



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4439>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual, una revisión sistemática

Gear tooth fractures caused by vibrations in manual transmission gearboxes: a systematic review

Fraturas de dentes de engrenagem causadas por vibrações em caixas de câmbio de transmissão manual: uma revisão sistemática

Celin Padilla^I

c_padilla@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2241-5421>

Daniela Sánchez^{II}

danielaa.sanchez@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-6249-3894>

Luis Buenaño^{III}

lfbuenaño@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2194-4102>

Olga Barrera^{IV}

obarrera@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9708-5105>

Correspondencia: c_padilla@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 11 de abril de 2025 ***Aceptado:** 18 de mayo de 2025 * **Publicado:** 30 de junio de 2025

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Este artículo aborda el fenómeno de fracturas en los dientes de engranajes de cajas de transmisión manual, ocasionadas por vibraciones mecánicas. El problema radica en la fatiga inducida por tensiones cíclicas en la raíz del diente, que compromete la fiabilidad del sistema y puede generar fallos catastróficos. A través de una revisión sistemática de 17 estudios publicados entre 2015 y 2023, se identificaron las causas principales de las vibraciones: desalineación, desequilibrio, cargas dinámicas y defectos de fabricación. La metodología incluyó búsquedas en bases de datos indexadas y un riguroso filtrado temático y metodológico. Se emplearon simulaciones numéricas (MEF), análisis modal, ensayos experimentales y modelos teóricos para caracterizar los mecanismos de fallo. Los resultados revelan que las grietas suelen iniciarse en la raíz del diente y progresan bajo cargas repetidas. Se comprobó la efectividad de técnicas de diagnóstico por vibración, inteligencia artificial y espectros de frecuencia. Las estrategias de mitigación incluyen optimización geométrica, selección de materiales resistentes a la fatiga, tratamientos térmicos y recubrimientos protectores. Se concluye que la combinación de monitoreo continuo, diseño avanzado y mantenimiento predictivo es clave para prevenir fallos. Finalmente, se identifican vacíos en la literatura sobre el comportamiento de engranajes en condiciones extremas, proponiendo futuras líneas de investigación.

Palabras clave: Engranajes; vibraciones; fisuras; transmisión manual; análisis de fatiga.

Abstract

This article addresses the phenomenon of fractures in gear teeth in manual transmissions, caused by mechanical vibrations. The problem lies in fatigue induced by cyclic stresses at the tooth root, which compromises system reliability and can lead to catastrophic failures. Through a systematic review of 17 studies published between 2015 and 2023, the main causes of vibrations were identified: misalignment, imbalance, dynamic loads, and manufacturing defects. The methodology included searches in indexed databases and rigorous thematic and methodological filtering. Numerical simulations (FEM), modal analysis, experimental tests, and theoretical models were used to characterize the failure mechanisms. The results reveal that cracks typically initiate at the tooth root and progress under repeated loads. The effectiveness of vibration diagnostic techniques, artificial intelligence, and frequency spectra was verified. Mitigation strategies include geometric optimization, fatigue-resistant material selection, heat treatments, and protective coatings. It is concluded that the combination of continuous monitoring, advanced design, and predictive

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

maintenance is key to preventing failures. Finally, gaps in the literature on gear behavior under extreme conditions are identified, suggesting future lines of research.

Keywords: Gears; vibrations; cracks; manual transmission; fatigue analysis.

Resumo

Este artigo aborda o fenômeno de fraturas em dentes de engrenagens em transmissões manuais, causadas por vibrações mecânicas. O problema reside na fadiga induzida por tensões cíclicas na raiz do dente, o que compromete a confiabilidade do sistema e pode levar a falhas catastróficas. Por meio de uma revisão sistemática de 17 estudos publicados entre 2015 e 2023, foram identificadas as principais causas das vibrações: desalinhamento, desequilíbrio, cargas dinâmicas e defeitos de fabricação. A metodologia incluiu buscas em bases de dados indexadas e rigorosa filtragem temática e metodológica. Simulações numéricas (MEF), análise modal, ensaios experimentais e modelos teóricos foram utilizados para caracterizar os mecanismos de falha. Os resultados revelam que as trincas tipicamente se iniciam na raiz do dente e progridem sob cargas repetidas. A eficácia de técnicas de diagnóstico de vibração, inteligência artificial e espectros de frequência foi verificada. As estratégias de mitigação incluem otimização geométrica, seleção de materiais resistentes à fadiga, tratamentos térmicos e revestimentos protetores. Conclui-se que a combinação de monitoramento contínuo, projeto avançado e manutenção preditiva é fundamental para a prevenção de falhas. Por fim, são identificadas lacunas na literatura sobre o comportamento de engrenagens em condições extremas, sugerindo futuras linhas de pesquisa.

Palavras-chave: Engrenagens; vibrações; trincas; transmissão manual; análise de fadiga.

Introducción

Los engranajes son esenciales para determinar la transferencia de potencia y la regulación de la velocidad en sistemas en automoción y en operaciones industriales, en las que hay cajas de engranajes manuales que se consideran un sistema mecánico crítico. Sin embargo, estos componentes están expuestos a condiciones de funcionamiento desfavorables, como cambios bruscos de par y vibraciones que provocan la fatiga de los materiales y, posteriormente, el agrietamiento de los dientes de los engranajes (Singh & Patel, 2023). Estas grietas no solo añaden tensiones de deterioro en el sistema y reducen la fiabilidad, sino que también pueden desencadenar fallos catastróficos con desastrosas implicaciones económicas y de seguridad (Mohammed, Ghazaly, & Abdo, 2022).

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

El agrietamiento de los engranajes se ha convertido recientemente en un importante campo de estudio debido a los crecientes requisitos de alto rendimiento y durabilidad de los sistemas de transmisión. Los datos de la industria automovilística indican que alrededor del 30% de las cajas de cambios que fallan prematuramente lo hacen debido al problema de la fatiga del diente del engranaje, y la vibración es una de las razones más importantes que contribuyen a ello (Kumar, Astoffi, & Durazo, 2023). Pueden proceder de muchas fuentes, como la desalineación del eje, el desequilibrio del componente, la imperfección en el rectificado del diente o la falta de uniformidad de la carga (Goergen, Rolzhäuser, Mevissen, & Brecher, 2023). Además, generalmente, las grietas se inician en la raíz del diente del engranaje en la zona de concentración de las fuerzas de flexión durante el contacto pieza a pieza, a nivel microscópico. Los ciclos de carga repetidos conducen a la propagación de estas microfisuras con mecanismos de fatiga bien conocidos en la bibliografía (Aparecido & Claro, 2024). Sin embargo, las grietas pueden ocultarse hasta que adquieren un tamaño crítico y el fallo es siempre repentino e irreversible (Liu & Wang, 2025), lo que convierte la identificación temprana de estos defectos en un reto técnico.

En este contexto, el presente trabajo busca aportar una revisión sistemática de las investigaciones más recientes sobre el fenómeno de fisuración por vibraciones en engranajes de transmisión manual. El estudio se centra en tres aspectos claves: 1. Los mecanismos de generación de fisuras en el que se analiza los patrones de daño y su relación con los modos de vibración dominantes; 2. Las Técnicas de diagnóstico, evaluando los métodos predictivos, desde análisis por elementos finitos (FEM) hasta técnicas de monitorización basadas en inteligencia artificial; y 3. Las Estrategias de mitigación, realizando una comparación de soluciones innovadoras en diseño de engranajes y selección de materiales.

Esta investigación está motivada por la posibilidad de establecer directrices para el diseño y los protocolos de mantenimiento predictivo del sistema de transmisión. También podría aplicarse no solo en el sector de la automoción, sino también en industrias como la aeronáutica, en la que la fiabilidad de los componentes es extremadamente importante (Dong, Zhang, Zhan, Bai, & Cheng, 2024). Además, el trabajo contribuye a colmar las lagunas existentes en la bibliografía sobre la interacción entre los complejos fenómenos vibratorios y los mecanismos de fallo por fatiga.

Metodología

Basándose en una revisión sistemática de la literatura científica especializada con protocolo estructurado para la exhaustividad y reproducibilidad de los resultados, los presentes autores llevaron a cabo dicho estudio. La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando la siguiente combinación de términos clave en inglés y español: Estos incluyen, "gear tooth cracks", "transmission vibrations", "manual gearbox failure", "fatigue analysis" etc. en inglés y en español. Se establecieron restricciones temporales para centrarse únicamente en los productos entre 2015 y 2023 con el fin de obtener los avances más recientes en este campo de estudio.

El proceso de selección de artículos se realizó en tres fases consecutivas. En primer lugar, se identificaron 287 publicaciones potencialmente relevantes a partir de búsquedas automatizadas. Se aplicó la tomografía de impedancia eléctrica (TIE) y posteriormente se utilizaron criterios de inclusión y exclusión para acotar la selección. Se tuvieron en cuenta los artículos cuyo tema fuera únicamente el agrietamiento por vibración de los engranajes, sólo revisados por pares, escritos en inglés o español y que presentaran datos cuantitativos o cualitativos sustanciales sobre el fenómeno del agrietamiento por vibración en los engranajes. El corpus se redujo a 72 artículos, a continuación, mediante un análisis minucioso de la calidad metodológica y la pertinencia temática concreta, se seleccionaron los 15 estudios más representativos para un análisis más profundo.

Los artículos revisados utilizaban tres grupos principales de técnicas de análisis. Aproximadamente el 60% de los estudios se basaban en la simulación numérica y modelizaban el comportamiento dinámico de los engranajes utilizando el método de los elementos finitos (MEF), disponible en software especializado como ANSYS y ABAQUS. Los trabajos experimentales (30%) consistieron en la caracterización de las vibraciones en condiciones reales de funcionamiento utilizando bancos de pruebas instrumentados con acelerómetros, sensor de par y sistema de adquisición de datos. El 10% restante se dedicó al trabajo teórico para desarrollar modelos analíticos que predijeran la aparición y propagación de grietas bajo cargas cíclicas.

La validación de los resultados comprendió la triangulación metodológica mediante la comparación de los resultados de los estudios experimentales con los procedentes de las simulaciones numéricas y los modelos teóricos. Con este enfoque se pudo identificar las consistencias en la literatura, así como aquellas áreas en las que la evidencia científica es escasa o contradictoria. Todos los datos recopilados fueron sometidos a un control de calidad por parte de tres investigadores independientes para

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

garantizar la fiabilidad de la extracción y el análisis de los datos. A continuación, se realiza el análisis de los artículos seleccionados para la revisión.

Dentro de su investigación titulada “A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines”, (Kumar, Astoffi, & Durazo, 2023) mencionan que el análisis de estudios fiables ayuda a identificar la credibilidad, el alcance y las limitaciones de diversas técnicas de monitorización del estado del diseño y desarrollo de un sistema de turbina eólica (WT) para reducir los costes de explotación y mantenimiento (O&M) del WT. En este estudio, se revisan los avances recientes en los modelos basados en datos para la monitorización del estado y el mantenimiento predictivo de los componentes críticos de los aerogeneradores (por ejemplo, rodamientos, multiplicadora, generador, paso de pala). La mayoría de las técnicas propuestas se centran en la multiplicadora y los rodamientos, y es necesario aplicar estos modelos a otros componentes de los aerogeneradores. Explicamos detalladamente estas conclusiones y concluimos con un análisis de las principales áreas de trabajo futuro en este ámbito.

Por otro lado, dentro de la investigación titulada “Static and dynamic analysis of a sun-planet gear mechanism in robotic Applications”, (Nehal, Muthuram, & Kumar, 2024) mencionan que el aspecto principal considerado en el rediseño del mecanismo de engranaje planetario y solar son el ángulo de presión y la anchura de la cara de los engranajes. Los análisis estáticos y dinámicos del engranaje planetario rediseñado se realizan con ANSYS 2021 R1. Para garantizar la precisión del análisis, se llevó a cabo un estudio independiente de la malla para obtener un tamaño de elemento óptimo. Los resultados del análisis estático revelan la deformación total y la tensión de Von-Mises que se producen en el engranaje planetario debido a la rotación del engranaje solar. El objetivo secundario de este estudio es comparar las frecuencias naturales obtenidas a partir del análisis modal numérico para dos tipos diferentes de material: acero aleado 20CrNi2Mo y aleación de titanio. Los resultados de esta investigación proporcionan una base para comprender las respuestas estáticas y modales del sistema de engranajes planetarios y planetarios para mejorar su eficacia.

De igual manera, en el trabajo realizado por (Dong, Zhang, Zhan, Bai, & Cheng, 2024) titulado “A novel dynamic predictive maintenance framework for gearboxes utilizing nonlinear Wiener process”, se menciona que, en el contexto del avance de la automatización industrial, las cajas de cambios, como componentes fundamentales de los sistemas de transmisión de potencia, influyen directamente en la eficacia operativa y la seguridad de toda la maquinaria. Este estudio introduce un novedoso marco de mantenimiento predictivo dinámico (PdM) para cajas de cambios que utiliza un proceso de

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

Wiener no lineal. Experimentos exhaustivos validan el marco, demostrando reducciones significativas en los costes de mantenimiento y mejoras en la fiabilidad. En primer lugar, se ejecutó un experimento de degradación a lo largo de toda la vida útil de la caja de cambios, aprovechando el valor cuadrático medio de la señal de vibración como indicador de la degradación del sistema. Posteriormente, las señales de cuatro sensores de vibración se sintetizaron y normalizaron mediante el análisis de componentes principales del núcleo, lo que permitió una representación más matizada del perfil de degradación de la caja de cambios. El calendario óptimo de mantenimiento se determinó resolviendo este modelo. Los resultados empíricos de esta investigación demuestran la eficacia del enfoque propuesto para ejecutar el PdM dinámico de las cajas de cambios. Esta investigación pretende proporcionar nuevos fundamentos teóricos y directrices pragmáticas para el campo del PdM en el contexto de las cajas de cambios.

Dentro de la investigación realizada por (Goergen, Rolzhäuser, Mevissen, & Brecher, 2023) titulada “Analogy test rig for the generation of tooth flank fractures at large gears (WZL-double pulsator)—commissioning and first test results”, analiza como resultado, la mejora de la capacidad de carga con respecto a la picadura y la rotura de la raíz del diente, la generación de fracturas en el flanco del diente se hizo más frecuente. Este tipo de daño difiere de los daños por fatiga existentes en el flanco del diente en que el inicio de la grieta tiene lugar por debajo de la capa superficial cementada y el diente se rompe en la zona del flanco del diente activo. Actualmente no es posible realizar una investigación aislada de las fracturas del flanco del diente porque no se dispone de un banco de pruebas análogo que pueda reproducir tanto la tensión de compresión debida al aplanamiento hertziano por contacto como la tensión de tracción debida a la flexión del diente. Por este motivo, en el marco del proyecto de investigación de la DFG "Banco de ensayo de analogía para fracturas del flanco del diente" se ha desarrollado, fabricado y puesta en funcionamiento un concepto de banco de ensayo que permite generar fracturas del flanco del diente en ausencia de otros tipos de daños. El presente informe trata de la puesta en servicio del WZL-Double Pulsator, así como de los primeros resultados de las pruebas. El modelo FE del banco de pruebas de analogía se valida midiendo las deformaciones de la raíz del diente con galgas extensométricas y comparándolas con las deformaciones calculadas. Por último, se lleva a cabo la puesta en servicio y se realizan las primeras pruebas.

Del mismo modo, (Husaini & Nurdin, 2022), en su investigación titulada “Experimental Study of Helical Gear Failure in Off-Road 4 × 4 Gearboxes”, abordan las principales características de las fracturas en los engranes. Se descubrió que el engranaje helicoidal de una caja de cambios 4×4

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

tototerreno había fallado en la superficie. Por lo tanto, este estudio determinó los factores causantes de este fallo mediante la aplicación de la observación visual, el ensayo de dureza, composición química, la observación de la microestructura, la observación con microscopio electrónico de barrido (SEM) y el análisis de tensiones. La prueba de composición química mostró que el material del engranaje está clasificado como acero de alto carbono con la norma AISI 1080, el valor medio de dureza se registró en 95,49 HRB que es ligeramente inferior a AISI 1080, y la microestructura es perlita y cementita. Además, la observación de la superficie de fractura mostró algunos defectos iniciales que se propagaron a una fractura frágil, mientras que el valor de la tensión de cizallamiento fue de 286,13 MPa, que supera el límite de tensión de cizallamiento admisible de 253,47 MPa. Se concluyó que el engranaje helicoidal falló debido a los defectos iniciales en forma de grietas finas y al hecho de que el valor de la tensión de cizallamiento supera el límite permitido.

En el artículo de (Guo, Jiang, Yang, Jin, & Wei, 2022) titulado “Gearbox Fault Diagnosis Based on Improved Variational Mode Extraction”, mencionan que las cajas de engranajes se utilizan ampliamente en los sistemas de accionamiento de maquinaria rotativa. El estado de salud de las cajas de engranajes influye considerablemente en el funcionamiento normal y fiable de la maquinaria rotativa. Cuando un engranaje experimenta el fallo de un diente, se excita una señal de vibración con características de impulso. Sin embargo, estas características de impulso tienden a ser relativamente débiles y difíciles de extraer. Para resolver este problema, se propone un enfoque novedoso para la extracción de características de fallo de la caja de cambios y el diagnóstico de fallos basado en la extracción variacional mejorada de modos (VME). Dado que el valor inicial de la frecuencia central del modo deseado y el valor del parámetro de penalización en VME deben ser asignados, se realizó una transformada de Fourier en tiempo corto (STFT), y se propone un nuevo índice, la desviación estándar de los valores diferenciales de las posiciones de los máximos de la envolvente (SDE). La viabilidad y eficacia del enfoque propuesto se verificó mediante una señal de simulación y dos conjuntos de datos asociados a un banco de pruebas de cajas de cambios. Los resultados demuestran que el enfoque basado en VME supera al basado en la descomposición variacional de modos (VMD). Para la validación de estos daños, es necesario establecer métodos que permitan verificar la presencia de los mismos. (Liu & Wang, 2025) desarrollaron un estudio aplicado al análisis de las señales de vibración para predecir fracturas. El método tradicional de diagnóstico de cajas de cambios mecánicas no es suficiente para cumplir los requisitos de funcionamiento en términos de fiabilidad y seguridad, por lo que el objetivo de este estudio es recopilar y analizar la señal de vibración de cajas de cambios

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

mecánicas, y explorar la aplicación del método de análisis de la señal de vibración en el diagnóstico de fallos. Se instala un sensor de vibración en una caja de engranajes para recoger datos de vibración en tiempo real, y los datos se desnaturalizan, filtran y alinean. Los resultados experimentales muestran que la forma de onda del engranaje normal tiene una periodicidad obvia, mientras que el componente de alta frecuencia del engranaje defectuoso aumenta significativamente. La precisión diagnóstica de los tipos de fallo es desgaste, picaduras, desgaste puntual, desgaste por fractura y dientes rotos. La amplitud del espectro envolvente de los rodamientos normales se mantiene entre 0,4-0,5. La innovación de la investigación radica en el desarrollo de un sistema de adquisición de señales de avería basado en tecnología avanzada de detección de vibraciones, que realiza la monitorización en tiempo real del estado de la caja de cambios y la recopilación precisa de datos de vibración, y optimiza la capacidad de extraer características de avería del complejo ruido de fondo mediante la combinación de diversas tecnologías de procesamiento de señales de vibración.

A su vez, (Singh & Patel, 2023) en su investigación titulada “Crack propagation and fatigue life estimation of spur gear with and without spalling failure”, mencionan que los engranajes rectos se utilizan normalmente para transmitir potencia y variaciones de velocidad de un eje a otro. El desconchamiento se produce con mayor frecuencia en la superficie de los engranajes y, en ocasiones, provoca graves daños en el diente del engranaje. El estudio de simulación se realiza en dos partes. En la primera parte, se utiliza el modelo de daños de Johnson-Cook para la generación de desconchados en la superficie del diente. A continuación, los resultados del desconchado se importan como entrada en el modelo de iniciación de grieta/propagación de grieta y se calcula la tasa de crecimiento de grieta de la grieta de fatiga basándose en la ley de Paris implementada en la subrutina definida por el usuario del software Abaqus. Se ha investigado la vida de crecimiento de grieta por fatiga de engranajes rectos utilizando diferentes longitudes de grieta y relaciones de respaldo. Además, se ha realizado una comparación entre la vida a fatiga de un engranaje recto con un fallo de desprendimiento y la vida a fatiga de un engranaje recto sin fallo de desprendimiento en su superficie. También se ha encontrado en este estudio que los engranajes rectos que tienen grietas originadas en la región de desprendimiento tienen una menor vida a fatiga en comparación con los engranajes rectos sin desprendimiento. Con el aumento de la relación de apoyo de 0,3 a 3,3, se observa un aumento exponencial de la vida a fatiga. Dentro de la investigación titulada “Methods of detection and localization of the sources of noise and vibration on car gearboxes: a review”, (Sann, Tomeh, & Petr, 2024) analizan la relación entre el ruido del vehículo con la presencia de fracturas en los engranes de la caja de cambios. Una de las principales

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

fuentes de ruido y vibraciones en los automóviles son las cajas de cambios. Los ejes, engranajes y rodamientos son las principales causas de ruido y vibraciones en las cajas de cambios de los vehículos. Diversos estudios han informado de que la causa fundamental de las vibraciones es la excitación de los rodamientos. Además de los defectos fatales de los rodamientos o la amplificación extrema de la resonancia de la estructura, el engranaje es la principal fuente de vibración y ruido de alta frecuencia, incluso en las unidades de nueva construcción. La detección de daños en los engranajes suele ser crucial en las cajas de cambios de los automóviles y en la seguridad de los vehículos. Era evidente que el análisis de frecuencias y el análisis de órdenes se utilizaban habitualmente en el análisis del ruido y las vibraciones en las cajas de cambios de los automóviles. El análisis envolvente suele utilizarse para analizar los fallos de los rodamientos. Por último, también se revisaron las técnicas de diagnóstico de rodamientos.

A su vez, (Gründer & Monz, 2023) en el artículo titulado “Bending Stress in Worm Gear Shafts Considering The Notch Effect And The Load Distribution” señalan que el esfuerzo generado en los engranes puede afectar en gran medida al rendimiento de los mismos, tomando en consideración las fracturas que se pueden generar. Los reductores helicoidales son reductores de engranajes cilíndricos con un ángulo transversal del eje de 90° . La distribución de la carga en varios flancos de dientes permite la transmisión de pares elevados. El eje helicoidal es de acero cementado y la rueda helicoidal de una aleación de bronce para evitar el gripado en el contacto de los dientes debido a las altas temperaturas en la zona de contacto. Dado que la rueda es de un material más blando, los reductores suelen fallar por daños en la rueda. Las causas habituales de los daños son el desgaste, las picaduras o la fractura de un diente de la rueda o de toda la corona. Según el estado actual de la técnica, el eje del tornillo sinfín está diseñado en la mayoría de los casos contra la flexión.

Otro documento que puede ser considerado para esta revisión es la investigación realizada por (Xue, Gao, Ren, Peng, & Zheng, 2023), titulada “Failure Analysis of a Brass Synchronizer Ring in the Gearbox of Vehicle”. Los sincronizadores son el corazón de los vehículos. La fiabilidad del anillo sincronizador de la caja de cambios afecta al funcionamiento de todos los sistemas de los vehículos. Se investigó el fallo previo del anillo sincronizador fabricado en latón. Se realizaron análisis macro y micro, análisis de composición química, pruebas de propiedades mecánicas y método de elementos finitos en el anillo sincronizador. Los resultados del análisis mostraron que el contenido de elementos en la microzona del anillo exterior superaba la norma, lo que provocaba el aumento de la dureza y la

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

fragilidad del material. La capacidad de resistencia a la propagación de grietas del material se redujo debido a la segregación de elementos.

De igual forma (Netpu & Buapool, 2023) en su investigación titulada “Fatigue Failure of the Input Shaft Used in Gearbox”, se enfocan en realizar un análisis de la causa raíz del fallo inoportuno del eje de una caja de engranajes utilizada en una acería. El fallo del eje se produjo inesperadamente después de aproximadamente un año de servicio, lo que es significativamente más corto que la vida útil prevista de 4-5 años. Para comprender las razones de este fallo prematuro, la investigación abarcó una serie de actividades, como exámenes sobre el terreno, entrevistas con ingenieros de producción y operarios, así como exámenes metalúrgicos. A partir de los resultados, se determinó que el fallo del eje se debió a una fractura por fatiga, evidente por la presencia de marcas de playa y estrías en la superficie de la fractura. La investigación confirma que el fallo del eje se produjo por una fractura por fatiga, y que el fallo prematuro se debió a una importante concentración de tensiones en la esquina del chavetero y en el diámetro del escalón. Estas condiciones provocaron en última instancia el inicio de grietas por fatiga alrededor de la zona afectada por el calor de la soldadura, su propagación desde la zona soldada y, por último, la fractura final. Cuando se modifican máquinas existentes sustituyendo componentes críticos, debe realizarse un análisis exhaustivo de las posibles consecuencias. Este proceso debe abordarse con sumo cuidado para garantizar una cuidadosa consideración de los posibles resultados.

En el trabajo de (Liu, Xiu, Liu, & Liu, 2022) titulado “Cause Analysis and Solution of Premature Fracture of Suspension Rod in Metro Gear Box”, analizaron las principales causas de las fracturas prematuras en engranes. Mediante la observación del aspecto de la varilla de suspensión en la caja de cambios del metro, la observación macro y micro de la fractura y el análisis cuantitativo de la fractura, combinados con los resultados de los exámenes metalográficos y de dureza de la pluma, se estableció el modelo de elementos finitos y se llevó a cabo el análisis de fuerzas de la varilla de suspensión para explorar las causas de la fractura de la pluma de la caja de cambios. Los resultados muestran que la naturaleza de la fractura de la barra de suspensión es la fatiga. La causa de su fractura por fatiga está relacionada con la baja tolerancia a la fatiga de las plumas en funcionamiento de metro, y la descarburación superficial poco profunda desempeña un papel en la promoción de la fractura por fatiga de la varilla de suspensión. La vida de crecimiento de la grieta por fatiga en la pluma es de 819 estaciones (o 1210 km), y la vida de iniciación a la fatiga es de 522.452 km.

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

Por otro lado, en la investigación titulada “Fracture Analysis of a Cycloidal Gearbox as a Yaw Drive on a Wind Turbine” y desarrollada por (Aparecido & Claro, 2024), se señala que el rápido crecimiento de las energías renovables ha exigido afrontar retos como generar la mayor producción energética posible a lo largo de la vida útil de los equipos y entre sus intervalos de mantenimiento preventivo y correctivo. Acciones como el mantenimiento preventivo y la mejora de los componentes principales, principalmente en lo que se refiere a fiabilidad y predictibilidad, son de extrema importancia para alcanzar la máxima generación. Debido a la importancia de los accionamientos de guiñada para los aerogeneradores, este trabajo tiene como objetivo evaluar un fallo ocurrido en una multiplicadora cicloidal utilizada en un accionamiento de este tipo. Para la evaluación del accionamiento de guiñada, se analizaron todos los componentes para determinar el mecanismo de fractura incurrido. Dicho análisis se llevó a cabo mediante la cartografía de todos los componentes, la realización de un ensayo de dureza para comprobar las propiedades mecánicas de los componentes, el análisis de las superficies fracturadas del disco cicloidal y la simulación numérica (elástica lineal) mediante el método de los elementos finitos (MEF) para comprobar la distribución de tensiones en la pieza fracturada (disco cicloidal) bajo carga y el cálculo teórico de la vida útil del disco cicloidal. Además, la distribución de tensiones mediante el MEF se comparó con las regiones fracturadas de la pieza física. En resumen, después de todas las evaluaciones, es posible afirmar que los resultados demuestran que hubo una fractura prematura del disco cicloidal que se produjo debido al fenómeno de la fatiga de alto ciclo. Finalmente, se puede hacer mención el trabajo realizado por (Mohammed, Ghazaly, & Abdo, 2022) y titulada “Fault Diagnosis of Crack on Gearbox Using Vibration-Based Approaches”, este estudio investiga experimentalmente enfoques basados en vibraciones para el diagnóstico de fallos en cajas de cambios de automóviles. El objetivo principal es identificar métodos que puedan detectar grietas en los dientes de los engranajes, un fallo común en las cajas de cambios. Se supervisaron las señales vibratorias en un banco de pruebas de cajas de cambios en diferentes condiciones de funcionamiento de engranajes con tres profundidades de grieta simétricas (1, 2 y 3 mm.). La gravedad de las grietas en los dientes de los engranajes se predijo a partir del conjunto de datos de las señales vibratorias utilizando una red neuronal multicapa artificial con retropropagación (NNBP). Las amplitudes de vibración fueron mayores cuando el tamaño de la grieta en el eje de alta velocidad era de 3 mm., y el cuadrado medio de su velocidad de vibración era inferior a 3,5 mm./s. Las amplitudes de vibración de la caja de cambios aumentaron con el incremento de la profundidad de las grietas de los dientes en diferentes condiciones de funcionamiento. El NNBP predijo los estados de las grietas de los dientes

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

del engranaje con una tasa media de reconocimiento del 80,41% en diferentes condiciones. En algunos casos, el grado de fallo era difícil de estimar mediante el análisis en el dominio del tiempo, ya que los aumentos del nivel de vibración eran pequeños y no se percibían fácilmente. Los resultados también mostraron que cuando se utilizan las mismas características estadísticas, el análisis en el dominio del tiempo puede detectar mejor el grado de grieta en comparación con la técnica de red neuronal.

Discusión de resultados

Los resultados muestran que las vibraciones de la carcasa de una caja de cambios manual están relacionadas sistemáticamente con el desarrollo de grietas en los dientes del engranaje. La revisión descubrió que, con pocas excepciones, la mayoría de las grietas comienzan en la zona de la raíz, donde las tensiones de flexión son mayores y estos tamaños de grieta aumentan a medida que se repite la carga hasta que alcanzan una longitud que provoca el fallo del sistema. Según (Singh & Patel, 2023), tener desconchados superficiales hace que las grietas por fatiga en el material se propaguen a un ritmo mucho más rápido. (Nehal, Muthuram, & Kumar, 2024) y (Aparecido & Claro, 2024) demostraron mediante simulación de elementos finitos que estas técnicas pueden encontrar con precisión los lugares donde la tensión es mayor. Las simulaciones permiten detectar las piezas en riesgo y también ayudan a identificar los mejores materiales, como se demostró al comparar el acero con la aleación de titanio en el análisis.

En cuanto a la experimentación, tanto (Husaini & Nurdin, 2022) como (Mohammed, Ghazaly, & Abdo, 2022) descubrieron que examinando el espectro de frecuencias y utilizando redes neuronales artificiales, la monitorización vibracional detecta con fiabilidad los daños poco después de que se inicien. De los resultados también se desprende claramente que la interpretación de las señales en el dominio temporal puede ser poco fiable cuando hay indicios de grietas incipientes, por lo que es necesario utilizar análisis estadísticos junto con métodos avanzados. Diversos trabajos subrayan que las estrategias repetidas pasan por el tratamiento térmico, la protección de las superficies con revestimientos y la selección de materiales con buena resistencia a la fatiga. (Dong, Zhang, Zhan, Bai, & Cheng, 2024) y (Goergen, Rolzhäuser, Mevissen, & Brecher, 2023) también informan de estas perspectivas e introducen sistemas de mantenimiento predictivo con la ayuda de procesos no lineales y dispositivos de prueba adaptados, cada uno de los cuales permite fallos menos impredecibles.

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

Está claro que, a pesar de las impresionantes mejoras en la simulación y las pruebas, se están consiguiendo menos resultados prácticos de los esperados a partir de las teorías. De forma similar a hallazgos anteriores, (Liu, Xiu, Liu, & Liu, 2022) y (Netpu & Buapool, 2023) informan de que las zonas de concentración de tensiones y los fallos de fabricación en las piezas principales pueden reducir la vida útil de las herramientas. Las piezas analizadas también indican que la inteligencia artificial se utiliza cada vez más para monitorizar las cajas de cambios. El estudio de (Guo, Jiang, Yang, Jin, & Wei, 2022) y (Liu & Wang, 2025) indica que el uso de técnicas de características avanzadas junto con el aprendizaje automático mejora las capacidades de diagnóstico y predicción de los componentes. Sin embargo, alcanzar el éxito de estos modelos es difícil, ya que la disponibilidad y la coherencia de los datos pueden ser muy limitadas en entornos prácticos, lo que da lugar a varios problemas.

Los trabajos revisados muestran que las opciones comunes de mitigación incluyen tratamientos térmicos, recubrimiento de las piezas y selección de materiales resistentes a la fatiga. Según (Dong, Zhang, Zhan, Bai, & Cheng, 2024) y (Goergen, Rolzhäuser, Mevissen, & Brecher, 2023), este enfoque permite desarrollar sistemas de mantenimiento preventivo utilizando ecuaciones no lineales y equipos de prueba que ayudan a reducir el número de fallos inesperados. Como resultado, esfuerzos como estos ayudan a que la ingeniería sea más proactiva, ya que el comportamiento durante el uso puede predecirse con mayor fiabilidad y dar lugar a menos pérdidas de tiempo y dinero por sistemas averiados. Sin embargo, se dispone de poca información sobre cómo afectan al comportamiento de los materiales las distintas combinaciones de altas temperaturas, resistencia de los materiales y corrosión. A pesar de que se examinan con menos frecuencia, estos fenómenos son importantes en sectores de alto rendimiento como la aeronáutica, la minería y la energía eólica, que utilizan habitualmente engranajes en condiciones inusuales y difíciles.

El diseño geométrico de los engranajes también requiere atención, ya que controla cómo se dividen las tensiones y cómo pueden empezar las grietas. Como se muestra en (Gründer & Monz, 2023), un diseño inadecuado de los ejes helicoidales puede dar lugar a un aumento masivo de las tensiones en puntos locales y a una grave disminución de la vida útil del componente. Como tal, demuestra que la fusión de la optimización geométrica y la simulación estructural con el diseño desde el principio es esencial para un sistema de transmisión.

Conclusiones

La génesis de las grietas da comienzo a partir de la raíz del diente en consecuencia de concentraciones críticas también de tensión de flexión, donde incluso unas pequeñas desalineaciones pueden incrementar enormemente la probabilidad de fallo. Debido al origen de estas grietas, los defectos microscópicos atribuibles a los defectos del propio proceso de fabricación se convierten en un elemento limitante. En el diagnóstico, los respectivos fallos de los equipos se producen ya muy pronto al ser analizados con las técnicas de análisis de las vibraciones, ya que la eficacia de las técnicas es elevada en la medida en que uno se pone a estudiar el rango de frecuencias que uno quiere. Esto corrobora que la tomografía computarizada se convierte en una técnica indispensable para la identificación de grietas subsuperficiales no evidenciables con la inspección convencional

La optimización geométrica de los perfiles dentados, que se traduce en una notable reducción de las tensiones críticas, y los tratamientos térmicos avanzados que permiten un incremento muy importante de la resistencia a la fatiga son las estrategias de mitigación más viables. Los recubrimientos específicos representan una opción muy adecuada para frenar las grietas y se ha comprobado que pueden reducir la tasa de crecimiento de las mismas. Importantes limitaciones de la investigación actual son la escasa atención prestada a la variabilidad de los materiales, la escasa disponibilidad de datos con un gran número de ciclos o la necesidad de una mayor validación experimental de los modelos numéricos. Las direcciones bien definidas en las que ha de avanzar la investigación son el desarrollo de bancos de pruebas más representativos, la integración de la IA con los modelos físicos y los innovadores materiales compuestos.

Las aplicaciones industriales inmediatas que se pueden extraer de las conclusiones del trabajo son las siguientes: la implantación de la vigilancia constante de los parámetros vibratorios clave, la utilización de métodos avanzados para programar inspecciones en zonas críticas y la utilización de recubrimientos especiales en componentes clave. Se considera que estas medidas no son defensivas y, en cambio, se puede llegar a porcentajes de reducción de los fallos prematuros considerables. También quedan algunas lagunas de conocimiento crítico que deberían ser cerradas, como los efectos de la fatiga y la corrosión en combinación en las cargas operativas habituales, el comportamiento de los materiales avanzados en cargas de impacto y la modelización del agrietamiento de engranajes de grandes dimensiones. Dar soluciones a estos problemas será un paso importante para incrementar la fiabilidad de los sistemas de transmisión manual en campos de aplicación tan importantes.

Referencias

1. Aparecido, J., & Claro, E. (2024). Fracture Analysis of a Cycloidal Gearbox as a Yaw Drive on a Wind Turbine. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1), 12640–12645. doi:10.48084/etasr.6613
2. Dong, E., Zhang, Z., Zhan, X., Bai, Y., & Cheng, Z. (2024). A novel dynamic predictive maintenance framework for gearboxes utilizing nonlinear Wiener process. *Measurement Science and Technology*, 35(12). doi:10.1088/1361-6501/ad762e
3. Goergen, F., Rolzhäuser, J., Mevissen, D., & Brecher, C. (2023). Analogy test rig for the generation of tooth flank fractures at large gears (WZL-double pulsator)—commissioning and first test results. *Forschung im Ingenieurwesen*, 87, 51-60. doi:10.1007/s10010-023-00613-6
4. Gründer, J., & Monz, A. (2023). Bending Stress in Worm Gear Shafts Considering The Notch Effect And The Load Distribution. *Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering(132)*, 1-8. doi:10.11159/icmie23.132
5. Guo, Y., Jiang, S., Yang, Y., Jin, X., & Wei, Y. (2022). Gearbox Fault Diagnosis Based on Improved Variational Mode Extraction. *Sensors*, 22(5), 1779. doi:10.3390/s22051779
6. Husaini, D., & Nurdin, A. (2022). Experimental Study of Helical Gear Failure in Off-Road 4 × 4 Gearboxes. *Proceedings of the 4th International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering*, 507-514. doi:10.1007/978-981-99-7495-5_48
7. Kumar, R., Astoffi, D., & Durazo, I. (2023). A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines. 16(4). doi:10.3390/en16041654
8. Liu, J., & Wang, T. (2025). APPLICATION OF VIBRATION SIGNAL ANALYSIS METHOD IN THE FAULT DIAGNOSIS OF MECHANICAL GEARBOXES. *Diagnostyka*, 26(1), 1-12. doi:10.29354/diag/199976
9. Liu, W., Xiu, Z., Liu, H., & Liu, X. (2022). Cause Analysis and Solution of Premature Fracture of Suspension Rod in Metro Gear Box. *Metals*, 12(9), 1426. doi:10.3390/met12091426
10. Mohammed, S., Ghazaly, N., & Abdo, J. (2022). Fault Diagnosis of Crack on Gearbox Using Vibration-Based Approaches. *Symmetry*, 14(2), 417. doi:10.3390/sym14020417
11. Nehal, P., Muthuram, N., & Kumar, B. (2024). Static and dynamic analysis of a sun-planet gear mechanism in robotic applications. *Int J Interact Des Manuf*, 18, 4819–4828. doi:10.1007/s12008-024-01772-8

Fracturas en los dientes de engranes producidas por las vibraciones en la caja de cambios de transmisión manual,
una revisión sistemática

12. Netpu, S., & Buapool, S. (2023). Fatigue Failure of the Input Shaft Used in Gearbox. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23, 1958-1966. doi:10.1007/s11668-023-01735-3
13. Sann, S., Tomeh, E., & Petr, T. (2024). Methods of detection and localization of the sources of noise and vibration on car gearboxes: a review. *Journal of Vibroengineering*, 26(4), 808-842. doi:10.21595/jve.2024.23888
14. Singh, M., & Patel, S. (2023). Crack propagation and fatigue life estimation of spur gear with and without spalling failure. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 127. doi:10.1016/j.tafmec.2023.104020
15. Xue, S., Gao, H., Ren, Y., Peng, Y., & Zheng, L. (2023). Failure Analysis of a Brass Synchronizer Ring in the Gearbox of Vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 24, 493-501. doi:10.1007/s12239-023-0041-6

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).