

# Tensiones de contacto en el desgaste de un cojinete de una turbina de vapor para la generación eléctrica

**Fernando de la Vara Garrido**

[fdelavara@ismm.edu.cu](mailto:fdelavara@ismm.edu.cu)

**Ledennis Suarez Torres**

[lstorres@ismm.edu.cu](mailto:lstorres@ismm.edu.cu)

**Anabel Ruiz Padilla**

[aruiz@ismm.edu.cu](mailto:aruiz@ismm.edu.cu)

**Efrain Guzmán Romero**

[eeguzman@ismm.edu.cu](mailto:eeguzman@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa

**Resumen:** Se determinó las tensiones de contacto en el desgaste de un cojinete de una turbina de vapor para la generación eléctrica. Se caracterizó la composición química del metal babbit para establecer la carga a emplear. Al ser un cojinete seccionado, se consideró esta misma disposición para la simulación por el método de los elementos finitos. Se determinó que, el espesor del recubrimiento es de 2,3 mm y el desgaste ocurrido por efecto de la fricción es de una profundidad de 1,07 mm; lo que representa el 46 % de este desgaste y que la causa del defecto posiblemente sea la deficiente lubricación en el par tribológico y que, en las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos, las direcciones tangenciales y radiales no son independientes entre sí y que la pérdida de material genera tensiones máximas de 9 264 N/m<sup>2</sup> y mínima de 7 720 N/m<sup>2</sup> en el interior de la pista de deslizamiento.

**Palabras claves:** cojinete; tensiones; par tribológico; deslizamiento; desgaste.

## Contact stress in the wear of a bearing of a steam turbine for electric generation

**Abstract:** The contact stresses in the wear of a bearing of a steam turbine for electricity generation were determined. The chemical composition of the babbit metal was characterized to establish the charge to be used. Being a sectioned bearing, this same arrangement was considered for the simulation by the finite element method. It was determined that the thickness of the coating is 2,3 mm and the wear caused by the effect of friction is 1,07 mm deep; which represents 46% of this wear and that the cause of the defect is possibly the deficient lubrication in the tribological torque and that, in the stresses, deformations and displacements, the tangential and radial directions are not independent of each other and that the Loss of material generates maximum stresses of 9,264 N/m<sup>2</sup> and minimum of 7,720 N/m<sup>2</sup> inside the sliding track.

**Keywords:** bearing; stresses; tribological torque; slip; wear

## Introducción

El mercado de la electricidad en el mundo está superdotado a la competencia global causada por la privatización y la desregulación, de este modo cada productor de energía debe tener plantas eléctricas competitivas para ofrecer abasto en el suministro energético del país. Las generadoras nacionales han sido operadas por años y es muy probable que el deterioro de cada componente por envejecimiento proceda gradualmente. Para evitar estos problemas, es importante establecer la estrategia de mantenimiento y mantener la confiabilidad y disponibilidad de las plantas termoeléctricas (Roemer, Kacprzyński & Gregory, 2000; Loboda, Yepifanov & Feldshteyn, 2009).

Las turbinas de vapor han ido evolucionando y desarrollándose cada vez más a lo largo de los años con el objetivo de obtener una mayor eficiencia energética, alcanzando actualmente rendimientos entre un 40 y un 52%. La principal aplicación es la de hacer girar el rotor del generador situado en una central de producción de electricidad (Loboda, Yepifanov & Feldshteyn, 2009).

Refieren Roemer, Kacprzyński & Gregory (2000) que, en la potencia total de una red de un país cualquiera, se requiere que no exista una dependencia total de las turbinas de vapor no mayor al 50 % de la máxima capacidad. Las ventajas son su alta potencia y su excelente realización dentro del ciclo Clausius-Rankine. Así mismo, logran operar a altas  $r/\text{min}$  y la instalación puede ser pequeña. Además de que la potencia se consigue regular, lo que es positivo, cuando se utiliza para accionar equipos mecánicos.

De acuerdo con Gujar y Bhaskar (2013) y Rodríguez-Rodríguez (2017), la energía eléctrica se produce fundamentalmente mediante el uso de turbinas de vapor, de gas, hidráulicas y motores Diesel. La de vapor, permite alcanzar la mayor capacidad de generación. Este empleo no es el único de las turbinas, también existen aplicaciones en donde una planta de proceso tiene necesidad de grandes cantidades de calor, como en la producción de energía eléctrica, donde se encuentran instaladas con capacidad de hasta de 1 300 MW.

Uno de los elementos que garantiza el movimiento de rotación en el eje de las turbinas son los cojinetes de contacto plano, construidos en una base metálica revestidos con una aleación de base estaño. Cuando se presentan incidentes ya sea falla de

lubricación o claros muy ajustados o desgaste en el tiempo, se suelen reconstruir estos cojinetes en forma artesanal aplicando una nueva capa de magnolia manualmente, la misma que a pesar de tener todas las precauciones, queda con macro porosidades que crea irregularidades y muchas veces baja durabilidad del cojinete (Sawalhi y Randall, 2008).

Según Cupillard, Cervantes & Glavatskih (2014) comúnmente, para permitir el movimiento relativo entre el eje y la estructura de la máquina y funcionar como punto de apoyo se suelen emplear los rodamientos, pero en algunos casos su aplicación es restringida por algunas variables que finalmente convierten al cojinete de fricción en la opción más adecuada. Es importante tener en cuenta que, a diferencia de los rodamientos, en estos cojinetes no existe un deslizamiento por rodadura, por lo que el movimiento se genera por deslizamiento entre las superficies en contacto. Esta condición produce que se presente fricción entre ellas y se genere un desgaste entre las mismas, tanto del eje como del cojinete. Esta variable conlleva a que el cojinete de fricción se construya de un material más blando que el del eje, dado que es preferible que se desgaste el primero y no el segundo.

Son del criterio García, Linares & Arias (2013) que, los cojinetes tienen que soportar diferentes cargas a la que están sometidos. Los arrastres más pequeños de micro partículas, la sobrealimentación y los más altos rangos de potencia hacen que el cigüeñal y los cojinetes de biela se sometan a cargas muy pesadas. Esto ha llevado al desarrollo de algunas nuevas aleaciones y recubrimientos que permiten a estas partes resistir a tantos esfuerzos.

García, Linares & Arias (2013) consideran que, los fabricantes de cojinetes ofrecen una gama de materiales con diferentes índices de resistencia a la fatiga para maniobrar con todo tipo de aplicaciones, ya sean los motores de serie o los de rendimiento. La película de aceite también ayuda a distribuir la carga en el rodamiento y para protegerla contra el golpeteo constante.

### **Simulación por el método de elementos finitos**

El uso de software computacional como ANSYS evita la necesidad de construir prototipos experimentales para pruebas de fricción y desgaste en el caso de los cojinetes hidrodinámicos, ya que aparte de tener un elevado costo en cuanto a la construcción de los modelos físicos se consume tiempo importante en la realización de

las pruebas y no siempre se pueden replicar las condiciones reales de operación. Si bien las pruebas en el software consumen recursos computacionales ofrecen grandes ventajas debido a que se pueden probar distintos modelos para ser comparados y así obtener conclusiones sobre un prototipo final (Hutton y Pullman, 2006).

García, Linares & Arias (2013) realizaron una investigación numérica del comportamiento del campo de presión, el flujo axial, el espesor de película y la fricción viscosa, considerando el desalineamiento del eje por el efecto del peso y la flexibilidad del rotor. El campo de presión hidrodinámica lo resuelven utilizando la ecuación de la lubricación de Reynolds junto con una expresión modificada del espesor de película que incluye el desalineamiento del eje. También se presentan una expresión para calcular el máximo desalineamiento permitido por una chumacera, en función del punto de equilibrio de estado estable. Los resultados muestran que, a medida que el desalineamiento del eje se incrementa el espesor de película se reduce, causando el incremento de la presión máxima, del flujo axial del lubricante y cambios en la fricción viscosa.

Cupillard, Cervantes & Glavatskih (2014) analizaron el rendimiento termo hidrodinámico de un cojinete con un microsurco creado en el eje, fue modelado mediante (CFD), este software resuelve las ecuaciones de energía de Navier-Stokes, así como los patrones de flujo. El efecto inducido por un microsurco en la distribución de presión explica diferentes configuraciones de cojinete, excentricidades y profundidades, concluyeron que, el microsurco produce una caída de presión y disminuye la capacidad de transporte de carga.

El objetivo de este trabajo es determinar las tensiones de contacto en el desgaste de un cojinete de una turbina de vapor para la generación eléctrica.

## **Desarrollo experimental**

### **Composición química del cojinete**

En la tabla 1 se muestra la composición química estándar del babbit base estaño según *Alloy Casting Institute (ACI)* y la designación de la AISI y SAE, de la *American Society for testing Materials-ASTM B 23*.

Tabla 1. Composición química del babbitt base estaño, % en masa

UNS	Sn	Sb	Cu	Fe	Zinc	Al
55189	83,0-85,5	7,5-8,5	7,5-8,5	0,08	0,005	0,005

Esta aleación está constituida por: un 85,5 % de estaño (Sn) como máximo; 8,5 % de antimonio (Sb) y un 8,5 % de cobre (Cu), su punto de fusión es de 232 °C, en ocasiones se agrega plomo, con el fin de abaratar su costo. Este porcentaje de adición está especificado en bajos contenidos. La red cristalina generada entre el antimonio y el cobre ayuda considerablemente a aumentar la resistencia de la aleación, para lo cual, esta debe ser continua, es decir, interconectada.

### Caracterización del cojinete de deslizamiento

En la figura 1 se muestra el cojinete de deslizamiento y la zona de rodamiento que se daña durante su funcionamiento.

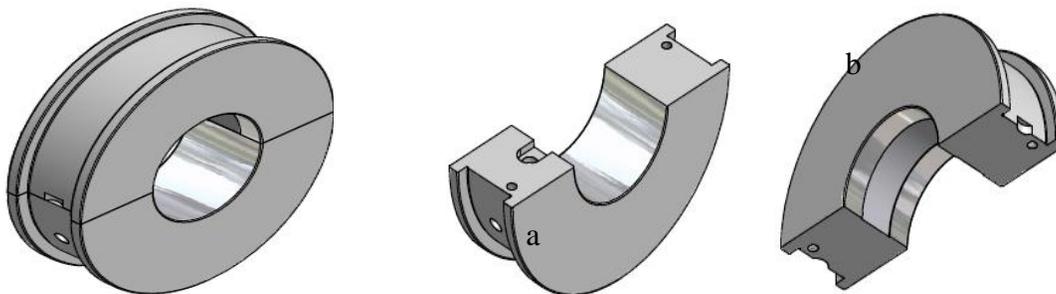


Figura 1. Cojinete de deslizamiento. a) Tapa inferior. b) Tapa superior.

En un cojinete compuesto por dos casquillos y tiene un movimiento en contacto directo, realizándose un deslizamiento por fricción, con el fin de que esta sea la menor posible. El par tribológico cojinete-árbol trabaja una película lubricante que separa las dos piezas del mecanismo mediante una lubricación completa. La selección de este tipo se justifica ya que se usa en máquinas de gran tamaño, con grandes cojinetes de deslizamiento.

El desgaste se produjo debido a que, la película lubricante es delgada como para separar las microirregularidades de las dos piezas, las cuales al entrar en contacto generan una fricción con desprendimiento de partículas que erosionan las partes. Este desgaste ocurre en las asperezas que conforman el área real de contacto la cual es menor que la aparente (área geométrica). En esos puntos de contacto real la presión

específica es muy alta ocurriendo deformaciones y temperaturas que aceleran el proceso de desgaste.

### Determinación del espesor del cojinete

Se seleccionó un cojinete retirado de servicio al cual se le realizó mediciones en su espesor para determinar la magnitud del desgaste. En la figura 2 se muestra las zonas medidas.



Figura 2. Zonas de desgaste medida en el cojinete.

Se realizó 9 mediciones en toda el área de contacto entre el árbol y el cojinete. Se considera que, por las condiciones de trabajo, este cojinete debe presentar de forma regular un desgaste uniforme sobre la superficie.

### Determinación de tensiones por el método de los elementos finitos

El modelo considerado para la simulación presenta como características, que es compuesto de dos partes, un cojinete al cual se le aplica una carga en un diámetro de  $127,3^{+0,005}_{-0,005}$  milímetros y un radio de curvatura de 63,65 milímetros. El material utilizado para el respaldo es acero, el cual se idealizó como elástico. La segunda placa consistió de un material tribológico conocido comercialmente como la aleación ASTM B 23, que se consideró como isotrópico elástico lineal con endurecimiento. En la figura 3 se muestra el ensamble del modelo observado desde el plano XY.

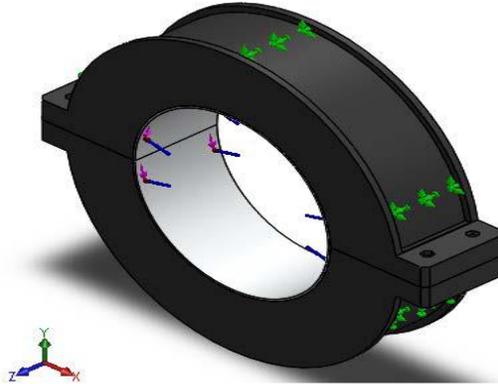


Figura 3. Ensamble del modelo desde el plano XY.

A la superficie del cojinete se le asignó puntos de referencias, los cuales determinarán su comportamiento dentro del modelo, es decir, mediante estos puntos se establecen los grados de libertad que rigen el movimiento, se crean dos particiones con el fin de seccionarlo en cuatro partes y con ello lograr, en el módulo de mallado (mesh) una mejor malla de elementos finitos para esta pieza.

### Mallado del modelo

Cuando se realiza un modelo, se debe recurrir al análisis de la convergencia para seleccionar el tamaño correcto de los elementos en el mallado y de este modo obtener el mínimo de error en los resultados. El software permite realizar un mallado más fino en las zonas de interés, es decir en aquellas donde el gradiente de temperatura es mayor. En la tabla 2 se muestra los detalles del mallado.

Tabla 2. Detalles del mallado del modelo

Número total de nodos	4 337
Número total de elementos	2 337
Cociente máximo de aspecto	19,259
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	59,1
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	10,2

Según los detalles establecidos, el tipo de malla considerado es sólida, el mallador utilizado es basada en curvatura, los puntos Jacobianos tenidos en cuenta son 4 y la calidad es con elementos cuadráticos de alto orden. Establecidas las geometrías, propiedades, interacciones y condiciones en cada uno de los módulos anteriores, se definió el tipo y la geometría de los elementos finitos que compondrán la malla del modelo. La figura 4 muestra el mallado.

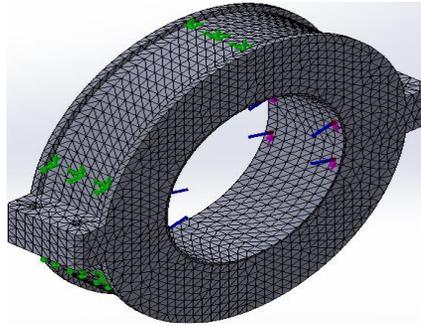


Figura 4. Modelo mallado.

La solución obtenida mediante el MEF se acercará más a la solución exacta, siempre que se aumente el número de elementos que conformará el mallado del modelo. A este estudio previo se le denomina análisis de la convergencia. En el caso de la modelación de la transferencia de calor, se debe analizar el mismo modelo con varias densidades de malla, hasta encontrar los rangos de temperaturas, más exactas y precisas, así como el valor de las deformaciones y tensiones en los nodos deseados. En las simulaciones se observará la influencia que tiene el efecto del valor de la carga del árbol sobre el cojinete, el cual es suficiente para alcanzar la deformación plástica del material tribológico y así poder formar la mezcla mecánica de la tribocapa, se observará la influencia en el giro del árbol para la formación de la misma.

Después de haber ubicado las respectivas restricciones y carga radial, se seleccionó el tipo de resultados que se desea obtener, para este caso, se solicitan los esfuerzos equivalentes (Von-Mises), las deformaciones totales, factor de seguridad y análisis modal (primera velocidad crítica).

## Resultados y discusión

### Espesor de las capas desgastada en el cojinete

A partir del espesor del casquillo de acero exterior del cojinete y las dimensiones generales de este (diámetro exterior e interior de alojamiento del muñón), obtenidas del manual de explotación y mantenimiento de la turbina se determinó el espesor de la capa de metal antifricción Babbitt, según las zonas establecidas. En la tabla 3 se muestra los resultados de las mediciones realizadas en el cojinete, para un espesor inicial de babbitt de 2,3 mm.

Tabla 3. Espesor del material antifricción a lo largo del cojinete

Medición	Ángulo	Longitud
1	- 96,63	0,63
2	- 90	0,88
3	- 98,13	1,02
4	- 94,82	1,21
5	- 93,9	1,28
6	- 92,83	1,18
7	- 92,79	1,19
8	- 92,15	1,16
Media		1,07

El cojinete de fricción tiene un espesor promedio en la zona del babbitt (material con desgaste) de 1,07 mm de un valor máximo de 1,28 mm y uno mínimo de 0,63 mm. Estos resultados muestran irregularidad en la superficie, lo que muestra la posibilidad de que en explotación haya existido una lubricación deficitaria o un exceso de contaminantes sólidos, o fuera de parámetros en sus propiedades por durante su trabajo, considerando en este caso que la calidad del metal babbitt del cojinete es la adecuada. El desgaste del cojinete de la turbina fue del 46 %.

La falla fundamental que presentan es el desgaste adhesivo por fricción con un componente de abrasión, debido presumiblemente a la contaminación en el lubricante. El desgaste límite permisible en explotación es hasta un diámetro de 123,93 mm (1,07 mm). Un incremento en la carga del cojinete o un aumento en la temperatura del lubricante, provoca disminución de la viscosidad y evitan la acumulación de una película suficientemente gruesa para impedir el contacto metal a metal. La lubricación marginal es la situación menos deseable porque permite que entren en contacto las asperezas superficiales y se desgasten con rapidez, criterio que ha sido expuesto además por Daquinta (2010).

### **Resultados del método de los elementos finitos**

La simulación realizada por medio del MEF consistió en modelar una multicapa compuesta por una aleación tribológica blanda y un respaldo de acero. En los cojinetes de deslizamiento es este respaldo el que proporciona la rigidez a la estructura. La contraparte del tribopar se modeló como una superficie analítica idealmente rígida. En la figura 5 se muestra las tensiones de Von-Mises obtenidas en dicha simulación.

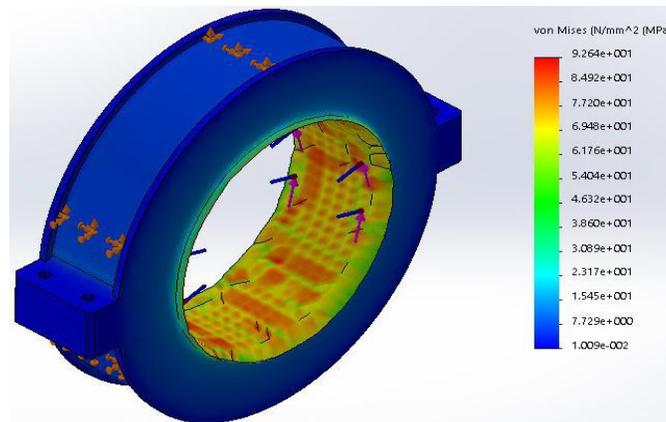


Figura 5. Tensiones de Von Mises.

Para una velocidad nominal de 3 600 min<sup>-1</sup>, un árbol de acero y que, según la cinemática de los cuerpos del par tribológico, formado por pares de materiales de diferentes durezas, se considera un par directo, ya que el elemento de mayor dureza (HB2) se mueve con respecto al más blando (HB1), provoca sobre la superficie del cojinete alteraciones superficial como se observa en la figura, generado por el deslizamiento del babbitt. Este defecto que trae consigo la pérdida de material, también genera tensiones máximas de 9 264 N/m<sup>2</sup> y mínima de 7 720 N/m<sup>2</sup> en el interior de la pista de deslizamiento, luego las mismas se distribuyen por la superficie de trabajo y por efecto de la fricción y en el espesor que alcanza el babbitt (2,3 mm) se obtienen valores de hasta 6 176 N/m<sup>2</sup>.

Los cojinetes de apoyo presentan limitaciones de velocidad si el peso es muy elevado. Las tensiones del rotor tienen dos orígenes: las provenientes de las exigencias mecánicas y las generadas por el propio material, también llamadas residuales. Estas últimas permanecen en ausencia de velocidad y, por lo tanto, no dependen del nivel de energía almacenada. Las mecánicas están originadas principalmente por la fuerza centrífuga, aunque también por la aceleración angular, el efecto giroscópico, el peso propio, el desequilibrio de masas y las vibraciones, de acuerdo con lo expuesto por Moreno, Alhama & Gómez De León (2005).

### Comportamiento de los desplazamientos

Se determinaron los desplazamientos que ocurren en el par tribológico. En la figura 6 se observa el comportamiento de los mismos.

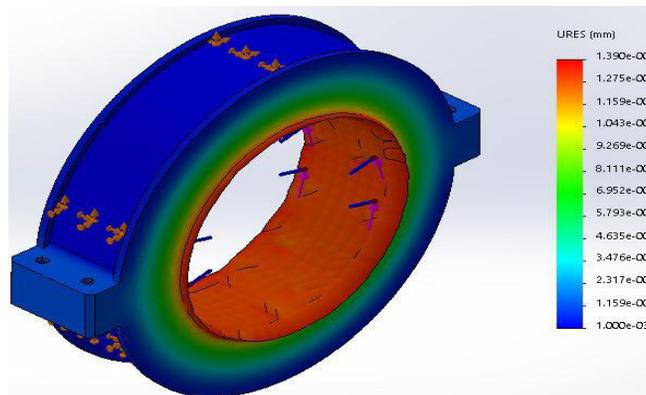


Figura 6. Desplazamientos del sistema árbol - cojinete.

Para los desplazamientos en el sistema árbol-cojinete se parte de la matriz de rigidez del sistema, que relaciona el vector de esfuerzos y el de estos desplazamientos. En correspondencia con la figura, existe variación en ellos a lo largo del eje X, es decir, el estrechamiento que se produce en la pieza, lo cual está en el rango de valores desde 1,3 hasta 1,15 mm.

En los cuerpos circulares, los desplazamientos y las deformaciones en las direcciones tangenciales y radiales no son independientes entre sí, el giro del árbol ocurre como resultado del desplazamiento en el eje  $z$  por efecto de la carga. La unión entre este y el cojinete presenta dos tipos de uniones, la rígida y la elástica. La primera, representada por el árbol, que soportará la fuerza centrífuga mediante la tensión radial y la elástica (metal babbitt) permite el desplazamiento radial, pero con una menor dureza que el primero, tiende a desgastarse con mayor rapidez.

### Comportamiento de las deformaciones

La figura 7 muestra las deformaciones del tribopar. Las simulaciones se realizaron con tipo de elementos cinemáticas e interpretándolos como rígidos sin presentar deformación en el contacto.

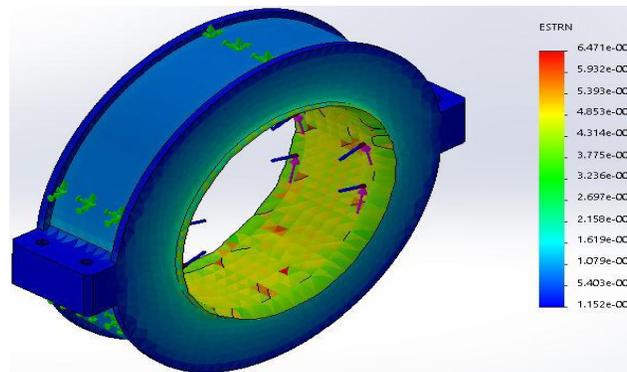


Figura 7. Deformación del par tribológico.

Al entrar en contacto el par tribológico, en un único punto, bajo la acción de la fuerza que cada uno de ellos ejerce sobre el otro (que suele denominarse carga) se deforman en la región del primer contacto, al no existir un cuerpo que permita el libre desplazamiento entre ellas (lubricante), una de ellas se deforma por efecto de la fricción y el calor. El cojinete de la turbina ha quedado deformado en la dirección radial del material y esto dificulta la unión con el eje. Este desplazamiento radial genera simultáneamente una deformación en esta misma dirección y es debido a la geometría cerrada del cojinete, en donde el perímetro es función del radio.

Esta dependencia geométrica origina algunos efectos cruzados entre las tensiones tangenciales y las radiales. Algunos son favorables, como la fuerza centrífuga, que es radial, genera también tensión tangencial, pero otros son perjudiciales, una tensión tangencial que no sea proporcional al radio genera una tensión radial. Esta dependencia complica el comportamiento de giro del árbol, criterios expuestos por Suárez, Toro & Vélez (2012).

## Conclusiones

En las mediciones efectuadas en el cojinete babbitt de la turbina de vapor se determinó que, el espesor del recubrimiento es de 2,3 mm y el mismo se desgastó por efecto de la fricción hasta un 1,07 mm; lo que representa el 46 % del desgaste y que la causa del defecto posiblemente sea la deficiente lubricación en el par tribológico.

En las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos obtenidos por el método de los elementos finitos entre el árbol y el cojinete se determinaron que, las direcciones tangenciales y radiales no son independientes entre sí y que la pérdida de material

genera tensiones máximas de 9 264 N/m<sup>2</sup> y mínima de 7 720 N/m<sup>2</sup> en el interior de la pista de deslizamiento.

### Referencias bibliográficas

- CUPILLARD, S.; CERVANTES, M. & GLAVATSKIH, S. 2014. Thermo hydrodynamic analysis of a journal bearing with a microgroove on the shaft. *Computational Thermal Sciences: An International Journal* 6(1): 17-28.
- DAQUINTA, A. 2010. Durabilidad del par de fricción compuesto por el árbol de levas y el cuerpo de los cojinetes del motor VAZ de fabricación Rusa. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(4): 67-73.
- GARCÍA, A.; LINARES, J. & ARIAS, M. 2013. Investigación numérica de las condiciones de lubricación en chumaceras hidrodinámicas con el efecto del desalineamiento del eje. *Ingeniería, investigación y tecnología* 14(1): 89-98.
- GUJAR, R. & BHASKAR, S. 2013. Shaft design under fatigue loading by using modified Goodman method. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 3(4): 1061-1066.
- HUTTON, D. & PULLMAN, W. 2006. *Fundamental of Finite Elements Analysis*. McGraw-Hill, EE.UU.
- LOBODA, I.; YEPIFANOV, S. & FELDSHTEYN, Y. 2009. Diagnostic analysis of maintenance data o fault gas turbine for driving an electric generator. ASME Turbo Expo 2009: International Technical Congress "Power for Land Sea & Air", Orlando, Florida, USA, 12p., ASME Paper No. GT200-6 0176, June 8-12.
- MORENO, J.; ALHAMA, F. & GÓMEZ DE LEÓN, F. 2005. Campo de temperaturas en cojinetes deslizantes. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* 9(3): 49-55.
- RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, A. 2017. *Análisis CFD de un álabe del último paso de una turbina de vapor*. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Politécnica de Madrid.

ROEMER, M.; KACPRZYNSKI, J. & GREGORY J. 2000. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment. In *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8484)* 6: 345-353.

SAWALHI, N. & RANDALL, R. 2008. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localized bearing faults. *Mechanic Systems and Signal Processing* 22(2): 1924-1951.

SUÁREZ, F.; TORO, F. & VÉLEZ, J. 2012. Efecto de la textura superficial en el desempeño a fricción de cojinetes de empuje. *Ingeniería, investigación y tecnología* 13(1): 97-103.