

Lo que un Ingeniero debe saber sobre Rotodinámica

J. H. Ruiz-Rodríguez, B. F. Morales-Hernández

Sielecom SAS

Carrera 36 # 54-120 Cabecera

E-mail: jruiz@sielecom.com, bmorales@sielecom.com

Bucaramanga, Santander – Colombia

Resumen

La rotodinámica, una rama clave de la ingeniería mecánica, estudia el comportamiento dinámico de sistemas rotativos como turbinas, compresores y motores, esenciales en diversas industrias. Este trabajo aborda sus fundamentos para fortalecer competencias profesionales en diseño y mantenimiento. Se describe la interacción entre el rotor y el cojinete, y el uso de simulaciones numéricas como los Métodos de Elementos Finitos-FEA y Volúmenes Finitos-FVM, para analizar la respuesta dinámica del rotor. También se describen algunas metodologías experimentales como los análisis modales, de órbitas y de estabilidad, además se describen los efectos del desbalance, desalineación, oil whip, oil whirl y el uso de técnicas de validación de modelos numéricos como el Criterio de Confianza Modal MAC. Dada la complejidad de la turbo maquinaria y sus costos asociados, un conocimiento profundo en rotodinámica es crucial para asegurar la eficiencia, seguridad y productividad en procesos industriales.

Introducción

La rotodinámica es una rama crucial de la ingeniería mecánica que se enfoca en el comportamiento dinámico de sistemas rotativos, presentes en una amplia gama de aplicaciones industriales, como turbinas, bombas y compresores. Comprender los principios de la rotodinámica es esencial para los ingenieros que buscan optimizar el diseño, la operación y el mantenimiento de estos sistemas, garantizando así su eficiencia y seguridad.

El estudio de la rotodinámica abarca diversos aspectos, desde el análisis de las frecuencias naturales y las formas modales[1], hasta la identificación de fenómenos como el desbalanceo y la desalineación. El uso de herramientas numéricas, como el Método de Elementos Finitos y los métodos de volúmenes finitos, permiten modelar de manera precisa el comportamiento dinámico de los rotores y sus componentes[2]. Además, la adquisición de datos experimentales es fundamental para evaluar el estado de los sistemas

rotativos y diagnosticar posibles fallas. Sensores especializados permiten medir vibraciones, temperatura y otros parámetros críticos, lo que facilita un análisis exhaustivo de las condiciones operativas.

Este artículo tiene como objetivo proporcionar una visión integral de los conocimientos y habilidades necesarios para incursionar en el mundo rotodinámico. A lo largo del texto, se abordarán las principales herramientas y métodos de análisis, así como la importancia de la validación de modelos y la interpretación de datos experimentales. Esto proporciona a los ingenieros de mantenimiento las competencias necesarias para enfrentar los desafíos de la dinámica de los sistemas rotativos en el entorno industrial actual.

Componentes de un sistema rotodinámico

Un sistema rotodinámico está compuesto generalmente por un eje, un disco y cojinetes de soporte, representando una parte fundamental de diversos equipos mecánicos, como turbinas,

bombas, compresores y motores. Un modelo simplificado de un sistema rotodinámico se muestra en la Fig 1.

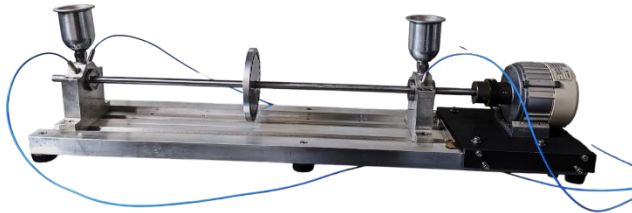


Fig 1. Rotorkit basado en el rotor de Jeffcott

Eje: Es el componente principal encargado de la transmisión de potencia en el sistema rotodinámico. Las características dimensionales de este elemento son cruciales para su comportamiento dinámico, especialmente cuando se trata de un rotor flexible. Por lo tanto, el movimiento del eje se convierte en el principal objeto de estudio de la rotodinámica.

Cojinete: Los cojinetes son responsables de soportar el eje, garantizando su rotación libre. Según sus características, pueden clasificarse en rodamientos, cojinetes hidrostáticos, cojinetes magnéticos activos, cojinetes aerodinámicos, bujes y cojinetes hidrodinámicos. Dependiendo de su clasificación, generan diferentes efectos dinámicos sobre el eje, influenciados por las características de rigidez y amortiguamiento propias de cada tipo de cojinete. En el caso de los cojinetes hidrodinámicos, estas características generan un comportamiento no lineal en la respuesta dinámica del rotor[3].

Disco: Se pueden definir como una masa adicional al eje, como es el caso de los rodets con aspas o álabes en ventiladores, bombas y turbinas. Estos elementos generan efectos dinámicos sobre el eje, tales como el efecto giroscópico y el desbalanceo.

Simulación

Uno de los aspectos representativos en la rotodinámica es el análisis numérico. Mediante la

simulación numérica se busca obtener un modelo que represente de forma aproximada los fenómenos físicos asociados a la dinámica de los rotores, como las fuerzas de desbalanceo o los efectos giroscópicos.

El modelamiento numérico se enfoca principalmente en el eje rotativo, mediante la aplicación de métodos numéricos como el Método de Elementos Finitos MEF[4] y el uso de elementos lineales de viga para facilitar su cómputo. Los cojinetes, de acuerdo con su tipo y complejidad, se modelan numéricamente mediante diferencias finitas o volúmenes finitos con el fin de determinar sus aportes de rigidez y/o amortiguamiento sobre el eje. Los discos se adicionan al modelo numérico del rotor como masas puntuales[5] o se modelan numéricamente por el MEF para ser ensamblados en el modelo global del rotor.

En la actualidad existen diversos softwares de simulación que facilitan este proceso, sin embargo, el modelamiento de los sistemas rotodinámicos que buscan estudiar el comportamiento en entornos controlados, se realiza en lenguajes de programación versátiles como Python o en entornos de programación con enfoque matemático como Matlab. De este modo se tiene un mayor control de las variables que se desean estudiar.

Adquisición de datos experimentales

La adquisición de datos experimentales en turbo maquinaria es fundamental para garantizar su funcionamiento seguro, eficiente y confiable. A través de sensores especializados y colectores de datos, se obtienen mediciones precisas de parámetros clave como vibraciones, temperatura, presión y velocidad de rotación. Estos datos, representados en unidades adecuadas, permiten el análisis detallado mediante métodos como el espectro, la forma de onda y las órbitas, esenciales para diagnosticar fallas y evaluar condiciones

dinámicas. Pruebas como el run-up y coast-down proporcionan información sobre el comportamiento dinámico del rotor durante aceleraciones y desaceleraciones. Este enfoque integral es vital para el monitoreo predictivo y la optimización del mantenimiento.

Los acelerómetros son los sensores más utilizados en la adquisición de señales de vibración por su alta precisión y versatilidad. La Fig 2 muestra un ejemplo de un acelerómetro uniaxial de propósito general para uso industrial. Los velocímetros o sensores de piezovelocidad, son una alternativa de medición habitualmente usada en maquinaria de baja velocidad y en el diagnóstico de errores comunes en maquinaria rotativa. Finalmente, los proximitores o sondas de proximidad, miden la distancia relativa entre el rotor y el cojinete. Los proximitores son los sensores más utilizados en el monitoreo de grandes rotores como turbinas, bombas y compresores.



Fig 2. Acelerómetro piezoeléctrico Sielecom Vibration HS-150

La colección de datos se realiza mediante unidades de procesamiento que deben cumplir con especificaciones técnicas que permitan capturar los rangos de frecuencias relacionadas con el desbalance, la desalineación y altas frecuencias asociadas a fallas en rodamientos o resonancias. Además, se deben tener en cuenta la capacidad de procesamiento, memoria interna de almacenamiento, conectividad, portabilidad y robustez, así como el software de análisis con programas de análisis rotodinámico avanzado. Lo anterior asegura que el colector pueda cumplir con

las exigencias de monitoreo y diagnóstico de equipos rotodinámicos en condiciones reales de operación. En la Fig 3, se muestra un colector de vibraciones multicanal usado en el monitoreo y diagnóstico de activos de alta criticidad.



Fig 3. Analizador de vibraciones multicanal OROS OR35

En el análisis de máquinas rotativas, se emplean diversas unidades de medida que permiten caracterizar diferentes fenómenos físicos y evaluar el estado de los equipos. A continuación, se describen las principales unidades de medida, junto con sus usos más comunes. Entre ellas se encuentra la aceleración, la velocidad y desplazamiento permitiendo detectar defectos en rodamientos, engranajes, problemas de desbalance, desalineación y desplazamientos relativos en ejes y cojinetes. También son importantes la frecuencia y la fase, las cuales facilitan la identificación de frecuencias características de fallo, el análisis espectral y la correlación entre señales.

La temperatura, una variable determinante en un sinnúmero de procesos, no es la excepción en los equipos rotodinámicos, puesto que permite el monitoreo de las condiciones térmicas en cojinetes, sellos y demás componentes constitutivos. Estas son algunas de las unidades más relevantes para llevar a cabo un análisis integral del comportamiento de las máquinas, asegurando un monitoreo y diagnóstico preciso de su estado operativo.

En el contexto de análisis de maquinaria rotativa, el run-up y coast-down, generalmente representados mediante un diagrama de Bode, son técnicas de monitoreo de vibraciones utilizadas para evaluar la dinámica de una máquina durante el arranque, proceso en el cual la máquina acelera desde el reposo hasta alcanzar su velocidad máxima de operación (run-up), y el apagado, proceso inverso, donde la máquina desacelera desde su velocidad máxima hasta el reposo, usualmente por inercia (coast-down). Este análisis es fundamental para identificar resonancias, inestabilidades y otros fenómenos dinámicos que puedan afectar el rendimiento o la vida útil del equipo. El diagrama de Bode típico usado en este contexto consta de dos gráficas principales; la amplitud de vibración vs. velocidad de rotación y la fase vs. velocidad de rotación. Picos de amplitud de vibración o cambios abrupto de la fase cerca de estas frecuencias o velocidades indican que la máquina está operando cerca de una frecuencia natural o en las vecindades de una resonancia.

El análisis espectral es un recurso imprescindible para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de las turbomáquinas, permitiendo un mantenimiento eficiente y una operación confiable. El espectro es una herramienta fundamental para el análisis y diagnóstico de turbo maquinaria, debido a que permite identificar frecuencias características y ayuda a detectar problemas específicos asociados con componentes como rodamientos, engranajes, álabes, ejes y cojinetes. Además, contribuye al monitoreo del estado de la máquina facilitando el seguimiento de la condición operativa a través del tiempo y permitiendo detectar fallas antes de que se conviertan en problemas graves.

La forma de onda y el espectro están estrechamente relacionados. Mientras que la forma de onda ofrece información temporal detallada, el espectro facilita la identificación de frecuencias específicas. Juntos proporcionan una visión integral del comportamiento de la turbo

maquinaria, permitiendo diagnósticos precisos y eficaces.

En el contexto de la turbomaquinaria, la forma de onda cumple varias funciones clave en el análisis del comportamiento dinámico, puesto que permite observar cómo las señales cambian con el tiempo, ayudando a identificar eventos transitorios, choques mecánicos o irregularidades en el funcionamiento. Además, ofrece una base para detectar fallas como impactos, holguras, golpes, cavitación, desbalanceo dinámico o colisiones entre componentes. El espectro y la forma de onda en el tiempo son complementarias para un diagnóstico completo, y en la identificación de señales no periódicas es útil para reconocer fenómenos que no tienen un patrón regular y que podrían no ser evidentes en el análisis espectral.

Las órbitas se complementan con el análisis espectral y la forma de onda para proporcionar una comprensión completa del comportamiento dinámico de la turbomaquinaria. Su análisis adecuado es fundamental para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los equipos rotativos. Las órbitas son trayectorias bidimensionales que describen el movimiento del eje de un rotor en el plano transversal al eje de rotación. Estas se obtienen combinando señales de desplazamiento medidas en dos direcciones perpendiculares (generalmente X y Y) utilizando sensores de proximidad o desplazamiento instalados en cojinetes o cerca del eje.

En la turbomaquinaria, las órbitas desempeñan un papel esencial en el diagnóstico y monitoreo del comportamiento dinámico del rotor, diagnóstico de fallos como problemas de desbalance, desalineación, holguras mecánicas, resonancia, inestabilidad del rotor y fallas en cojinetes o sellos. La detección de fenómenos complejos como "whirl" (precesión) o "whip" (inestabilidad del rotor debido a fuerzas fluidodinámicas) y la evaluación de condiciones operativas sobre cómo el rotor interactúa con su entorno mecánico,

incluyendo la distribución de cargas y la respuesta ante variaciones en la velocidad o condiciones de operación.

Análisis de datos

Para garantizar que la información obtenida de los modelos numéricos sea una representación precisa de la dinámica del rotor, es fundamental validar el modelo numérico mediante la comparación y correlación entre los modos numéricos y los modos obtenidos a partir de un Análisis Modal Experimental. En este contexto, una de las técnicas más utilizadas es el Criterio de Confianza Modal (MAC)[6]. Un ejemplo de visualización del MAC se muestra en la Fig 4.

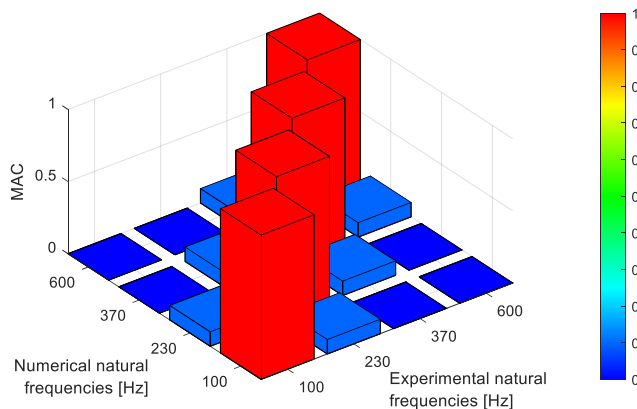


Fig 4. Ejemplo de aplicación del Criterio de Confianza Modal MAC

Desde la perspectiva de la rotodinámica, han surgido otros métodos basados en el MAC que se consideran alternativas más adecuadas para minimizar los errores asociados a este criterio en el análisis de rotores. Una de estas alternativas es el Criterio de Confianza Modal para Rotores (RMAC)[7], que tiene en cuenta las matrices de rigidez y masa en rotores no amortiguados. De acuerdo con los resultados de la técnica de correlación y correspondencia modal, el modelo numérico se valida o ajusta para asegurar una representación adecuada de la dinámica del rotor.

Un modelo validado permite un análisis más exhaustivo de la dinámica del rotor, utilizando diagramas como el de Campbell y el de estabilidad. El primero permite estudiar las frecuencias naturales amortiguadas de los modos del sistema rotodinámico en relación con las fuerzas de excitación asociadas a la velocidad de giro del rotor. Un ejemplo de un diagrama de Campbell de un rotor flexible se muestra en la Fig 5.

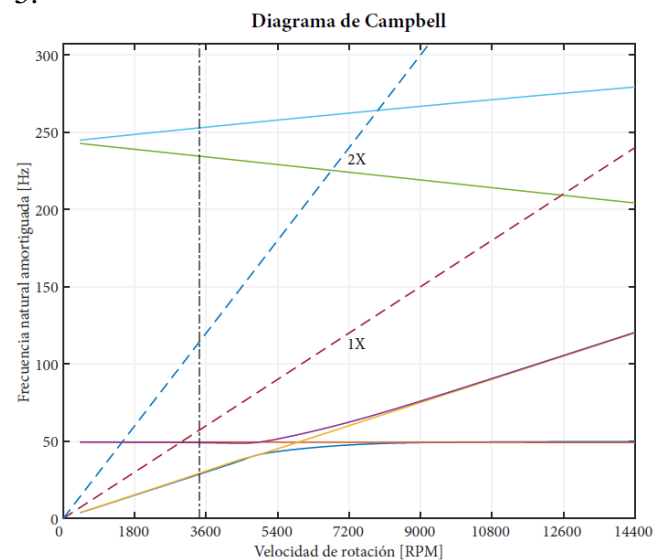


Fig 5. Diagrama de Campbell de un rotor flexible soportado en cojinetes hidrodinámicos[8]

El segundo diagrama analiza la estabilidad del rotor, considerando el crecimiento o decrecimiento de la relación de amortiguamiento de sus modos. Un ejemplo de un diagrama de estabilidad de un rotor flexible se muestra en la Fig 6. En este diagrama, los modos que superan un valor de 0 se consideran inestables. La inestabilidad en el rotor indica que la vibración del sistema, a una determinada velocidad de giro o en un rango de velocidades, se incrementa, lo que puede causar daños a corto plazo en el sistema. Luego, tanto las zonas de inestabilidad como las velocidades críticas deben ser evitadas, o su paso a través de ellas debe ser controlado.

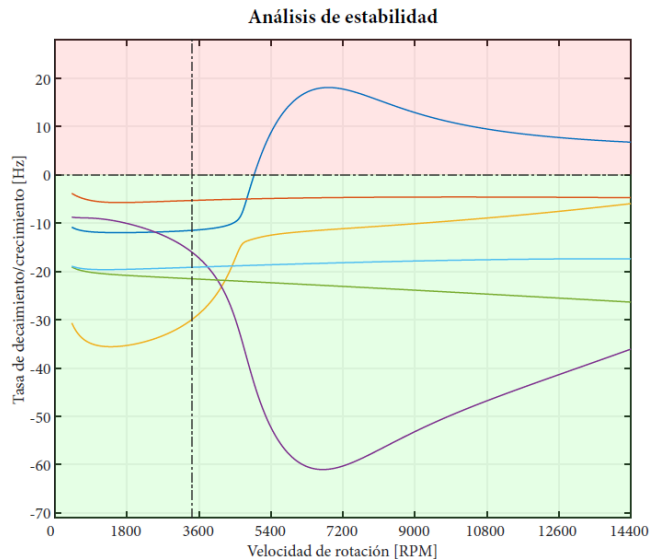


Fig 6. Diagrama de estabilidad de un rotor flexible soportado en cojinetes hidrodinámicos[8]

Los diagramas de Campbell y de estabilidad también son herramientas robustas en el análisis de las frecuencias autoexcitadas generadas por la película lubricante en los cojinetes hidrodinámicos, asociadas a fenómenos como el latigazo de aceite (oil whip) y el torbellino de aceite (oil whirl)[9], resultado de la interacción entre el fluido y el rotor.

Otro diagrama útil para analizar las velocidades críticas y el comportamiento de las vibraciones o desplazamientos laterales del rotor es la respuesta en frecuencia, tanto numérica como experimental (run-up y coast-down). Este análisis, junto con los estudios de Campbell y estabilidad, permite tomar decisiones tanto en el diseño como en la operación del sistema rotodinámico, especialmente en la selección de cojinetes o dispositivos de amortiguamiento.

Conclusiones

La rotodinámica es fundamental en la ingeniería mecánica al estudiar el comportamiento dinámico de sistemas rotativos esenciales para diversas

industrias, fortaleciendo competencias en diseño y mantenimiento de maquinaria crítica.

El uso de herramientas numéricas como los métodos FEA y FVM, junto con análisis experimentales como los modales y de estabilidad, permite un análisis integral de la respuesta dinámica de los rotores, mejorando la precisión en los modelos y su validación.

Un conocimiento profundo en rotodinámica es indispensable para abordar la complejidad de la turbomaquinaria, garantizando eficiencia, seguridad y productividad en los procesos industriales al minimizar los riesgos asociados al desbalance, desalineación, holguras y run out.

Bibliografía

- [1] J. W. Heo and J. Chung, "Vibration analysis of a flexible rotating disk with angular misalignment," *J Sound Vib*, vol. 274, no. 3–5, pp. 821–841, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0022-460X(03)00573-X.
- [2] H. Taplak and M. Parlak, "Evaluation of gas turbine rotor dynamic analysis using the finite element method," *Measurement*, vol. 45, no. 5, pp. 1089–1097, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.measurement.2012.01.032.
- [3] D. A. Lara Forero, et al., "Seminario de investigación en lubricación hidrodinámica en cojinetes", Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- [4] H. G. Sánchez-Acevedo, "Modelo analítico para el estudio de la torsión en rotores flexibles," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 9, no. 1, pp. 69–76, 2010.
- [5] R. Zaradnik, S. Raichman, and A. E. Mirasso, "Comparación de Diversas Matrices de Masas Concentradas con Similitud de Modos Propios," *Mecánica Computacional*, vol. 28, no. 10.

[6] Randall J. Allemang, “The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse,” *Sound and Vibration*, vol. 37, pp. 14–23, 2003, Accessed: Oct. 27, 2024.

[7] G. Mikota, “A model correlation criterion for rotors,” *J Sound Vib*, vol. 441, pp. 106–110, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.10.040.

[8] B. F. Morales-Hernández, “Metodología para el ajuste y validación del modelo numérico de un rotor de Jeffcott, mediante el uso de funciones de respuesta en frecuencia (FRF),” Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2023.

[9] A. Muszynska, “Stability of whirl and whip in rotor/bearing systems,” *J Sound Vib*, vol. 127, no. 1, pp. 49–64, Nov. 1988, doi: 10.1016/0022-460X(88)90349-5.

J. H. Ruiz-Rodríguez: Ingeniero Electrónico de la Universidad Antonio Nariño, Máster en Fiabilidad y Riesgo de la Universidad de La Gran Canaria. Analista de Vibraciones CAT III y Analista de Ultrasonidos CAT I de Mobius Institute, Analista Termógrafo CAT II de PTA, Instructor Internacional de Vibraciones CAT I, CAT II y CAT III, Termografía CAT I y Ultrasonidos CAT I de Mobius Institute y Sielecom SAS. Investigador en Sielecom SAS, especializado en vibraciones mecánicas, rotodinámica, Condition Monitoring, Análisis Modal y Desarrollo de Modelos Numéricos.

B. F. Morales-Hernández: Ingeniero Mecánico y Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Analista de Vibraciones CAT II de Mobius Institute. Investigador en Sielecom SAS, enfocado en vibraciones mecánicas, rotodinámica, algoritmos de optimización y materiales compuestos.