

Análisis de sensibilidad global de las características estáticas de un nuevo descanso mecatrónico respecto a las tolerancias de fabricación

Víctor Javier Mercado Mejías¹, Jorge Andrés González Salazar²

¹Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile.
Email: victor.mercado@ufrontera.cl

²Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile.
Email: jorge.gonzalez@ufrontera.cl

Resumen

Este estudio examina cómo las variaciones dimensionales en los parámetros geométricos afectan las características estáticas de un descanso hidrodinámico novedoso, el FPJB activo. Utilizando el método FAST y un modelo isoterma-hidrodinámico resuelto mediante el método de los elementos finitos, se analizó el impacto de las tolerancias de fabricación en el rendimiento operacional del descanso. Se estudiaron parámetros clave, tales como el radio del eje, el radio de la zapata, la longitud de la zapata y la inserción del pivote, para determinar su influencia en las presiones máximas y los espesores mínimos de la película de aceite fluido. El método FAST utiliza parámetros independientes con distribuciones normales ajustadas según las normas ISO 286 e ISO 2768. Los resultados muestran la influencia de los parámetros geométricos en el espesor de la película y las presiones en los dominios de lubricación del descanso. Se destaca la inserción del pivote en la zapata, cuya variación representa una mayor variabilidad de las presiones y espesores de película en el dominio hidrostático.

Palabras clave: Análisis de sensibilidad global; Descansos hidrodinámicos; Mecatrónica; Método FAST.

Abstract

This study examines how dimensional variations in geometric parameters affect the static characteristics of a novel hydrodynamic bearing, the active FPJB. Using the FAST method and an isothermal- hydrodynamic model solved by the finite element method, the impact of manufacturing tolerances on bearing performance was analyzed. Key parameters, including shaft radius, pad radius, pad length, and pivot insertion, were studied for their influence on maximum pressures and minimum fluid film thicknesses. The FAST method used independent parameters with distributions adjusted according to ISO 286 and ISO 2768 standards. Results showed the influence of geometric parameters on film thickness and pressures in the bearing's lubrication domains, where the pivot insertion is noteworthy, as its variation represents a greater variability of pressures and fluid film thicknesses in the hydrostatic domain.

Keywords: Global sensitivity analysis; Journal Bearings; Mechatronics; FAST method.

1. Introducción

En el proceso de diseño y fabricación de descansos hidrodinámicos, es esencial realizar una investigación exhaustiva sobre las variaciones de los parámetros geométricos para determinar su impacto tanto en las características estáticas como dinámicas del descanso, y, en consecuencia, en las de todo el sistema. Las variaciones entre las dimensiones reales y nominales de estos parámetros pueden conducir a variaciones en

el rendimiento operacional de todo el sistema de rotor, principalmente debido a discrepancias de fabricación que ocurren durante el proceso de producción del descanso, los cuales pueden afectar significativamente la eficiencia y la fiabilidad del sistema [1]. Una comprensión integral de la influencia de la variación de los parámetros geométricos en las características del descanso es crucial, ya que permite un análisis más detallado y robusto del sistema. Esta comprensión requiere de un análisis paramétrico, permitiendo a los

ingenieros predecir y mitigar posibles problemas derivados de estas variaciones. Por lo tanto, realizar un análisis de sensibilidad es de suma importancia. Dicho análisis no solo resalta los parámetros críticos que más afectan el rendimiento, sino que también proporciona información para optimizar los procesos de diseño y fabricación, mejorando la robustez y fiabilidad del sistema en general.

Numerosos investigadores han explorado el impacto de diversos parámetros en el rendimiento de los descansos. Iwamoto y Tanaka [2] investigaron descansos cilíndricos y, a través de un análisis paramétrico, demostraron que los errores de fabricación en la redondez del eje afectan significativamente el espesor mínimo de la película de aceite. De manera similar, Fillon et al. [3] examinaron un descanso de zapatas basculantes (TPJB, por su sigla en inglés), identificando parámetros clave de sensibilidad relacionados con las tolerancias de fabricación. Su estudio se centró en características como el juego radial, la precarga, la posición del pivote y las dimensiones de las zapatas. Concluyeron que para predecir con precisión las características estáticas de un descanso es necesario considerar las tolerancias de fabricación.

Los estudios mencionados anteriormente emplearon principalmente el análisis de sensibilidad local, en el cual se varía un parámetro a la vez mientras los demás permanecen fijos en sus valores nominales, i.e. *ceteris paribus*. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones notables: no logra explorar todo el espacio de

análisis de sensibilidad global, los cuales abordan estas limitaciones al proporcionar una comprensión más completa de la influencia de varios parámetros en el rendimiento de los descansos [1]. Este cambio permite un enfoque más preciso e integral para analizar y optimizar los sistemas rotatorios.

1.1. Descanso hidrodinámico de pivote fluido activo

Este trabajo aporta en el adecuado entendimiento funcional de una nueva propuesta de descanso hidrodinámico denominado "Descanso de pivote fluido mecatrónico" o "Active FPJB". El diseño presenta un descanso equipado con zapatas basculantes sostenidas por pivotes esféricos a través de una película de fluido lubricante [4]. La película de fluido entre la zapata y el pivote es inyectada por el propio pivote, que actúa como inyector, incorporando un orificio central conectado a una servoválvula que suministra aceite a alta presión. La versión inicial del modelo tridimensional del descanso fue desarrollada originalmente por Dalidet [5]; el modelo tridimensional se ilustra en la Figura 1. Posteriormente, Sandoval [6] y Castro [7] contribuyeron con mejoras al diseño derivadas de un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del sistema descanso. La mejora continua del concepto de diseño del descanso está influenciada por los conocimientos obtenidos de tales estudios.

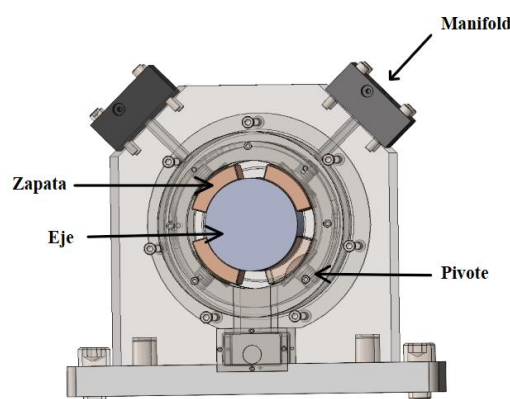


Figura 1. Modelo tridimensional del descanso de pivote fluido activo. Fuente: elaboración propia.

parámetros, pasa por alto la complejidad del modelo (a menudo basándose en suposiciones como la linealidad y la aditividad) y no puede expresar adecuadamente las interacciones entre los parámetros. En consecuencia, la investigación reciente se ha inclinado hacia métodos de

1.2. Modelo elemental del descanso

En la actualidad, se dispone de un modelo matemático denominado Current elemental model (CEM) [8] que puede determinar la posición de equilibrio de los elementos internos del sistema FPJB Activo,

específicamente del eje y de la zapata, bajo ciertas condiciones operacionales de carga, velocidad de rotación e inyección de aceite a alta presión. Este equilibrio se deriva de las distribuciones de presión que determinan el balance de fuerzas.

El modelo se basa en relaciones geométricas, así como en el equilibrio de fuerzas y momentos entre tres cuerpos rígidos: el eje, la zapata y el pivote. La Figura 2 ilustra la configuración del sistema FPJB Activo de una zapata. La zapata puede desplazarse de manera traslacional en las direcciones radiales y tangenciales, además de rotar respecto a su centro de masa. En cuanto al eje, solo se permite su movimiento vertical. Asimismo, este modelo considera la lubricación hidrodinámica e hidrostática, separando el estudio en

cambios en sus parámetros de entrada. El GSA se emplea para múltiples propósitos, incluyendo la asignación de incertidumbre en los resultados a diferentes fuentes de incertidumbre dentro del modelo tales como parámetros desconocidos y errores en los datos de entrada. Este proceso es crucial para priorizar los esfuerzos en la reducción de la incertidumbre, mejorando así la fiabilidad del modelo. Además, el GSA puede usarse para evaluar el impacto relativo de varios parámetros del modelo en la precisión, ayudando en los procesos de calibración, verificación y simplificación del modelo. Al elucidar los factores principales de un sistema o modelo, el GSA apoya la toma de decisiones informadas basadas en los resultados del modelo, asegurando predicciones más precisas y robustas [10].

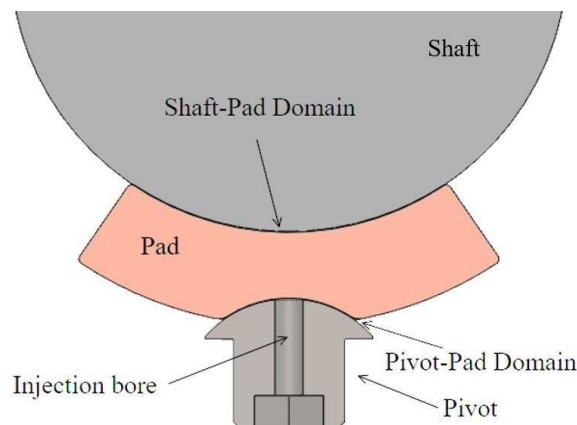


Figura 2. Configuración del sistema FPJB Activo de una zapata. Fuente: elaboración propia.

dos dominios de lubricación. La ecuación de Reynolds, con los supuestos mencionados en [9], rige el comportamiento hidrodinámico del dominio superior, denominado eje-zapata. Por otro lado, el dominio pivote-zapata, en la parte inferior, está definido por la ecuación de "Skew Reynolds" como se especifica en [5], explicando el comportamiento hidrostático de esta sección del descanso. Las ecuaciones mencionadas se discretizaron utilizando el método de los elementos finitos y se resolvieron de forma iterativa mediante el método de Newton-Raphson.

Como se mencionó previamente, este modelo puede determinar características relevantes para el diseño del descanso, tales como las distribuciones de presión que se desarrollan en los dominios de lubricación, así como los espesores de la película de aceite entre los cuerpos sólidos de interés.

1.3. Análisis de sensibilidad global

El Análisis de sensibilidad global (GSA, por su sigla en inglés) abarca una serie de técnicas matemáticas diseñadas para investigar cómo las variaciones en la salida de un modelo numérico pueden atribuirse a

Existen diferentes métodos para llevar a cabo un GSA [11], como la prueba de Efectos Elementales (EET, o Método de Morris), el Análisis de Sensibilidad Regional (RSA), el Análisis de Sensibilidad Basado en la Varianza (VBSA, o método de Sobol), la prueba de Sensibilidad de Amplitud de Fourier (FAST), el Análisis de Identificabilidad Dinámica (Dynia) y el método de sensibilidad basado en densidad (PAWN).

Es importante destacar que todos los enfoques de GSA pueden describirse a través de los siguientes pasos.

1. Muestreo de las entradas dentro de su espacio de variabilidad.
2. Evaluación del modelo contra las combinaciones de entradas muestreadas.
3. Post-procesamiento de las muestras de entrada/salida para calcular los índices de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad global según la varianza, específicamente el método FAST es elegido para evaluar el modelo CEM. Este método se basa en la distribución de la varianza de salida a cada parámetro de entrada. Además, es uno de los algoritmos más efectivos en el campo del análisis de sensibilidad. Este

método ha sido desarrollado y publicado por varios investigadores [12-14]. Al emplear FAST, es posible estimar la contribución individual de cada parámetro de entrada a la varianza de salida, con el objetivo de determinar su efecto principal. Además, permite clasificar los parámetros geométricos que necesitan ser mejor mecanizados, en términos de sus tolerancias de fabricación, para reducir la varianza o incertidumbre de las variables de salidas del modelo descriptivo del comportamiento, el modelo CEM.

En [1], se utilizó el método FAST para estudiar las características estáticas de un TPJB en relación con las tolerancias de fabricación, donde se analizaron y evaluaron los índices de sensibilidad de primer orden de la capacidad de carga, la pérdida de potencia y el flujo de entrada para cinco parámetros de procesamiento distribuidos normalmente. El autor demostró que el método FAST era adecuado para el modelo de descanso. Parte de su metodología se aplicó en este estudio, específicamente el muestreo de los parámetros estudiados.

2. Metodología

En este trabajo, se aplica un análisis de sensibilidad global al cálculo de las características estáticas de un descanso de pivote de fluido activo, utilizando el modelo CEM disponible para analizar su rendimiento. El objetivo es identificar las dimensiones más relevantes durante el proceso de mecanizado de los elementos internos del descanso, como el eje, la zapata

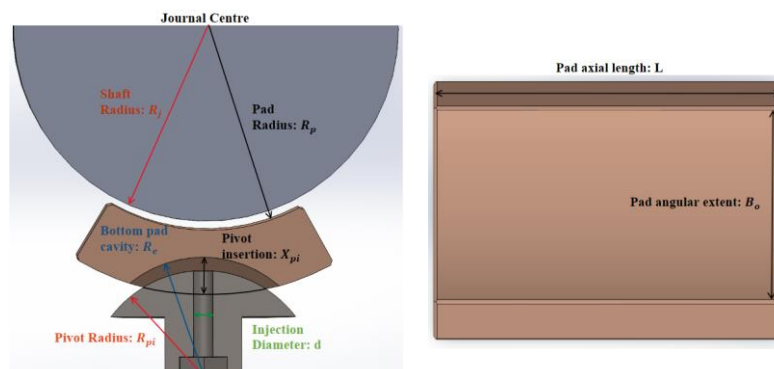
Las condiciones operacionales del FPJB activo están definidas por tres variables: la carga aplicada [N], la velocidad de rotación del eje [rpm] y la tasa de flujo de inyección de aceite [l/min]. Para investigar la influencia de los parámetros en las variables de interés, se estudiaron las siguientes condiciones operativas del descanso, considerando la variación de un parámetro operacional mientras se mantenían constantes los otros dos. Se estudiaron 30 condiciones operacionales, las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones operacionales.

Condición operacional	Carga [N]	Velocidad [rpm]	Inyección [l/min]
[1 – 10]	2500 -500-* 7000	3000	3
[11 – 20]	3000	3000 -1000-* 12000	3
[21 – 30]	3000	3000	1.2 -0.2-* 3

(*El número entre guión, representa el incremento del intervalo)

Para este estudio, se seleccionaron los siguientes parámetros geométricos de interés: el radio interno de la zapata, el radio del eje, el radio del pivote, la extensión angular de la zapata, el diámetro de inyección, la cavidad inferior de la zapata, la inserción de la zapata y la longitud de la zapata (Ver Figura 3). Las tolerancias asociadas se seleccionaron en base a las



a) Vista de sección del eje, zapata y pivote b) Vista superior de la zapata

Figura 3. Parámetros geométricos en vista de sección a) y vista superior de la zapata b). Fuente: elaboración propia.

y el pivote. Además, este trabajo busca determinar qué dimensión influye más y en qué medida en el espesor mínimo de la película de aceite y las distribuciones de presión máxima en los dos dominios de lubricación existentes del descanso activo, es decir, hidrodinámico e hidrostático.

normas internacionales de tolerancia ISO 286 [15] e ISO 2768 [16]. Las variables de salida del estudio incluyen los espesores mínimos de la película de aceite y las presiones máximas en cada dominio del sistema, hidrostático e hidrodinámico.

Es importante destacar que, debido al diseño de este descanso, presenta dos espesores de película, uno para cada dominio de lubricación hidrostático e hidrodinámico (ver Figura 2), en comparación con los descansos convencionales de zapata basculante, que tienen un solo espesor de película entre el eje y la zapata. Esto subraya la importancia de estudiar la influencia de los parámetros geométricos, especialmente en la región pivote-zapata, ya que es el dominio con menos estudios al respecto.

Para evaluar el modelo con los ocho parámetros geométricos en estudio, que son independientes entre sí, se requiere proporcionar una muestra distribuida uniformemente. Esto se logra utilizando una ecuación conocida como curva de búsqueda. En este estudio, se empleó la curva de búsqueda mostrada en la Ecuación (1) donde cada parámetro obtiene su distribución uniforme según una frecuencia angular única obtenida de [10]. El mismo autor también especifica cómo muestrear basado en el número de parámetros en estudio según el criterio de Nyquist en la Ecuación (2), determinando el número total de muestras a simular en el programa del modelo isotermodinámico del FPJB. Para 8 parámetros en estudio, esto equivale a $N_s=1001$ muestras. Cada una de estas muestras debe evaluarse para cada condición operacional propuesta según la Tabla 1.

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin \omega_i s) \quad (1)$$

Donde:

x_i : Representa cada parámetro estudiado, donde

$i=1 \dots 8$.

ω_i : Frecuencia para cada parámetro estudiado.

s : Variable escalar dentro del rango $(-\infty, \infty)$.

$$N_s = 2N_{harm} \omega_{max} + 1 \quad (2)$$

Donde:

N_s : Número de muestras.

N_{harm} : Factor de interferencias, por ejemplo, el número de armónicos superiores a considerar, en este trabajo se consideró 4.

ω_{max} : Frecuencia angular máxima asociada al número de entradas.

Suponiendo una distribución normal para el proceso de fabricación, los valores de muestra dentro del rango de tolerancia especificado deben ser convertidos a una distribución normal utilizando la función de distribución acumulativa inversa. La media se

considera como el valor nominal del parámetro, y la desviación estándar corresponde a un tercio de la tolerancia superior, conocida como la regla de 3σ [1]. Los parámetros geométricos, sus valores medios nominales y las respectivas tolerancias se enumeran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros geométricos, su valor medio y tolerancia de manufactura.

Parámetro [unidad]	Valor medio	Desviación estándar
Radio del eje [mm]	49.89	3.67×10^{-3}
Radio de la zapata [mm]	50	3.67×10^{-3}
Largo de la zapata [mm]	100	50×10^{-3}
Extensión angular de la zapata [°]	60	0.11
Radio del pivote [mm]	30	3.17×10^{-3}
Diámetro de inyección [mm]	7	1.5×10^{-3}
Cavidad inferior de la zapata [mm]	30.1	3.17×10^{-3}
Inserción del pivote [mm]	10	33.3×10^{-3}

Después del proceso de muestreo, las muestras se ingresan en el programa del modelo numérico CEM para calcular el espesor mínimo de la película y la presión máxima del descanso en función de las condiciones operacionales propuestas en la Tabla 1. Una vez obtenidos los resultados, se utiliza el método FAST, implementado en MATLAB por [11], para determinar los índices de sensibilidad de primer orden. Esto permite extraer conclusiones sobre la influencia de los parámetros geométricos en los espesores mínimos de la película de aceite y las presiones máximas en ambos dominios de lubricación al variar las condiciones operacionales del sistema.

3. Resultados

Los índices de primer orden de los parámetros geométricos de la Tabla 2 respecto a condiciones de operación variables de la Tabla 1 se presentan en las Figuras 4 a 9. La presentación de resultados se organiza en gráficos de dos en dos para los espesores y presiones máximas de película de aceite en términos de la carga

(Figura 4 y 5), flujo de inyección (Figura 6 y 7) y velocidad rotacional (Figura 8 y 9), respectivamente.

Este gráfico revela que el parámetro de inserción del pivote tiene la mayor importancia en su contribución a

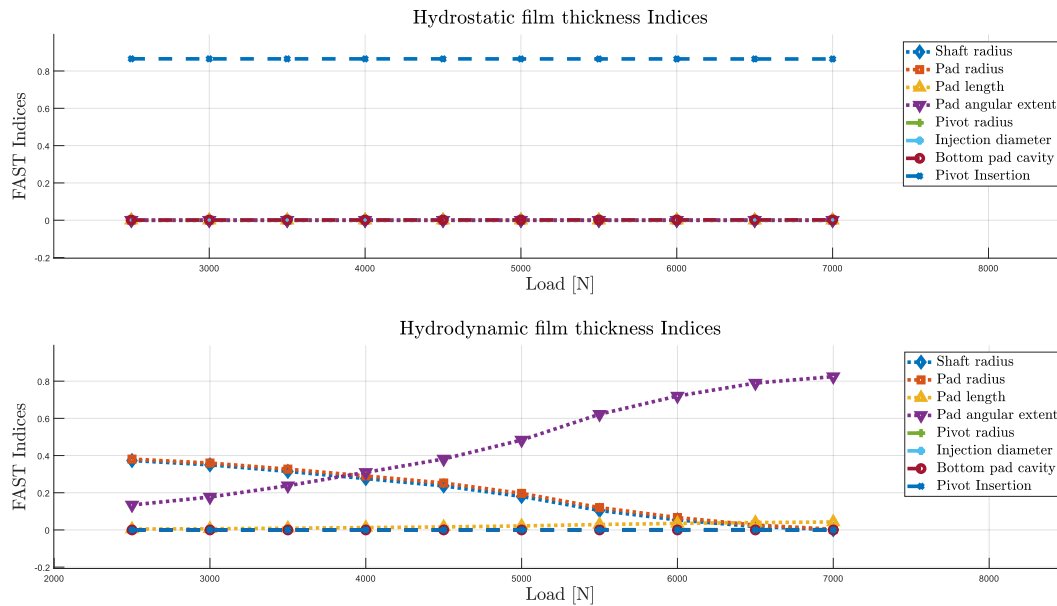


Figura 4. Índices FAST para los espesores mínimos de película para diferentes cargas.

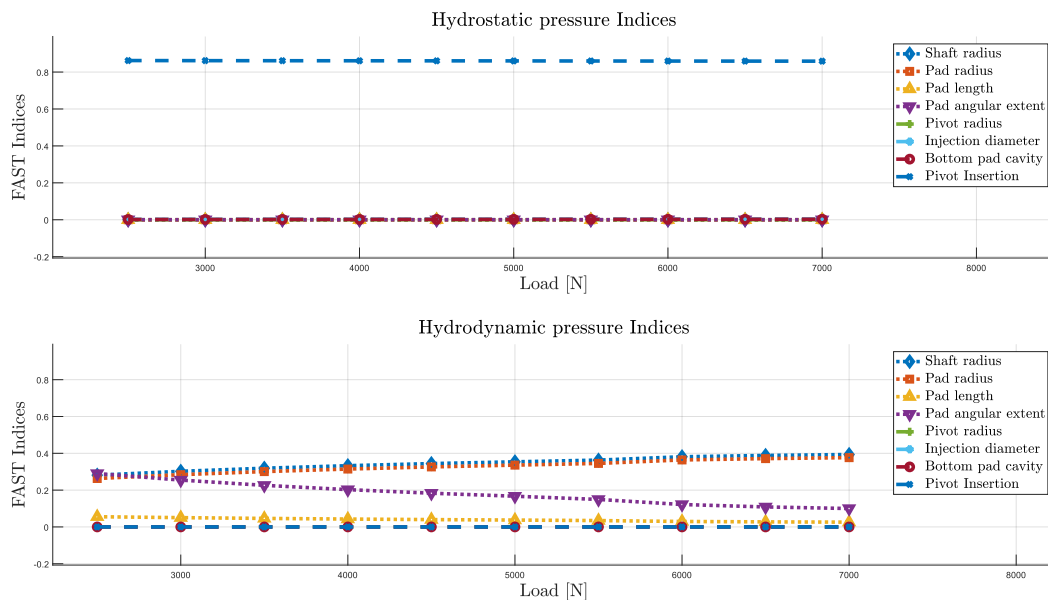


Figura 5. Índices FAST de las presiones máximas para diferentes cargas.

La Figura 4 muestra los índices de primer orden para los espesores mínimos de película de aceite hidrostático e hidrodinámico al variar la carga aplicada.

la variabilidad del espesor hidrostático para todas las condiciones de operación estudiadas. Respecto del espesor hidrodinámico, a cargas bajo 4000 [N], el radio

de la zapata y el radio del eje son los parámetros predominantes, mientras que la extensión angular de la zapata aumenta su impacto en el espesor al evaluar cargas más superiores a 4000 [N].

En la Figura 5 se presentan los índices de primer orden para las presiones máximas hidrostáticas e hidrodinámicas al variar la carga aplicada. Se observa

que el parámetro de inserción del pivote juega un papel crucial en la influencia de la variabilidad de la presión hidrostática máxima para todo el rango operacional estudiado. En el caso de la presión hidrodinámica máxima, particularmente bajo cargas inferiores a 3000 [N], el radio de la zapata y el radio del eje se presentan como los factores predominantes. Sin embargo, a medida que aumenta la carga sobre los 3000 [N], la

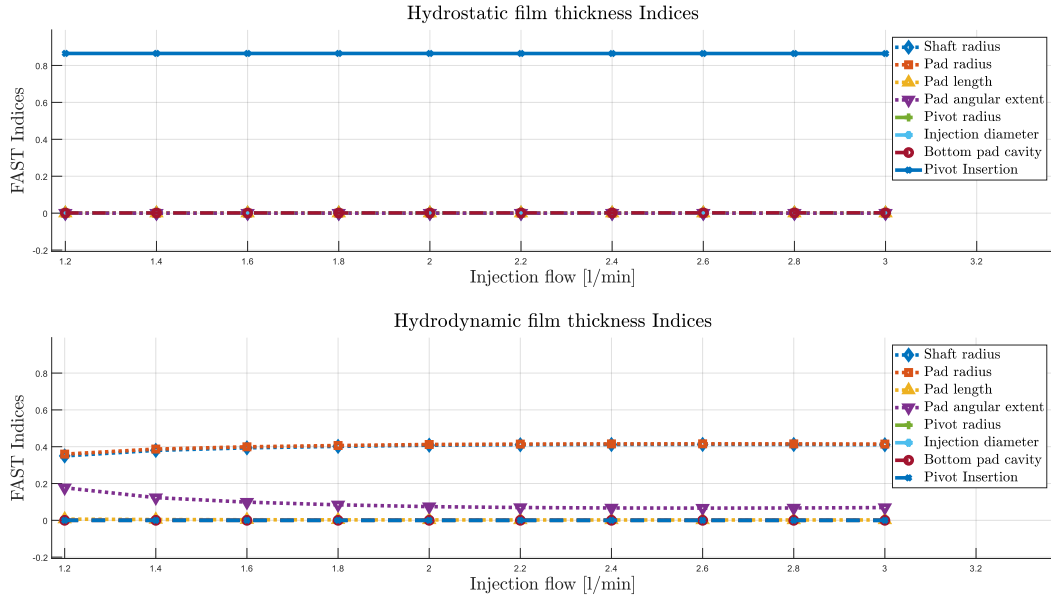


Figura 6. Índices FAST para los espesores mínimos de película para diferentes flujos de inyección.

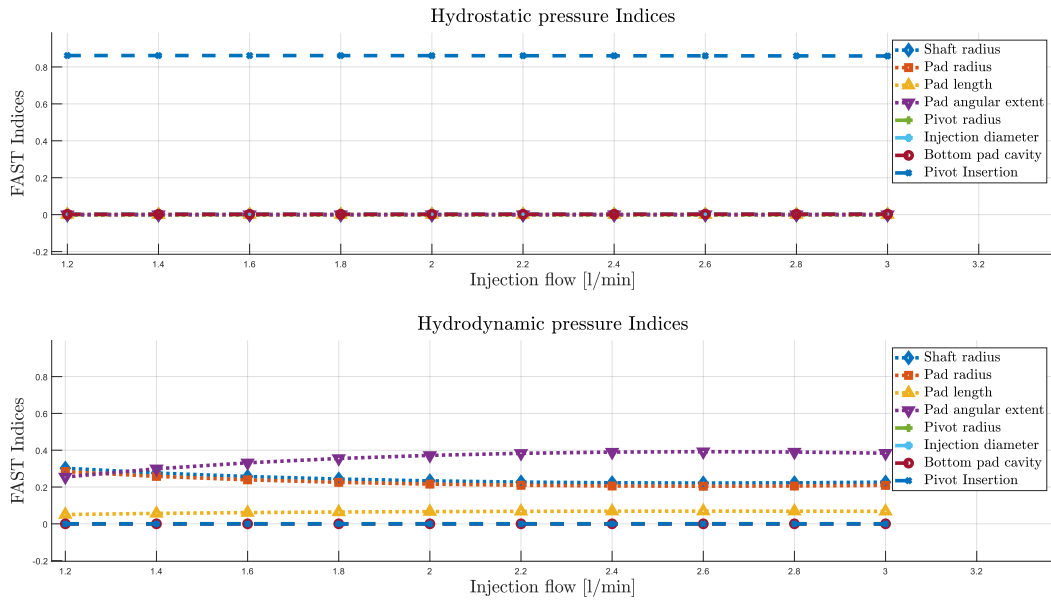


Figura 7. Índices FAST de las presiones máximas para diferentes flujos de inyección.

extensión angular de la zapata disminuye su impacto en la presión hidrodinámica.

La Figura 6 muestra los índices de primer orden para los espesores mínimos de película de aceite hidrostático e hidrodinámico al variar la inyección de aceite. Se observa que el parámetro de inserción del pivote influye significativamente en la variabilidad del espesor hidrostático mínimo para todas las condiciones de operación estudiadas. En cuanto al espesor hidrodinámico mínimo, el radio de la zapata y el radio

extensión angular de la zapata en la presión hidrodinámica máxima se vuelve más pronunciada.

La Figura 8 muestra los índices de primer orden para los espesores mínimos de película de aceite hidrostático e hidrodinámico al variar velocidad rotacional del eje. Se muestra que el parámetro de inserción del pivote tiene un impacto sustancial en la variabilidad del espesor mínimo de la película hidrostática, siendo constante para todas las velocidades de rotación. En términos del espesor

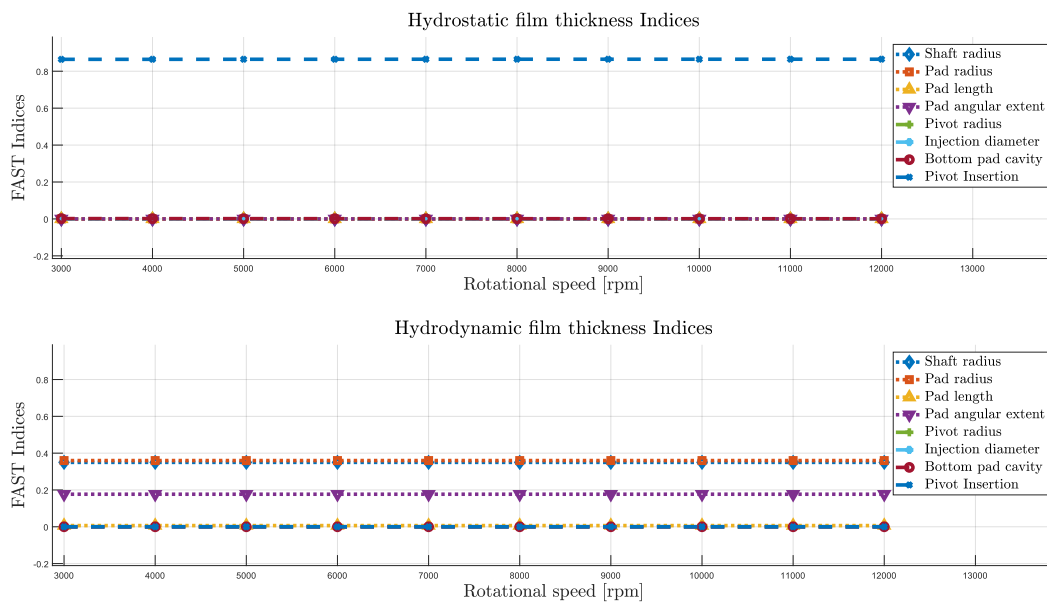


Figura 8. Índices FAST para los espesores mínimos de película para diferentes velocidades rotacionales.

del eje se destacan como los parámetros principales. Además, a medida que los flujos de inyección aumentan, el impacto de la extensión angular de la zapata en el espesor disminuye.

En la Figura 7 se presentan los índices de primer orden para las presiones máximas hidrostáticas e hidrodinámicas al variar la inyección de aceite. Se observa que la variación del parámetro de inserción del pivote tiene el impacto más significativo en la

variabilidad de la presión hidrostática máxima, ya que su índice de primer orden es el más alto para las condiciones operativas estudiadas. En términos de la presión hidrodinámica máxima, particularmente bajo flujos de inyección menores a 1.4 [l/min], el radio de la zapata, el radio del eje y la extensión angular de la zapata emergen como los parámetros principales. Sin embargo, a medida que aumentan los flujos de inyección sobre 1.4 [l/min], la influencia de la

hidrodinámico mínimo, el radio de la zapata, el radio del eje y la extensión angular de la zapata son los parámetros principales; este comportamiento es constante para todas las velocidades de rotación evaluadas.

En la Figura 9 se presentan los índices de primer orden para las presiones máximas hidrostáticas e hidrodinámicas al variar la velocidad rotacional del eje. Se muestra que el parámetro de inserción del pivote tiene un impacto sustancial en la variabilidad de la presión hidrostática máxima en cada velocidad de rotación evaluada. En términos de la presión hidrodinámica máxima, particularmente bajo flujos de inyección bajos, el radio de la zapata, el radio del eje y la extensión angular de la zapata emergen como los parámetros principales. En este caso, la longitud de la

zapata muestra un leve impacto en la variabilidad de la presión hidrodinámica.

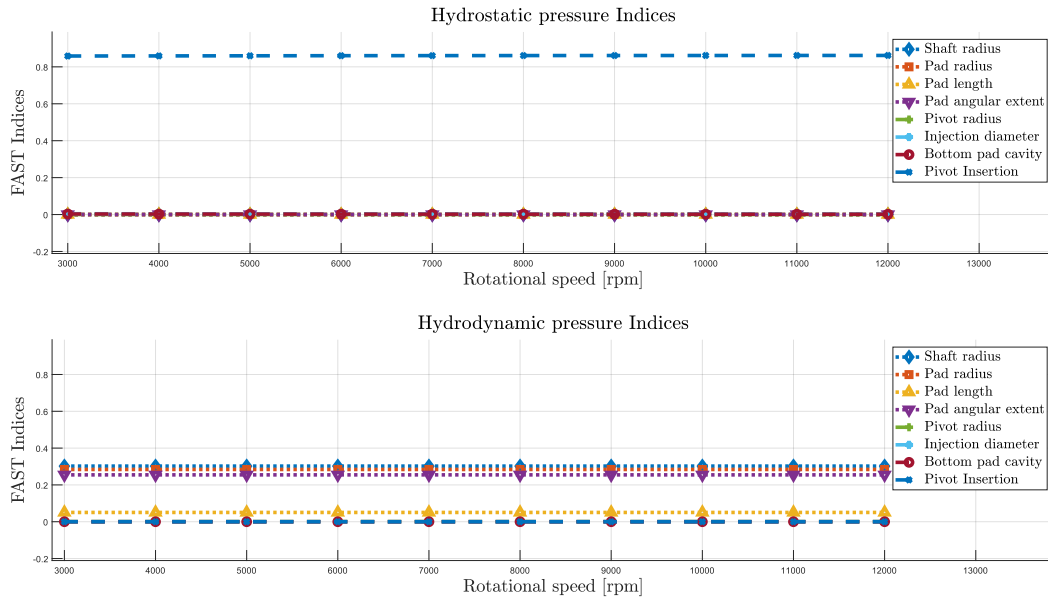


Figura 9. Índices FAST de las presiones máximas para diferentes velocidades rotacionales.

4. Conclusiones

El método FAST se empleó para investigar la influencia de ocho parámetros geométricos en las características estáticas de un descanso hidrodinámico.

De acuerdo a las simulaciones numéricas, los índices de primer orden obtenidos indican que la variación de estos parámetros dentro de las tolerancias de fabricación tiene un impacto significativo en el espesor mínimo de la película de aceite y las presiones máximas dentro del sistema Active FPJB. Específicamente, la variación de la inserción del pivote en la zapata representa alrededor del 86% de la variabilidad de la presión hidrostática máxima y el espesor mínimo de la película fluida en el dominio hidrostático para todas las condiciones operacionales estudiadas

Este trabajo es significativo para determinar el equilibrio entre la precisión del mecanizado en ciertos componentes y el costo total de fabricación considerando los resultados obtenidos al disponer de una evaluación cualitativa que identifica a aquellos que más influyen sus características operativas. Además, sienta las bases para realizar un análisis de sensibilidad sobre las características dinámicas del sistema FPJB activo.

5. Agradecimientos

A la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, proyecto FONDECYT 11190844 y a la Universidad de La Frontera, proyecto DI19-0029.

6. Referencias

- [1] M. Lou, "Global sensitivity analysis of static characteristics of tilting-pad journal bearing to manufacturing tolerances", *Tribology International*, 149, p. 105734, 2020.
- [2] K. Iwamoto, K. Tanaka, "Influence of manufacturing error of roundness for characteristics of cylindrical journal bearing", *Life Cycle Tribology*, pp. 751–754, 2005.
- [3] M. Fillon, W. Dmochowski, A. Dadouche, "Numerical Study of the sensitivity of tilting pad journal bearing performance characteristics to manufacturing tolerances: Steady-state analysis", *Tribology Transactions*, 50(3), pp. 387–400, 2007.
- [4] J. González, M. Reumay. "Mechatronic Design of a New Fluid Pivot Journal Bearing", 2023.
- [5] F. Dalidet, "Diseño de un descanso de zapata basculante por medio de un software de diseño asistido por computador 3D", Informe de Proyecto de Título, Universidad de La Frontera, 2019.

[6] S. Sandoval, “Modelación CFD de un descanso hidrodinámico activo”, Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de La Frontera, 2021.

[7] R. Castro, “Simulación FSI de un descanso hidrodinámico”, Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de La Frontera, 2023.

[8] V. Mercado, “Hacia la incorporación de la flexibilidad de la zapata en el modelo del descanso de pivote fluido activo”, Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de La Frontera, 2023.

[9] B.J. Hamrock, S.R. Schmid, B.O. Jacobson, “Fundamentals of Fluid Film Lubrication”, 2nd ed., CRC Press, 2004.

[10] A. Saltelli, S. Tarantola, KPS. Chan “A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]”. *Technometrics*; 41(1):39–56, 1999.

[11] F. Pianosi, F. Sarrazin, and T. Wagener, “A MATLAB toolbox for global sensitivity analysis”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 70, pp. 80–85, Aug. 2015.

[12] J.L. Christen, “Global sensitivity analysis of analytical vibroacoustic transmission models”, *Journal of Sound and Vibration*, 368, pp. 121–134, 2016.

[13] W. Chai, “Sensitivity analysis of a sound absorption model with correlated inputs”, *Journal of Sound and Vibration*, 394, pp. 75–89, 2017.

[14] M. Ouisse, “On the sensitivity analysis of porous material models”, *Journal of Sound and Vibration*, 331(24), pp. 5292–5308, 2012.

[15] International Organization for Standardization, “ISO 286:2010 Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes”, ISO 286:2010, 2010.

[16] International Organization for Standardization, “ISO 2768-1:1989 General tolerances - Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications”, ISO 2768-1:1989, 1989.