



DISEÑO DE UN ROTOR EXPERIMENTAL PARA REALIZAR EXPERIENCIAS DE DESBALANCE Y DESALINEACIÓN

Fernando Palmieri*¹, Darío Violante¹ y Andreas Klempnow²

*¹ Facultad Regional San Nicolás. Universidad Tecnológica Nacional
Colon 332 San Nicolás Buenos Aires Argentina
correo-e: fpalmieri@frsn.utn.edu.ar

² Facultad Regional Delta. Universidad Tecnológica Nacional
San Martín 1171 Campana Buenos Aires Argentina.

RESUMEN

La enseñanza de la ingeniería en la Argentina se encuentra ante nuevos desafíos producto del avance de la disciplina misma, de la transformación de los estudiantes y de las exigencias que imponen los procesos de acreditación de carreras.

Uno de los principales desafíos es desarrollar investigación de calidad que impulse la creación de nuevos conocimientos y el avance de la tecnología a nivel nacional. Otro desafío importante es incrementar el número de experiencias prácticas de laboratorio que los estudiantes realizan en el transcurso de su carrera para mejorar el proceso de enseñanza y la comprensión de los temas. Para lograr estos propósitos se debe contar con equipamiento de laboratorio apropiado.

En la Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional hace algunos años viene desarrollándose un grupo de investigación en el área de Vibraciones Mecánicas que específicamente se ha dedicado a estudiar fenómenos de dinámica de rotores.

En este trabajo se describe el diseño realizado de un rotor de pruebas pensado para dotar a este grupo de una herramienta para poder realizar experiencias de laboratorio vinculadas a su área de estudio y también para poder realizar experiencias con los estudiantes de las asignaturas mecánica Racional y Mantenimiento.

Para tal fin se ha realizado una extensa búsqueda bibliográfica acerca de los equipos existentes desarrollados con fines experimentales, se analizaron su utilidad, complejidad y funcionalidad. Se consideraron las necesidades de investigación relacionadas con estudiar en el corto plazo problemas de alineación y balanceo de rotores, y más a largo plazo, problemas en cojinetes.

Finalmente se logró diseñar un rotor de pruebas que permite realizar experiencias relacionadas con problemas de balanceo, alineación, rigidez de pedestales y lubricación, en un mismo equipo, permitiendo analizar una amplia variedad de problemas de dinámica de rotores en forma experimental con fines científicos y didácticos.

Palabras Claves: Rotor de pruebas, Dinámica de rotores, alineación, balanceo.



1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás viene trabajando desde hace bastante tiempo en mejorar los procesos de enseñanza incorporando actividades prácticas de laboratorio. Este compromiso viene asumido en el mismo diseño curricular [1] de la carrera Ingeniería Mecánica que propone formar ingenieros que puedan desempeñarse en la industria y puedan llevar a cabo actividades de desarrollo científico y tecnológico. Esto requiere una muy buena formación práctica, entonces el manejo de instrumentos y la capacidad de observación en condiciones experimentales son habilidades que los estudiantes deben desarrollar.

Además, el concepto de universidad como productora de conocimientos vuelve central las tareas de los docentes investigadores, quienes requieren de instalaciones y equipamiento para sus labores. Dentro de la Facultad Regional San Nicolás existe un grupo de docentes investigadores de ingeniería mecánica, que viene trabajando desde hace algún tiempo en el tema de vibraciones, más específicamente, en las vibraciones de rotores o dinámica de rotores, intentando desarrollar sistemas de balanceo y volcando sus conocimientos a las asignaturas.

La dinámica de rotores no es un campo nuevo, pero dada la importancia que tienen las máquinas rotantes para la industria, la complejidad creciente de estos equipos y las exigencias cada vez mayores que experimentan, en conjunto, hacen que sea un campo de mucho desarrollo en la actualidad.

Por definición, la dinámica de rotores es una rama de la mecánica aplicada que pretende conocer el comportamiento de dichos sistemas para poder diagnosticar fallas en funcionamiento y proponer soluciones. Los objetivos [2] de la dinámica de rotores son:

- Predecir las velocidades críticas.
- Determinar modificaciones en el diseño para cambiar las velocidades críticas
- Predecir las frecuencias naturales de las vibraciones torsionales.
- Calcular las masas de corrección y su localización para el balanceo del rotor a partir de mediciones de las vibraciones.
- Predecir las amplitudes de las vibraciones sincrónicas causadas por el desbalance del rotor.
- Predecir las condiciones que producen inestabilidad dinámica y los rangos de velocidades de trabajo seguro.
- Determinar las modificaciones de diseño para evitar los problemas de inestabilidad.



FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Para poder analizar el comportamiento de las máquinas rotantes se utilizan generalmente sistemas rotor-cojinetes de laboratorio. En el mercado se pueden encontrar distintas plataformas didácticas que sirven para analizar vibraciones y además hacer pruebas de balanceo o de alineación. Sin embargo, la mayoría de los centros de investigación desarrollan sus propios sistemas, a los que incorporan otros dispositivos para modelar fenómenos más complejos y diversos.

El propósito de este trabajo fue diseñar un rotor de pruebas para satisfacer las necesidades experimentales de los investigadores del área de vibraciones de la facultad y también para poder realizar experiencias con los estudiantes de las asignaturas mecánica Racional y Mantenimiento.

2. ANTECEDENTES

Se pueden encontrar múltiples configuraciones de rotores de pruebas en la literatura, cada uno de ellos ha sido desarrollado con el propósito de realizar algún tipo de experiencia determinada. Las configuraciones más simples son las diseñadas para analizar experimentalmente fenómenos de balanceo y aquellos utilizados para estudiar la dinámica del modelo del rotor de Jeffcott. No obstante, con el avance del conocimiento de la dinámica de rotores se han ido construyendo sistemas más complejos que permiten modelar experimentalmente otras fallas.

Dentro de las primeras configuraciones de rotores de prueba utilizadas que se pueden encontrar en la literatura, se pueden mencionar las utilizadas por el laboratorio de Shell Westhollow Research Center descritas por Vance [2] que sirvieron para determinar las velocidades críticas de ejes simples. El primero de ellos consistía de un rotor de solo un disco de 9 pulgadas de diámetro por 3 pulgadas de espesor, montado por interferencia sobre un eje de 2 pulgadas de diámetro y 48 de longitud, dicho rotor se hacía girar sobre rodillos de forma tal que quedara simplemente apoyado. El segundo equipo descrito, es un rotor de tres discos de 10 pulgadas de diámetro por 5 pulgadas de espesor, separados 10 pulgadas entre centros; todo el conjunto fue mecanizado de una única pieza de 52 pulgadas de largo. Este rotor está montado sobre cojinetes instrumentados con sensores de proximidad y soportes rígidos, además los discos tienen perforaciones radiales roscadas para poder hacer pruebas de balanceo.

Otro rotor de laboratorio utilizado por Bently [3] para pruebas de balanceo estaba formado por un eje de 3/8" de diámetro por 24 pulgadas de largo, montado sobre tres cojinetes instrumentados con sensores de proximidad y dotado con 3 discos fijados con tornillos radiales al eje. Con dicho rotor se hicieron las primeras observaciones del fenómeno de vibraciones auto-excitadas en cojinetes.

En un trabajo más reciente [4] se describe un equipo para pruebas de balanceo de la universidad de Aston en Birmingham que tiene algunas características que lo asemejan más a un rotor real de una turbina. Por empezar, tiene dos ejes de 38mm de diámetro, uno de 1,56m y el otro de 1,17m



vinculados con un acoplamiento de bridas, cada eje está montado sobre dos cojinetes de relación longitud/diámetro 0,3, juego radial de $150\mu\text{m}$ y alimentado con aceite de viscosidad 0.0009Ns/m^2 . Estos cojinetes se vinculan mediante soportes metálicos relativamente flexibles con una base de gran tamaño también metálica. Por último, los dos ejes tienen discos de balanceo, el primero 3 y el segundo 2, todos de diámetro 203mm por 25mm de espesor. Este rotor por su configuración ha sido empelado para analizar problemas de alineación [5].

Para estudiar fenómenos de desalineación Patel [6] también utilizó un rotor con dos ejes, uno con discos y el otro sin discos pero vinculado a una celda de carga. El primero de los ejes está montado sobre una base que permite desalinearlo respecto del segundo mediante la acción de tornillos de regulación. De igual forma, en el estudio de Lees y col. [7] se empelaron soportes con correderas y tornillos de regulación como se observa en la figura 1.

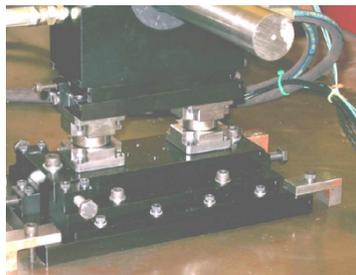


Figura 1: Soporte con tornillos de regulación [7]

Para el estudio de balanceo con métodos multi-planos se suelen usar rotores simples, de pequeño tamaño, que tienen varios discos y están montados sobre cojinetes de bolas de soportes rígidos, con la única particularidad que constan con unidades motrices que le permiten alcanzar velocidades muy altas, como en el trabajo de Lin y col [8] donde se emplea un rotor equipado con un motor que permite lograr velocidades de hasta 200Hz.

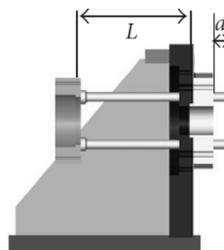


Figura 2: Pedestales diseñados por Sinou y col. [9]



FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

En algunos trabajos experimentales se han desarrollado sistemas de prueba que permiten variar la rigidez de los soportes para poder analizar cómo ésta afecta la dinámica del rotor. Así Sinou y colaboradores [9] diseñaron pedestales donde el cuerpo del cojinete se vincula con la estructura del pedestal mediante pernos calibrados, como se muestra en la Figura 2, que permiten alejar la base rígida del pedestal del cuerpo del cojinete propiamente dicho, una distancia L , de forma tal de disminuir la rigidez del conjunto en una cantidad fácilmente determinable.

De manera similar, Vázquez [10] desarrolló un sistema de pruebas montado sobre soportes flexibles anisotrópicos. Este rotor consiste en un eje flexible de diámetro 19mm x 654mm de longitud con tres discos de 152mm de diámetro y 25,4mm de espesor fijados con manguitos con tornillos. El eje está montado sobre cojinetes con un juego radial de 0,18mm; todo el conjunto está accionado por un motor mediante un acople y montado sobre un bloque de concreto de 900kg. El elemento particular de este rotor es el pedestal que se muestra en la Figura 3 y está conformado por dos placas gruesas horizontales, una solidaria al cuerpo del cojinete y la otra a la base, y estas placas están vinculadas por placas flexibles delgadas verticales. Cambiando éstas últimas, se altera la rigidez lateral del soporte.

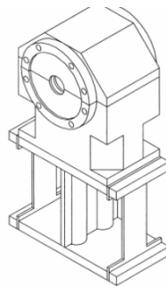


Figura 3: Pedestal flexible desarrollado por Vázquez [10]

Para analizar la inestabilidad dinámica producida por problemas en cojinetes de lubricación, se emplean arreglos experimentales que incorporan cojinetes en baño de aceite. Algunos de ellos tienen dispositivos especiales para intentar provocar la inestabilidad estudiada. Tal es el caso del rotor utilizado por Vance [11] para estudiar las constantes de rigidez de los cojinetes, que consta de cojinetes de aceite de diámetro 63,6mm x 25,4mm de longitud, con una luz radial de 50 μ m, lubricado con aceite de viscosidad 22cP y un aditamento especial para incrementar la carga sobre el eje mediante un cilindro neumático. Otros rotores de prueba usados para analizar este tipo de problemas, incorporan un único cojinete alimentado con aceite a presión, y para modelar problemas hidrodinámicos, utilizan un control muy preciso de la lubricación o mecanismos para modificar el juego radial, tal es el caso de los empleados por Meagher [12] o por Fan y colaboradores [13].



FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

En las recientes investigaciones acerca del tema de fisuras de rotores también se han empleado configuraciones de prueba muy sencillas, como la usada por Gómez Mansilla [14] que cuenta con dos cojinetes rígidos lubricados en aceite con un juego radial de $49\mu\text{m}$, un eje muy pequeño de diámetro 1cm, dos discos y una fisura provocada de 0,25mm. Saavedra [15], en cambio uso un rotor de Jeffcott montado sobre rodamientos y también modelaba la fisura mediante un corte radial.

Muszynska [16] describe un par de dispositivos más complejos, destinados a analizar experimentalmente la interacción rotor fluido, uno de ellos consiste en un disco perforado sobre el que incide un flujo controlado de aire y esto permite analizar las perturbaciones sobre los alabes de un rotor. Otro sistema descrito se compone de un cojinete con aceite que gira excéntrico para analizar inestabilidad en la película de aceite.

Finalmente con Macias [17] y Escudero Puente [18] describen sendos diseños de rotores de pruebas realizados con fines principalmente didácticos. EL primero de estos autores resume pautas muy concretas de diseño para asegurar que el rotor pueda operar en condiciones seguras en los ensayos y explica cómo realizar, con ese sistema, experiencias de desbalance, medición de arranques y trazado de orbitas. El segundo muestra un sistema simple que permite realizar con los alumnos pruebas de balanceo y solturas de distinto tipo con un diseño realmente muy económico.

3. NECESIDADES Y RESTRICCIONES DEL DISEÑO

El Grupo de investigación de vibraciones mecánicas de la Facultad Tecnológica Nacional se ha dedicado desde sus orígenes al estudio de problemas de balanceo, es por ello que, originalmente, se construyó un rotor de pruebas, dotado de un solo eje apoyado en dos rodamientos con pedestales relativamente rígidos que se vinculan a una base de hormigón como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Banco de pruebas original de la FRSN

Posteriormente se comenzó a trabajar en métodos de modelado de rotores reales de centrales de generación. Entonces surgió la necesidad de contar con un rotor con cojinetes de deslizamiento con aceite a presión, dado que las máquinas de generación tienen este tipo de cojinetes.



FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Como los proyectos de investigación se vincularon a problemas de balanceo y alineación, el rotor debería tener la posibilidad de hacer pruebas de alineación es por ello que se eligió una configuración con un rotor de dos ejes conectados por un acople y cuatro soportes, estos soportes debían tener la posibilidad de regular la alineación.

Dado que la base de hormigón disponible (Figura 5) era lo suficientemente grande se decidió trabajar sobre un diseño que use dicha fundación, para ello se debió respetar la distancia entre anclajes. También existían algunos elementos disponibles, como las cajas de los rodamientos oscilantes, acoples y motor eléctrico, por lo que se adaptaron las dimensiones y se verificó el diseño con estos elementos.

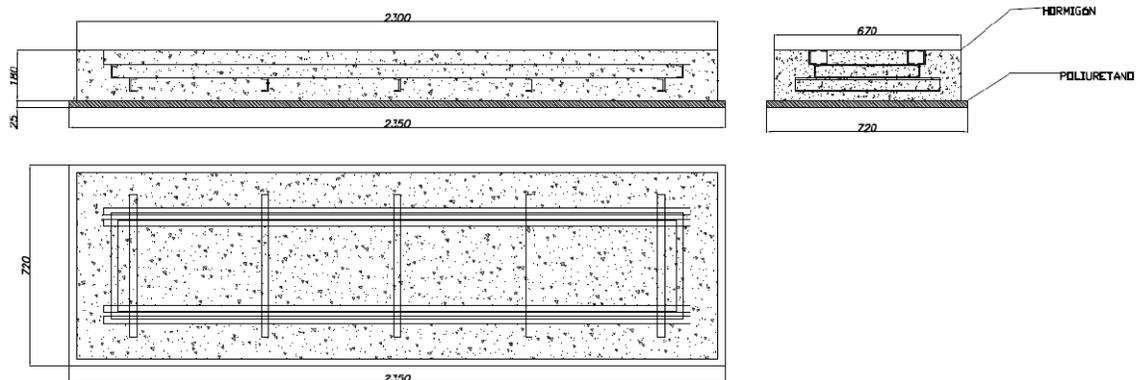


Figura 5: Base disponible.

4. DISCUSIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Durante el diseño del rotor de pruebas se manejaron diversas alternativas para el diseño de sus partes constitutivas. En líneas generales sus dimensiones se eligieron teniendo el cuidado de intentar mantener semejanza con un eje real de una turbina de generación, es por ello que la relación entre la longitud y el diámetro del eje (rigidez del eje) y las masas de los discos se eligieron de manera tal de que sus dos primeras frecuencias naturales se encuentren dentro del rango de 0 a 60Hz.

Esto ocasiona que el eje sea muy largo, para de esa forma bajar la rigidez; como la longitud de todo el conjunto estaba limitada por la base existente, se decidió usar un eje en el que se puedan montar muchos discos y estos discos se hicieron más pesados para lograr que las velocidades críticas se encuentren en el rango deseado. Luego se verificó la respuesta máxima en resonancia y se seleccionó un material que pueda superarla sin daño permanente siguiendo la metodología con la que verificó su diseño Macías [17].



FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Para el rotor, se manejaron dos alternativas constructivas: confeccionarlo en una sola pieza (eje más discos) o en varias piezas, eje por un lado y discos móviles. Estas son las variantes observadas en la literatura, la primera permite un mejor equilibrado inicial pero es más costosa; Igualmente, se eligió la segunda configuración de un eje liso con discos montados sobre manguitos de fijación, porque permiten correr los discos sobre el eje, e incluso incorporar más discos para poder asemejar mejor el rotor de pruebas a una determinada configuración de eje real.

Para los cojinetes de deslizamiento, se plantearon varias alternativas para lograr un apoyo simple, Esto implica que se debe liberar el giro en todos los sentidos, o sea convertir el cojinete en una rotula. Originalmente se intentó un diseño de soporte con dos ejes transversales a 90° de forma que el cojinete quedaba como en el centro de un giróscopo, y de esa forma podía acompañar los movimientos angulares del eje. No obstante, como esta idea requería mecanizar muchas piezas se terminó usando la pista externa de un rodamiento oscilante del tipo esférico con su soporte estándar como base para montar en su interior el buje lubricado. Para el sellado del aceite se eligió un sello laberintico porque un sello de goma u otro tipo de sello de contacto hubiere producido roces; restricciones del movimiento del eje, e incluso generarían componentes de ruido en las vibraciones.

Para poder variar la rigidez de los pedestales se observaron las alternativas planteadas por Sinou [9] y por Vázquez [10], y se eligió un diseño parecido al de este último con chapas calibradas que se puedan acoplar o quitar para variar la rigidez actuando como las hojas de un resorte tipo ballesta.

Finalmente para la provisión de aceite a presión se manejaron dos alternativas, ambas comerciales, de centrales de lubricación integradas con bomba de engranajes y válvula de regulación de presión, ambas alternativas se corresponden con centrales para lubricación de bancadas y tornillos de movimiento de máquinas herramientas. El único problema de estas centrales es que por el tipo de bomba que tienen, son de caudal constante y en las máquinas se valen de picos volumétricos para dosificar el aceite, en el caso del rotor se requiere un control más preciso para el caudal y por ello se debe agregar un variador de frecuencia.

5. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO FINAL

El rotor de prueba diseñado consta de tres ejes, uno largo de 900mm (ítem 7 de la Figura 6) y dos cortos de 500mm (8 de la Figura 6) y 4 pedestales con sus respectivos cojinetes. Se pueden armar varias configuraciones como se observa en la **Figura 6**, pudiéndose usar los ejes de a uno o combinados, dos cortos o un eje largo y uno corto.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

En total se construyeron 5 discos (1) de diámetro 270mm x 40mm de espesor perforados cada 10°, estos discos se instalan sobre el eje con manguitos de fijación cónicos (2). Cada soporte consta de dos partes: el cojinete (4) y el pedestal (5). Además, para recolectar el aceite y retornarlo al circuito se diseñaron dos alternativas de base, ambas con una batea para posicionar sobre el hormigón del laboratorio.

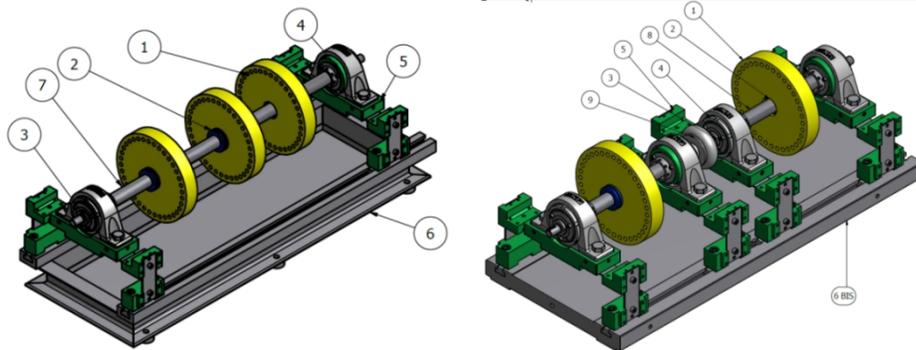


Figura 6: Configuraciones del rotor, eje largo a la izquierda, dos ejes cortos y acople a la derecha

Los cojinetes (Figura 7 izquierda) se confeccionaron en bronce y se montaron por interferencia en un cuerpo de acero que está preparado para alojarse dentro de la pista externa de un rodamiento oscilante (ítem 10 Figura 7 derecha) Para ello, se desarmó el rodamiento y se dejó sólo el soporte con la pista externa, luego dentro se ajustó el cuerpo del cojinete al diámetro interno de la pista, como el tipo de rodamiento elegido tiene la pista externa esférica por fuera, el cojinete funciona como un apoyo simple.

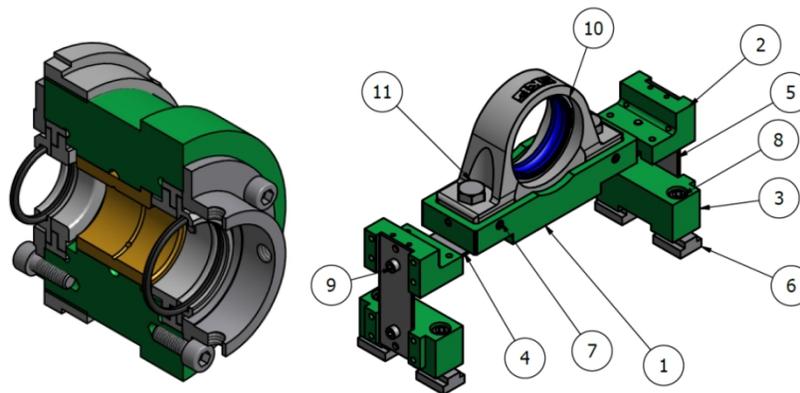


Figura 7: Izquierda: Cuerpo del cojinete; Derecha: Pedestal

El buje cuenta con ductos y canales de lubricación. Tiene sellos de laberinto a ambos lados y las tapas están preparadas para montar sensores de proximidad analógicos de 8mm de diámetro.



En la Figura 7 a la derecha se muestra la estructura del pedestal con el soporte de rodamiento desarmado (10) y con las chapas elásticas horizontales (4) y verticales (5) construidas en acero SAE 1070 templado y revenido. Estas hojas o flejes se diseñaron para ser desmontables y de esa forma poder agregar quitar flejes para alterar la rigidez vertical y horizontal del pedestal.

Finalmente, la cuna del soporte de rodamiento (1) tiene tornillos de regulación (7) que permiten alinear o desalinear los soportes desplazando el cojinete respecto del pedestal. Esto es muy útil para realizar ensayos de problemas de alineación.

6. CONCLUSIONES

El rotor diseñado permite realizar ensayos de balanceo y alineación con fines didácticos o de investigación.

Con el diseño logrado se puede analizar la influencia de la variación de la rigidez de los cojinetes y dado que la central de lubricación tiene regulación de presión y caudal también se pueden hacer ensayos con problemas de lubricación. Estos ensayos son más útiles a los fines de investigación

La construcción está finalizada, resta terminar las bases de los soportes de rodamientos y adquirir la central de lubricación para empezar a hacer pruebas de laboratorio.

7. REFERENCIAS

- [1] Universidad Tecnológica Nacional “Diseño curricular de la carrera Ingeniería Mecánica” Ordenanza 1027, agosto 2004.
- [2] Vance J. M. *Rotordynamics of Turbomachinery*, Jhon Willey & Sons, New York, 1988.
- [3] Muszynska A. *Rotordynamics*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005.
- [4] Sinha J. K. Friswell M. I. Lees A. W. and Sinha R. K. *Robust Method for the Rotor Unbalance Estimation*. Proceedings of VETOMAC-2, 16-18 December, 2002.
- [5] Sinha J. K. Lees A. W. and Friswell M. I. *Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down*. Journal of Sound and Vibration 272, pp 967–989, 2004.
- [6] Patel T. H. & Darpe A. K. *Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, pp. 2236–2252, 2009.
- [7] Lees A. W. Price E. D. and Friswell M.I. *Identification of Rotor Dynamic Machinery – A Laboratory Trial*. Proceedings of 23th IMAC conference, paper 171, February 2005.



FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

- [8] Lin T. W. Kang Y. Wang C. C. Chang C. W. and Chiang C. P. *An investigation in optimal locations by genetic algorithm for balancing flexible rotor-bearing systems*. Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air. Reno-Tahoe, Nevada, June 6-9, 2005.
- [9] Sinou J. J. Villa C. and Thouverez F. *Experimental and Numerical Investigations of a Flexible Rotor on Flexible Bearing Supports*. International Journal of Rotating Machinery, N° 3, pp 179–189, 2005.
- [10] Vázquez J.A. Barrett L.E. and Flack R.D. *Including the Effects of Flexible Bearing Supports in Rotating Machinery* International Journal of Rotating Machinery, Vol. 7, No. 4, pp. 223-236, 2001.
- [11] Vance J. M. Murphy B.T. and Tripp H. A. *Critical Speeds of Turbomachinery: Computer predictions vs. Experimental Measurements. Part II*, ASME Design Engineering Division Conference and Exhibit on Mechanical Vibrations and Noise, Cincinnati, Ohio, September 10-13, 1985.
- [12] Meagher J. Wu X. and Lencioni C. *Response of a Warped Flexible Rotor with a Fluid Bearing*. International Journal of Rotating Machinery, Article ID 147653, 2008.
- [13] Fan C.C. Syu J.W. Pan M.C. And Tsao W.C. *Study of start-up vibration response for oil whirl, oil whip and dry whip*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, N° 3, pp. 102–115, 2008.
- [14] Gómez Mansilla J.C. *Interacción fisura desbalance en las resonancias locales y evolución orbital para detectar fisuras en rotores: parte 2*. Actas del IX Congreso y exposición latinoamericana de turbomaquinaria. Veracruz, México, Junio de 2006.
- [15] Saavedra P.N. and Cutiño L.A. *Vibration analysis of rotor for crack identification*. Journal of Vibration and control, N° 8, pp. 51-67, 2002.
- [16] Muszynska A. *Modal Testing of Rotors with Fluid Interaction*. International Journal of Rotating Machinery, Vol. I, No. 2, pp. 83-116, 1995.
- [17] Macias A.R. *Diseño, construcción e instrumentación de un sistema rotor - chumaceras basado en el modelo Jeffcott para el análisis de vibraciones*. Tesis de grado presentada en la universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México, 2013.
- [18] Escudero Puente P. *Realización de una maqueta para el análisis de vibraciones*. Tesis de grado presentada en la facultad náutica de Barcelona, Barcelona, España 2011.