejas, hasta las simulaciones más avanzadas para el diseño de rodamientos y máquinas. En la medida de lo posible, estos programas están a disposición de los clientes para el uso en sus computadoras. Asimismo, se presta una atención especial para brindar integración e interoperabilidad de los diferentes sistemas entre sí.

Herramientas de cálculo disponibles en línea, en skf.com

Encontrará herramientas fáciles de usar para el cálculo y la selección de rodamientos en línea, en skf.com. El enlace específico depende del país desde el cual se acceda a la web de SKF. Para obtener más detalles, comuníquese con su representante SKF local o con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF. Se ofrecen funciones de búsqueda de rodamientos por su designación o sus dimensiones, y también se pueden evaluar sistemas de rodamientos sencillos. Las ecuaciones que se emplean se corresponden con las utilizadas en este catálogo.

Las herramientas de ingeniería interactivas de SKF permiten generar dibujos de los rodamientos y soportes que se pueden utilizar en la mayoría de los programas CAD disponibles en el mercado.

SKF Bearing Beacon

SKF Bearing Beacon es el programa principal de aplicaciones de rodamientos empleado por los ingenieros de SKF para encontrar la mejor solución de sistemas de rodamientos para sus clientes. Al trabajar en un entorno virtual, los ingenieros de SKF combinan sistemas mecánicos que incluyen ejes, engranajes y soportes con un modelo de rodamiento preciso para analizar con detalle el comportamiento del sistema. El programa permite analizar también la fatiga de los rodamientos mediante el método de la vida nominal de SKF. SKF Bearing Beacon es el resultado de años de investigación y desarrollo en el seno de SKF.

Orpheus

La herramienta numérica Orpheus sirve para estudiar y optimizar el comportamiento dinámico de aplicaciones de rodamientos críticas en términos de ruido y vibración, como motores eléctricos y cajas de engranajes. El programa se utiliza también para resolver ecuaciones completas de movimiento no lineales para un sistema de rodamientos y sus componentes adyacentes, como engranajes, ejes y soportes. Orpheus proporciona un conocimiento en profundidad sobre el comportamiento dinámico de una aplicación, incluidos los rodamientos, teniendo en cuenta las desviaciones de forma (ondulación) y la desalineación.

Esto permite a los ingenieros de SKF determinar el tipo y tamaño de rodamiento más adecuados, así como las condiciones de montaje y precarga correspondientes para una aplicación determinada.

Beast

Beast es un programa de simulación que permite a los ingenieros de SKF simular la dinámica detallada en el interior de un rodamiento. Se puede considerar como un banco de pruebas virtual para ejecutar estudios detallados de las fuerzas, momentos, etc. que se producen en el interior de un rodamiento, prácticamente con cualquier condición de carga.

Esto permite la "prueba" de nuevos conceptos y diseños en menos tiempo y obteniendo más información en comparación con las pruebas físicas tradicionales.

Otros programas

Además de los programas mencionados anteriormente, SKF ha desarrollado programas informáticos especializados que permiten a sus investigadores ofrecer a los clientes rodamientos con un acabado superficial optimizado que prolonga la vida útil del rodamiento en condiciones de funcionamiento severas. Estos programas pueden calcular el espesor de la película de lubricante en contactos con lubricación elastohidrodinámica. También se calcula de forma detallada el espesor localizado de la película resultante de la deformación de la topografía tridimensional de la superficie en el interior de dichos contactos, así como la consiguiente reducción de la fatiga del rodamiento.

Los ingenieros de SKF utilizan también paquetes disponibles en el mercado para efectuar, por ejemplo, análisis dinámicos de sistemas genéricos o de elementos finitos. Estas herramientas están integradas con los sistemas de propiedad exclusiva de SKF, lo que permite una conexión más rápida y sólida con los datos y modelos del cliente.

Soluciones específicas de aplicación

Motores de inducción equipados con convertidores de frecuencia

Desde la década del noventa, ha aumentado el uso de convertidores de frecuencia con modulación por ancho de impulsos (PWM) para ajustar la velocidad de los motores. Desde entonces, se ha observado un número creciente de fallos prematuros de los rodamientos causados por erosión eléctrica (debida a un voltaje excesivo y fugas de corriente). Estos tipos de fallos suelen provocar paradas imprevistas de las máquinas que reducen la producción, y aumentan de forma significativa los costos de mantenimiento y/o de garantía.

Se ofrecen más detalles en el **capítulo 7, Procesos de erosión eléctrica, página 119**, y en el **capítulo 1, INSOCOAT y Rodamientos híbridos**, a partir de la **página 26**.

Kits de anillos de conexión a tierra para ejes SKF de la serie TKGR

Mientras que los rodamientos INSOCOAT e híbridos protegen los rodamientos contra el paso de la corriente eléctrica, los anillos de conexión a tierra para ejes son un complemento potencial para desviar la corriente eléctrica de los ejes, a través de las escobillas, al soporte y a tierra, y proteger así toda la máquina más allá de los rodamientos.

Los kits de anillos de conexión a tierra para ejes TKGR constan de un anillo de conexión a tierra para ejes y una selección de abrazaderas y racores de montaje especialmente diseñados para su instalación en motores eléctricos industriales con tamaño de bastidor IEC ya existentes. Son fáciles de instalar en el motor sin grandes modificaciones del diseño de la tapa del motor (→ **fig. 1**). Según la potencia del motor y de la aplicación, puede ser necesario el uso de un TKGR junto con rodamientos INSOCOAT o híbridos SKF.

La norma IEC 60034-25 menciona como las más efectivas las siguientes medidas contra la corriente en los rodamientos:

- para tamaños pequeños del bastidor del motor, 2 rodamientos aislados más una escobilla
- para máquinas grandes, 2 rodamientos aislados, acoplamiento aislado y una escobilla

Kit de anillos de conexión a tierra para ejes de la serie TKGR



Fig. 1

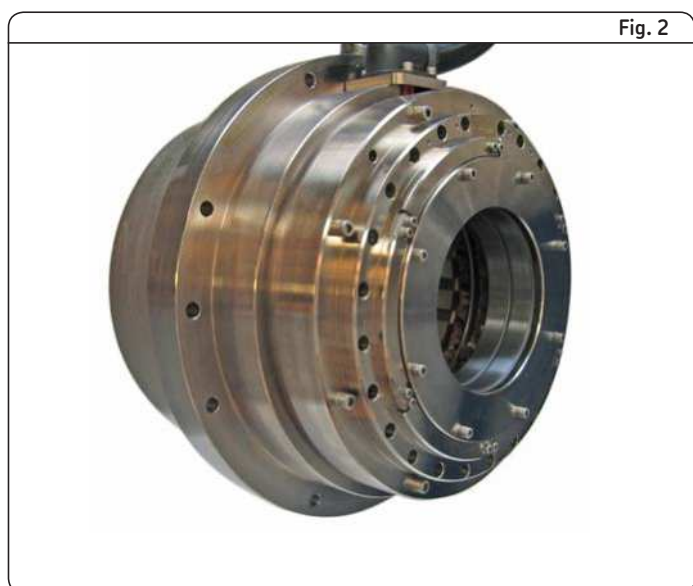
Rodamientos magnéticos para motores eléctricos

SKF ofrece una amplia gama de sistemas de rodamientos magnéticos activos para múltiples sectores industriales. En particular, los rodamientos magnéticos SKF se utilizan para motores eléctricos de alta velocidad variable (high variable speed, HVS) que accionan compresores centrífugos en la industria del petróleo y el gas, y generadores eléctricos de alta velocidad en el sector de la energía.

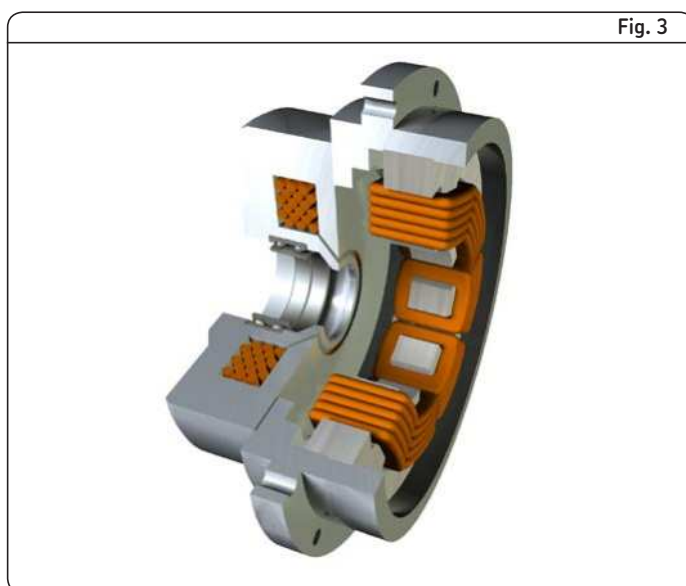
Los rodamientos magnéticos activos (active magnetic bearings, AMB) (→ **fig. 2 y 3**) son sistemas mecatrónicos que constan de componentes mecánicos, electroimanes, sensores y un sistema de control digital. Los AMB funcionan sin contacto físico entre las piezas giratorias y fijas, y no necesitan lubricantes. De esta forma, aumenta sustancialmente la confiabilidad y disponibilidad de la máquina giratoria. Además, los rodamientos magnéticos son respetuosos con el medioambiente.

Para obtener más información, comuníquese con su representante SKF local.

Cartucho de rodamiento magnético



Despiece de un rodamiento magnético radial típico



Control del motor en accionamientos trifásicos

El cambio de accionamientos de corriente continua a accionamientos trifásicos ofrece muchas ventajas. El motor de inducción de CA trifásico es el tipo más utilizado en aplicaciones industriales; constituye una solución resistente y prácticamente sin mantenimiento. Sin embargo, para controlar la velocidad y la dirección de giro, es necesario utilizar un dispositivo electrónico adicional que registre la velocidad del motor. Lo más habitual es montar un equipo de resolución o un codificador óptico en el motor para ejecutar esta función.

Unidad de rodamiento con sensor SKF

Las unidades de rodamientos con sensor SKF (→ fig. 4 y 5) son componentes mecatrónicos que combinan tecnologías de sensor y rodamiento. Están diseñados para funcionar como codificadores incrementales para el control de motores y/o de máquinas. Estas unidades emplean un sensor protegido contra las influencias externas. El cuerpo del sensor y el aro impulsor están unidos mecánicamente al rodamiento, lo que forma una unidad integral lista para el montaje. Las dimensiones compactas de este codificador permiten su integración en el motor. Esto simplifica el diseño del motor y el proceso de montaje, y reduce el número de componentes, ya que no se nece-

sita un acoplamiento entre el eje del motor y el codificador. Las unidades de rodamientos con sensor diseñadas y patentadas por SKF son sencillas y resistentes, y proporcionan una codificación compacta y confiable para aplicaciones de control muy exigentes. Están diseñadas para aplicaciones con aro interior giratorio y aro exterior fijo. Los rodamientos con sensor estándar SKF están disponibles para diámetros de eje de 15 a 45 mm. Se pueden fabricar otros tamaños a pedido.

Para aplicaciones en las cuales es necesario conocer la posición del rotor (p. ej., motores de imanes permanentes), está disponible la última novedad de SKF: una unidad de rodamiento con sensor con salida de señal de tipo resolución. Con su salida básica de seno/coseno, se indica la posición angular absoluta del rotor.

Máquinas eléctricas grandes y muy grandes

En la actualidad, la solución de rodamiento más común para motores eléctricos y generadores grandes y muy grandes consiste en una unidad de rodamiento liso. Esta unidad incluye un rodamiento liso, soporte y otros componentes, como aislamiento eléctrico y cámara de presión de aire para unidades con pestañas.

La unidad de rodamiento liso se considera costosa, particularmente en condiciones

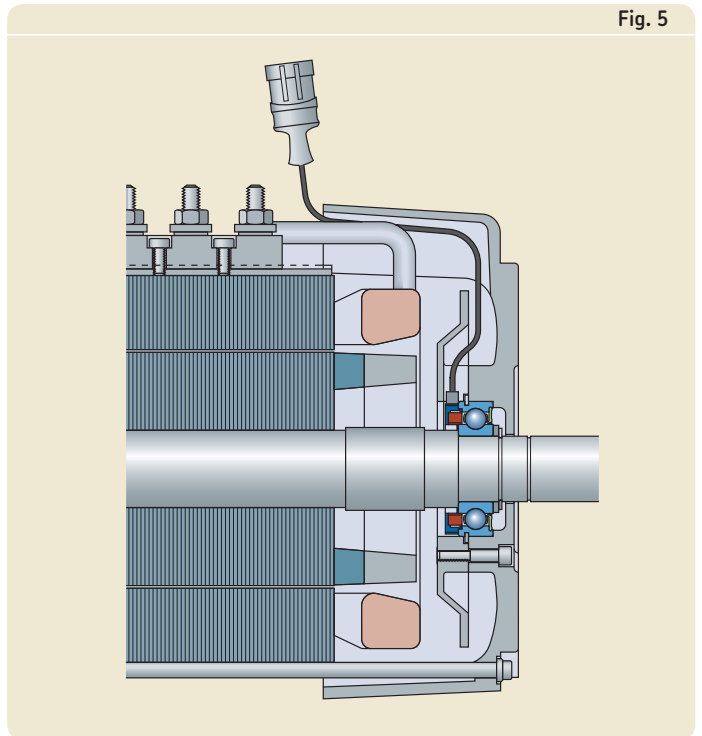
La unidad de rodamiento con sensor SKF no ocupa espacio radial adicional, está bien protegida dentro del motor y proporciona una señal constante y confiable

Unidad de rodamiento con sensor SKF

Fig. 4



Fig. 5



durante el arranque y la parada o cambios en la dirección de giro (inversión) cuando el espesor de la película de aceite puede reducirse hasta casi cero. Esta condición de lubricación inadecuada puede dar lugar a un contacto entre metales que puede dañar el rodamiento liso y provocar su fallo prematuro. Para evitarla, se requiere un equipo complementario que permita un suministro adicional de presión de aceite al rodamiento.

Con el fin de maximizar la vida útil de un rodamiento liso, el aceite lubricante debe:

- crear una película hidrodinámica bastante espesa entre el eje y el rodamiento en todas las condiciones de funcionamiento
- disipar el calor del rodamiento para mantener la temperatura del rodamiento y del aceite dentro de los límites aceptables

En general, las unidades de rodamientos lisos requieren sistemas de circulación de aceite especiales dotados de refrigeradores.

Unidades de soportes con pestaña con rodamientos SKF

Unidades de soportes con pestaña SKF: serie AFC

Creado como una alternativa rentable a los sistemas de rodamientos lisos de elevado costo, el sistema de eje de unidad de soporte con pestaña AFC de SKF sostiene y fija el eje con dos soportes de pestaña, equipados cada uno de ellos con un rodamiento de rodillos.

El rodamiento fijo es un rodamiento de rodillos a rótula, mientras que el rodamiento libre puede ser un rodamiento de rodillos toroidales CARB (→ **fig. 6**) u otro rodamiento de rodillos a rótula. La ventaja del rodamiento de rodillos toroidales CARB es que absorbe el desplazamiento axial como un rodamiento de rodillos cilíndricos en el interior del rodamiento, y la desalineación como un rodamiento de rodillos a rótula. Esto es particularmente importante en las aplicaciones en que la dilatación térmica del eje es un parámetro de funcionamiento clave.

El sistema de eje SKF admite la inversión de la dirección de giro y las bajas velocidades, así como un largo tiempo de parada de las aplicaciones de alta inercia (p. ej., generadores en turbinas de vapor o de agua). Soporta cargas radiales y axiales, y permite la dilatación térmica del eje y la flexión del eje. No se requieren componentes adicionales, como rodamientos axiales o dispositivos de elevación hidrostáticos. Esto puede ser particularmente

importante para los motores empleados en acerías y unidades de propulsión navales.

Diseñado para lubricación con baño de aceite, el sistema de eje SKF no requiere costosos sistemas de circulación de aceite, lo que elimina la necesidad de bombas, tuberías, colectores de aceite y refrigeradores. Para retener el lubricante y excluir los contaminantes, se emplean unos sellos laberínticos especialmente diseñados.

Desde el punto de vista del mantenimiento, lo único que se necesita son cambios de aceite regulares.

En comparación con una unidad de rodamiento liso, el sistema de eje SKF es una solución más eficiente, rentable y sencilla, con menos componentes, y más fácil de mantener. También se ofrecen versiones dotadas de un depósito de aceite con dispositivo inteligente de monitoreo del nivel de aceite, que ajusta y rellena el nivel de aceite durante el funcionamiento.

Para obtener más detalles, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.

Unidad de soportes con pestaña SKF con un rodamiento de rodillos toroidales CARB

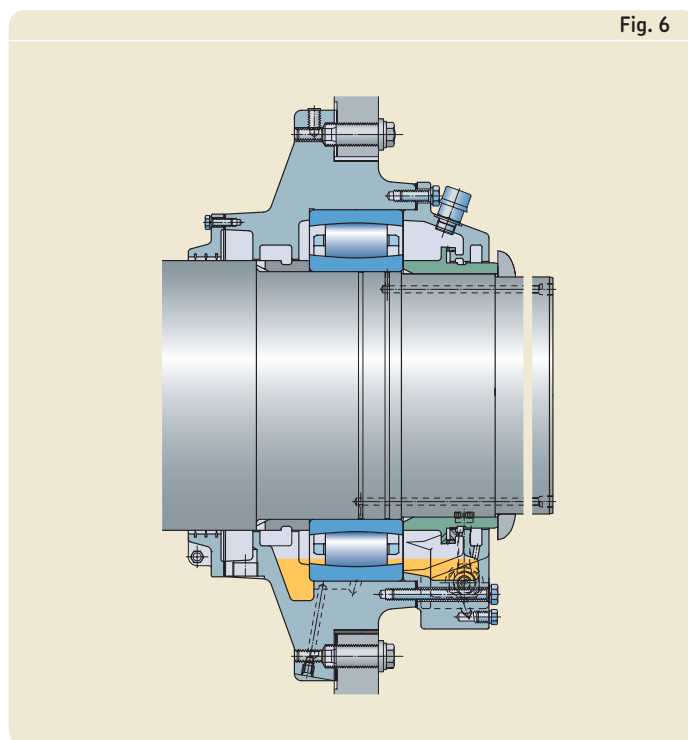


Fig. 6

Motores de tracción

Los motores de tracción utilizados para líneas de transmisión eléctricas están ganando popularidad en los segmentos de las obras públicas y la minería.

Desarrollar y diseñar una disposición de rodamientos completa y gestionar la logística de cada uno de sus componentes puede llevar mucho tiempo y resultar costoso. Además, el mantenimiento de los motores de tracción con un diseño de disposición de rodamientos tradicional requiere una gran habilidad de fabricación y logística.

Una solución rentable para los desafíos de las aplicaciones de motor de tracción es la unidad de rodamiento para motores de tracción (traction motor bearing unit, TMBU) SKF.

Unidad de rodamiento para motores de tracción SKF

La unidad de rodamiento para motores de tracción está prelubricada y tiene placas de protección, y está diseñada para el montaje con pestaña en el soporte (→ **fig. 7 y 8**). La unidad contiene una grasa especial de alta calidad que proporciona una larga vida útil incluso a altas temperaturas de funcionamiento. La unidad de rodamiento está equipada con sellos laberínticos no rozantes que no se desgastan. Está disponible con rodamientos híbridos con elementos rodantes cerámicos para evitar los daños causados por el paso de la corriente eléctrica. Las características opcionales incluyen las que hacen lo siguiente: aislamiento eléctrico y monitoreo de datos de funcionamiento, como la temperatura, la velocidad y la posición absoluta para el control del sistema de propulsión.

Para obtener más información sobre las TMBU y los motores de tracción, consulte el *Manual Técnico Ferroviario SKF Vol. 2* o comuníquese con su representante SKF local.

TMBU totalmente de acero para disposiciones de rodamientos fijos con un diseño de rodamiento rígido de bolas

Fig. 7



TMBU híbrida para disposiciones de rodamientos libres con un diseño de rodamiento de rodillos cilíndricos

Fig. 8



Generadores de turbinas eólicas

Para convertir la energía eólica en electricidad, las turbinas eólicas están equipadas con un generador. El tamaño habitual de las turbinas eólicas va desde 750 kW hasta los 7 MW utilizados en entornos terrestres y marítimos. Los generadores empleados en las turbinas eólicas son normalmente de tipo asíncrono de doble alimentación o síncrono de imanes permanentes.

Los generadores asíncronos de doble alimentación están equipados con un devanado de rotor activo alimentado por un convertidor de frecuencia. Esta disposición permite a la turbina maximizar la producción eléctrica dentro de una gama relativamente amplia de velocidades del viento.

El generador síncrono de imanes permanentes utiliza el campo de excitación proporcionado por un imán permanente en lugar de una bobina. En este caso, la velocidad del motor debe corresponder siempre con la frecuencia de suministro. Estos generadores no requieren un suministro de CC para el circuito de excitación ni llevan anillos colectores ni escobillas de contacto. Los generadores están disponibles para turbinas eólicas de transmisión directa de baja velocidad, así como para turbinas de velocidad media y alta equipadas con una caja de engranajes.

A causa del diseño específico de los generadores de doble alimentación y el uso de convertidores de frecuencia, es muy probable que pasen corrientes eléctricas parásitas de

alta frecuencia a través de los rodamientos del generador (→ **capítulo 7, Erosión eléctrica**, a partir de la **página 116**). A consecuencia de ello, puede producirse erosión eléctrica, fallos prematuros de los rodamientos y averías en el generador, lo que hace necesario el aislamiento tanto en el lado de accionamiento (DE) como en el lado opuesto al accionamiento (NDE).

Desde el punto de vista técnico, los rodamientos híbridos son la solución más confiable para evitar el paso de corriente de alta frecuencia por los rodamientos. No solo son un excelente aislamiento eléctrico, sino que, en comparación con los rodamientos estándares, presentan además excelentes propiedades tribológicas incluso en condiciones de funcionamiento difíciles, lo que permite unos intervalos de mantenimiento más largos.

SKF dispone de toda una gama de rodamientos rígidos de bolas híbridos extragrandes (XL). Estos rodamientos han sido diseñados y desarrollados específicamente para generadores de turbinas eólicas, con el fin de eliminar prácticamente el riesgo de paso de corrientes eléctricas perjudiciales a través del área de contacto de rodadura en el interior de los rodamientos de los generadores.

Los rodamientos rígidos de bolas híbridos XL tienen unas dimensiones principales estándares conformes con la norma ISO 15. No se requieren rediseños, componentes adicionales ni herramientas especiales para la instalación. Se deben manipular e instalar con el mismo cuidado que los rodamientos estándares.

Generador de turbinas eólicas



Motores de engranajes

La solución de sellado utilizada para los motores de engranajes es de extrema importancia. Se ha demostrado que la entrada de contaminantes tiene una incidencia directa en el rendimiento y la vida útil.

En los motores de engranajes modernos, los rodamientos del motor se lubrican normalmente con grasa, mientras que la caja de engranajes se lubrica con aceite.

Los rodamientos del motor suelen ir sellados y engrasados de por vida. En la caja de engranajes, se utilizan normalmente sellos de aceite diseñados para mantener el aceite dentro y los contaminantes fuera de la carcasa. Estos sellos externos requieren:

- ingeniería
- espacio
- mecanizado de precisión (y ocasionalmente templado)
- logística
- inventario
- manipulación especial

Una alternativa rentable a esta solución intensiva en términos de trabajo y costos es la unidad ICOS de SKF.

Unidades ICOS

Con el fin de simplificar la solución de sellado y reducir costos, SKF ha desarrollado una unidad de sellado de aceite compacta que integra un sello radial de eje único cargado mediante muelles dentro de un rodamiento (→ **fig. 8**).

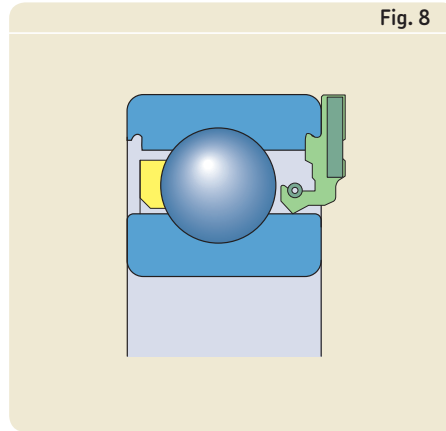
La unidad, que se puede usar en aplicaciones lubricadas tanto con grasa como con aceite sin sellos adicionales, requiere menos espacio que las disposiciones típicas de dos componentes. La unidad ICOS simplifica el montaje y evita el costoso mecanizado del eje, ya que el reborde del aro interior constituye una superficie de contacto de sellado óptima.

Las unidades ICOS también pueden ofrecer beneficios en aplicaciones:

- con un entorno muy contaminado
- con presencia de flujo de agua
- con motores de escobillas
- que no toleren las fugas de grasa

Fig. 8

Una unidad ICOS



Tecnologías y servicio de monitoreo de la condición

La finalidad de un sistema de monitoreo de la condición es medir la condición de los componentes de “desgaste” y otras funciones que influyen en la confiabilidad de la máquina. La ventaja del monitoreo de la condición usando análisis de vibración es que actúa como un sistema de alerta temprana. En consecuencia, esto significa que habrá tiempo suficiente para emprender medidas correctivas y se podrá planificar correctamente la sustitución del rodamiento (→ **diagrama 1**).

A continuación, se citan algunos ejemplos de los componentes y sistemas que se pueden monitorear:

- rodamientos
- transmisiones por correa
- cajas de engranajes
- motores eléctricos

Monitoreo multiparámetro

El monitoreo multiparámetro, desarrollado conjuntamente por Monitoreo de la condición SKF y el Centro de Ingeniería e Investigación de SKF en los Países Bajos, es el enfoque más completo, confiable y preciso de monitoreo y análisis de maquinaria. La obtención y el análisis de múltiples parámetros de medición aumentan considerablemente la capacidad de identificar de forma precisa y fácil los daños de los rodamientos y otros problemas de la maquinaria.

Mediante la medición de una serie de parámetros relacionados con la maquinaria, como la aceleración, la velocidad y el desplazamiento,

y parámetros del proceso, como la velocidad, la temperatura, la corriente, la presión y el caudal, los usuarios obtienen una visión de la condición de la máquina. Las técnicas de análisis avanzadas, como la envolvente de aceleración, permiten a los analistas suprimir las conjeturas en el mantenimiento, al suministrar la información necesaria para adoptar las medidas que eviten las paradas no planificadas.

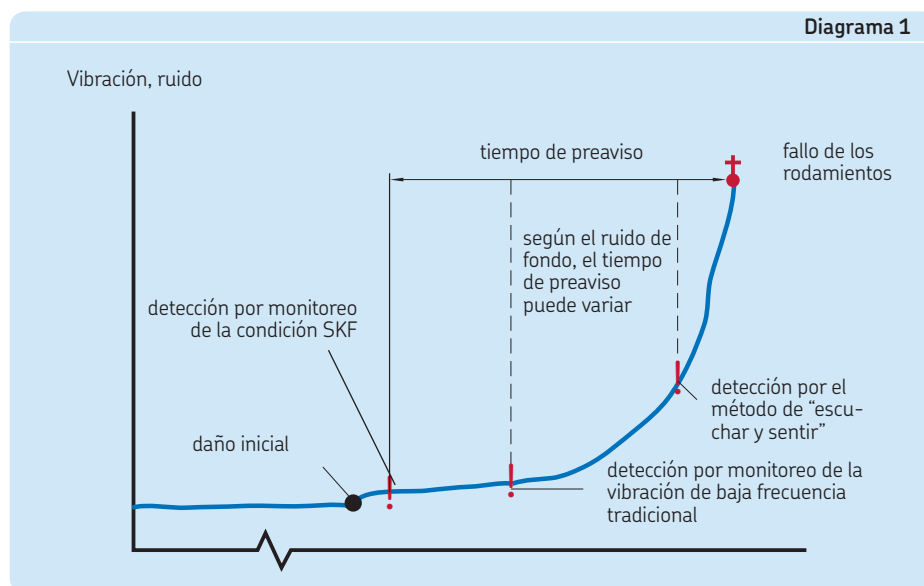
Vibración

El monitoreo de la vibración de baja frecuencia tradicional sigue siendo esencial para identificar las condiciones problemáticas de la maquinaria. En general, el mal funcionamiento que causa vibración y pérdida de la eficiencia de la máquina acaba produciendo daños en la máquina o en sus componentes. Si bien los análisis de vibración de baja frecuencia pueden ser un indicador eficaz de los daños en los rodamientos, puede que no sean los más oportunos.

Envolvente de aceleración

Las técnicas de envolvente son muy efectivas para la detección temprana de los daños de la máquina. La envolvente mejora las señales repetitivas causadas por los impulsos procedentes de un rodamiento dañado, por ejemplo. En las primeras etapas, los daños en los rodamientos generan una señal que puede no detectarse entre el ruido de vibración general de la máquina. El uso de detección envolvente permite identificar no solo la naturaleza, sino también la localización del daño en el rodamiento o el engranaje.

Diagrama 1



Recopiladores/analizadores de datos de vibración

Los motores y otros equipos esenciales de la planta, como las bombas, ventiladores, compresores, cajas de engranajes, grúas y cintas transportadoras, dependen de los rodamientos para mantener las máquinas en funcionamiento.

Unos instrumentos económicos, portátiles y fáciles de usar proporcionan una indicación rápida y básica de las áreas con posibles problemas.

Monitoreo periódico

Analizador de la condición de la máquina SKF

El Analizador de la condición de la máquina SKF es un dispositivo portátil, fácil de usar y resistente que mide simultáneamente las señales de vibración y la temperatura para indicar el estado de la máquina y los daños en los rodamientos, y proporciona una alerta temprana de los problemas del motor antes de que se produzcan costosas averías.

Serie de analizadores SKF Microlog

Diseñados para ayudar a los usuarios a establecer o mejorar un programa de monitoreo de la condición ya existente, los analizadores SKF Microlog realizan las tareas requeridas para el mantenimiento predictivo de maquinaria giratoria en numerosas industrias, lo que hace que resulte más fácil recopilar, analizar, utilizar y compartir datos sobre la condición de las máquinas.

La serie SKF Microlog incluye instrumentos basados en rutas, que funcionan con potentes sistemas de software de mantenimiento predictivo SKF, e instrumentos autónomos que ofrecen funciones de asesoramiento y análisis de la señal *in situ*.

Sistemas SKF Microlog Inspector

La aplicación SKF Microlog Inspector es el sistema más reciente y avanzado desarrollado por SKF para el registro de datos de inspección. Anteriormente, los operarios utilizaban el sistema SKF MARLIN como sustituto de las notas orales o en papel sobre las inspecciones para documentar sus observaciones con información precisa, coherente y práctica. SKF Microlog Inspector va un paso más allá en el proceso de inspección.

El software SKF @ptitude Inspector (→ **página 137**) permite realizar análisis en mayor profundidad, además de facilitar las



Analizador de la condición de la máquina SKF



Analizadores SKF Microlog



SKF Microlog Inspector y Detector Inalámbrico de Condición de la Máquina SKF

comunicaciones entre operaciones, mantenimiento, ingeniería y dirección de la planta.

Cuando se utilizan con el Detector Inalámbrico de Condición de la Máquina SKF, los datos de vibración recopilados permiten la detección temprana de los problemas en las gamas de frecuencia baja, media y alta. La recopilación rutinaria de datos de vibración durante las rondas de inspección permite la disponibilidad de los datos críticos de las máquinas con regularidad, lo que elimina los desplazamientos para inspección innecesarios y libera al personal de mantenimiento para que pueda dedicarse a las reparaciones programadas.

Monitoreo continuo

El monitoreo en línea para el análisis constante de rodamientos y maquinaria ofrece ventajas significativas. Con los sistemas en línea SKF Multilog, unos sensores instalados permanentemente recogen datos de las máquinas críticas, de difícil acceso o problemáticas, lo que elimina la necesidad de recopilación de datos manual *in situ*.

Junto con el software SKF @ptitude, los sistemas muestran información actualizada del funcionamiento de la máquina para elaborar completos análisis en tiempo real. Estos sistemas ofrecen el más alto grado de coherencia de datos y seguridad para el trabajador.

SKF @ptitude Monitoring Suite

El software de monitoreo de la condición SKF @ptitude Monitoring Suite constituye la base para un enfoque totalmente integrado del monitoreo de la condición, que permite el almacenamiento, la manipulación y la recuperación de grandes cantidades de información compleja de las máquinas y la planta de manera rápida, eficiente y confiable. SKF @ptitude Monitoring Suite es una solución de software modular que se acomoda a sus necesidades. Usted puede añadir o eliminar funciones a medida que su sistema se amplíe o se optimice conforme a sus necesidades de monitoreo de la condición.

SKF @ptitude Analyst, una solución de software completa con potentes funciones analíticas y de diagnóstico, permite almacenar, analizar y recuperar información compleja acerca de los activos de manera rápida, eficiente y confiable. Se adapta a sus necesidades específicas, ya sean rondas de inspección de los operarios, recopilación en línea y periódica de datos de monitoreo de la condición o análisis en profundidad de la vibración y asesoramiento experto.

Software adaptado a las necesidades

SKF @ptitude Inspector es el software de SKF @ptitude Analyst especialmente destinado a su uso para la confiabilidad dirigida por operarios. Junto con el sistema SKF Microlog Inspector/SKF MARLIN, permite al personal de operaciones hacer sus rondas recopilando datos sobre la condición de las máquinas, de inspección y de procesos de manera sencilla y eficiente en un equipo que cabe en la palma de la mano.

SKF Multilog IMx



SKF @ptitude
Monitoring Suite



Equipos de comprobación de motores eléctricos

SKF ofrece una gama completa de equipos de comprobación estática y dinámica, y monitoreo en línea de motores para su uso por parte de los profesionales del mantenimiento de motores.

Los equipos portátiles de comprobación estática de motores se utilizan para encontrar fallos de aislamiento y de circuitos en los motores cuando estos se encuentran fuera de línea, apagados o retirados del servicio (modo estático).

Los equipos portátiles de comprobación dinámica y monitoreo se utilizan para comprobar el estado y el rendimiento de los motores mientras estos están encendidos y funcionando en su entorno de aplicación.

Los equipos de monitoreo en línea son una forma de monitoreo dinámico, con la diferencia de que se encuentran instalados de forma permanente (fija), con conexiones en red con los sistemas críticos del motor/la máquina para monitorear de manera constante los problemas de salud o rendimiento de dichos sistemas.

SKF ofrece también productos de comprobación de motores para fabricantes de motores de alto volumen, utilizados para el control y el aseguramiento de la calidad.

Comprobación estática de motores eléctricos

Los Analizadores estáticos de motores SKF (Baker AWA-IV y Baker DX) son instrumentos portátiles que realizan la gama más amplia de pruebas de aislamiento y de circuitos de todos los equipos de comprobación basados en sobretensión disponibles en la actualidad. Estos equipos de comprobación estática detectan fallos que no se pueden encontrar únicamente con el uso de pruebas de bajo voltaje. El analizador Baker DX ofrece grandes posibilidades de configuración para adaptarse a las necesidades específicas de comprobación de los profesionales de mantenimiento de motores dentro de toda la gama de organizaciones de mantenimiento industrial, talleres de mantenimiento y reparación, y operaciones de fabricación de motores. Baker AWA-IV es un analizador por computadora basado en Microsoft Windows y utilizado por los profesionales en el terreno como base para sus programas de mantenimiento predictivo de motores. Estos equipos de comprobación estática se utilizan también con Baterías Baker con el fin de elevar los voltajes para la comprobación de motores muy grandes.



Analizador estático de motores SKF – Baker DX



Analizador estático de motores SKF – Baker AWA-IV



Analizador dinámico de motores SKF – EXP4000

Comprobación dinámica de motores eléctricos

El Analizador dinámico de motores SKF EXP4000 es utilizado por los profesionales del mantenimiento de motores para detectar las condiciones adversas en un motor o un sistema de máquinas que podrían provocar un mal funcionamiento o fallo del sistema. El EXP4000 es un analizador para PC con Windows que monitorea la calidad de la fuente de alimentación (en relación con las especificaciones del motor), la carga aplicada al motor por el equipo accionado por este y el rendimiento del propio motor.

Monitoreo de motores en línea

El Analizador dinámico de motores SKF NetEP es una solución permanente y fija de monitoreo en línea de motores utilizada por los profesionales del mantenimiento para monitorear continuamente motores críticos recopilando datos sobre el estado del sistema del motor a intervalos regulares a lo largo del día, los 365 días del año. El NetEP es un dispositivo en red que proporciona información de monitoreo a una oficina central o a cualquier computadora personal en cualquier lugar del mundo con una conexión a Internet.



Analizador dinámico de motores SKF – NetEP

Comprobación para el control y el aseguramiento de la calidad de motores

Los sistemas Baker WinAST y Baker WinTATS de SKF son equipos de comprobación para la fabricación de motores con alto volumen de producción utilizados por los fabricantes de motores eléctricos de alto volumen para asegurarse de que sus motores alcancen los estándares de calidad de los productos. El sistema Baker WinAST es un equipo de comprobación de estátores en bastidor totalmente automatizado que sirve para comprobar desde decenas hasta miles de motores (o generadores) al día, según el tamaño y el tipo de los motores o los accesorios de comprobación empleados. Permite comprobar motores con un tamaño que va desde unidades de potencia fraccionada hasta motores eléctricos de 1 000 kW.

Baker WinTATS es un sistema de comprobación de inducidos de tracción utilizado por los fabricantes de alto volumen de inducidos de motores grandes para el aseguramiento de la calidad. Al igual que el Baker WinAST, el Baker WinTATS es una unidad en bastidor que realiza la gama completa de pruebas estándares de aislamiento (CA y CC, alto voltaje, sobretensión) y resistencia, así como pruebas especializadas (p. ej., corona, mapa de campo y dirección de giro). Los sistemas de comprobación de control de calidad de motores de SKF incluyen unidades de control de calidad con una única función, como el equipo de comprobación de impulsos Baker DT05, el ohmímetro de baja resistencia Baker RT45 y el equipo de comprobación de aislamiento de alto voltaje HP91.



Analizador estático de motores SKF – Baker WinAST

Productos de mantenimiento

En una época de reducción de la mano de obra fija y aumento de la presión para producir más en menos tiempo, SKF se centra en proporcionar a los clientes las herramientas y los servicios que necesitan para seguir siendo competitivos.

La amplia gama de productos de mantenimiento de SKF proporciona soluciones sencillas, flexibles y confiables para las necesidades de mantenimiento de sus clientes. Ya sea el más reciente extractor de garras hidráulico u otras herramientas lo que busca el cliente, SKF tiene el producto adecuado a sus necesidades.

Para obtener más información o solicitar un catálogo de productos detallado, comuníquese con su representante SKF local o visite SKF en línea, en skf.com.

Paso de corriente eléctrica

El paso de la corriente eléctrica es el resultado de los voltajes del eje del motor que descargan a tierra a través del rodamiento, lo que provoca erosión eléctrica, degradación del lubricante y, en último término, el fallo del rodamiento, véase el **capítulo 7, Erosión eléctrica, página 116**. Los detectores de paso de corriente eléctrica ayudan a detectar la presencia de corrientes eléctricas, lo que permite tomar medidas correctivas.



El Detector de paso de corriente eléctrica SKF (– TKED 1) es un instrumento portátil fácil de usar que ayuda a detectar la presencia de corriente eléctrica perjudicial en los rodamientos de motores eléctricos

Programa de certificación para empresas de mantenimiento de motores eléctricos

SKF Certified Rebuilder Electric Motor es un programa diseñado por SKF para dar respuesta a la demanda de operaciones de reparación más confiables por parte de los usuarios industriales. Este programa se centra en identificar la causa raíz del fallo de los rodamientos, los mejores métodos de reparación y las pruebas de conformidad eléctrica y mecánica de motores que permitan alcanzar el rendimiento óptimo del motor.

Desarrollado en colaboración entre los talleres de reparación idóneos, los distribuidores autorizados de SKF y la propia SKF, el programa SKF Certified Rebuilder mejora la especialización de los talleres de reparación de motores eléctricos habilitados mediante la capacitación de los empleados, la mejora de los equipos y las tecnologías, y nuevos estándares de uniformidad y calidad en las reparaciones.

SKF puede proporcionarle una lista de empresas Certified Rebuilder situadas cerca de usted o puede reunirse con usted para evaluar a su proveedor de servicios y ofrecerle más información acerca de los beneficios de este programa.

Visite el programa SKF Certified Rebuilder en skf.com/rebuilder.



