

SELECCION DE COJINETES DE RODAMIENTO

Introducción

A diferencia de otros cálculos de elementos de máquinas, los cojinetes de rodamiento se seleccionan considerando la vida útil que se desea que tengan. Esto significa que la vida infinita no es posible de alcanzar y debemos pensar que los rodamientos son elementos de desgaste que deben ser reemplazados periódicamente para evitar daños al mecanismo en el cual están montados. Este reemplazo se realiza bajo el concepto de mantención preventiva, en donde el rodamiento es reemplazado justo antes de que falle. La falla debe entenderse como un grado de desgaste tal que provoca vibraciones en el eje, apreciables auditivamente por un zumbido característico.

Son muchos los factores que afectan la vida útil, los más importantes son la magnitud de las cargas, la dirección de las cargas, la velocidad de giro, las deformaciones del eje, la desalineación, la calidad de la lubricación, la temperatura de operación y la limpieza. Se utilizarán en este capítulo tres fórmulas para estimar la vida del rodamiento, las cuales varían en complejidad al considerar más variables en el cálculo.



Los rodamientos son piezas de acero aleado con cromo, manganeso y molibdeno, para facilitar la ejecución de rigurosos tratamientos térmicos y obtener piezas de gran resistencia al desgaste y a la fatiga. En la selección de los materiales, deben tomarse en consideración las temperaturas de operación y una adecuada resistencia a la corrosión.

El material para las jaulas ha evolucionado en forma importante actualmente se utilizan aceros, metales de bajo roce y poliamida.

Otra característica de los rodamientos es la exactitud de sus dimensiones cada parte de tener tolerancias muy estrechas para un satisfactorio funcionamiento del conjunto.



Existen rodamientos de muy variados tipos para adecuarse a las diversas aplicaciones, es muy importante escoger el rodamiento preciso, tomando la decisión en base a criterios tales como: costo, facilidad de montaje, vida útil, dimensiones generales, simpleza del conjunto, disponibilidad de repuestos y tipo de lubricación.

Básicamente hay tres formas de clasificar los rodamientos:

I. Según la dirección de la carga que mejor soportan:

1. Rodamientos Radiales: son aquellos que están diseñados para resistir cargas en dirección perpendicular al eje. Constan en forma general de tres piezas: Un aro exterior, un aro interior y un elemento rodante con algún tipo de canastillo o jaula. Por ejemplo, las ruedas de un carro se apoyan en el suelo y reciben la carga en el eje, de esta forma los rodamientos de las ruedas trabajan bajo carga radial.



2. Rodamientos Axiales: son aquellos que están diseñados para resistir cargas en la misma dirección del eje. Constan en forma general de tres piezas: Un aro superior, un aro inferior y un elemento rodante con algún tipo de canastillo. Por ejemplo, pensemos en un carrusel, el peso total de esta máquina actúa verticalmente hacia el suelo y debe rotar en torno a un eje vertical al suelo, en esta aplicación debe utilizarse un rodamiento axial de gran diámetro, cuyo aro superior sostenga al carrusel y cuyo aro inferior se apoye en el suelo.



- Rodamientos de contacto angular: son una mezcla de los casos anteriores, se basan en un rodamiento similar al radial con un diseño especial de los aros exterior e interior para soportar cargas axiales mayores que un rodamiento radial simple. Sus aplicaciones son muy amplias, debido a que un eje siempre puede desarrollar cargas eventuales en una dirección inesperada y debido al ahorro que se genera al colocar un solo rodamiento para hacer el trabajo de dos.



II. Según la rigidez del rodamiento:

1. Rodamientos rígidos: son aquellos que no aceptan desalineamientos del eje. Ante un desalineamiento se generan cargas que pueden dañar definitivamente el rodamiento.



2. Rodamientos rotulados: Son aquellos que por un diseño especial de los aros permiten que el eje gire algunos grados sin desarmar el rodamiento. Esta característica se logra con una pista de rodadura esférica que permite a las bolas o barriletes desplazarse para acomodarse al desalineamiento del eje. Son muy utilizados en maquinaria pesada debido a la necesidad de prevenir daños frente a las deformaciones de los ejes, cargas provocadas por dilataciones térmicas y cargas dinámicas.



III. Según el elemento rodante:

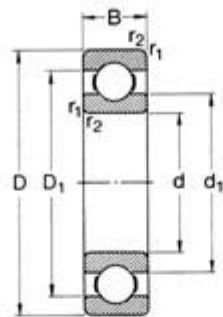
Existen diversos elementos rodantes que varían según las aplicaciones. El mas común son las bolas de rodamiento, muy útiles para cargas livianas y medianas. Para cargas mayores se utilizan rodillos y barriletes. Finalmente en cargas axiales se utilizan conos. Algunas aplicaciones en donde el espacio es reducido se usan agujas, que son cilindros largos con diámetros pequeños.



Al catalogar un rodamiento es útil entregar una información completa, indicando los tres conceptos anteriores, por ejemplo: Rodamiento radial rígido de bolas, rodamiento radial rotulado de barriletes, rodamiento axial rígido de conos.

Afortunadamente los fabricantes de rodamientos han mantenido una numeración estándar en todas las marcas, permitiendo una identificación sencilla de los rodamientos en base a un número y en ocasiones acompañado de unas letras.

Ante la necesidad de trabajar con estos elementos, es recomendable que se adquiriera un catalogo de rodamientos de la marca que prefiera para conocer la numeración y dimensiones del rodamiento que desea indicar. En ese catalogo aparecen además valores de resistencia mecánica que son la base para los cálculos de vida útil. Estos valores ha sido obtenidos en bancos de prueba realizando numerosos ensayos y son los siguientes:



Capacidad de carga
estática: C_0 (fuerza)

Capacidad de carga
dinámica: C (fuerza)

Velocidad nominal: V
(r.p.m.)

Carga límite de fatiga: P_u
(fuerza)

| Dimensiones principales | | | Capacidad de carga | | Carga límite de fatiga | Velocidad nominal | |
|-------------------------|-----|----|--------------------|---------|------------------------|-------------------|--------|
| | | | dinám. | estát. | P_u | Lubricación con | |
| d | D | B | C | C_0 | | grasa | aceite |
| mm | | | N | | N | r/min | |
| 260 | 320 | 28 | 111 000 | 163 000 | 4 000 | 1 700 | 2 000 |
| | 360 | 46 | 212 000 | 270 000 | 6 550 | 1 600 | 1 900 |
| | 400 | 44 | 238 000 | 310 000 | 7 200 | 1 500 | 1 800 |
| | 400 | 65 | 291 000 | 375 000 | 8 800 | 1 500 | 1 800 |
| | 480 | 80 | 390 000 | 530 000 | 11 800 | 1 100 | 1 400 |
| 280 | 350 | 33 | 138 000 | 200 000 | 4 750 | 1 600 | 1 900 |
| | 380 | 46 | 216 000 | 285 000 | 6 700 | 1 500 | 1 800 |
| | 420 | 44 | 242 000 | 335 000 | 7 500 | 1 400 | 1 700 |
| | 420 | 65 | 302 000 | 405 000 | 9 300 | 1 400 | 1 700 |
| | 500 | 80 | 423 000 | 600 000 | 12 900 | 1 100 | 1 400 |
| 300 | 380 | 38 | 172 000 | 245 000 | 5 600 | 1 400 | 1 700 |
| | 420 | 56 | 270 000 | 375 000 | 8 300 | 1 300 | 1 600 |
| | 460 | 50 | 286 000 | 405 000 | 8 800 | 1 200 | 1 500 |
| | 460 | 74 | 358 000 | 500 000 | 10 800 | 1 200 | 1 500 |



La falla principal de los rodamientos es la fatiga superficial en las pistas de rodadura y en los elementos rodantes. Esta falla se basa en las fórmulas de esfuerzo de contacto (Hertz).

Se han desarrollado cálculos avanzados para estimar la magnitud de estas fuerzas y por otra parte se han desarrollado materiales que soporten estas cargas logrando prolongar la vida útil.

En la figura, se aprecia la falla por fatiga superficial en la pista de rodadura del aro interior de un rodamiento radial, esta falla provoca la aparición de escamas que se separan dañando la zona de rodadura. La razón para este tipo de falla se explica evaluando las fórmulas de esfuerzo de contacto, que entregan valores altos bajo la superficie de rodadura provocando la aparición y propagación de fisuras que terminan por cortar la capa superficial de la pista.

El cálculo de la vida útil es dependiente del rodamiento en particular, esto lo convierte en un cálculo iterativo en el cual se escoge un rodamiento y se comprueba su vida útil, si el resultado es satisfactorio, la selección ha terminado, pero si la vida es menor o muy mayor de lo recomendado debe escogerse otro rodamiento y recalcular la vida.

Las tablas siguientes entregan recomendaciones para la vida útil que debería tener un rodamiento para las aplicaciones que se detallan, este es el punto de partida.

| Guía de valores requeridos de vida nominal L10h para diferentes clases de máquinas | |
|--|---------------------------|
| Clases de máquinas | L10h horas de servicio |

| | |
|---|------------------|
| Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparatos para uso médico. | 300 a 3 000 |
| Máquinas usadas intermitente o por cortos períodos : Máquinas-herramienta portátiles, aparatos elevadores para talleres, máquinas para la construcción. | 3 000 a 8 000 |
| Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente : Ascensores, grúas para mercancías embaladas. | 8 000 a 1 2000 |
| Máquinas para 8 horas de trabajo diario no totalmente utilizadas : Transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos para uso industrial, machacadoras giratorias. | 10 000 a 25 000 |
| Máquinas para 8 horas de trabajo diario totalmente utilizadas : Máquinas-herramientas, máquinas para trabajar la madera, máquinas para la industria mecánica general, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipo de imprenta, separadores y centrífugas. | 20 000 a 30 000 |
| Máquinas para trabajo continuo, 24 horas al día : Cajas de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil. | 40 000 a 50 000 |
| Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para trasatlánticos. | 60 000 a 100 000 |
| Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para la línea de eje de transatlánticos. | ≈ 100 000 |

Fuente: Catálogo General SKF

| Guía de valores requeridos de vida nominal L10s para vehículos de carretera y ferroviarios | |
|--|---------------------|
| Tipo de vehículo | L10s millones de km |
| Rodamientos de cubo de rueda para vehículos de carretera : | |
| Automóviles | 0,3 |
| Camiones y autobuses | 0,6 |
| Rodamientos para cajas de grasa en vehículos ferroviarios : | |
| Vagones de mercancías (según especificación UIC). | 0,8 |
| Material móvil de cercanías, tranvías. | 1,5 |
| Coches de pasajeros para grandes líneas. | 3 |
| Coches automotores para grandes líneas. | 3 a 4 |
| Locomotoras eléctricas y diesel para grandes líneas | de 3 a 5 |

Fuente: Catálogo General SKF

Una vez ubicada la vida sugerida, se procede a escoger un rodamiento del catálogo considerando el tipo de carga a soportar y las limitaciones dimensionales del problema. Una vez ubicados algunos candidatos se extraen los valores de C, P_u, D y d. De las condiciones del problema se obtienen el tipo de aceite utilizado, la temperatura de operación, la velocidad del eje, la fiabilidad requerida y el grado de contaminación. Con estos valores se procede a realizar los cálculos que a continuación se detallan.

En particular, la carga equivalente sobre el rodamiento se obtiene de fórmulas como la siguiente:

$$P = X F_r + Y F_a$$

Donde:

- F_r** es la carga radial que se aplica sobre el rodamiento
- F_a** es la carga axial que se aplica sobre el rodamiento
- X** e **Y** son valores adimensionales que varían para cada tipo de rodamiento.

Por ejemplo, en la tabla siguiente se muestran los valores de estas variables para el caso de rodamientos radiales de bolas con juego normal. Para el cálculo de otro tipo de rodamiento debe consultarse el catálogo de rodamientos en el capítulo correspondiente, para obtener los valores de: e, Y , X.

| Factores para el cálculo de los rodamientos rígidos de una hilera de bolas | | | |
|--|------|------|-----|
| Juego Normal | | | |
| F _a /C ₀ | e | X | Y |
| 0,025 | 0,22 | 0,56 | 2 |
| 0,04 | 0,24 | 0,56 | 1,8 |
| 0,07 | 0,27 | 0,56 | 1,6 |
| 0,13 | 0,31 | 0,56 | 1,4 |
| 0,25 | 0,37 | 0,56 | 1,2 |
| 0,5 | 0,44 | 0,56 | 1 |

Fuente: Catálogo General SKF

Se desarrollaran tres fórmulas para la vida útil: Vida Nominal [L₁₀]; Vida Nominal Ajustada [L_{na}] y Vida Nominal Ajustada SKF [L_{naa}].

1. Vida Nominal:

L₁₀ = (C / P)^p

Donde:

- L₁₀** es la vida estimada en millones de revoluciones
- C** es la capacidad de carga dinámica
- P** es la carga equivalente sobre el rodamiento, se calcula en función de las cargas radiales y axiales que afectan al rodamiento su fórmula depende del tipo de rodamiento a utilizar
- p** es 3 para los rodamientos de bolas y 10/3 para los rodamientos de rodillos

La vida nominal puede expresarse en otras unidades mas adecuadas al problema que se analiza, de esta forma se tiene:

L_{10h} = (1000000 / 60 n) L₁₀

Donde:

- L_{10h}** es la vida estimada en horas de funcionamiento
- n** es la velocidad del eje en r.p.m.

L_{10s} = (p D / 1000)

Donde:

- L_{10s}** es la vida estimada en millones kilómetros recorridos
- D** es el diámetro de las ruedas en metros

2. Vida Nominal Ajustada

L_{na} = a₁ a₂₃ L₁₀

Donde:

a₁ es el factor correspondiente a la fiabilidad del rodamiento, este factor se obtiene de la tabla siguiente, se puede observar que la fiabilidad mínima es de 90% y que es imposible asegurar un 100%.

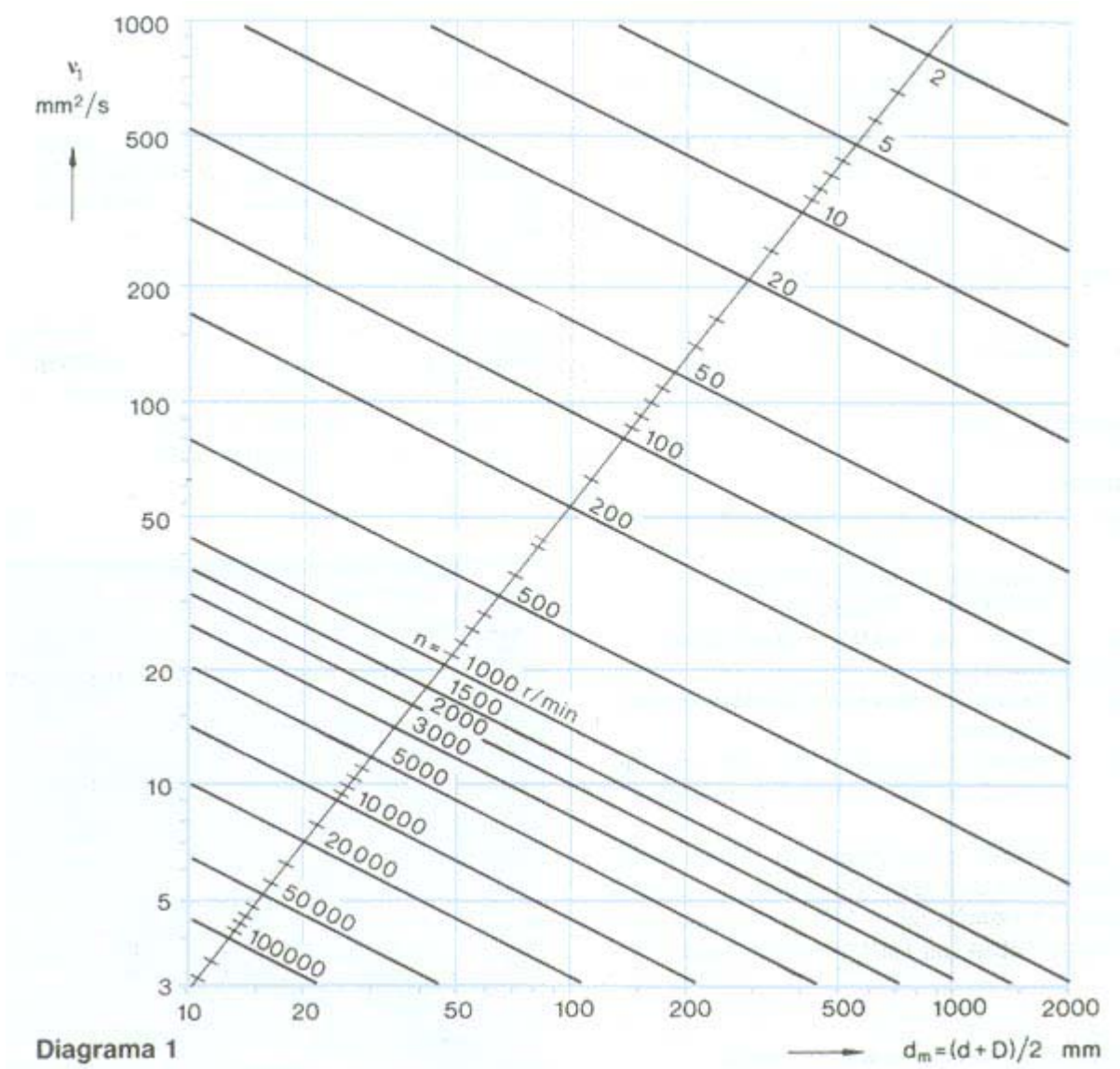
| Valor del factor a₁ | |
|---------------------------------------|----------------------|
| Fiabilidad % | a₁ |
| 90 | 1 |
| 95 | 0,62 |
| 96 | 0,53 |
| 97 | 0,44 |
| 98 | 0,33 |
| 99 | 0,21 |

Fuente: Catálogo General SKF

a₂₃ es un factor que considera la calidad de la lubricación y su obtención requiere el uso de dos gráficos que a continuación se muestran.

Se necesita conocer las dimensiones básicas del rodamiento: su diámetro exterior D y su diámetro interior d. Esto significa que es preciso darse un rodamiento y calcular su vida útil según las condiciones del problema.

Con las dimensiones principales del rodamiento se calcula el promedio $d_m = (D + d) / 2$ y se entra al gráfico por el eje horizontal. A continuación se sube hasta tocar la línea inclinada correspondiente a la velocidad de giro del eje en r.p.m. Se sale horizontalmente hasta cortar el eje vertical del gráfico, obteniendo el valor de la viscosidad cinemática v_1 requerida por el rodamiento.



Fuente: Catálogo General SKF

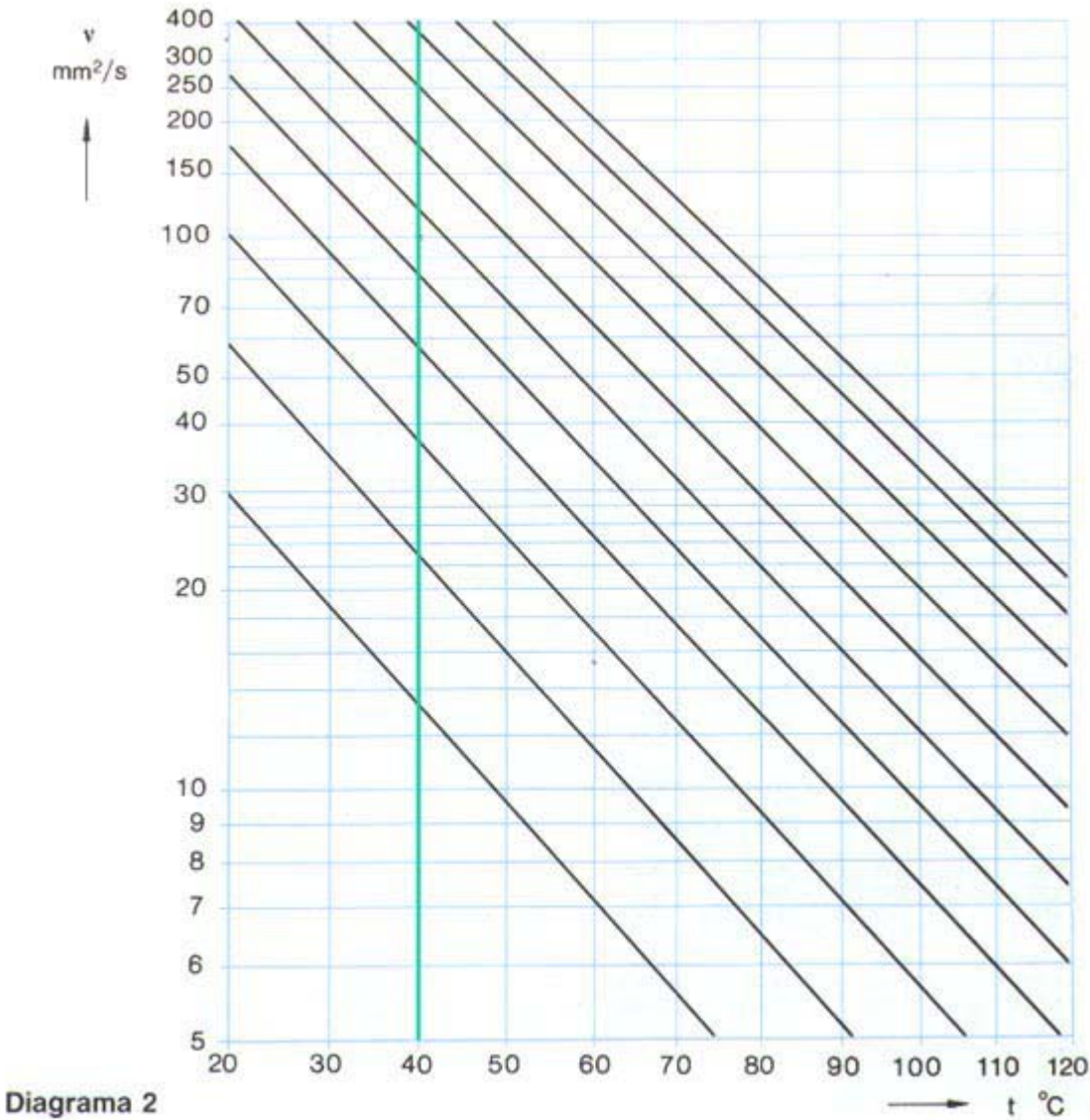
El siguiente gráfico nos entrega la viscosidad cinemática que se tiene en la realidad, considerando el lubricante utilizado y la temperatura de operación. Para iniciar el proceso, se ubica el valor de la viscosidad del lubricante a utilizar en la siguiente tabla.

| Clase ISO de viscosidad | Viscosidad cinemática a 40 °C | | |
|-------------------------|-------------------------------|------|------|
| | media | mín | máx |
| - | mm ² /s | | |
| ISO VG 2 | 2,2 | 1,98 | 2,42 |
| ISO VG 3 | 3,2 | 2,88 | 3,52 |
| ISO VG 5 | 4,6 | 4,14 | 5,06 |
| ISO VG 7 | 6,8 | 6,12 | 7,48 |
| ISO VG 10 | 10 | 9,00 | 11,0 |
| ISO VG 15 | 15 | 13,5 | 16,5 |
| ISO VG 22 | 22 | 19,8 | 24,2 |
| ISO VG 32 | 32 | 28,8 | 35,2 |
| ISO VG 46 | 46 | 41,4 | 50,6 |
| ISO VG 68 | 68 | 61,2 | 74,8 |
| ISO VG 100 | 100 | 90,0 | 110 |
| ISO VG 150 | 150 | 135 | 165 |

| | | | |
|--------------|-------|-------|-------|
| ISO VG 220 | 220 | 198 | 242 |
| ISO VG 320 | 320 | 288 | 352 |
| ISO VG 460 | 460 | 414 | 506 |
| ISO VG 680 | 680 | 612 | 748 |
| ISO VG 1 000 | 1 000 | 900 | 1 100 |
| ISO VG 1 500 | 1 500 | 1 350 | 1 650 |

Fuente: Catálogo General SKF

Conocida la viscosidad se observa que este valor se entrega para una temperatura de referencia de 40°C, por ello, se ubica en el gráfico siguiente la línea vertical que representa 40°C y sobre ella se ubica la viscosidad nominal del aceite utilizado. Realizado esto, se mueve sobre una línea inclinada paralela a las líneas inclinadas que se muestran en el gráfico hasta cortar con la temperatura de operación de la maquina. Una vez ubicado el punto en cuestión se lee en el eje vertical la viscosidad cinemática ν de que se dispone. Por ejemplo un aceite ISO VG 68 tiene una viscosidad media de 68 mm²/s a 40°C, si la temperatura sube a 70 °C la viscosidad media desciende a 19 mm²/s aproximadamente, si en cambio, la temperatura baja a 30°C, la viscosidad media sube a 115 mm²/s aproximadamente.



Fuente: Catálogo General SKF

Finalmente en el gráfico que sigue a continuación se ingresa por el eje horizontal con $K = \nu / \nu_1$ hasta cortar la línea quebrada y se lee en el eje vertical el valor del factor a_{23} .

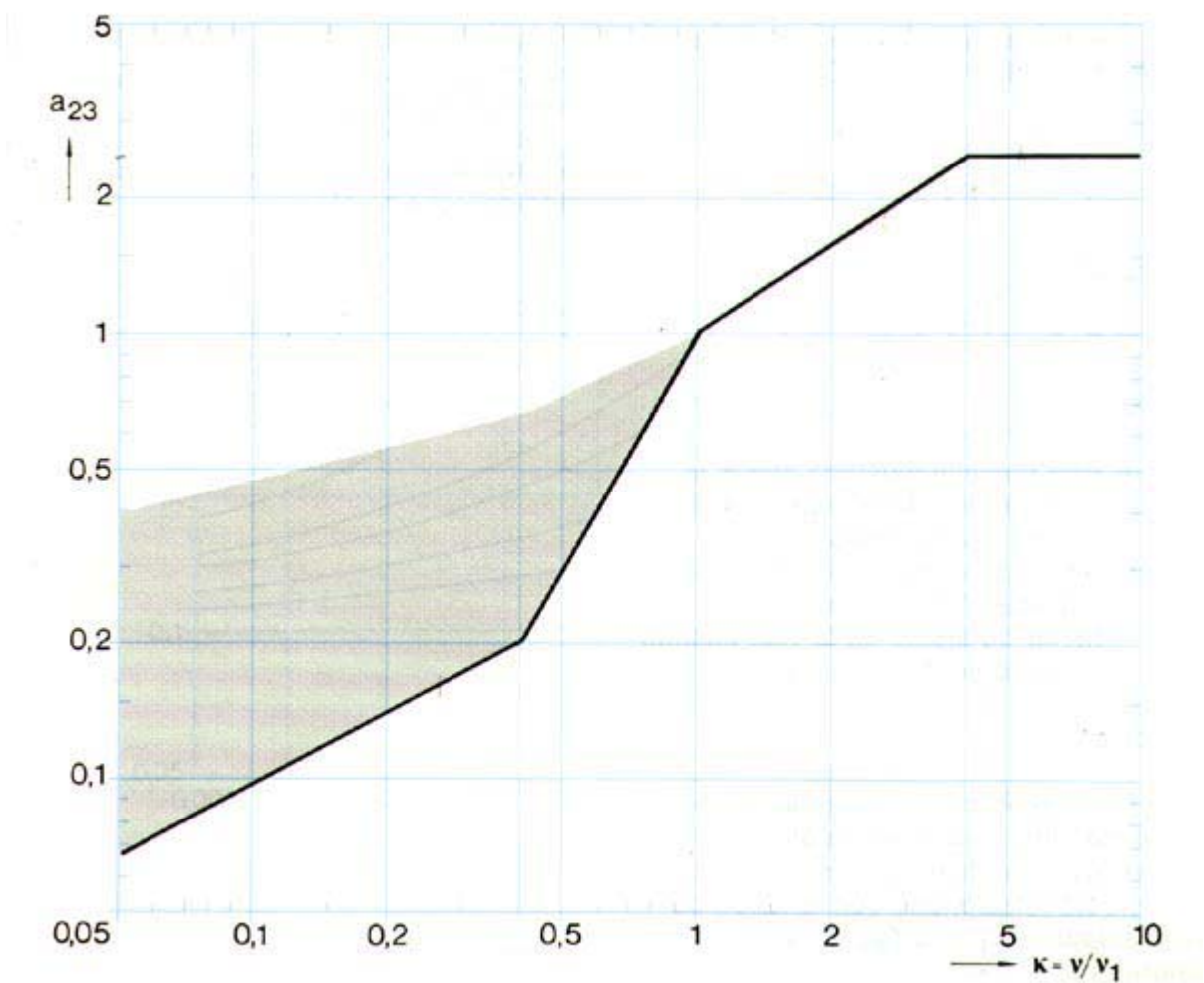


Diagrama 3

Fuente: Catálogo General SKF

La zona sombreada que aparece el gráfico anterior corresponde a una zona alcanzable con la aplicación de aditivos al aceite.

3. Vida Nominal Ajustada SKF

$$L_{naa} = a_1 a_{SKF} L_{10}$$

Donde:

a_1 es el factor de confiabilidad utilizado en el calculo anterior
 a_{SKF} es un nuevo factor introducido por la fabrica SKF. Para conocer su valor se debe primeramente evaluar el valor η_c que varia en función al grado de contaminación, este valor se puede obtener de la tabla siguiente:

| Valores del factor de ajuste η_c para diferentes grados de contaminación | |
|---|----------|
| Condición ¹⁾ | η_c |
| Muy limpio Tamaño de partículas del orden del espesor de la película de lubricante. | 1 |
| Limpio Condiciones típicas de rodamientos con obturaciones engrasados por vida. | 0,8 |
| Normal Condiciones típicas de rodamientos con protecciones engrasados por vida. | 0,5 |

| | |
|--|-----------|
| Contaminado Condiciones típicas de rodamientos sin obturaciones integradas; filtros de paso grueso para lubricante y/o entrada de partículas desde el entorno. | 0,5 a 0,1 |
| Fuertemente contaminado²⁾ | 0 |
| 1. La escala para η_c se refiere sólo a contaminantes sólidos típicos. La disminución de la vida del rodamiento por contaminación por agua u otros fluidos no está incluida. 2. Para fuerte contaminación, los valores η_c pueden estar fuera de la escala resultando una más severa reducción de la vida que la predicha por la ecuación L_{naa} | |

Fuente: Catálogo General SKF

Ahora se requiere el valor de P_u obtenido del catalogo para el rodamiento en cuestión y el valor de la carga equivalente P obtenido de las condiciones del problema.

Con todo esto de evalúa ($\eta_c P_u / P$) y se ingresa por el eje horizontal en uno de los cuatro gráficos que siguen a continuación.

- [Para rodamientos radiales de bolas.](#)
- [Para rodamientos radiales de rodillos.](#)
- [Para rodamientos axiales de bolas.](#)
- [Para rodamientos axiales de rodillos.](#)

Obtenido el valor a_{SKF} se procede a evaluar L_{naa} . De esta forma se han obtenido 3 resultados para la vida útil del rodamiento.

Para el caso de cargas fluctuantes que afecten al rodamiento es recomendable que se consulte el catalogo de rodamiento para fórmulas mas complejas. En la confección de este apunte se ha utilizado el "Catálogo General de Rodamientos SKF" que contiene además mucha información relevante.





Existen muchas aplicaciones que requieren un rodamiento de diseño especial. Una de estas situaciones es la falta de espacio para colocar un rodamiento normal.

Para ofrecer una solución a este problema, se crean los rodamientos de agujas, que consisten en cilindros delgados unidos por un canastillo o jaula y el aro exterior. La carencia de aro interior y el reducido diámetro de las agujas, logra un rodamiento delgado con aspecto de anillo.

Para situaciones en donde el espacio es aún más reducido, existen rodamientos sin aro exterior que se denominan "corona de agujas" y rodamientos denominados "casquillos de agujas" compuestos por agujas y un aro exterior de acero delgado.



Los rodamientos de agujas también se aplican para cargas axiales en donde las agujas (o más exactamente los troncos de cono) se ordenan en un canastillo y puede tener aros de variados espesores, aprovechando el espacio disponible.



Cuando se realiza el diseño de un montaje, se pueden usar soportes completos que incluyen el rodamiento, los sellos y una base de apoyo que puede ser "de pie" con dos perforaciones para unirlos a una estructura o de "brida" para unirse a una plancha. En la figura se aprecian dos soportes de pie y uno brida del tipo SY que además son a rótula.



Finalmente, en la figura se aprecian dos rodamientos lineales, utilizados para el desplazamiento de un objeto a lo largo de un riel. El rodamiento partido es para desplazamientos lineales y el rodamiento entero puede utilizarse para desplazamiento lineal y rotacional.