

# 16

Fecha de presentación: Mayo, 2024  
Fecha de aceptación: Septiembre, 2024  
Fecha de publicación: Noviembre, 2024

## MÉTODO

PARA LA RECUPERACIÓN DEL ÁRBOL DE UN VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO

### METHOD FOR THE RECOVERY OF THE SHAFT OF AN INDUCED DRAFT FAN

Luis Angel Iturralde Carrera <sup>1\*</sup>

E-mail: [liturralde28@alumnos.uaq.mx](mailto:liturralde28@alumnos.uaq.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5595-9329>

Hugo Martínez Ángeles <sup>1</sup>

E-mail: [hmartinez15@alumnos.uaq.mx](mailto:hmartinez15@alumnos.uaq.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8552-705X>

Reinier Jiménez Borges <sup>2</sup>

E-mail: [rjimenezborges@gmail.com](mailto:rjimenezborges@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3430-0322>

Oswaldo Mur González <sup>3</sup>

E-mail: [omur@refcfg.cu](mailto:omur@refcfg.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0675-2233>

Jesús Agustín Ramírez Ramírez <sup>1</sup>

E-mail: [contratosolar.jr@gmail.com](mailto:contratosolar.jr@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1710-0572>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos. Cuba.

<sup>3</sup> Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos", Cuba.

\*Autor para correspondencia

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Iturralde Carrera, L. A., Martínez Ángeles, H., Jiménez Borges, R., Mur González, O. & Ramírez Ramírez, J. A. (2024). Método para la recuperación del Árbol de un Ventilador de Tiro Inducido. *Universidad y Sociedad*, 16 (6), 154-162.

#### RESUMEN

Este trabajo presenta un método integral para la recuperación del árbol de un ventilador de tiro inducido, abordando aspectos críticos como el estudio de vibraciones, el proceso de metalizado, el análisis mecánico y la implementación de ajustes y tolerancias precisas. La aplicación de este método se realizó específicamente en el ventilador de tiro inducido modelo P-52-115-1 de la caldera F-101-1, y comprendió una serie de pasos esenciales para garantizar la efectividad del proceso de recuperación. Inicialmente, se llevó a cabo un exhaustivo análisis de vibraciones mecánicas para identificar posibles puntos de falla y áreas de mejora en la estructura del ventilador. Posteriormente, se realizó un análisis detallado de la manufactura y de la resistencia mecánica del árbol, utilizando herramientas de simulación como Autodesk Inventor. Este análisis permitió determinar que la falla principal se originó por la pérdida de elasticidad del cárter, con los mayores esfuerzos cortantes localizados en los apoyos de los cojinetes, donde se concentraban las cargas más significativas. Para corregir estos problemas y mejorar la durabilidad del árbol, se implementó un proceso de metalizado. Este procedimiento no solo incrementó la resistencia superficial del árbol, sino que también permitió lograr los ajustes necesarios con los rodamientos, asegurando un funcionamiento óptimo del ventilador. En conjunto, el método propuesto ofrece una solución robusta para la recuperación de componentes críticos en sistemas de ventilación industrial.

**Palabras clave:** Análisis mecánico, Resistencia superficial, Proceso de recuperación, Falla mecánica, Ventilador de tiro inducido.

#### ABSTRACT

This work presents a comprehensive method for the shaft recovery of an induced draft fan, addressing critical aspects such as vibration study, plating process, mechanical analysis and the implementation of precise adjustments and tolerances. The application of this method was carried out specifically on the induced draft fan model P-52-115-1 of the

F-101-1 boiler, and involved a series of essential steps to ensure the effectiveness of the recovery process. Initially, a comprehensive mechanical vibration analysis was performed to identify potential failure points and areas for improvement in the fan structure. Subsequently, a detailed analysis of the manufacturing and mechanical strength of the shaft was performed using simulation tools such as Autodesk Inventor. This analysis made it possible to determine that the main failure was caused by the loss of crankcase staticity, with the highest shear stresses located at the bearing supports, where the most significant loads were concentrated. To correct these problems and improve shaft durability, a plating process was implemented. This procedure not only increased the surface strength of the shaft, but also allowed the necessary adjustments to be made to the bearings, ensuring optimal fan operation. Overall, the proposed method offers a robust solution for the recovery of critical components in industrial ventilation systems.

**Keywords:** Mechanical analysis, Surface resistance, Recovery process, Mechanical failure, Induced draft fan.

## INTRODUCCIÓN

Desde la Revolución Industrial, las máquinas rotativas han sido fundamentales en el avance y desarrollo de la industria, desempeñando un rol crucial debido a su amplia variedad de aplicaciones. Estas máquinas, presentes en una gran cantidad de procesos industriales, son esenciales para garantizar altos niveles de eficiencia y productividad. Sin embargo, su operación continua y los largos ciclos de trabajo a los que son sometidas las exponen a un desgaste considerable, lo que puede comprometer su rendimiento y, por ende, la continuidad de la producción (García & Torres, 2022; Miller, 2021; Smith & Johnson, 2019).

La importancia de mantener las máquinas rotativas en condiciones óptimas no puede subestimarse. Un mantenimiento adecuado no solo prolonga la vida útil de estos equipos, sino que también asegura la estabilidad y eficiencia de los procesos productivos. La falta de mantenimiento o la negligencia en la atención de estas máquinas puede llevar a fallas inesperadas, paradas no programadas y, en el peor de los casos, a costosos tiempos de inactividad que afectan significativamente la productividad y los resultados económicos de una empresa.

Por tanto, el desarrollo de técnicas y métodos avanzados para la monitorización, diagnóstico y mantenimiento de las máquinas rotativas es esencial. Estas prácticas no solo contribuyen a maximizar el rendimiento operativo, sino que también minimizan los riesgos de fallas catastróficas, asegurando que la producción se lleve a cabo sin interrupciones y que las empresas puedan seguir operando de manera competitiva en un entorno industrial cada vez más exigente (Brown et al., 2020; Chen & Lee, 2021; Zhang & Wu, 2019).

En el ámbito industrial, anticipar fallos en la maquinaria es crucial para evitar paros inesperados y retrasos en la producción. Esto no solo asegura la calidad de los productos, sino también la confiabilidad en la entrega de pedidos y el cumplimiento de altos estándares de calidad (Carvalho & Silva, 2020; Fernández & Martínez, 2019; Patel & Mehta, 2021). Partiendo de esta premisa, se resalta la importancia del monitoreo de vibraciones mecánicas como una herramienta esencial para la detección temprana de fallas. Este enfoque permite a las empresas mantener la continuidad operativa, mejorar la eficiencia y minimizar el riesgo de interrupciones que puedan comprometer el proceso productivo.

La vibración es, en esencia, la respuesta de un sistema a fuerzas internas o externas que lo estimulan (Jones & Brown, 2019; Kumar et al., 2020; Wang & Zhang, 2021). Para comprender y evaluar correctamente este fenómeno, es crucial medir tres parámetros fundamentales: amplitud, frecuencia y fase. En el ámbito del análisis de vibraciones, las magnitudes más comunes utilizadas para evaluar las vibraciones mecánicas son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Estos parámetros proporcionan información clave sobre el comportamiento dinámico de un sistema, permitiendo identificar posibles problemas y optimizar su funcionamiento.

Para diagnosticar problemas en máquinas mediante el análisis de vibraciones, es esencial medir regularmente los niveles de vibración. Estas mediciones, junto con el seguimiento de las tendencias en los cambios de vibración, permiten evaluar la gravedad del problema y proporcionan información valiosa para planificar el mantenimiento (Cao & Wu, 2020; Silva & Santos, 2021; Yang & Chen, 2019). Además, el análisis de vibraciones ofrece una visión detallada sobre la causa raíz del problema, facilitando la corrección de su origen, como puede ser un desbalance o desalineamiento. De este modo, el enfoque del mantenimiento no se limita a reemplazar componentes dañados o con signos de desgaste, sino que busca resolver las causas subyacentes para prevenir futuras fallas.

Es posible que, al realizar pequeños ajustes en la instalación, operación, mantenimiento o incluso en el diseño, una máquina pueda volverse más confiable y requerir menos mantenimiento en el futuro. El análisis de frecuencias es la técnica analítica más comúnmente utilizada para identificar fallas o fuentes de problemas en máquinas en operación, ya sea durante su funcionamiento normal, en arranques y paradas, o durante ensayos y pruebas, como un balanceo o después de un mantenimiento completo. Este enfoque permite detectar y corregir problemas de manera proactiva, mejorando así la eficiencia y confiabilidad de la maquinaria.

El ventilador de tiro inducido de una caldera tiene la función de extraer los gases de la cámara de combustión y expulsarlos hacia la chimenea. Sin embargo, enfrenta varios desafíos debido a su ubicación en una zona problemática. Este ventilador opera en un entorno de alta

temperatura, donde también se encuentra expuesto a gases corrosivos y partículas sólidas, como cenizas. Estos factores pueden dañar las paletas del ventilador, afectando su rendimiento y durabilidad (Lee & Park, 2020; Martínez & López, 2019; Zhao et al., 2021).

Debido a estos factores, el ventilador de tiro inducido es susceptible a fallas mecánicas durante su operación, las cuales a menudo son difíciles de diagnosticar y, en su mayoría, requieren intervenciones correctivas. Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo es proponer un método para la recuperación del árbol de un ventilador de tiro inducido, que incluya un estudio de vibraciones, el proceso de metalizado de la pieza, un análisis mecánico exhaustivo y, finalmente, la realización de ajustes y tolerancias precisas.

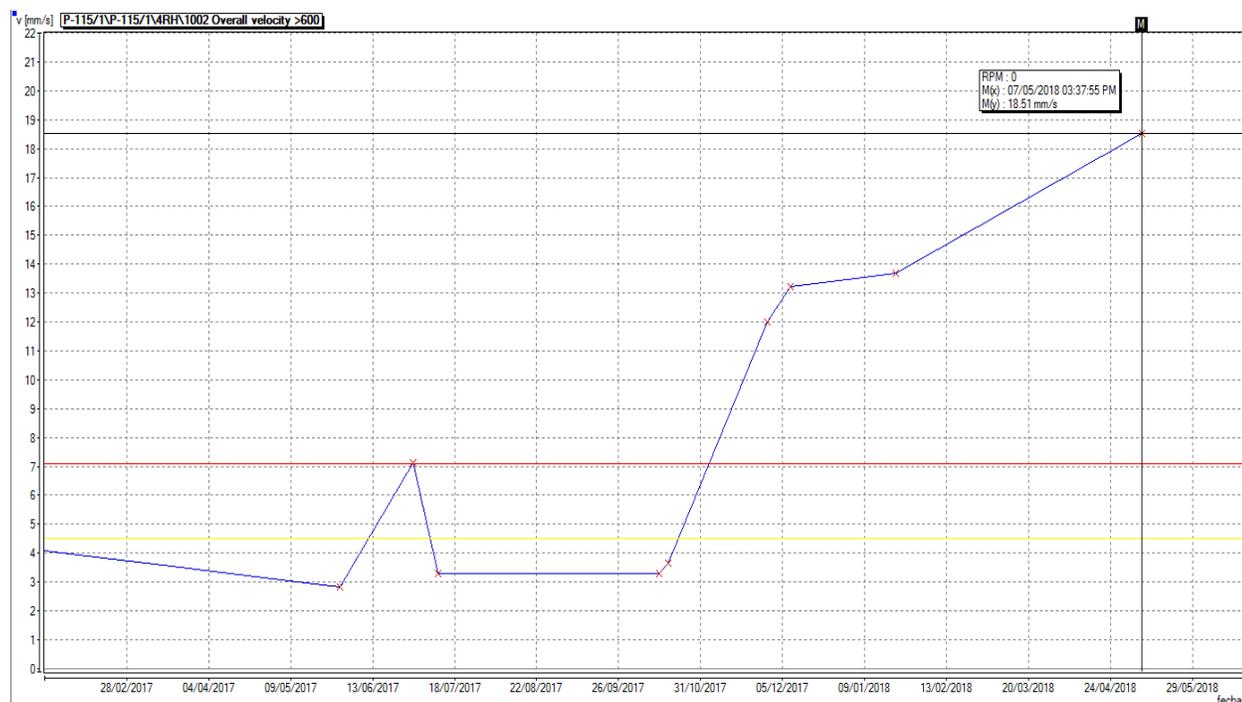
## MATERIALES Y MÉTODOS

El árbol del ventilador objeto de estudio debido a la gran cantidad de años que lleva en explotación, y a las extremas condiciones de trabajo como son las altas temperaturas que la misma se transmite por inducción a todo el ventilador, el alto peso del impelente que provoca un gran momento con respecto a los puntos de apoyos en este caso los rodamientos y a su vez los apoyos en la carcasa, es un foco de atención dentro del proceso para cualquier planta industrial. Debido a esto, dicha pieza sufrió desgaste en el eje de transmisión de potencia del motor eléctrico al impelente. Este desgaste se produjo en donde están situados los rodamientos, notándose porque los mismos están colados y ha provocado la pérdida del ajuste en la zona.

En la planta industrial los inspectores del área de mantenimiento realizan pruebas de vibraciones una vez al mes a estos ventiladores. Donde en una de estas pruebas se percataron del problema y realizaron unas recomendaciones que no se realizaron. En otra de las pruebas vieron que el problema se había agravado hasta un punto que el equipo debía salir de circulación. Debido a ello es que se propone la recuperación del equipo porque se dañó el árbol y la carcasa ambos en la zona de ajuste con los rodamientos debido a las vibraciones en el ventilador.

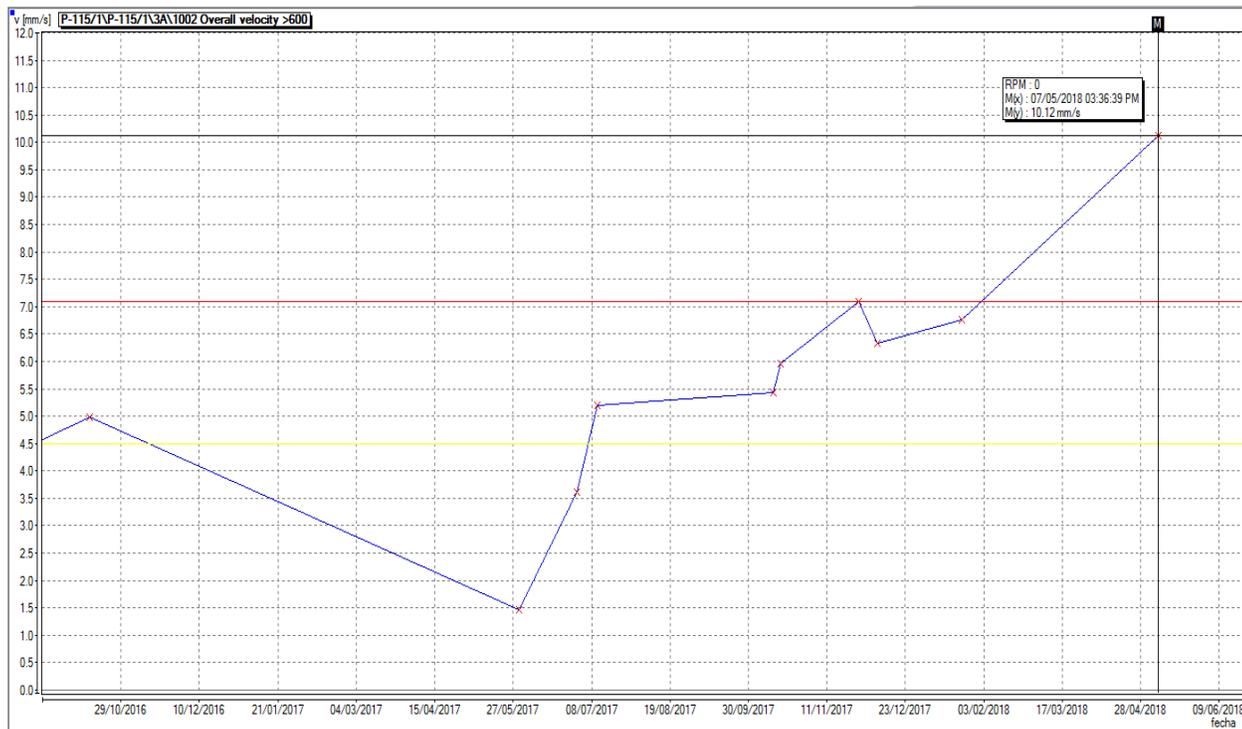
La figura 1 y figura 2 presentan el registro de vibración del pedestal del tiro inducido al generador de vapor. En ellas se evidencian las altas vibraciones primeramente en la componente radial en el rodamiento del pedestal del lado del ventilador. Esto provocó flojedad en los pernos de anclaje que fijan el pedestal a su base. Por otra parte, se tomaron mediciones en la componente axial evidenciándose la tendencia al incremento constante de las mismas para dicho elemento de máquina.

Fig 1: Registro de vibración del pedestal del tiro inducido de la caldera en la componente radial.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 2: Registro de vibración del pedestal del tiro inducido de la caldera en la componente axial.



Fuente: Elaboración propia.

El método propuesto en dicha investigación es el de metalizado por ser el que posee las mejores condiciones para realizarse in situ y un equipo bien preparado al igual que la tecnología necesaria. La figura 3 resume el método propuesto y la secuencia lógica de pasos para su cumplimiento.

Fig 3: Método propuesto y la secuencia lógica de pasos para su cumplimiento.



Fuente: Elaboración propia.

Primeramente, se debe determinar el momento torsor (ecuación 1) (Johnson & Wang, 2018; Patel et al., 2020; Singh & Gupta, 2019) que provoca el impelente y se divide el radio del impelente para ver la fuerza que crea este momento (ecuación 2):

$$M_{tp} = 9550 \frac{N (kW)}{n \left(\frac{r}{min}\right)} \tag{1}$$

Desarrollo de la ecuación 1 Momento torsor:

$$M_{tp} = 9550 \frac{90}{180} = 728 \text{ N.m}$$

Ecuación 2 Fuerza que provoca el momento:

$$H M_{tp} = \frac{728 \text{ N.m}}{1,4 \text{ m}} = 520,3 \text{ N} \quad (2)$$

Posteriormente se determina la masa del impelente por la aceleración de la gravedad para obtener el valor de la fuerza que provoca su masa (ecuación 3):

$$P = m g \quad (3)$$

Ambas fuerzas multiplicadas por la constante kd, permite obtener la fuerza total que provoca el impelente. Ecuación 4 fuerza total para el impelente

$$F = (P + H M_{tp}) \cdot kd = 4410,25 \text{ N} \quad (4)$$

El análisis de esteticidad se realiza mediante el software autodesk inventor. Autodesk Inventor es un software de modelado paramétrico de sólidos en 3D. Este ofrece herramientas profesionales y específicas para el diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos, lo que facilita el trabajo de diseño de productos (Chen & Lin, 2021; García et al., 2020; Johnson & Patel, 2019; Lee, 2018; Martínez & Ramírez, 2022).

De esta forma tanto diseñadores como clientes pueden crear prototipos visuales y hacer pruebas y dibujos de modelos 3D. Como es un programa específico para diseño de producto tiene una gran cantidad de funciones como diseño paramétrico de piezas y ensamblajes, simulación, visualización, automatización, bibliotecas de elementos normalizados y bocetaje, que en otros programas CAD son secundarias. Permite la integración de datos en 2D y 3D en un mismo entorno creando una representación virtual del producto final, de forma que se puede inspeccionar y ajustar el funcionamiento del producto en cualquier momento durante la fase de diseño (Adams & Clark, 2021; Evans & Murphy, 2020; Roberts & Turner, 2019).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los hallazgos derivados del análisis detallado del árbol del ventilador, realizados mediante herramientas de simulación avanzadas como Autodesk Inventor. Este análisis incluye la evaluación de parámetros críticos tales como esfuerzos cortantes, momentos flectores y desplazamientos, proporcionando datos esenciales para comprender el comportamiento estructural del componente bajo condiciones operativas específicas. Los resultados obtenidos ofrecen una visión clara de las cargas internas y tensiones a las que está sometido el árbol, facilitando una evaluación precisa de su desempeño y resistencia. A continuación, se detallan estos resultados, que forman la base para la discusión y la interpretación de cómo influyen en la integridad y funcionalidad del componente.

La figura 4 presenta un esquema general para la determinación de los esfuerzos cortantes y momento flector, así como el desplazamiento del árbol.

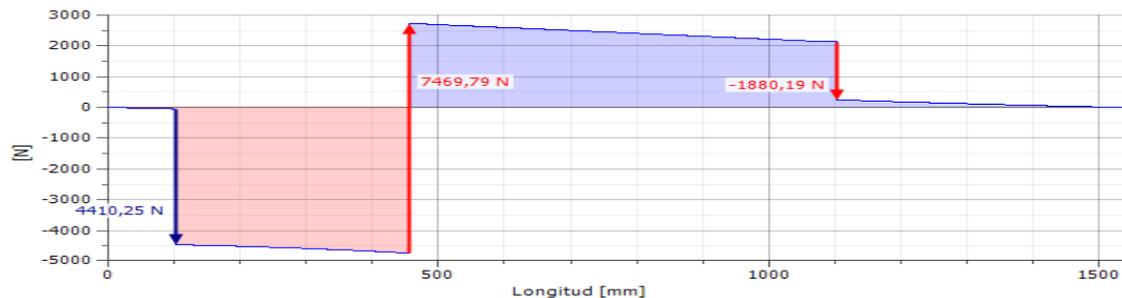
Fig 4: Esquema de análisis mediante autodesk inventor.



Fuente: Elaboración propia, Autodesk\_Inventor\_Professional\_2024.

La figura 5 presenta los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector:

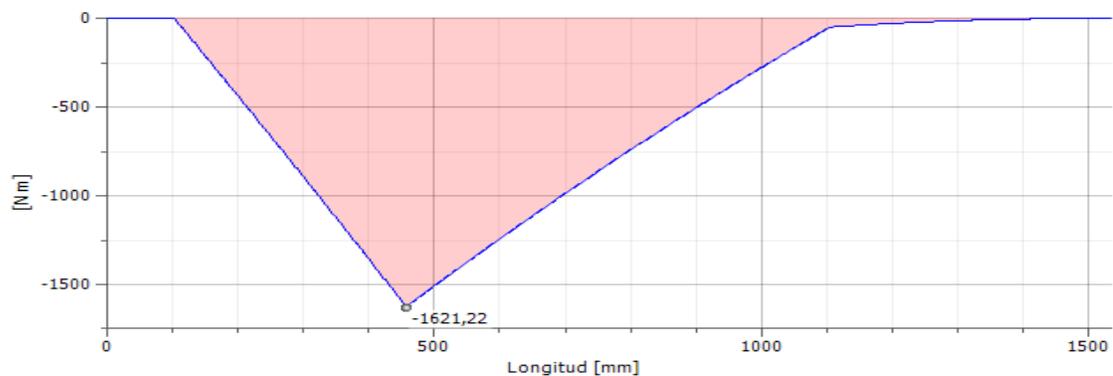
Fig 5: Esfuerzo cortante en el árbol calculado mediante autodesk inventor.



Fuente: Elaboración propia, Autodesk\_Inventor\_Professional\_2024.

Como se observa en la figura anterior los mayores esfuerzos cortantes están generados por los apoyos de dicho elemento, es decir las cargas asociadas con los cojinetes. Por otro lado, se genera un cortante de magnitud 4 410 N calculado previamente debido al impelente. El mayor momento flector (figura 6) coincide con el acoplamiento de uno de los rodamientos dentro de la pieza.

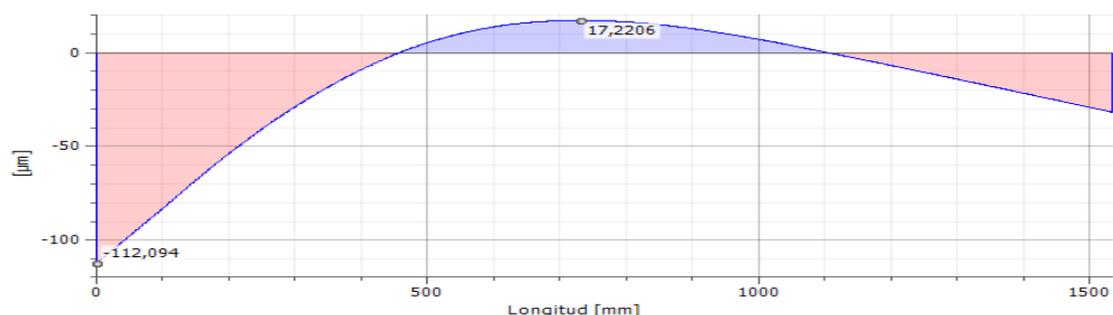
Fig 6: Momento flector en el árbol calculado mediante autodesk inventor.



Fuente: Elaboración propia, Autodesk\_Inventor\_Professional\_2024.

La figura 7 por su parte muestra el desplazamiento para el árbol, siendo estos mayores en la zona de acoplamiento de este y en la parte central.

Fig 7: Desplazamiento para el árbol mediante autodesk inventor.



Fuente: Elaboración propia, Autodesk\_Inventor\_Professional\_2024.

La Tabla 1 presenta el resumen de los resultados obtenidos en el análisis.

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos mediante autodesk inventor.

Parámetro	Magnitud
Longitud	1 534,5 mm
Masa	120,26 kg
Tensión de plegado máxima	7,86 MPa
Tensión de corte máxima	0,707 MPa
Tensión reducida máxima	7,869 MPa
Flexión máxima	112,0 $\mu\text{m}$

Fuente: Elaboración propia.

Se desea realizar un ajuste de adherencia H7/k6 Tabla 2 entre el diámetro del eje y la pista interior de los rodamientos el cual es el especificado en el plano del eje del diseñador (ver figura 8).

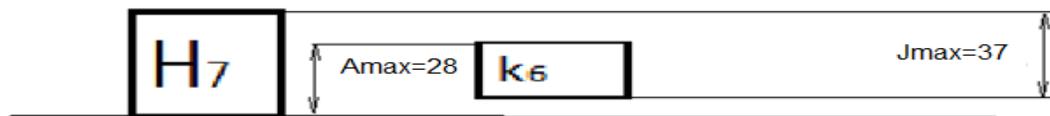
130H7/k6: Donde: T-tolerancia, es -desviación superior del eje, ei -desviación inferior del eje, Es -desviación superior agujero, Ei- desviación inferior del agujero.

Tabla 2: Ajuste y tolerancia entre H7/k6.

Agujero H7	Eje k6
T = 40	T = 25
Ei = 0	ei = 3
Es = 40	es = 28

Fuente: Elaboración propia.

Fig 8: Esquema del ajuste propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El método de metalizado propuesto en la investigación se ha seleccionado por ser el más adecuado para su implementación in situ, debido a sus condiciones óptimas y a la disponibilidad de un equipo bien preparado y la tecnología necesaria para llevarlo a cabo. Este enfoque no solo asegura una mejora en las propiedades superficiales del componente, como mayor resistencia y durabilidad, sino que también facilita su aplicación directa en el sitio de operación, minimizando tiempos de inactividad y costos asociados. La elección de este método resalta la importancia de considerar las condiciones prácticas y tecnológicas disponibles al seleccionar soluciones de reparación y mantenimiento, garantizando así una implementación efectiva y eficiente que cumpla con los requisitos técnicos y operacionales.

El análisis realizado mediante Autodesk Inventor muestra que las tensiones máximas en el árbol del ventilador son adecuadas para la carga prevista, con una tensión de plegado máxima de 7,86 MPa y una tensión de corte máxima de 0,707 MPa. Sin embargo, la tensión reducida máxima de 7,869 MPa y la flexión máxima de 112,0  $\mu\text{m}$  indican que, aunque el diseño es robusto, existe una ligera deformación bajo carga que debe ser considerada. La flexión, aunque dentro de un rango aceptable, puede implicar una necesidad de revisión en el diseño o el refuerzo del componente.

para mejorar su durabilidad y rendimiento en condiciones de operación extremas.

El ajuste de adherencia especificado como H7/k6 se refleja en la Tabla 2, mostrando un rango de tolerancias para el diámetro del eje y la pista interior de los rodamientos. La tolerancia T para el agujero H7 es de 40  $\mu\text{m}$  con una desviación inferior (Ei) de 0  $\mu\text{m}$  y una desviación superior (Es) de 40  $\mu\text{m}$ . Para el eje k6, la tolerancia T es de 25  $\mu\text{m}$ , con una desviación inferior (ei) de 3  $\mu\text{m}$  y una desviación superior (es) de 28  $\mu\text{m}$ . Estos ajustes aseguran que el encaje entre el eje y los rodamientos estará dentro de un rango controlado, lo que es crucial para mantener una operación suave y minimizar el desgaste prematuro.

Las tolerancias especificadas para el ajuste H7/k6 indican que el eje tiene una ligera holgura en relación con el agujero, dado que la tolerancia del agujero (40  $\mu\text{m}$ ) es mayor que la del eje (25  $\mu\text{m}$ ). Esta diferencia de tolerancia permite una cierta flexibilidad en el ensamblaje, pero es importante asegurarse de que el ajuste final cumpla con los requisitos operacionales y no comprometa la precisión del posicionamiento o la alineación del ventilador.

Con los datos obtenidos, es aconsejable considerar revisiones en el diseño para optimizar la resistencia y reducir la flexión máxima observada. Además, la implementación del ajuste H7/k6 debe ser verificada para garantizar que los rodamientos se asienten correctamente y que no haya problemas de ajuste o fricción que puedan afectar el rendimiento. La tolerancia ajustada también debe ser controlada de cerca durante el proceso de fabricación para asegurar que el componente funcione dentro de los límites especificados y para evitar problemas en la operación del ventilador.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R., & Clark, H. (2021). Optimizing mechanical design workflows with Autodesk Inventor. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(3), 567-578. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa055>
- Brown, A., White, P., & Kim, S. (2020). Predictive maintenance of rotating machinery in industrial settings. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 13(4), 15-27. <https://doi.org/10.3926/jiem.3007>
- Cao, X., & Wu, Y. (2020). Análisis avanzado de vibraciones en sistemas industriales. *Tecnología y Mantenimiento*, 32(1), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.tecmant.2020.01.004>
- Carvalho, J., & Silva, A. (2020). Mantenimiento predictivo en la industria moderna. Editorial Técnica.
- Chen, T., & Lin, X. (2021). Simulación y diseño de productos utilizando Autodesk Inventor. *Ingeniería y Diseño*, 12(3), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.ingdis.2021.03.005>
- Chen, Y., & Lee, H. (2021). Advanced monitoring techniques for rotating machinery: A comprehensive review. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(8), 3251-3262. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0709-5>
- Evans, D., & Murphy, T. (2020). Simulation and analysis capabilities in Autodesk Inventor: A comprehensive overview. *Design Automation Journal*, 27(2), 91-104. <https://doi.org/10.1115/1.4046376>
- Fernández, P., & Martínez, L. (2019). Gestión de fallos en maquinaria industrial: Nuevas metodologías. Ediciones Industriales.
- García, M., López, J., & Torres, P. (2020). Modelado paramétrico 3D con Autodesk Inventor: Un enfoque práctico. *Diseño y Manufactura*, 8(2), 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.dismant.2020.02.010>
- García, R., & Torres, L. (2022). Impact of wear on rotating machinery and the role of predictive maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 180, 109238. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109238>
- Johnson, P., & Wang, H. (2018). Torsional dynamics and the effects of impeller design in rotating machinery. *Journal of Mechanical Design*, 140(5), 051403. <https://doi.org/10.1115/1.4039380>
- Johnson, R., & Patel, S. (2019). Herramientas avanzadas en Autodesk Inventor para diseño mecánico. *Mecánica Aplicada*, 14(1), 100-115.
- Jones, P., & Brown, T. (2019). Fundamentals of vibration analysis in mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 134, 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.06.003>
- Kumar, R., Singh, V., & Sharma, M. (2020). Dynamic behavior of mechanical systems: Vibration analysis and its implications. *Journal of Sound and Vibration*, 464, 114095. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.114095>
- Lee, K. (2018). Introducción al diseño 3D con Autodesk Inventor. Editorial Técnica.
- Martínez, L., & Ramírez, A. (2022). Optimizando el diseño industrial mediante Autodesk Inventor. *Ingeniería y Tecnología*, 17(4), 202-218. <https://doi.org/10.1016/j.ingtec.2022.04.009>
- Miller, D. (2021). The evolution of industrial machinery: From the Industrial Revolution to modern automation. *Industrial History Review*, 35(2), 45-59. <https://doi.org/10.1080/01472231.2021.1274423>
- Patel, R., & Mehta, S. (2021). Optimización de la productividad a través de la predicción de fallos. *Revistas Industriales*, 45(2), 120-135. <https://doi.org/10.1016/j.revind.2021.02.003>

- Patel, S., Mehta, P., & Roy, A. (2020). Analysis of torsional moments in mechanical systems: Applications to impeller-driven machines. *International Journal of Mechanical Sciences*, 170, 105340. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105340>
- Roberts, L., & Turner, A. (2019). Applications of parametric modeling in Autodesk Inventor for advanced mechanical design. *Computer-Aided Design*, 111, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.01.002>
- Silva, J., & Santos, M. (2021). Monitorización de vibraciones y diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa. *Ingeniería de Mantenimiento*, 29(3), 101-120. <https://doi.org/10.1016/j.ingmant.2021.03.009>
- Singh, K., & Gupta, R. (2019). Calculation of forces generated by impellers and their impact on mechanical systems. *Journal of Applied Mechanics*, 86(8), 081002. <https://doi.org/10.1115/1.4043975>
- Smith, J., & Johnson, M. (2019). Rotating machines and their significance in modern industry. *International Journal of Industrial Automation*, 26(3), 235-250. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03824-6>
- Wang, H., & Zhang, Y. (2021). Measurement and analysis of vibration in industrial machinery. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(7), 3055-3068. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0647-2>
- Yang, H., & Chen, Z. (2019). Aplicaciones del análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo. *Revista Internacional de Mantenimiento*, 18(4), 73-88.
- Zhang, X., & Wu, Z. (2019). Diagnosis and maintenance strategies for rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 182-197. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.027>