

# Evaluación de lubricante para apoyos de ventilador en planta termoeléctrica con empleo de norma ISO 7902.

**A. García Toll, R. Gómez González, G. González Rey, M. E. García Domínguez.**

Departamentos CEIM y Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.

Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba

Teléfono: (537) 266 3607 Fax: (537) 260 2267

E – mail: agarciat@ceim.cujae.edu.cu, cidim@mecanica.cujae.edu.cu, megarcia@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 10 de julio de 2007; aceptado el 22 de septiembre de 2007)

## Resumen

Durante la reparación de un ventilador de recirculación de gases de la caldera en una planta termoeléctrica, se modifican las dimensiones de los cojinetes de deslizamiento lubricados por aros, que sirven de apoyo al rotor. Se decide entonces analizar la posibilidad de emplear el mismo lubricante que antes de la reparación. Para evaluar el uso del aceite propuesto se utiliza la norma ISO 7902 “*Hydrodynamic plain journal bearing under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings*”, que permite verificar la capacidad de trabajo de un cojinete de deslizamiento en condiciones de lubricación hidrodinámica para un lubricante seleccionado, con una geometría y sistema de cargas en una aplicación de cojinete. En el artículo se expone un ejemplo práctico de análisis evaluación del lubricante en una aplicación típica de cojinete de deslizamiento.

**Palabras claves:** Cojinetes de deslizamiento, lubricante, capacidad de carga, Norma ISO 7902.

## 1. Introducción.

Los cojinetes de deslizamiento han sido empleados ampliamente en la industria, en la actualidad mantienen un vasto campo de aplicación, pueden encontrarse en turbinas, generadores, motores eléctricos, engranajes, laminadoras, bombas, ventiladores y otras máquinas.

Evaluar la conveniencia del empleo de un lubricante en un cojinete de deslizamiento en condiciones de lubricación hidrodinámica, de forma teórica, exige un procedimiento complejo y la bibliografía disponible propone formas diversas. Al enfrentarse a la valoración del beneficio de mantener el mismo aceite en un cojinete que ha sido reparado, al cual se le han modificado sus dimensiones, se opta por el estudio y aplicación de la norma ISO 7902:1998 “*Hydrodynamic plain journal bearing under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings*”, elaborada por el comité técnico ISO-123/SC 4.

En este trabajo se pretende demostrar la aplicabilidad de ISO 7902 en un caso de estudio de cojinetes de deslizamiento de dimensiones medias.

## 2. Evaluación del cojinete del rotor.

En el proceso de reparación de una planta termoeléctrica se incluye analizar el estado del ventilador de recirculación de gases de la caldera, al que generalmente se le modifica el diámetro de los apoyos

del rotor. La variación de las dimensiones del diámetro del apoyo y de la holgura con que se monta en los nuevos cojinetes de deslizamiento exige la verificación de la capacidad de trabajo del cojinete de deslizamiento con el tipo de lubricante empleado hasta la reparación. Los cojinetes de deslizamiento de rotores de turbinas de plantas termoeléctricas se montan en pedestales y usualmente se explotan a temperaturas medias lubricados con asistencia de aros, debido a que están expuestos a la intemperie y próximos al paso de los gases calientes.

Para evaluar la conveniencia del empleo de un aceite en condiciones de lubricación hidrodinámica, es imprescindible la determinación de la temperatura de trabajo. La viscosidad del aceite, a la temperatura de trabajo, es la propiedad del lubricante que define la capacidad de trabajo de una película hidrodinámica, por esto se requiere de un procedimiento de simulación de cojinetes fiable que incluya la influencia de todos los factores involucrados en mantener el equilibrio dinámico que caracteriza la cuña de lubricante.

En particular el procedimiento de cálculo que se hace referencia en este artículo se basa en el documento normativo ISO 7902: 1998. La mencionada norma ISO especifica un método de cálculo para los cojinetes hidrodinámicos con la separación completa del árbol y las superficies de deslizamiento por una película de lubricante. La norma es aplicable a cojinetes cilíndricos

circulares que tienen segmentos angulares de 360°, 180°, 150° y 90°, siendo el segmento de arco cargado centralmente. Su holgura geométrica es constante, exceptuando deformaciones despreciables que son el resultado de la presión de la película lubricante y la temperatura. El procedimiento de cálculo se emplea en cojinetes bajo condiciones de operación continua, con magnitud y dirección de la carga constante, así como velocidad angular estable de las partes de rotación. La base de cálculo es la solución numérica a la ecuación diferencial de Reynolds para un cojinete de longitud finita [3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta(u_j + u_B) \frac{\partial h}{\partial x} \dots\dots\dots 1$$

La norma empleada presenta un procedimiento de cálculo iterativo que permite la simulación de las condiciones de trabajo y la determinación aproximada de la temperatura de equilibrio del mismo así como las variables de estado fundamentales como: la excentricidad relativa, coeficiente de fricción relativo, pérdidas de potencia, y espesor de película mínimo. Para ello, diferencia dos modos de cálculo según sea el mecanismo principal de transferencia de calor al exterior.

El caso que se estudia toma como base la especificación de la norma en el epígrafe 6.4, que trata el tema del balance térmico al referirse a los cojinetes hidrodinámicos cuya disipación de calor es realizada por convección, donde plantea que a este grupo pertenecen los cojinetes lubricados sin presión por aros [3].

El método propuesto por la norma ISO 7902: 1998 se ofrece por medio de un modelo matemático que se muestra a continuación de forma simplificada, en la Tabla 1, cuyos identificadores aparecen en la Tabla 2.

El problema que se plantea trata de un ventilador de recirculación de gases de una caldera en una planta termoeléctrica con masa total de 16 110kg, potencia 1150 kW, temperatura del fluido que manipula 328°C, y antes de la reparación los apoyos poseían un diámetro 0,175m. La Tabla 3 presenta los datos que se tomaron para la simulación de las nuevas condiciones de trabajo del cojinete para evaluar la posibilidad de continuar empleando el lubricante Turbina 46.

Tabla 1. Modelo matemático.

# Relación	Relación
1	$\eta_{\text{eff}} = \text{función} \{T_B, \text{aceite}\}$
2	$(\Psi_{\text{máx}} \cdot D) - D_{\text{máx}} + d_{\text{min}} = 0$
3	$S_o(D \cdot B \cdot \eta_{\text{eff}} \cdot \omega) - F \cdot (\Psi_{\text{máx}})^2 = 0$
4	$\varepsilon = \text{función} \{S_o, B/D\}$
5	$f / \Psi_{\text{máx}} = \text{función} \{\varepsilon, B/D\}$
6	$P - f \cdot F \cdot v = 0$
7	$A = \text{función} \{\text{Geometría y condiciones del apoyo}\}$
8	$T_B \cdot K_A \cdot A - P - T_{\text{amb}} = 0$
9	$T_{B_i} - T_{B_{(i+1)}} - \Delta T_B = 0$
10	$h_{\text{min}} - 0,5 \cdot D \cdot \Psi_{\text{máx}} (1 - \varepsilon) = 0$

Tabla 2. Variables, identificadores y unidades

Identificadores designación y unidades		
aceite	Aceite lubricante del cojinete	-
A	Área de transferencia de calor	m <sup>2</sup>
B	Ancho del cojinete	m
d <sub>min</sub>	Diámetro mínimo del árbol	m
D	Diámetro nominal del cojinete	m
D <sub>máx</sub>	Diámetro máximo del cojinete	m
f	Coefficiente de fricción	-
f / $\Psi_{\text{máx}}$	Relación coeficiente de fricción holgura efectiva	-
F	Fuerza radial aplicada al cojinete	N
h <sub>min</sub>	Espesor de película mínimo	m
K <sub>A</sub>	Coefficiente de transferencia de calor exterior	W/m <sup>2</sup> °C
P	Pérdidas por fricción	w
S <sub>o</sub>	Número de Somerfield	-
T <sub>amb</sub>	Temperatura ambiente	°C
T <sub>B</sub>	Temperatura del cojinete	°C
T <sub>B<sub>i</sub></sub>	Temperatura del cojinete al comienzo de la iteración	°C
T <sub>B<sub>(i+1)</sub></sub>	Temperatura del cojinete al final de la iteración	°C
v	Velocidad circunferencial del cojinete	m/s
ε	Excentricidad relativa	-
$\Psi_{\text{máx}}$	Holgura relativa máxima	-
$\eta_{\text{eff}}$	Viscosidad dinámica del lubricante a la temperatura de trabajo	Pa · s
ω	Velocidad angular	1/s
ΔT <sub>B</sub>	Diferencia de temperatura para una iteración	°C

Tabla 3. Datos para el cálculo

Designación	Símbolo	Unidad	Valor
Fuerza radial	F	N	32 500
Velocidad angular	$\omega$	1/s	123,569
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	°C	46
Holgura relativa efectiva del cojinete	$\Psi_{eff}$	-	0,00175
Diámetro nominal del eje	D	m	0,1766
Ancho nominal del cojinete	B	m	0,138
Area de transferencia de calor	A	m <sup>2</sup>	1,1
Lubricante 46 Turbina	-	-	-
Coefficiente de transferencia de calor exterior	$K_a$	W/m <sup>2</sup> °C	20
Temperatura límite del cojinete	$T_{lim}$	°C	110

En la Tabla 4 se revelan los resultados luego de las iteraciones realizadas para arribar a la solución del problema. Como se puede observar, la temperatura del cojinete, el espesor mínimo de película de lubricante, así como la excentricidad relativa se encuentran dentro de los valores permisibles por lo que se puede concluir que bajo las condiciones actuales, el cojinete debe operar de forma estable. Tomando en cuenta los resultados se pudo demostrar que el lubricante propuesto permite el trabajo del cojinete.

Tabla 4. Resultados.

Designación	Variable	Unidad	Resultado
Temperatura del cojinete	$T_B$	°C	103,6
Viscosidad dinámica del lubricante a la temperatura de trabajo	$\eta_{eff}$	Pa·s	0,0046
Número de Sommerfeld	$S_o$	-	4,1
Excentricidad relativa	$\epsilon$	-	0,84
Espesor de película mínimo	$h_{min}$	m	$24,64 \cdot 10^{-6}$
Relación coeficiente de fricción holgura efectiva	$f/\Psi_{eff}$	-	1,576
Pérdidas por fricción	P	W	975,08

### 3. Cálculos para otros cojinetes lubricados por aros con cargas y frecuencia de rotación diferentes.

Se realizan otros cálculos para 21 cojinetes de deslizamiento, para corroborar la valía del procedimiento empleado en la simulación del cojinete. Los cálculos han tomado como referencia un estudio realizado por ingenieros expertos en el tema de cojinetes hidrodinámicos, declarado en *Bearings, Tribology Handbook*, mediante una recopilación de experiencias ajustadas a los requerimientos industriales actuales, así como a las normas internacionales vigentes [1]. Las curvas que aparecen en la publicación se refieren a cojinetes hidrodinámicos lubricados por anillos, que soportan sólo cargas radiales (sin desplazamiento transversal). Las características de los mencionados cojinetes se compilan en la Tabla 5:

Tabla 5. Características generales de los cojinetes lubricados por aros a comparar.

Designación	Símbolo	Unidad	Valor
Ancho/ Diámetro	B/D	-	1
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	°C	20
Holgura efectiva relativa del cojinete	$\Psi_{eff}$	-	0,001
Lubricante ISO VG 68			

A esta gama de cojinetes diferentes en cuanto a dimensiones, carga y frecuencia de rotación del árbol, se le aplicarán restricciones a los valores de temperatura, espesor mínimo de película de lubricante y excentricidad relativa para garantizar de esta manera su trabajo en condiciones estables, esos valores aparecen en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros permisibles para operaciones estables bajo carga

$T_{lim}$	90 ÷ 110 °C
$h_{min}$	$9 \cdot 10^{-6} \div 30 \cdot 10^{-6}$ m
$\epsilon$	0,7 ÷ 0,90

Los valores establecidos como permisibles para la temperatura aparecen en la Norma ISO 7902-3 "Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings".

El rango designado para el espesor mínimo de película de lubricante, se ha establecido con valores válidos para el equipamiento que comúnmente se encuentra en los talleres y fábricas del país, un espesor que permite condiciones de trabajo estables tomando en consideración el rango de excentricidad relativa, las pérdidas por fricción líquida, pérdidas de rigidez de la película de lubricante y las fugas laterales. Además, se tiene en consideración el rango de excentricidad relativa que propone P. Orlov [2].

Adicionalmente, se definen tres puntos característicos para cada curva con las siguientes propiedades:

- Carga máxima a bajas revoluciones
- Punto intermedio de cargas y revoluciones
- Carga mínima a altas revoluciones

Se confecciona la Tabla 7, cuya primera columna corresponde al diámetro del cojinete analizado, la segunda y tercera columna definen las combinaciones de carga radial y frecuencia de rotación a estudiar. Las columnas cuarta, quinta y sexta, muestran los valores de variables de estado, obtenidas con la aplicación de la norma a los puntos seleccionados de las curvas.

Después de realizado el cálculo de comprobación a todos los cojinetes con diferentes dimensiones y cargas, se puede observar que con la aplicación del procedimiento de cálculo propuesto por la norma ISO 7902:1998, se obtienen resultados favorables, pues los parámetros que debían cumplir con ciertas restricciones para garantizar condiciones de trabajo estables, se encuentran dentro de los rangos permisibles para una amplia gama de valores de frecuencias de rotación y diámetros de ejes. De forma general, se puede decir que el valor de excentricidad calculado es satisfactorio. Esto indica que la norma es una herramienta útil para la simulación de cojinete hidrodinámico lubricado por aros.

Como se pudo demostrar, para diámetros de eje con valores pequeños, cargas medias y altas revoluciones, las temperaturas exceden los valores permisibles, en estos puntos por el método que establece la norma no se garantiza el funcionamiento del cojinete. El procedimiento de cálculo de la norma es más conservador, principalmente para cojinetes de pequeños diámetros, cargas medias y altas velocidades.

Tabla – 7 Variables de estado obtenidas a partir de la aplicación de la ISO 7902:1998.

Diámetro interior del cojinete d [mm]	Fuerza radial F [N]	Frecuencia de rotación n [rpm]	Temperatura del cojinete $t_b$ [°C]	Excentricidad relativa $\epsilon$	Espesor de película mínimo $h_{min}$ [ $\mu$ m]
225	195000	200	44,55	0,89	9,62
	180000	350	59,50	0,86	11,81
	170000	600	80,80	0,88	10,5
200	170000	250	52,04	0,87	11,37
	150000	500	74,77	0,86	12,25
	130000	700	86,54	0,87	11,37
175	130000	300	58,88	0,85	13,12
	110000	600	87,12	0,84	14,00
	100000	800	79,92	0,83	14,87
150	100000	300	60,93	0,82	15,75
	90000	700	91,55	0,83	14,87
	80000	900	104,8	0,83	14,87
125	70000	300	61,00	0,78	19,25
	65000	900	<b>110,4</b>	0,82	15,75
	60000	1100	<b>125,6</b>	0,83	14,87
100	50000	400	75,27	0,73	23,62
	45000	900	<b>113,1</b>	0,78	19,25
	40000	1400	182,0	0,67	28,87
75	30000	350	69,56	<b>0,65</b>	28,87
	28000	1400	<b>182,0</b>	<b>0,67</b>	28,87
	25000	2000	<b>208,7</b>	<b>0,67</b>	<b>87,5</b>

## 4. Conclusiones

El procedimiento de cálculo propuesto por la norma ISO 7902 “Hydrodynamic plain journal bearing under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings”, se ha empleado con éxito para la simulación de las condiciones de trabajo de los cojinetes lubricados por aros del rotor del ventilador de recirculación de gases de la caldera y la evaluación del lubricante a emplear, tomando en consideración su viscosidad a la temperatura de trabajo.

Se demuestra con el cálculo de 21 cojinetes de deslizamiento que la Norma ISO 7902 puede ser aplicada en la simulación de los cojinetes lubricados por aros para condiciones de trabajo estables, considerándose el intercambio de calor solo por convección.

## 5. Referencias

1. Bearings, A Tribology Handbook. Butterworth Heinemann 1998.
2. Orlov P, Ingeniería de Diseño, Editorial MIR, Moscú, 1985.
3. Norma ISO7902. “Hydrodynamic plain journal bearing under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings”, 1998.

# Evaluation of lubricant for fan supports in thermoelectric plant by means of ISO standard 7902.

## Abstract:

During the repair of a recirculation gases fan in the boiler in a thermoelectric plant frequently are modified the dimensions of the plain bearings lubricated. In this case, it is necessary to analyze the possibility to use the same one lubricant that before the repair. The standard ISO 7902 "Hydrodynamic plain journal bearing under steady-state conditions - Circulate cylindrical bearings", it is used to verify the capacity of work of a plain bearing under conditions of hydrodynamic lubrication for a selected lubricant, with a geometry and loads given system. In this paper a procedure to verify the capacity of plain bearings taking into account a specific lubricant is given. Moreover, a sample of analysis of lubricant film thickness capacity for an application in plain journal bearing is presented.

**Key words:** bearings, lubricant, load capacity, ISO Standard.

## INGENIERÍA MECÁNICA

ISSN 1029-516X.

Revista Ingeniería Mecánica (On Line):

<http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Mecanica.asp>

La Revista Ingeniería Mecánica se encuentra referenciada en las bases de datos:

1. Periódica  
(<http://dgb.unam.mx/periodica.html>)
2. Latindex
3. Cambridge Scientific Abstracts  
(<http://www.csa.com/>)
4. Directory of Open Access Journals  
(<http://www.doaj.org>)
5. Ulrich's Periodical Directory  
(<http://www.ulrichsweb.com>)
6. Registro Cubano de Publicaciones Seriadadas  
(<http://www.cubaliteraria.com/publicacion/ficha.php?id=55>)

La publicación ha sido aceptada con los requerimientos exigidos por el Tribunal Nacional Permanente para Grados Científicos en Ingeniería Mecánica como publicación de referencia.

Las contribuciones con artículos a publicar en Ingeniería Mecánica pueden remitirse al Consejo de Redacción, para iniciar proceso con revisores, a las direcciones:

Email: [jwellesley@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:jwellesley@mecanica.cujae.edu.cu)

Email: [cidim@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:cidim@mecanica.cujae.edu.cu)

