UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Optimización de Costos de Mantenimiento mediante el Rediseño de la Guía de Embrague en Tractomulas DAF

Joseph Jair Martínez Eraso

Informe de semestre de industria para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica
Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Asesores

Interno: Sergio Cipriano Agudelo Flórez, PhD. – Ingeniero Mecánico
Externo: Julián Duque Arbeláez, Ingeniero Mecánico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	(Martínez Eraso, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Martínez Eraso, J.J. (2025). *Optimización de Costos de Mantenimiento Mediante el Rediseño de la Guía de Embrague en Tractomulas DAF.* [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico, en primer lugar, a mis padres, quienes han sido mi guía y sendero en todo mi proceso de aprendizaje desde que tengo memoria. Gracias a su esfuerzo, dedicación y amor incondicional he podido alcanzar mis metas. Ellos sacrificaron tiempo y comodidades para brindarme lo mejor, y por ello estaré siempre profundamente agradecido.

De igual manera, agradezco a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para enfrentar cada reto, así como por permitirme disfrutar de una familia cálida, unida y llena de buenos deseos para mi vida.

Tabla de contenido

Resumen 9

Abstract 10

1. Introducción 11

2. Objetivos 12

2.1 Objetivo general 13

2.2 Objetivos específicos 13

3. Marco teórico 13

3.1. Sistema de Embrague en Vehículos Pesados 13

3.2. Función de la Guía del Sensor de Posición del Embrague 14

3.3. Diseño de Elementos de Máquinas Aplicado a la Guía 14

3.4. Análisis de elementos finitos en ANSYS 15

3.5. Selección y Caracterización de Materiales Poliméricos 16

3.6. Teoría del Desgaste por Contacto 17

3.7. Interpretación Práctica del Modelo 18

3.8. Proceso de Fabricación CNC 19

3.9. Mantenimiento Preventivo y Rotación de Repuestos 20

3.10. Sistema de Trazabilidad y Condición 21

4. Metodología 22

Etapa 1: Análisis funcional y contextual del sistema de embrague automatizado 22

Etapa 2: Caracterización del material de la guía 27

Etapa 3: Selección de materiales alternativos 32

Etapa 4: Análisis estructural mediante simulación FEA (ANSYS) 35

Etapa 5: Estrategia de Fabricación y Definición de Procesos CNC 38

5. Análisis de resultados 41

6. Conclusiones y recomendaciones 49

Referencias 51

Anexos 51

Lista de tablas

Tabla 1 Variables de mecanizado para la fabricación de la guía 40

Tabla 2 Resultados del experimento de desgaste de los materiales en cuestión. 45

Lista de figuras

Figura 1 Esquema general del sistema de embrague de una tractomula DAF CF480 23

Figura 2 Fotografía de la guía del sensor instalada en su posición en el actuador y esquema. 25

Figura 3 Fotografía de la guía del sensor, tomada en vista general. 27

Figura 4 Fotografía de la fractura de la pieza, donde se evidencia la textura interna del material (sin fibras visibles). 28

Figura 5 Ejemplo de componente de baquelita moldeado por inyección. 30

Figura 6 Comparación de propiedades clave en materiales poliméricos candidatos mediante CES EduPack:.....34

Figura 7 Distribución de esfuerzos en baquelita. 36

Figura 8 Distribución de esfuerzos en nylon.....37

Figura 9 Estrategia de mecanizado. 41

Figura 10 Guía mecanizada en nylon junto al actuador donde será instalada.....42

Figura 11 Probetas para utilizar en el experimento, a la izquierda Nylon y a la derecha Fenólico original. 43

Figura 12 Banco experimental para analizar el volumen de desgaste de cada material, (la flecha indica la probeta utilizada). 44

Figura 13 Pobretas después de someterse al experimento, a la izquierda Nylon y a la derecha Fenólico original. 46

Figura 14 Gráfico del porcentaje de desgaste de cada material. 47

Figura 15 Gráfico del volumen desgastado de cada material. 47

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CNC	Control Numérico Computarizado
FEA	Análisis de Elementos Finitos
CAD	Diseño Asistido por Computadora
CAM	Manufactura Asistida por Computadora
FTIR	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier
TGA	Análisis Termogravimétrico
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
ECU	Unidad Electrónica de Control
mm	Milímetros
km	Kilómetros

Resumen

El diseño exitoso de un elemento de máquina requiere un análisis detallado que permita estudiar la necesidad y definir la mejor solución técnica. Este proyecto se centra en el desarrollo de un componente mecánico para una tractomula DAF CF 480, equipada con un sistema de embrague automatizado conformado por diferentes elementos esenciales para garantizar la operación.

Dentro de este sistema, la guía del sensor del actuador de embrague es un componente crítico, ya que asegura el correcto funcionamiento entre la parte mecánica y la computadora central. El sensor transmite la posición del actuador, indicando si el embrague está acoplado o desacoplado. Sin embargo, debido al movimiento axial constante y a las cargas transmitidas por el motor, la guía se desgasta progresivamente, convirtiéndose en una pieza consumible. Dado que su reemplazo actual exige cambiar el actuador completo, con altos costos asociados, se plantea la fabricación independiente de la guía como alternativa técnica y económica.

El desarrollo inicia con la identificación de geometría, entorno y material de la pieza original. Posteriormente, se evalúan materiales alternativos con propiedades similares, manteniendo la forma inicial. Para ello, se emplean simulaciones en ANSYS Workbench, donde se analizan cargas y deformaciones, comparando el desempeño del material original frente a la alternativa mediante el modelo de Archard.

La fabricación se realiza por mecanizado CNC vertical, complementado con acabados manuales en zonas de difícil acceso. Finalmente, se planea instalar la guía fabricada en la tractomula y validarla en condiciones reales de operación, garantizando confiabilidad, reducción de costos y viabilidad para futuras rotaciones de repuestos.

Palabras clave: Diseño de elementos de máquinas, caracterización, polímeros, elementos finitos, mecanizado, variables de corte, cargas aplicadas, desgaste, fricción, modelado, simulación, optimización, rotación de repuestos, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo.

Abstract

The successful design of a machine element requires a detailed analysis that allows the needs to be assessed and the optimal technical solution to be defined. This project focuses on the development of a mechanical component for a PACCAR DAF CF 480 tractor-trailer, equipped with an automated clutch system comprised of various essential components to ensure proper operation.

Within this system, the clutch actuator sensor guide is a critical component, ensuring proper operation between the mechanical component and the central computer. The sensor transmits the actuator position, indicating whether the clutch is engaged or disengaged. However, due to the constant axial movement and loads transmitted by the engine, the guide progressively wears, becoming a consumable part. Since its current replacement requires replacing the entire actuator, with associated high costs, independent manufacturing of the guide is proposed as a technical and economical alternative.

Development begins with the identification of the geometry, environment, and material of the original part. Alternative materials with similar properties are then evaluated, maintaining the original shape. To achieve this, simulations are used in ANSYS Workbench, where loads and deformations are analyzed, comparing the performance of the original material with the alternative using the Archard model.

Manufacturing is carried out using vertical CNC machining, complemented by manual finishing in hard-to-reach areas. Finally, the manufactured guide is planned to be installed on the tractor-trailer and validated under real-life operating conditions, ensuring reliability, cost reduction, and viability for future spare parts rotations.

Keywords: Machine element design, characterization, polymers, finite elements, machining, cutting variables, applied loads, wear, friction, modeling, simulation, optimization, spare parts rotation, preventive maintenance, corrective maintenance.

1. Introducción

El presente proyecto tiene como objetivo principal el mejoramiento del sistema de guía del sensor del actuador del embrague de las tractomulas DAF CF480. Dado que esta guía es una pieza crítica dentro del sistema de embrague y no se encuentra disponible como repuesto individual en el mercado, su diseño, caracterización y fabricación adecuada pueden generar ahorros significativos en costos de mantenimiento para la empresa de transporte, además de prolongar la vida útil del actuador y mejorar el rendimiento del vehículo.

Para el desarrollo de esta propuesta, se siguió un cronograma estructurado, propuesto en el anteproyecto, que consta de varias etapas claramente definidas. En las primeras semanas, se realizó la adaptación al entorno de trabajo dentro de la empresa, lo cual incluyó inducciones, familiarización con las plataformas de optimización y el equipo de trabajo. Esta fase fue fundamental para entender las condiciones reales de operación y las necesidades específicas del sistema de embrague en las tractomulas DAF.

Una vez adquiridos los conocimientos iniciales, el siguiente paso fué conocer a fondo el funcionamiento del sistema y el papel específico que desempeña la guía del sensor dentro del conjunto del actuador. Esta pieza es esencial para mantener la correcta posición del sensor tipo Hall, encargado de medir el desplazamiento axial del actuador neumático, y asegurar así la sincronización adecuada de los cambios de marcha en la transmisión automática ZF Traxon instalada en estos vehículos.

El proyecto contempla la elaboración de un prototipo virtual de la guía mediante un modelo CAD. Este diseño se realizará con medidas aproximadas, ya que las dimensiones exactas son propiedad exclusiva de la marca DAF y no están disponibles públicamente. El propósito fué desarrollar una propuesta ingenieril con fines académicos y de mejora técnica, sin intención comercial, enfocándose en la investigación y el conocimiento de materiales alternativos para su fabricación.

En cuanto a la caracterización del material original, dado que se trata de un polímero fenólico, se propone inicialmente realizar un análisis espectroscópico FTIR, complementado con otros métodos de identificación. Sin embargo, considerando las limitaciones y la precisión, también se tomó como referencia la información impresa sobre la pieza (números y códigos), para aproximarse a un material con propiedades mecánicas similares y características verídicas. Este paso fué crucial, ya que el material original exacto solo es conocido por el fabricante.

Con la información del material y el modelo CAD, se procedió a realizar simulaciones estructurales y de desgaste mediante análisis por elementos finitos utilizando el software ANSYS con licencia estudiantil. Este análisis permitió evaluar el comportamiento mecánico y la resistencia al desgaste de la guía bajo las condiciones reales de carga y operación. Además, se utilizó el software CES EduPack para comparar materiales alternativos afines, seleccionando al menos un candidato adicional al material original para un análisis comparativo más detallado.

La fabricación de las piezas seleccionadas se llevó a cabo mediante maquinado CNC. El código CNC se generó a partir del modelo CAD utilizando la plataforma CAM Inventor, también bajo licencia estudiantil. La fabricación se realizó en una máquina de fresado vertical, produciendo pequeñas series piloto.

Reconociendo que las simulaciones, aunque precisas, no sustituyen la realidad operativa, se implementaron pruebas de desgaste bajo las mismas condiciones en los materiales alternativos y el original. Para cuantificar el desgaste, se aplicó la ley de Archard, que relaciona la pérdida de volumen con la presión ejercida y el área de contacto, integrando así resultados experimentales y simulados para seleccionar el material más adecuado.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se propuso una estrategia de mantenimiento correctivo focalizada, que permita reemplazar únicamente la guía del sensor, evitando el cambio completo del actuador y generando una significativa reducción en costos y tiempos de mantenimiento. Esta propuesta contribuye también a un mejor control de la rotación de repuestos y al mantenimiento eficiente de la flota, minimizando las interrupciones por fallas asociadas a este componente.

Este proyecto se enmarca dentro de la práctica académica de la carrera de Ingeniería Mecánica, y busca no solo cumplir con los objetivos técnicos planteados, sino también aportar conocimiento práctico y aplicado, que pueda servir de referencia para futuros desarrollos similares en la industria del transporte pesado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar e implementar una solución técnica y económica que permita reparar o reemplazar exclusivamente la guía del sensor, con el fin de reducir los costos de mantenimiento, extender la vida útil de los componentes, y garantizar la operatividad continua de la flota en condiciones de la topografía colombiana.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar las características técnicas y mecánicas del actuador de embrague actual y las condiciones del sistema del sensor.
- Identificar el material del cual está fabricada la guía del sensor, mediante una caracterización.
- Identificar materiales alternativos y procesos de fabricación adecuados para producir la guía del sensor con mayor resistencia al desgaste.
- Realizar un análisis de elementos finitos, evaluando la resistencia al desgaste y comparando el material original con las alternativas.
- Diseñar una estrategia de fabricación.
- Validar el rendimiento del nuevo componente mediante pruebas en condiciones reales de operación.
- Establecer un protocolo de mantenimiento correctivo que permita reemplazar solo la guía, reduciendo el reemplazo completo del actuador.

3. Marco teórico

3.1. Sistema de Embrague en Vehículos Pesados

El sistema de embrague en vehículos pesados, como los tractocamiones DAF CF480, cumple una función esencial en la transmisión de potencia entre el motor y la caja de cambios. Este mecanismo permite acoplar y desacoplar el motor de la transmisión de forma controlada, facilitando cambios de marcha suaves y evitando daños en la transmisión.

Los embragues de tractomulas suelen estar compuestos por un disco de fricción, un plato de presión, un diafragma o mecanismo de accionamiento, y un sistema de control, que puede incluir

componentes hidráulicos y electrónicos. Estos sistemas modernos incorporan sensores de posición que permiten al módulo de control del vehículo monitorear el funcionamiento del embrague y actuar automáticamente sobre él, garantizando una operación eficiente.

Uno de estos sensores es el sensor de posición del embrague, cuya función es medir con precisión la posición del actuador o del conjunto móvil del embrague (*Manual DAF*). Esta señal es crítica para el control electrónico del cambio y para el sistema de protección del tren motriz.

3.2. Función de la Guía del Sensor de Posición del Embrague

La guía del sensor de posición en los sistemas de embrague de las DAF cumple una función estructural y de precisión clave: asegura el posicionamiento correcto y evita el giro o desplazamiento no deseado del sensor de posición durante la operación dinámica del embrague.

Debido a las altas cargas de operación, vibraciones, presencia de polvo, cambios térmicos y desgaste mecánico, es indispensable que la guía actúe como soporte firme y preciso del sensor. Si la guía falla o presenta juego mecánico, puede provocar el giro del sensor, lo que resultaría en lecturas erróneas de posición, desincronización del sistema de embrague automatizado, o incluso fallos críticos de operación.

El rediseño de esta guía implica un análisis detallado de su geometría, sus mecanismos de fijación, los esfuerzos aplicados sobre ella, y los materiales utilizados, con el fin de asegurar un funcionamiento confiable en condiciones severas.

3.3. Diseño de Elementos de Máquinas Aplicado a la Guía

El diseño de elementos de máquinas es una disciplina de la ingeniería mecánica que se encarga de determinar las dimensiones, formas, materiales y características funcionales de las piezas que componen un sistema mecánico, bajo criterios de resistencia, rigidez, durabilidad y fabricación (*Mott, Robert, 2006*).

Para diseñar adecuadamente una guía de sensor, deben considerarse los siguientes aspectos:

- **Resistencia mecánica:** la guía debe soportar las cargas generadas por el sensor, el resorte de retorno, y las vibraciones del vehículo sin deformaciones plásticas ni fallos por fatiga.
- **Ajuste geométrico:** el diseño debe garantizar tolerancias estrictas para evitar juego mecánico, permitiendo un montaje firme y estable del sensor.

- **Facilidad de ensamblaje:** debe diseñarse de forma que pueda instalarse y retirarse fácilmente para mantenimiento sin afectar otros componentes.
- **Compatibilidad de materiales:** debe evitarse el desgaste por fricción entre materiales incompatibles y asegurar la resistencia al medio (calor, grasa, polvo).
- **Costo y fabricación:** debe seleccionarse una geometría y material que puedan fabricarse de forma eficiente, ya sea por mecanizado CNC o moldeo por inyección.

3.4. Análisis de elementos finitos en ANSYS

El FEA es una herramienta de simulación que permite estudiar el comportamiento estructural de una pieza bajo diversas condiciones de carga. El software ANSYS (*ANSYS Inc., 2024*) es uno de los más utilizados para este tipo de simulaciones, y en este proyecto se usa para validar el rediseño de la guía.

Las etapas clave del análisis estructural de la guía son:

- **Modelado 3D de la geometría:** Se crea un modelo CAD de la guía, que puede ser una simplificación para reducir tiempos de cálculo.
- **Definición de materiales:** Se asignan propiedades como módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y resistencia a tracción según el polímero utilizado.
- **Aplicación de cargas y condiciones de frontera:** Se simulan las fuerzas que el sensor aplica a la guía (presión de contacto), así como las restricciones por los anclajes al cuerpo del actuador.
- **Malla:** El modelo se discretiza en pequeños elementos para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema, considerando las partes de interés para un refinamiento aún mayor, con el fin de identificar los puntos críticos de la estructura al ser una pieza relativamente pequeña.
- **Análisis de resultados:** En este apartado de la simulación se observan tensiones máximas, zonas críticas, deformaciones y posibles concentraciones de esfuerzo para validar la seguridad del diseño.

El resultado permite optimizar la geometría, aligerar peso, y garantizar que no existan fallos bajo condiciones de servicio real (*Galeano & Girón, 2019*).

3.5. Selección y Caracterización de Materiales Poliméricos

Esta etapa del proceso es fundamental para identificar el tipo de material que se analizará, lo cual permite establecer puntos de comparación relevantes en términos de resistencia a la tracción, flexión u otras propiedades mecánicas que resulten determinantes en el análisis funcional del componente.

En el caso de los materiales poliméricos, existen diversas familias con estructuras moleculares distintas, aunque muchas de ellas presentan propiedades similares en ciertos aspectos. Una de las características más destacadas de los polímeros es su capacidad de ser diseñados y formulados específicamente según la necesidad de uso, lo que permite modificar algunas de sus propiedades para adaptarlas a requerimientos particulares de desempeño.

Los polímeros se clasifican principalmente en tres grupos: termoplásticos, termoestables (o termofijos) y elastómeros (*Ashby, Jones 2012*). Dentro de estos, los más utilizados en aplicaciones estructurales, debido a su rigidez y resistencia, son los termoplásticos y los termoestables. La diferencia principal entre ambos radica en su estructura molecular. Los termoplásticos tienen cadenas lineales o ramificadas que pueden reorganizarse al aplicar calor, lo que permite su reciclaje y reprocesamiento (*Juárez, Balart, Ferrándiz, & García. 2012*). Por el contrario, los termoestables poseen una estructura reticulada tridimensional que, una vez curada, no puede volver a fundirse ni reformarse (*Covarrubias Velázquez, Sáenz Galindo & Castañeda Facio, 2016*).En lugar de ablandarse con el calor, estos materiales tienden a carbonizarse o degradarse térmicamente, razón por la cual no son reciclables por medios térmicos convencionales.

A pesar de ello, los termoestables son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere alta resistencia térmica, química y a la abrasión. Un ejemplo representativo son las resinas fenólicas, cuya variante más conocida es la baquelita, usada tradicionalmente en la industria eléctrica y electrónica por sus excelentes propiedades dieléctricas y estabilidad dimensional. Las resinas fenólicas pueden clasificarse en tipo Resol y tipo Novolac, diferenciándose en el tipo de catalizador utilizado durante su síntesis, el número de grupos funcionales presentes, y las condiciones de curado (*Covarrubias Velázquez, Sáenz Galindo & Castañeda Facio, 2016*).

La caracterización de materiales poliméricos, especialmente los termoestables, presenta retos importantes, ya que identificar de forma exacta el tipo de resina requiere conocer su estructura interna y composición química, lo cual sólo es posible mediante análisis especializados como

espectroscopía infrarroja (FTIR), análisis térmico diferencial (DSC), o cromatografía, que suelen ser costosos y de difícil acceso en contextos industriales rutinarios.

Sin embargo, según Covarrubias Velázquez, Sáenz Galindo y Castañeda Facio (2016) es posible realizar una identificación preliminar del tipo de polímero a partir de observaciones físicas, análisis de fractura y pruebas mecánicas simples. Por ejemplo, mediante la evaluación del aspecto del material, la textura de la superficie rota (fractura frágil o fibrosa), el color y el olor al someterlo a temperatura, se puede inferir si se trata de una resina fenólica, epóxica, o algún otro tipo de polímero estructural. También es posible clasificar el material como aglomerado, reforzado con fibras o no reforzado, lo cual permite hacer suposiciones sobre el proceso de fabricación y el tipo de carga incorporada, si la hubiera.

3.5.1. Criterios de selección de materiales:

- **Resistencia mecánica:** Debe resistir fuerzas de compresión, contacto y vibraciones sin fracturarse.
- **Estabilidad térmica:** El entorno del embrague puede alcanzar temperaturas elevadas, por lo que el polímero debe tener un punto de deflexión térmica alto (>150 °C).
- **Bajo coeficiente de fricción:** Para reducir el desgaste por contacto con la parte móvil (sensor).
- **Resistencia química:** Debe tolerar la exposición a grasas, aceites y contaminantes.
- **Compatibilidad con procesos de manufactura:** Que pueda ser mecanizado con precisión o moldeado por inyección.

La caracterización de estos materiales incluye ensayos de dureza, tracción, compresión, módulo elástico, TGA, DSC y coeficiente de fricción, entre otros.

3.6. Teoría del Desgaste por Contacto

El desgaste es el proceso mediante el cual dos superficies en contacto pierden material debido al movimiento relativo, a la presión ejercida y a las condiciones del entorno Alcántara-Borges, D., (*Fernández-Columbié, & Rodríguez-González, 2009*). En el caso de la guía del sensor de embrague, el desgaste puede llevar a pérdidas de precisión, juego mecánico y fallas funcionales si no se controla correctamente.

Según Suárez Bustamante y Vélez Restrepo (*2005*), cuando se analizan fenómenos de desgaste desde el punto de vista ingenieril, una de las herramientas más utilizadas para predecir el volumen de material perdido con el tiempo es el modelo de Archard, desarrollado por J. F. Archard en 1953. Este modelo permite estimar cuánto material se pierde debido a la fricción entre dos cuerpos en contacto, teniendo en cuenta variables como la carga, la dureza del material y la distancia recorrida por la superficie de contacto.

3.6.1. Fórmula del Modelo de Archard

El modelo se expresa matemáticamente mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{K * L * W}{H}$$

Donde:

- **V** = Volumen de desgaste [mm³]
- **K** = Coeficiente de desgaste [-]
- **W** = Fuerza normal aplicada sobre la superficie de contacto [N]
- **L** = Distancia deslizante o recorrido de contacto [m]
- **H** = Dureza del material más blando [N/mm²]

3.6.2. Explicación del Modelo

Esta fórmula indica que el volumen de desgaste es directamente proporcional a la fuerza que presiona las dos superficies, y a la distancia que una superficie recorre sobre la otra. También nos dice que el desgaste es inversamente proporcional a la dureza del material, es decir, mientras más duro sea el material, menos se desgastará ante las mismas condiciones (*Suárez Bustamante & Vélez Restrepo, 2005*).

La fórmula permite cuantificar, por ejemplo, cuánto material perderá la guía después de 100,000 ciclos de operación, considerando la fuerza de contacto promedio, la distancia de roce por ciclo, y la dureza del material caracterizado.

3.7. Interpretación Práctica del Modelo

Lo valioso del modelo de Archard es que permite predecir el desgaste antes de fabricar la pieza, facilitando así decisiones como:

- Cambiar el material por uno más duro si el desgaste es elevado.
- Modificar la geometría de contacto para reducir la fuerza normal.

- Incorporar un recubrimiento, lubricante o sellado que reduzca la fricción o impida la entrada de contaminantes.

Este tipo de análisis es fundamental cuando se quiere garantizar una vida útil prolongada del componente sin necesidad de mantenimiento frecuente, algo especialmente importante en flotas de transporte que requieren disponibilidad continua.

3.8. Proceso de Fabricación CNC

La fabricación por mecanizado CNC es una técnica común para producir piezas con alta precisión y buena repetibilidad, especialmente en bajos volúmenes de producción o prototipado (*Cabrera Moreta y Reina Guzman 2017*).

En el caso de la guía, se utiliza el fresado vertical CNC, donde una herramienta giratoria arranca material de un bloque de polímero, conforme a instrucciones programadas (código CAM).

3.8.1 Ventajas del mecanizado CNC para este proyecto:

- Alta precisión dimensional y repetibilidad.
- Posibilidad de fabricar geometrías complejas.
- Reducción del desperdicio de material.
- Adaptable a diferentes tipos de polímeros (fenoles, nylon, acetal, etc.).
- Producción bajo demanda sin necesidad de moldes costosos.

El desarrollo del programa CAM incluye la elección de herramientas (fresas de carburo), selección de parámetros de corte (rpm, avance, profundidad) y simulación previa del mecanizado para evitar colisiones.

3.8.2. Aplicación al Rediseño de la Guía

El rediseño de la guía del sensor de posición del embrague en el tractocamión DAF CF480 nace de la necesidad de contar con un repuesto económico y funcional, ya que esta pieza no se comercializa por separado y su desgaste compromete todo el sistema de embrague automatizado.

Este proyecto se enfoca en:

- Reingeniería inversa de la pieza original, mediante caracterización y medición.

- Modelado CAD en Inventor y simulación FEA en ANSYS, con ajustes geométricos que reduzcan el desgaste y mejoren el anclaje.
- Selección de polímero resistente utilizando CES Edupack

3.9.Mantenimiento Preventivo y Rotación de Repuestos

El mantenimiento preventivo es una estrategia fundamental dentro de la gestión de activos mecánicos que busca prevenir fallos antes de que ocurran, garantizando así la fiabilidad del sistema, disminuyendo costos por paradas imprevistas y extendiendo la vida útil de los componentes (*Sacristán 2014*). En sistemas de transmisión como el de una tractomula DAF CF480, donde la precisión del sensor de posición del embrague es crítica, se vuelve indispensable establecer protocolos específicos de inspección y reposición de piezas como la guía del sensor, especialmente si esta es un componente rediseñado con materiales poliméricos sujetos a desgaste.

3.9.1. Fundamento del Mantenimiento Preventivo

Según Sacristán (*2014*) a diferencia del mantenimiento correctivo, que se realiza una vez ocurrida la falla, el mantenimiento preventivo se planifica en intervalos de tiempo definidos o según el uso acumulado del componente. Estos intervalos pueden establecerse de forma empírica, con base en la experiencia operativa, o mediante análisis cuantitativos que consideran:

- Resultados de ensayos de desgaste acelerado
- Modelos de predicción como el de Archard
- Análisis estadístico del historial de fallas
- Recomendaciones del fabricante o diseñador

Para el caso específico de la guía del sensor de embrague, este mantenimiento puede incluir:

- Inspección visual de desgaste
- Medición del juego o aflojamiento del sensor
- Verificación de alineación
- Sustitución preventiva tras cierta cantidad de ciclos operativos o kilómetros recorridos

3.9.2. Ensayos para la Proyección del Desgaste

Una de las herramientas más útiles para establecer planes de mantenimiento preventivo es la proyección basada en pruebas de desgaste acelerado, también conocida como ensayo acelerado

de vida útil. En estos ensayos, la guía se somete a condiciones de carga, fricción y temperatura similares o más severas que las reales, pero durante un tiempo comprimido, lo que permite estimar:

- Tasa de pérdida de material por hora o por ciclo
- Comportamiento ante condiciones críticas (vibración, contaminación, temperatura)
- Tiempo estimado antes de la pérdida funcional

Estos datos se combinan con modelos como el de Archard para predecir el punto de falla funcional, definido como el momento en que el desgaste acumulado excede los límites de tolerancia dimensional o provoca pérdida de alineación del sensor.

3.9.3. Rotación de Repuestos

La rotación de repuestos es una práctica complementaria al mantenimiento preventivo, especialmente útil en sistemas donde el desgaste es inevitable pero controlado. En lugar de esperar al fallo, se planifican intercambios periódicos de piezas entre unidades o su reemplazo programado, lo que permite:

- Uniformar el desgaste entre componentes
- Aprovechar al máximo la vida útil de las piezas
- Reducir el inventario de emergencia y mejorar la logística de repuestos

Para el sistema de guías del sensor de embrague, esto se puede traducir en un protocolo que establezca, por ejemplo:

- Revisión cada 40,000 km
- Cambio o rotación cada 100,000 km o 150,000 ciclos de embrague
- Mantenimiento correctivo solo si se detecta juego mecánico o pérdida de señal

3.10. Sistema de Trazabilidad y Condición

En implementaciones más avanzadas, estas estrategias se pueden complementar con sistemas de condición monitoreada (*Condition-Based Maintenance - CBM*). Aunque no se requiere un sistema electrónico complejo, basta con mantener un historial de cada guía instalada, los ciclos registrados, condiciones de desgaste observadas en inspecciones y resultados de pruebas destructivas.

Esto se puede registrar mediante:

- Un software de gestión de mantenimiento

- Planillas técnicas de cada tractomula
- Bitácoras de revisión de piezas clave

La información recolectada permitirá afinar las proyecciones iniciales, ajustarlas con base en datos reales de campo, y mejorar la planificación futura del mantenimiento y la fabricación de guías optimizadas.

4. Metodología

Etapa 1: Análisis funcional y contextual del sistema de embrague automatizado

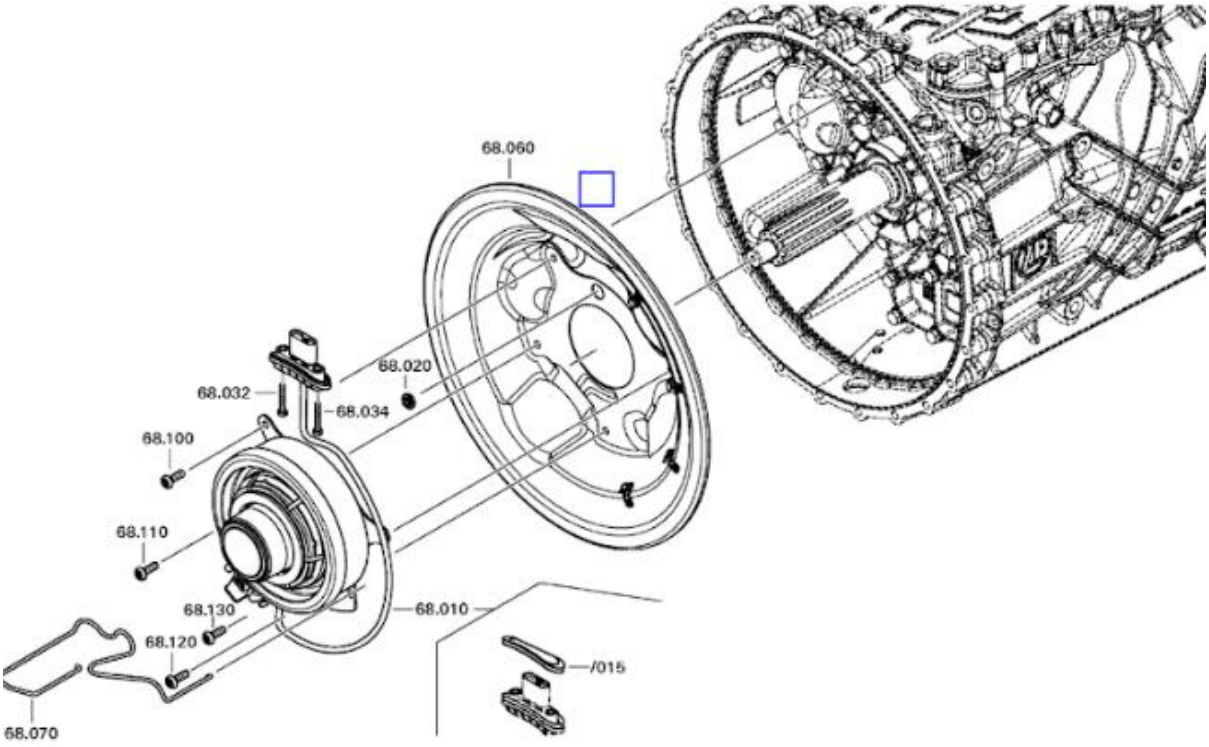
Aunque el problema ya ha sido planteado y se ha identificado una necesidad clara, es igualmente fundamental comprender el entorno operativo en el que se desarrolla esta problemática. El éxito de cualquier solución técnica depende en gran medida de su adaptación a las condiciones reales de trabajo, por lo que es necesario involucrarse con los aspectos técnicos y humanos del sistema. Es decir, resulta esencial interactuar con los operarios, técnicos de mantenimiento y conductores que han enfrentado directamente el problema, para conocer cómo lo han resuelto en el pasado, qué alternativas han intentado, cuánto les ha costado y qué sugerencias podrían aportar para lograr una solución más eficiente, duradera y viable.

En esta primera etapa, el objetivo principal es identificar y comprender en profundidad el funcionamiento de la guía del sensor del actuador de embrague, componente que ha demostrado fallas durante el servicio y cuyo deterioro genera costos de mantenimiento elevados, así como la inoperatividad del vehículo en momentos críticos. Esta guía, aunque de apariencia simple, cumple una función crucial dentro del sistema de transmisión automatizada.

El sistema de embrague que equipa a las tractomulas DAF CF480 forma parte de una transmisión automatizada de origen europeo, específicamente el modelo ZF TraXon, que combina eficiencia mecánica con sistemas electrónicos avanzados para facilitar la conducción en largas distancias. A pesar de sus ventajas, este tipo de transmisión, altamente dependiente de componentes electrónicos y sensores, también requiere una serie de mantenimientos preventivos y correctivos que aseguren su operatividad y confiabilidad. Como se muestra en la Figura 1, el sistema de embrague de las tractomulas DAF CF480 integra diversos componentes que trabajan de manera sincronizada para garantizar una transmisión efectiva. Dentro de este sistema, la guía del sensor de posición cumple una función crítica al mantener alineado el sensor y evitar pérdidas de señal.

Figura 1

Esquema general del sistema de embrague de una tractomula DAF CF480



**Obtenida del manual de taller de las tractomulas DAF CF480*

Es importante destacar que estas unidades han sido diseñadas originalmente para operar en Europa, donde las condiciones topográficas y de infraestructura vial son distintas a las de países como Colombia. En Europa, los vehículos recorren mayormente terrenos planos o colinas suaves, con pavimentos en excelente estado, lo que implica menores esfuerzos estructurales. Por el contrario, en Colombia, aunque existen regiones planas como el Valle, los Llanos Orientales y la Costa Atlántica, los principales centros logísticos, puertos y corredores industriales se ubican en la zona andina, atravesada por las tres cordilleras. Esto obliga a los vehículos de carga a transitar frecuentemente por rutas con pendientes pronunciadas, curvas cerradas y terrenos irregulares, como es el caso del corredor Cartagena–Medellín.

En estas condiciones, las transmisiones deben efectuar cambios de marcha con mayor frecuencia que en los escenarios para los cuales fueron originalmente diseñadas. En transmisiones manuales como las Eaton Fuler, esto se controla mediante una conducción cuidadosa y la selección manual

de marchas, minimizando los cambios. Sin embargo, en las transmisiones automatizadas como la ZF Traxon, los cambios de marcha son ejecutados automáticamente por una ECU, la cual decide el momento óptimo para cada cambio basándose en la información que recibe de múltiples sensores distribuidos en el vehículo.

La ECU, aunque sofisticada, no toma decisiones por sí sola. Recibe y procesa señales de una red de sensores que monitorean diversas variables operativas: sensores de presión y temperatura en el motor, sensores del sistema de inyección que regulan la mezcla aire-combustible, sensores del sistema de frenos antibloqueo (ABS), control de estabilidad, inclinación del vehículo, velocidad de las ruedas, entre muchos otros. Dentro de este sistema integral, también se incluyen sensores dedicados exclusivamente al sistema de transmisión.

Entre estos sensores, uno de los más relevantes para este estudio es el sensor de posición del actuador de embrague. Este sensor es el encargado de informarle a la ECU si el embrague está acoplado o desacoplado, permitiendo así realizar los cambios de marcha de manera segura y sin dañar los componentes internos de la transmisión.

El actuador del embrague es un conjunto electromecánico que automatiza la función que en vehículos con embrague manual realiza el pedal. Este actuador consta de una carcasa cilíndrica que contiene en su interior una membrana inflable (similar a una cámara de aire) que funciona mediante presión de aire comprimido. Esta membrana está conectada a un rodamiento de empuje y a un resorte de recuperación. Cuando se inyecta aire a la membrana, esta se expande, empujando el rodamiento hacia adelante, en dirección al motor y al embrague. Al cesar la presión de aire, el resorte retrae el rodamiento a su posición inicial.

El diseño interno del actuador permite que este movimiento de vaivén accione o libere la prensa del embrague, desacoplando temporalmente el motor de la transmisión. Este desacople es imprescindible para cambiar de marcha sin dañar los componentes, de la misma forma en que se presiona el pedal de embrague en una transmisión manual.

Sin embargo, aquí radica el origen del problema que aborda este proyecto: el sensor de posición, que está mecánicamente acoplado al sistema móvil del actuador, se desplaza con él durante todo su recorrido. La carcasa del actuador no tiene una conexión rígida con el sistema móvil; su único punto de unión es la membrana inflable, la cual es flexible. Al estar conectada únicamente por este medio, cuando el rodamiento hace contacto con la prensa del embrague (que está en rotación

constante), se produce un leve giro involuntario del conjunto, especialmente en los primeros instantes del contacto.

Este movimiento de rotación no deseado, aunque mínimo, se transmite a la carcasa a través de la membrana, y por ende también al sensor que se encuentra montado sobre ella. Este sensor, que debería moverse solo en línea recta, comienza a experimentar un pequeño pero repetitivo giro. Para evitar este movimiento de torsión, el sistema incorpora una guía fija, cuya función es precisamente mantener alineado el sensor y evitar su rotación. No obstante, con el uso continuo, el sensor tiende a apoyarse constantemente sobre un lado, generando un desgaste progresivo por fricción.

A esto se suma que, con el tiempo, el rodamiento que se acopla a la prensa también sufre desgaste, aumentando la resistencia al giro y, por lo tanto, incrementando la fuerza lateral ejercida sobre la guía a través del sensor. Este fenómeno acelera el desgaste de la guía, comprometiendo tanto la precisión del sensor como la estabilidad del actuador. La *Figura 2* ilustra con mayor detalle la posición y función de la guía dentro del conjunto. Esta guía impide que el sensor de posición gire o se desplace por efecto del movimiento del actuador, garantizando una lectura precisa.

Figura 2

Fotografía de la guía del sensor instalada en su posición en el actuador y esquema.



**Obtenidas del Manuel de talles de DAF CF480*

En cuanto a las condiciones reales de operación de la guía del sensor, es fundamental tener en cuenta que esta se encuentra expuesta a un entorno exigente y abrasivo. Durante el funcionamiento

del vehículo, se presenta un aumento progresivo de la temperatura en la zona del actuador, tanto por el calor irradiado por el motor como por la fricción constante entre el sensor y la guía, lo que incrementa los requerimientos térmicos del material. Además, la atmósfera dentro del alojamiento es predominantemente seca y carente de lubricación, lo que favorece fenómenos de desgaste acelerado por fricción. A esto se suma la presencia de partículas sólidas, como polvo ambiental y residuos del desgaste del disco de embrague, que generan un entorno abrasivo que deteriora la superficie de contacto de la guía con el sensor. En este contexto, la selección de un material polimérico con propiedades auto-lubricantes se justifica no solo por su buen comportamiento en entornos secos, sino también por su baja interferencia con señales magnéticas, lo cual es indispensable para no comprometer la precisión en la lectura del sensor. Este conjunto de condiciones operativas define los criterios funcionales clave que deberá cumplir el rediseño propuesto.

En resumen, esta primera etapa busca comprender en detalle:

- El contexto operacional real del vehículo en Colombia.
- Las diferencias topográficas y de infraestructura frente al diseño original europeo.
- El funcionamiento completo del sistema de embrague automatizado, incluyendo el papel de la ECU, los sensores y el actuador neumático.
- El origen mecánico del desgaste en la guía del sensor, a partir del análisis del movimiento y las fuerzas involucradas.

Este análisis funcional y contextual es el fundamento sobre el cual se estructura el resto del proyecto, ya que permite no solo comprender el porqué del problema, sino también definir con claridad qué características debe tener la solución propuesta para que sea técnica y económicamente viable, confiable en condiciones reales y adaptada al entorno local de operación. Es importante aclarar que este estudio se basa en observaciones visuales, de operación y en el análisis del comportamiento del sistema en condiciones reales de uso, sin que ello implique afirmar que el diseño original esté mal concebido. Por el contrario, este proyecto se enmarca en una investigación aplicada que busca proponer una solución alternativa y complementaria, orientada a mitigar un problema en condiciones específicas de operación. En ningún caso se pretende reemplazar ni descalificar el diseño original, sino contribuir a su mejora funcional bajo los requerimientos particulares del entorno operativo nacional.

Etapa 2: Caracterización del material de la guía

En esta etapa, el objetivo principal es identificar las propiedades mecánicas del material con el cual está fabricada la pieza original (la guía del sensor del embrague). Sin embargo, alcanzar una caracterización precisa implica, en muchos casos, recurrir a análisis complejos de laboratorio que podrían tornarse inviable dentro del alcance de este proyecto, principalmente por sus elevados costos y por las limitaciones de acceso a equipos especializados. La identificación exacta del material requeriría entrar al nivel microestructural para determinar su composición química y estructura interna, lo cual no es posible únicamente mediante observación macroscópica. La *Figura 3* muestra la guía de embrague retirada para su estudio. Se observa una geometría definida y un acabado superficial fino, coherente con procesos de fabricación por moldeo por inyección.

Figura 3

Fotografía de la guía del sensor, tomada en vista general.



**Fotografía obtenida del componente real.*

Entre los métodos más utilizados para la caracterización de materiales poliméricos se encuentran el FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier), el DSC (Calorimetría Diferencial

de Barrido) y el TGA (Análisis Termogravimétrico). Cada uno de estos análisis tiene una finalidad específica dentro del proceso de caracterización:

Aunque estos métodos son muy potentes para aproximarse a la naturaleza del material, es importante destacar que ninguno de ellos garantiza la identificación exacta del polímero cuando se trata de materiales desarrollados por fabricantes que utilizan formulaciones propietarias, como es el caso de la marca DAF. Esto se debe a que muchos de estos compuestos se obtienen mediante mezclas complejas de resinas base con aditivos, fibras o cargas minerales, diseñadas específicamente para cumplir con requerimientos mecánicos, térmicos o eléctricos particulares. Como se observa en la *Figura 4*, la fractura del componente presenta una estructura homogénea, sin presencia de fibras o refuerzos visibles, lo que sugiere una resina con carga mineral fina, probablemente silícea.

Figura 4

Fotografía de la fractura de la pieza, donde se evidencia la textura interna del material (sin fibras visibles).



**Fotografía obtenida del componente real*

A esto se suma el hecho de que la composición exacta del material es propiedad exclusiva del fabricante, que la ha definido con base en sus propios criterios de diseño, protección industrial y requerimientos funcionales.

Frente a estas limitaciones, y con el fin de evitar gastos injustificados en análisis que no aportarían una certeza total, se opta por realizar una caracterización basada en la inspección visual y algunas pruebas básicas de comportamiento térmico, como la exposición a calor moderado. A través de esta inspección se han identificado características clave como:

- Coloración oscura original, con zonas de degradación que se presentan verdosas o gris oscuro.
- Ausencia de fibras visibles en la fractura del material.
- Superficie con acabado liso y preciso, típico de piezas fabricadas mediante moldeo por inyección, lo que indica producción en serie.
- Impresión de una serie o código en el cuerpo del componente, lo cual es común en piezas técnicas fabricadas por inyección de polímeros termoestables.

Con base en estas evidencias, se concluye que el material corresponde a un termoestable tipo fenólico, muy probablemente una variante de baquelita, conocida comercialmente como Bakelite en honor a su creador, Leo Baekeland. Esta fue la primera resina sintética termoestable desarrollada, y aún hoy se utiliza ampliamente en aplicaciones donde se requiere buena resistencia térmica, dieléctrica y al desgaste.

Las resinas fenólicas se pueden reforzar con cargas como sílice, caolín o fibras, que aumentan su dureza, resistencia al impacto y estabilidad dimensional.

Existen dos tipos principales de resinas fenólicas: Resoles y Novolac. Los Resoles se curan con catalizadores básicos y pueden endurecer con el calor sin necesidad de agentes adicionales. Los Novolac, en cambio, requieren un agente de curado y un proceso térmico controlado. En este caso, por las características del material observadas (coloración, estructura de fractura, ausencia de fibras visibles), es probable que se trate de un Resol reforzado con cargas inorgánicas no visibles al ojo humano, como sílice.

Con base en todo lo anterior, y para efectos del análisis estructural por elementos finitos (FEA), se toma como referencia el conjunto de propiedades mecánicas estándar de la baquelita, como módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, dureza y resistencia térmica. Esto permitirá realizar una comparación objetiva con materiales alternativos, facilitando la toma de decisiones en etapas posteriores del proyecto. En la *Figura 5* se observa un ejemplo de pieza fabricada en baquelita mediante inyección, proceso coherente con la calidad de acabado superficial que presenta la guía original estudiada.

Figura 5

Ejemplo de componente de baquelita moldeado por inyección.



**Imagen obtenida de https://www.directindustry.es/prod/kpm-plasto-rubber-co/product-4570392-2593859.html*

- **Estudio del Material del Sensor del Actuador**

En esta etapa del análisis es fundamental caracterizar el material del sensor del actuador, ya que este componente desempeña un papel crucial en el funcionamiento del sistema. Su función principal es determinar con precisión la posición del actuador de embrague, asegurando una correcta sincronización entre el acoplamiento y desacoplamiento del sistema de transmisión. Además de su función de posicionamiento, el sensor interactúa directamente con la guía en estudio, estableciendo una fricción relativa entre ambas superficies.

Debido a que el sensor aún se encuentra en operación y no puede ser reemplazado sin comprometer el sistema, no es posible realizar ensayos destructivos para evaluar su composición interna. Por lo tanto, se recurre a métodos de caracterización no destructiva, entre ellos la inspección visual detallada del componente, lo que permite una aproximación razonable a su composición superficial y estructura externa.

Durante esta inspección visual se evidencia que el sensor posee una superficie con textura característica de un recubrimiento cerámico. Se observan áreas con brillo vítreo, aspecto quebradizo y presencia de microcristales, lo cual es común en materiales cerámicos técnicos. Estos indicios permiten suponer que el sensor está recubierto con una capa cerámica aplicada con el objetivo de proteger su integridad estructural y prolongar su vida útil operativa.

Desde el punto de vista funcional, este recubrimiento cerámico parece estar diseñado no solo para resistir el desgaste, sino también para transferir dicho desgaste a la guía, actuando como una superficie de mayor dureza frente a un componente más blando y consumible. Esta relación de dureza diferencial entre el sensor y la guía explica en gran medida el patrón de desgaste observado en esta última.

Las propiedades tribológicas de los recubrimientos cerámicos son ampliamente conocidas: presentan un coeficiente de fricción muy bajo, especialmente en condiciones secas, y poseen una alta resistencia al desgaste abrasivo. Su superficie lisa y fina minimiza la generación de calor por fricción, lo que es ideal para aplicaciones donde no se cuenta con lubricación directa. Además, su resistencia térmica y a la corrosión garantiza un desempeño constante incluso en entornos con alta carga térmica, como es el caso del compartimiento del embrague, donde las temperaturas pueden incrementarse significativamente por el contacto intermitente.

Cabe destacar que la alta dureza de los recubrimientos cerámicos, derivada de su estructura cristalina, los convierte en materiales excelentes para soportar esfuerzos mecánicos de contacto sin sufrir deformaciones permanentes. Sin embargo, su fragilidad inherente también los hace susceptibles a fallos por impacto o cargas concentradas excesivas. En este caso, el diseño parece haber considerado estas limitaciones al ubicar el recubrimiento en una zona donde las cargas son distribuidas y de carácter principalmente superficial.

Dado lo anterior, para efectos de análisis estructural y simulación, se asumirán propiedades similares a las de cerámicas técnicas utilizadas en recubrimientos industriales, tales como alúmina (Al_2O_3) o circonia. Estas cerámicas presentan módulos de elasticidad elevados, durezas superiores a 1200 HV y excelente resistencia al desgaste.

Este estudio también justifica por qué la guía —fabricada con un polímero termoestable más blando— presenta signos visibles de desgaste, ya que, en su función de componente consumible, entra en contacto constante con una superficie mucho más dura y resistente como lo es la del sensor. Esta decisión de diseño parece intencionada: proteger el sensor, una pieza

de mayor costo y precisión, mediante el sacrificio progresivo de la guía, la cual puede ser reemplazada con mayor facilidad.

Etapa 3: Selección de materiales alternativos

Una vez definida la lista de propiedades técnicas bases necesarias para el desempeño funcional de la guía, se procede a investigar posibles materiales alternativos para su fabricación. Esta etapa tiene como objetivo evaluar la viabilidad de sustitución del material original por otros con mejor comportamiento operativo, manteniendo la funcionalidad, geometría y compatibilidad con el sistema original.

Si bien el material actualmente utilizado cumple con los requerimientos básicos del sistema, la falta de información precisa sobre su composición estructural dificulta una validación exhaustiva. Por ello, se opta por proponer varias alternativas que, tras análisis comparativos, permitan identificar opciones viables para la rotación de repuestos en la empresa.

Para el desarrollo de esta etapa se emplea como herramienta principal el software CES EduPack, actualmente integrado en la suite de Ansys. A pesar de estar operando bajo una licencia académica limitada, el programa permite el acceso a una extensa base de datos de propiedades mecánicas, térmicas, tribológicas, de fabricación y económicas de materiales metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos.

- **Filtrado inicial de materiales**

  En una primera etapa dentro del software, se establece un filtro por familia de materiales. Dado que el sensor interactúa directamente con la guía mediante fricción en un entorno donde el campo magnético tiene un papel relevante, se priorizan materiales poliméricos, preferiblemente de ingeniería, por su baja interferencia magnética. Aunque el material original es un polímero termoestable, no se restringe la búsqueda exclusivamente a esta subfamilia, lo que permite evaluar una gama más amplia de opciones, incluyendo polímeros termoplásticos técnicos.

- **Selección de propiedades clave**

  A continuación, se definen las propiedades críticas que guiarán la selección de los materiales candidatos:

  - **Módulo de elasticidad (E):** Para evaluar la rigidez estructural bajo carga.
  - **Límite elástico (yield strength):** Indicador de deformación permanente.

- **Dureza:** Relacionada con la resistencia al rayado y penetración superficial.
- **Resistencia al desgaste:** Clave para mantener la funcionalidad del conjunto en operación continua.
- **Temperatura máxima en servicio:** Para asegurar estabilidad térmica bajo condiciones elevadas.
- **Maquinabilidad:** Importante dado que la fabricación propuesta es por mecanizado CNC.
- **Costo relativo:** Consideración esencial para evaluar la viabilidad económica.

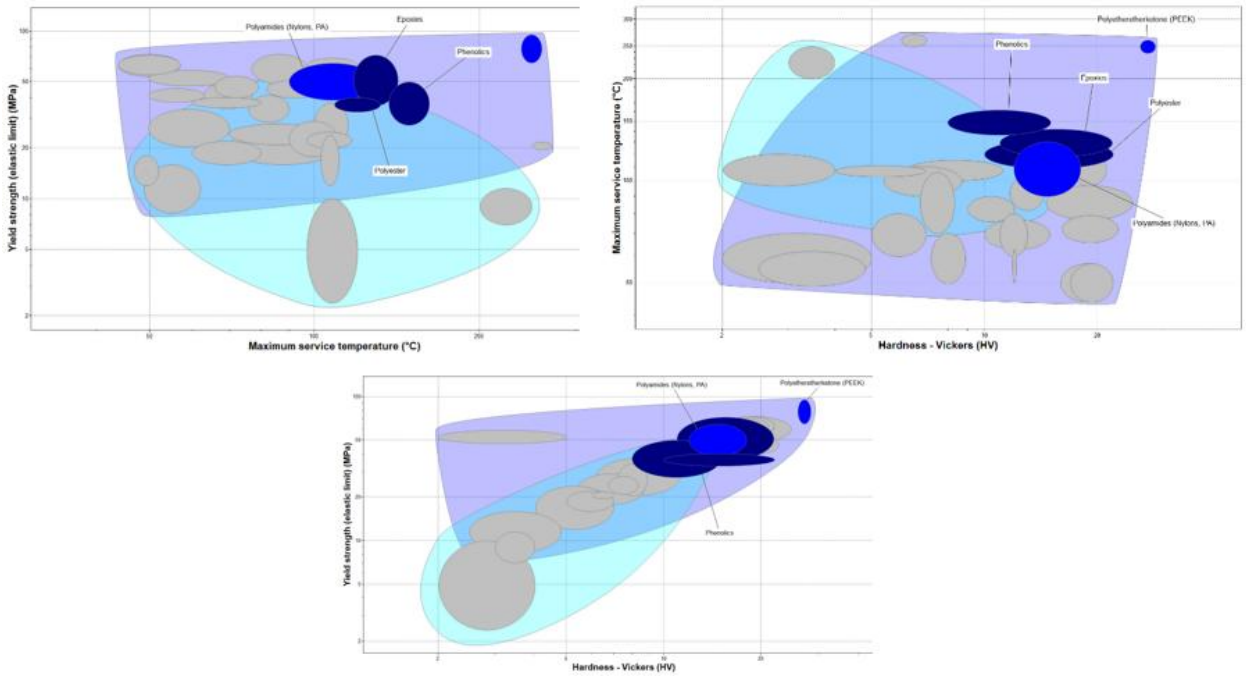
➢ **Análisis comparativo y resultados gráficos**

Con estas propiedades como referencia, se generan diversos gráficos de selección dentro de CES EduPack. Cada gráfico muestra la distribución de materiales poliméricos según las combinaciones de dos propiedades técnicas, permitiendo una comparación visual entre alternativas y su posición relativa respecto a los requerimientos establecidos.

Para fines de presentación y claridad, todos los gráficos de comparación se agrupan en una sola figura compuesta, presentada como la *Figura 6*:

Figura 6

Comparación de propiedades clave en materiales poliméricos candidatos mediante CES EduPack:



**Imágenes obtenidas del análisis realizado enj elñ software CES EduPack*

Estos diagramas permiten identificar materiales con mayor potencial de reemplazo para la guía, considerando un equilibrio entre desempeño mecánico y factibilidad técnica-económica.

Los materiales que se destacan consistentemente en todos los filtros aplicados durante el proceso de selección son los fenólicos, nylons (poliamidas), poliésteres y PEEK (polieteretercetona). Sin embargo, al analizar comparativamente las gráficas obtenidas en CES EduPack en relación con propiedades clave como módulo elástico, resistencia al desgaste, temperatura máxima de servicio y maquinabilidad se observa que los nylons se posicionan de manera intermedia y equilibrada en la mayoría de las comparaciones. Este comportamiento sugiere que pueden ser una buena alternativa de reemplazo para el material original, ya que ofrecen un balance entre propiedades mecánicas aceptables, disponibilidad comercial y facilidad de mecanizado.

Por otro lado, los fenólicos como la baquelita demuestran un rendimiento notable en propiedades críticas como el límite elástico y la resistencia térmica, lo que los convierte en una opción robusta y confiable para entornos exigentes como el del sistema de embrague, donde la temperatura elevada y el desgaste continuo por fricción son factores predominantes. Dado que el material original se ha identificado visualmente como una resina fenólica termoestable, su inclusión como referencia directa en los análisis es fundamental.

En este sentido, se decide avanzar con la evaluación comparativa entre la baquelita (fenólica) y el nylon, mediante simulaciones de comportamiento estructural y de desgaste. Esto permitirá valorar cuál de los dos materiales ofrece mejor desempeño estructural, menor tasa de desgaste y mayor estabilidad dimensional bajo las condiciones reales de operación.

No obstante, se destaca también el rendimiento sobresaliente del PEEK, material que supera ampliamente a los anteriores en casi todos los parámetros de selección, incluyendo resistencia mecánica, estabilidad térmica, y comportamiento frente al desgaste. A pesar de su idoneidad técnica, el alto costo y la baja disponibilidad comercial en las dimensiones requeridas para mecanizado lo convierten en una opción limitada para este proyecto en particular, especialmente en una aplicación que requiere múltiples unidades y rotación de repuestos.

En conclusión, para las etapas de simulación y análisis estructural se seleccionan como materiales candidatos la baquelita (por ser el original) y el nylon (por ser un posible sustituto viable y rentable), sin descartar la viabilidad futura del PEEK en versiones mejoradas del componente o en proyectos donde el costo no sea un factor limitante.

Etapa 4: Análisis estructural mediante simulación FEA (ANSYS)

Con los materiales candidatos previamente seleccionados y caracterizados, se procede a realizar una simulación estructural por el método FEA utilizando el software **ANSYS**, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de la guía del sensor del actuador de embrague bajo condiciones de operación reales. Esta etapa es crucial para predecir zonas críticas de esfuerzo, distribución de presiones de contacto y el comportamiento relativo al desgaste entre materiales.

- **Condiciones de simulación**

Se parte de un modelo tridimensional (CAD) generado en Inventor, que fue posteriormente importado al entorno de ANSYS Mechanical. Se definieron las siguientes condiciones de contorno para replicar lo más fielmente posible el escenario real:

- **Contacto puntual y deslizante** entre la superficie del sensor (recubierta con cerámica) y la cara interna de la guía.
- **Presión de contacto** aplicada sobre la zona funcional de la guía, calculada a partir de la fuerza normal esperada del actuador (~80 N).
- **Movimiento lineal repetitivo** para simular el vaivén del actuador durante la operación normal del sistema.
- **Materiales evaluados**:
    - **Baquelita**, como material original de la guía.
    - **Nylon Molibdeno**, como candidato alternativo de fácil fabricación y bajo costo.

➢ **Resultados de simulación**

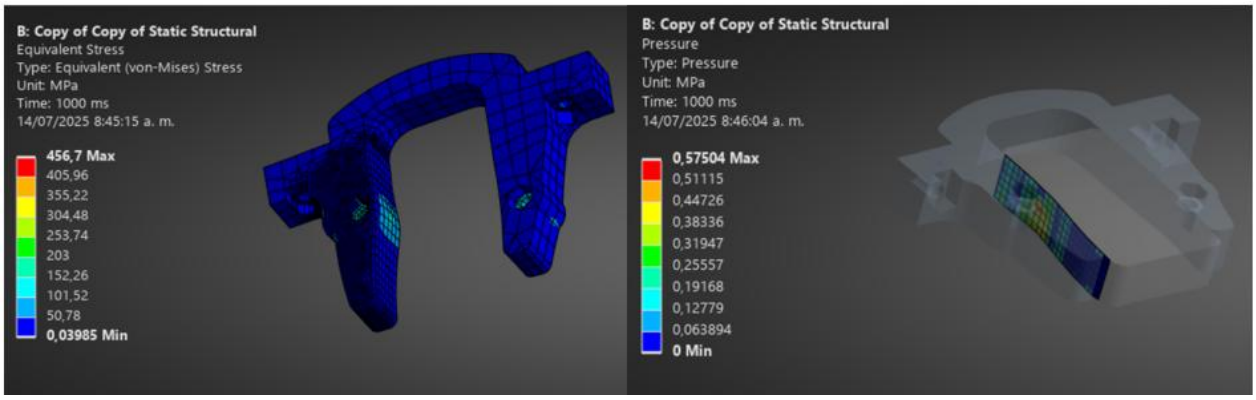
Los resultados muestran la distribución de tensiones (Von Mises), deformaciones y presiones de contacto en ambos casos. Se observa un comportamiento estructural diferente debido a las propiedades mecánicas contrastantes de ambos polímeros:

- **Baquelita** presenta menores deformaciones y una mayor rigidez general, pero concentra tensiones puntuales en zonas críticas.
- **Nylon** muestra una mayor deformación elástica, lo que reduce la concentración de esfuerzos, pero genera mayor área de contacto.

Ambas simulaciones se presentan en la *Figuras 7 y 8*, compuesta por:

Figura 7

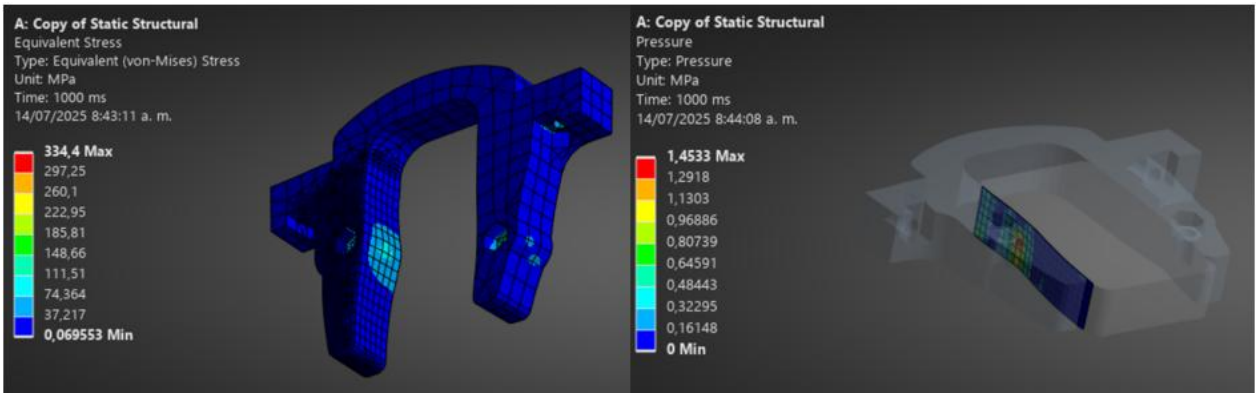
Distribución de esfuerzos en baquelita.



**Imágenes obtenidas de la simulación en Ansys Worckbench.*

Figura 8

Distribución de esfuerzos en nylon.



**Imágenes obtenidas de la simulación en Ansys Worckbench.*

- **Estimación del desgaste – Modelo de Archard**

Para cuantificar el comportamiento de desgaste relativo entre ambos materiales, se utiliza el modelo de **Archard**, cuya fórmula general es:

Tomando los valores simulados de presión de contacto para los dos materiales se obtiene:

$$W = P * A$$

- Para **baquelita**:

$$V_{Baquelita} = \frac{K_B * L * W}{H}$$

$$V_{Baquelita} = \frac{1 * 10^{-5} * 0.09 * 1.43 * (0.09 * 0.015)}{980.7}$$

$$V_{Baquelita} = 1.77 * 10^{-12}\ m^3$$

- Para **nylon**:

$$V_{Nylon} = \frac{K_N * L * W}{H}$$

$$V_{Baquelita} = \frac{2 * 10^{-4} * 0.09 * 0.57 * (0.09 * 0.015)}{294.2}$$

$$V_{Nylon} = 4.7 * 10^{-11}\ m^3$$

Dado que la baquelita tiene una dureza significativamente mayor, el volumen de desgaste proyectado para el nylon es considerablemente más alto, aun cuando su deformación elástica permite una distribución de esfuerzos más uniforme. Los valores de *K* deben obtenerse experimentalmente o de literatura, pero se espera que para aplicaciones en seco el nylon tenga un mayor coeficiente de desgaste que los termoestables como la baquelita.

- **Conclusiones técnicas de la simulación**
  - Baquelita es más resistente estructuralmente y presenta menor desgaste proyectado, lo cual la hace ideal para entornos abrasivos y de alta presión, aunque su fragilidad y dificultad de fabricación limitan su manejo.
  - Nylon ofrece mayor flexibilidad y facilidad de mecanizado, pero genera mayores volúmenes de desgaste bajo las mismas condiciones de carga.

Estos resultados permiten orientar la siguiente etapa del proyecto hacia la validación en campo de ambos materiales, considerando la facilidad de fabricación y la duración relativa bajo uso real.

Este análisis es muy importante ya que permite la orientación del material que se utilizara en la fabricación, la baquelita es según los cálculos realizados el material idóneo para la guía, sin embargo es importante realizar una prueba de campo con el nylon para ver su comportamiento en condiciones reales, además de eso también se busca opciones como las aleaciones que mejoran propiedades mecánicas siendo un candidato el nylon – molibdeno que aparte de tener buenas características mecánicas también tiene propiedades auto - lubricantes.

Etapa 5: Estrategia de Fabricación y Definición de Procesos CNC

Una vez seleccionados los materiales más viables para el reemplazo de la guía del sensor, se procede al diseño de la estrategia de fabricación. Esta etapa tiene como objetivo definir el método más adecuado y repetible para producir el componente con la precisión y calidad necesarias, considerando tanto las propiedades del material como la geometría de la pieza y su función crítica en el sistema de embrague automatizado.

- **Elección del método de fabricación**

Dado que se trata de una pieza de precisión que estará sometida a fricción, desgaste y vibraciones, es fundamental que la guía mantenga tolerancias dimensionales estrictas y un buen acabado superficial. Por tal razón, el proceso de mecanizado CNC se considera el más adecuado, especialmente en las fases de prototipado y validación.

- Para los materiales seleccionados, como baquelita o nylon, el mecanizado CNC ofrece una excelente alternativa frente a procesos como moldeo por inyección, que son más viables para producción masiva, pero no para fabricación de prototipos o lotes pequeños.
- Se descartó la fabricación aditiva (impresión 3D) debido a limitaciones en resistencia mecánica y propiedades térmicas de las piezas impresas con polímeros comerciales.

- **Consideraciones para el mecanizado CNC**

Las propiedades físicas de los materiales influyen directamente en la elección de parámetros de corte y herramientas:

- **Baquelita**: aunque rígida y estable dimensionalmente, su estructura frágil requiere herramientas afiladas y bajas velocidades de avance para evitar el astillado.
- **Nylon**: material más blando, pero con tendencia a la deformación térmica durante el mecanizado. Requiere refrigeración y herramientas de alta evacuación de viruta.

- **Fases del proceso de mecanizado**

El proceso de fabricación se estructura en las siguientes fases, programadas mediante software CAM:

1. **Sujeción de la pieza**: se utilizan mordazas suaves o fijaciones especiales para evitar deformaciones.
2. **Alineación y origen cero**: calibrado del eje Z y establecimiento del punto cero de la pieza.
3. **Desbaste**: eliminación rápida del exceso de material con fresas de punta plana.
4. **Acabado**: pasadas de precisión con herramientas de mayor número de filos para garantizar tolerancias ajustadas.
5. **Refinado de zonas críticas**: como el alojamiento del sensor, donde se exige bajo juego y excelente calidad superficial.
6. **Control dimensional**: mediante instrumentos como micrómetros y calibradores digitales.

- **Selección de herramientas y parámetros**

Las herramientas que se utilizarán para el desbaste y acabado de la pieza son HSS conocidas como acero rápido, se opta por este tipo de elementos ya que el material que se mecanizara es relativamente te blando, adicionalmente no se aplicara estrategia distinta de acabado ya que dentro del desbaste esta parametrizado para que el avance sea mínimo en cuanto en Z como en X y Y esto se hace con el fin de disminuir los tiempos de mecanizado sin dejar de ser conservadores con las variables, en una maquina con más ejes o mayores velocidades de husillo se podrá reducir aún mas el tiempo, las herramientas y las variables utilizadas en todo el mecanizado se estructuraron de acuerdo a la literatura dependiendo del material, el diámetro de la herramienta y el tipo de acabado deseado.

Las variables de cada herramienta y fase de mecanizado se describen en la tabla 2:

Tabla 1

Variables de mecanizado para la fabricación de la guía

Operación	Herramienta	Variable	Valor	Unidades
Planeado superficial	Fresa plana 4 filos Ø 12.7 mm	Velocidad del husillo	3000	RPM
		Avance de corte	900	mm/min
		Avance de profundidad	1200	
Taladrado	Broca Ø 5 mm	Velocidad del husillo	1100	RPM
		Avance de corte	N/A	mm/min
		Avance de profundidad	200	
Cajera hexágono	Fresa plana 4 filos Ø 3 mm	Velocidad del husillo	2700	RPM
		Avance de corte	250	mm/min
		Avance de profundidad	720	
Cajera lateral	Fresa plana 4 filos Ø 3 mm	Velocidad del husillo	2700	RPM
		Avance de corte	200	mm/min
		Avance de profundidad	200	
		Velocidad del husillo	2500	RPM

Contorneado pieza	Fresa plana 4 filos Ø 4 mm	Avance de corte	400	mm/min
		Avance de profundidad	466	

* Las variables se obtuvieron a partir de las fórmulas de mecanizado mejoradas con ensayo y error durante las pruebas de fabricación.

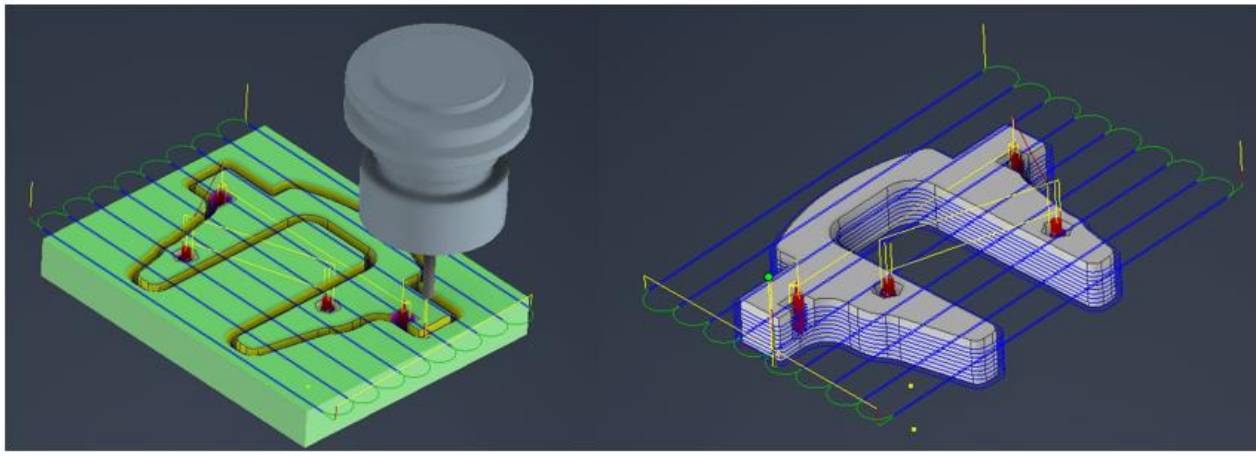
- **Evaluación de la viabilidad industrial**

Aunque el mecanizado CNC no es el método más económico para producción en masa, representa una alternativa ideal para fases de desarrollo y pruebas. En caso de validar la pieza con éxito, se podrá evaluar una transición posterior hacia procesos como moldeo por inyección o compresión, en función del material elegido y la escala de fabricación.

La estrategia de mecanizado implementada en CAM se muestra en la *Figura 9*:

Figura 9

Estrategia de mecanizado.



**Imágenes obtenidas de la simulación de mecanizado en el entorno CAM de Inventor*

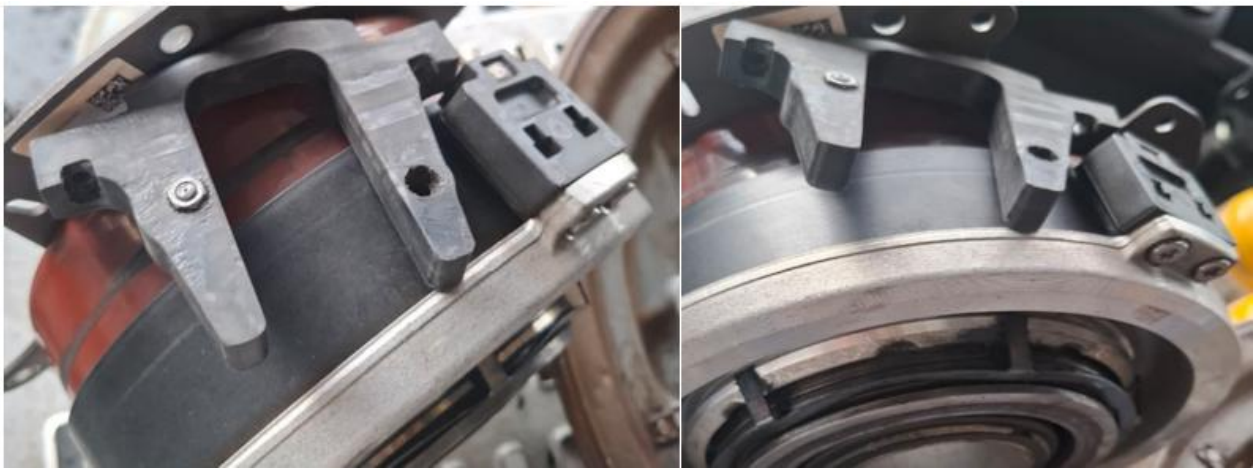
5. Análisis de resultados

Una vez finalizado el proceso de fabricación de la pieza, se procedió a realizar el pulido y los acabados superficiales. Este paso resultó especialmente importante en aquellas geometrías de menor tamaño y mayor complejidad, en las cuales la herramienta de mecanizado, debido a su geometría circular, no pudo alcanzar con la precisión necesaria durante el proceso de fabricación. El objetivo de este trabajo de terminación fue acercar la pieza fabricada al 100 % de exactitud

dimensional respecto a la original, garantizando así su correcta intercambiabilidad y la compatibilidad con el sistema donde será instalada, la guía alternativa junto al actuador se puede ver en la *Figura 10.*

Figura 10

Guía mecanizada en nylon junto al actuador donde será instalada.



**Fotografías tomadas de los componentes reales*

Con la pieza lista, el siguiente paso consistiría en instalarla en la tractomula con el fin de verificar su funcionalidad en condiciones normales de servicio. Dichas condiciones representan un escenario real de operación, donde influyen variables como la topografía irregular colombiana, las cargas dinámicas, la fricción continua y los ciclos de operación del vehículo. No obstante, es importante aclarar que, dado que el diseño se basó principalmente en el cambio de material, manteniendo las características geométricas y de forma de la pieza original, lo que realmente se busca evaluar en esta etapa es el desempeño del material alternativo como posible sustituto en una futura rotación de repuestos.

El aseguramiento de la operatividad y confiabilidad de los vehículos en operación exige someter los materiales a ensayos de desgaste que permitan comparar objetivamente su rendimiento. En este caso, se estableció que, más allá de instalar directamente la pieza en el vehículo, era necesario crear un entorno controlado que simulara de manera reproducible las condiciones de fricción y abrasión propias del contacto entre la guía y el sensor. Para ello, se diseñó un banco experimental de desgaste, con el cual fue posible realizar un ensayo comparativo entre el material original y el

material alternativo, garantizando la igualdad de condiciones de carga, velocidad de fricción y rugosidad superficial.

La decisión de emplear probetas rectangulares de ambos materiales, Figura 11, en lugar de probar directamente la pieza final, respondió a la necesidad de eliminar variables asociadas a la geometría del componente. De este modo, se aseguró que las diferencias observadas en el desgaste estuvieran asociadas únicamente a la naturaleza de los materiales y no a factores geométricos. Las probetas fueron fabricadas con dimensiones idénticas, controladas mediante calibradores, lo que permitió minimizar la desviación estándar en las mediciones y asegurar la confiabilidad de los resultados.

Aunque en la etapa previa se había realizado un análisis analítico utilizando la Ley de Archard para estimar el volumen de desgaste, es bien sabido que esta ley emplea constantes aproximadas que pueden diferir considerablemente del comportamiento real, dependiendo de las condiciones de operación

.

Figura 11

Probetas para utilizar en el experimento, a la izquierda Nylon y a la derecha Fenólico original.



**Fotografía tomada de las probetas reales.*

Para el desarrollo del banco experimental se implementó un sistema compuesto por un puente corredizo sobre dos verticales y un disco abrasivo inferior, colocando la probeta sobre el puente y dejando que el peso del sistema y la gravedad actúen en función de presión sobre el disco abrasivo, esto se muestra en la *Figura 12*.

Figura 12

Banco experimental para analizar el volumen de desgaste de cada material, (la flecha indica la probeta utilizada).



**Fotografía tomada del banco de prueba real*

La carga aplicada a las probetas se simuló colocando pesos calibrados sobre el sistema, de manera que ambas probetas quedaran en contacto directo con el disco abrasivo bajo la misma magnitud de fuerza normal.

El parámetro de medición principal para cuantificar el desgaste fue el tiempo de exposición. Cada probeta se sometió a un periodo de 10 segundos de fricción continua, tras lo cual se retiró y se midió nuevamente con instrumentos de precisión. Con estos datos se pudo determinar el volumen de material perdido y establecer una comparación directa entre ambos materiales.

La importancia de este procedimiento radica en que, aunque las condiciones reales de operación del vehículo son más severas y difíciles de reproducir experimentalmente, el método implementado permitió simular de manera controlada el fenómeno de desgaste, aislando variables y asegurando que los resultados obtenidos sean representativos. A partir de esta metodología fue posible obtener

información cuantitativa que servirá de base para la selección del material más adecuado, considerando no solo la resistencia al desgaste, sino también su compatibilidad con el sensor y el costo de fabricación.

En conclusión, la aplicación del banco experimental permitió validar la viabilidad técnica del material alternativo propuesto. Los resultados preliminares muestran que el método es robusto, reproducible y confiable para futuras pruebas. Asimismo, los valores obtenidos de volumen perdido y la estimación experimental de la constante de Archard brindan una base sólida para justificar técnicamente el reemplazo del material original de la guía por uno con mejor desempeño, sin comprometer la integridad del sensor ni la operatividad de la flota de vehículos.

Finalizado el experimento se describen los resultados en la *Tabla 2*:

Tabla 2 *Resultados del experimento de desgaste de los materiales en cuestión.*

Material	Vo [mm3]	Vf [mm3]	T [s]	% desgaste
Fenólico original	6517.75	4725,36875	10	27,5
Nylon Molibdeno	6517.75	4982,825	10	23,55

**Vo: Volumen inicial, Vf: Volumen final, T: Tiempo*

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en el experimento, se puede concluir que el material alternativo utilizado presenta un menor desgaste que el original bajo las mismas condiciones. Sin embargo, como se observa en la Figura 13, el Nylon con Molibdeno genera rebaba, producto del calor generado al estar en contacto con el disco abrasivo.

Figura 13

Pobretas después de someterse al experimento, a la izquierda Nylon y a la derecha Fenólico original.



**Fotografía tomada de las probetas reales*

Además, se evidencia que mientras la pieza estaba en contacto con el disco abrasivo, la rebaba dificultaba el arranque de material, retrasando la pérdida de volumen. Este fenómeno puede estar asociado a las propiedades autolubricantes del Nylon Molibdeno, que favorecen la aglomeración del material en la superficie de la herramienta abrasiva, reduciendo momentáneamente su efecto.

En contraste, el material fenólico original (aproximado a baquelita) mostró un comportamiento diferente. Aunque en el cálculo mediante el modelo de Archard se estimaba que el volumen desgastado sería menor respecto al material alternativo, en la prueba experimental sucedió lo contrario: el fenólico perdió un 3,95 % más de volumen que el Nylon Molibdeno. Esto se debe a que el fenólico se degrada en partículas de polvo al someter a fricción, lo que facilita la acción de la herramienta abrasiva y acelera el desgaste. A diferencia del Nylon, no genera rebaba, pero sí presenta mayor resistencia térmica. Estos resultados también permiten inferir que la pieza original no está compuesta al 100 % por baquelita pura, sino por una formulación fenólica que se degrada más fácilmente bajo abrasión.

Por otro lado, se puede inferir que el resultado es positivo, tal como se muestra en los gráficos de las figuras *14* y *15* ya que la probabilidad de que la pieza alternativa tenga una durabilidad igual o superior a la original aumenta significativamente ya que en general el nylon se desgasta un 14.4% menos que el original. No obstante, esto no garantiza una equivalencia del 100 %, pues el entorno

real de operación implica condiciones mucho más hostiles, con cargas dinámicas y calor constante durante períodos prolongados. El ensayo realizado solo permite determinar la tendencia de desgaste del material en un período corto de prueba, el cual no puede compararse directamente con el entorno real de operación.

Figura 14 *Gráfico del porcentaje de desgaste de cada material.*

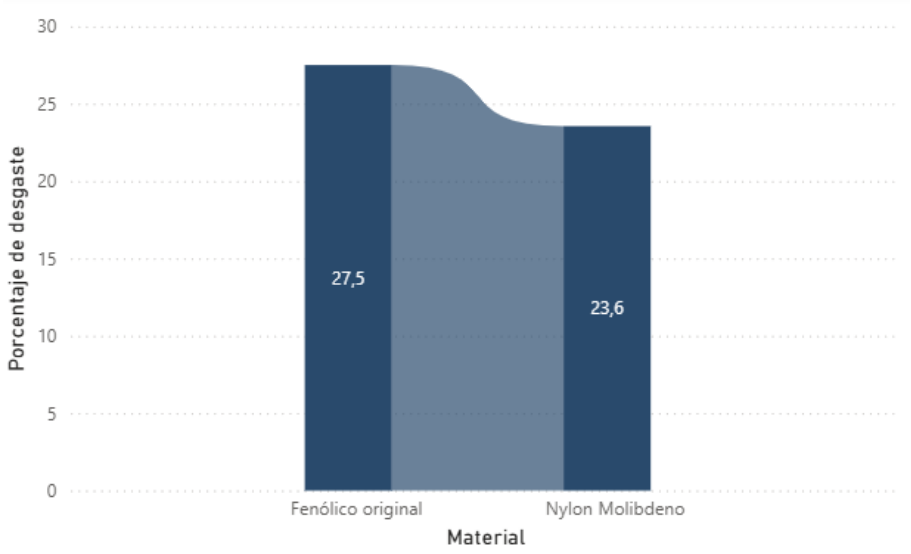


**Gráfico obtenido de Power BI a partir de los datos de la Tabla 2*

Figura 15 *Gráfico del volumen desgastado de cada material.*

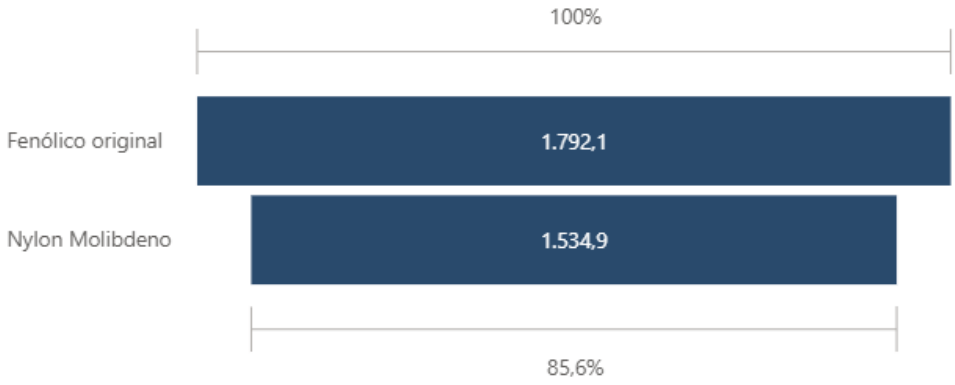


**Gráfico obtenido de Power BI a partir de los datos de la Tabla 2*

Tomando como referencia los datos recolectados en la primera etapa del proyecto, obtenidos directamente de la base de datos de TDM Transportes S.A.S., se evidenció que el kilometraje

mínimo al cual fue necesario reemplazar la guía de embrague correspondió a 250.000 km de recorrido en un vehículo DAF CF480. A partir de esta información, es posible proyectar la duración del componente fabricado con el material alternativo, considerando el porcentaje de desgaste diferencial observado entre los dos materiales en el experimento, exclusivamente en relación con el desgaste, y asumiendo que la desviación estándar o probabilidad de falla permanece restringida por las condiciones operacionales. Bajo estas consideraciones, el cálculo se realiza de manera proporcional de la siguiente forma:

Si el componente original tiene una duración mínima de 250.000 km y, según los ensayos, presenta un desgaste un 14,4 % mayor que el material alternativo, entonces:

$$Duración\ mínima\ nylon = 250.000\ km + 14.4\% = 286.000\ km$$

De acuerdo con los resultados anteriores, y considerando que el recorrido máximo alcanzado por la pieza original instalada fue de **460.000 km**, así como el costo del componente original completo (aproximadamente $3.600.000), se determina que la alternativa resulta viable desde el punto de vista económico. Esto se debe a que la pieza fabricada en Nylon Molibdeno tiene un costo cercano a **$180.000, equivalente al 5 % del valor del componente original**, lo cual significa que, incluso si solo alcanzara la duración mínima proyectada, cumpliría con los criterios de eficiencia y optimización de costos.

Finalmente, considerando los resultados tanto de las simulaciones numéricas como de las pruebas experimentales, se puede establecer que la pieza fabricada en Nylon Molibdeno cumple con un estándar mínimo de seguridad que justifica su instalación en el vehículo. A partir de su montaje, será fundamental realizar un seguimiento en condiciones reales de operación, evaluando la integridad de la pieza tras varios kilómetros recorridos. Con estas observaciones será posible proyectar su vida útil en servicio y determinar si constituye una opción viable para incorporarla en la rotación de repuestos y futuros mantenimientos.

6. Conclusiones y recomendaciones

- El trabajo desarrollado permitió obtener una solución viable a la necesidad planteada y, al mismo tiempo, evidenció el proceso ingenieril propio de la ingeniería mecánica, que inicia con la identificación de un problema y culmina en la fabricación de un prototipo funcional. Cada etapa de la metodología aplicada fue fundamental para alcanzar los objetivos, integrando herramientas de simulación y métodos analíticos tradicionales. La adecuada organización de ideas, la evaluación de ventajas y desventajas y la justificación de cada decisión a partir de resultados intermedios consolidaron una estrategia que permitió lograr un resultado positivo posible de mostrar y utilizar.

- Se demuestra que los resultados y cálculos analíticos, aunque útiles y en muchos casos confiables, no siempre representan con exactitud el comportamiento real de un componente, pues depende de aproximaciones. Por esta razón, es indispensable complementar dichos cálculos con pruebas experimentales que respalden y validen las decisiones tomadas en cada fase del proceso. En entornos reales, donde intervienen variables operativas y ambientales, la combinación de análisis teóricos y ensayos prácticos ofrece un sustento más robusto, asegurando la confiabilidad del diseño antes de su implementación en condiciones de mayor exigencia.

- El desarrollo del proyecto permitió cumplir el objetivo principal de optimizar los costos de mantenimiento asociados a la guía del sensor del actuador de embrague de los vehículos DAF CF480, demostrando que es posible fabricar un componente alternativo con un costo considerablemente inferior al original. Este resultado evidencia que, aún cuando pueda sacrificarse parcialmente el rendimiento, la implementación de un plan de mantenimiento preventivo más ajustado asegura que no se comprometa de manera significativa la disponibilidad operativa de los vehículos. En cuanto a los objetivos específicos, se logró analizar en detalle las características técnicas y mecánicas del actuador y del sistema del sensor, aproximar el material original mediante una caracterización, y proponer materiales alternativos con procesos de fabricación adecuados que ofrezcan mayor resistencia al desgaste y viabilidad económica. Del mismo modo, el análisis por elementos finitos

permitió comparar el desempeño del material original con los alternativos, concluyendo que los polímeros de ingeniería reforzados constituyen una opción óptima para la producción de la guía. También se definió una estrategia de fabricación viable que asegura la posibilidad de implementar el rediseño. Sin embargo, la validación del prototipo en condiciones reales de operación no pudo completarse dentro del tiempo disponible, ya que, si bien se efectuaron pruebas experimentales, no fue posible instalar el componente en el vehículo para obtener datos precisos en campo; en consecuencia, tampoco se alcanzó en su totalidad el objetivo de establecer un protocolo de mantenimiento correctivo basado en dicha retroalimentación. Pese a estas limitaciones, los resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica y económica del rediseño, constituyendo una base sólida para futuras fases de validación y consolidación de la solución, con el potencial de aportar significativamente a la reducción de los costos operativos en la flota de tractomulas DAF CF480.

Recomendación

Se recomienda establecer un sistema organizacional sólido y un cronograma bien estructurado como elementos fundamentales para alcanzar los objetivos planteados, especialmente cuando se trata de atender una urgencia o prioridad. Esta planificación permite trabajar con mayor agilidad y reducir el riesgo de retrocesos derivados de decisiones equivocadas durante la ejecución de la metodología. Asimismo, resulta primordial definir metas a corto plazo que faciliten la evaluación constante de la viabilidad del proceso, con el fin de decidir oportunamente si es pertinente continuar en la misma dirección o buscar alternativas más convenientes. Finalmente, aunque resolver la necesidad constituye el factor principal, no debe pasarse por alto el impacto económico que puede implicar, ya que para una empresa o entidad este aspecto es decisivo y, en ocasiones, puede determinar la continuidad o el alcance del proyecto.

Referencias

Alcántara-Borges, D., Fernández-Columbié, T., & Rodríguez-González, I. (2009). Fricción y desgaste en elementos circulares empleados en pasadores. *Ingeniería Mecánica*, *12*(2), 49-58.

ANSYS Inc. (2024). *ANSYS Workbench (Versión 2024 R1)* [Ansys Workbench]. ANSYS Inc. https://www.ansys.com/

DAF Trucks N.V. (s.f.). Manual de taller DAF CF480. Repair & Maintenance Information (RMI). https://rmi.daf.com/en/standard-navigation/authentication/login-to-vm

Galeano, C. E. E. R., & Girón, C. C. A. (2019). Modelacion por el método de elementos finitos (MEF), mediante el software ANSYS del elemnto de olaca. Univ. Dist. Fr. José caldas, 19.

Juárez Varón, D., Balart Gimeno, R. A., Ferrándiz Bou, S., & García Sanoguera, D. (2012). Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos.

Juiña, L., Cabrera, V. H., & Reina, S. (2017). Aplicación de la teoría de restricciones en la implementación de un Sistema de Manufactura CAD-CAM en la industria Metalmecánica-Plástica. *Enfoque Ute*, *8*(3), 56-71. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422017000300056

Sacristán, F. R. (2014). Elaboración y optimización de un plan de mantenimiento preventivo. *Técnica Industrial*, *308*(1), 30-41. https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/98/3064/a3064.pdf

SUÁREZ BUSTAMANTE, F. A., & VÉLEZ RESTREPO, J. U. A. N. (2005). Estudio del modelo de desgaste propuesto por Archard. *Dyna*, *72*(146), 27-43. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532005000200003&script=sci_arttext

Velázquez, H. E. C., Galindo, A. S., & Facio, A. O. C. (2016). Resinas termoestables de fenol–formaldehído. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, *17*(6). https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2016-covarrubias.pdf

Anexos

Anexo 1. Póster

Departamento de Ingeniería Mecánica

Optimización de Costos de Mantenimiento mediante el Rediseño de la Guía de Embrague en Tractomulas DAF

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

PRACTICANTE: Joseph Jair Martínez Eraso
ASESORES: Sergio Agudelo – Julian Duque

PROGRAMA: Ingeniería Mecánica
Semestre de la práctica: 2025-1

La guía del sensor del actuador de embrague en la tractomula DAF CF 480 es un componente vital que se desgasta con el uso, pero no se vende por separado. Su falla obliga a cambiar todo el actuador, lo que implica altos costos. Por ello, se propone desarrollar esta guía como repuesto independiente, evaluando materiales y validando su funcionamiento para ofrecer una alternativa técnica y económica.

El sistema de embrague del DAF CF480 utiliza un sensor de posición cuya guía es clave para su precisión. Esta guía debe ser resistente a cargas, desgaste y temperaturas. Su rediseño incluye análisis mecánico, selección de materiales poliméricos adecuados, simulaciones en ANSYS y fabricación CNC. Se aplica el modelo de Archard para estimar el desgaste y establecer mantenimiento preventivo, con rotación.



Introducción

Se rediseñó y fabricó la guía del sensor del actuador de embrague, una pieza clave no disponible como repuesto individual. Se modeló en CAD, se caracterizó su material original (polímero fenólico) mediante FTIR y se evaluaron materiales alternativos con simulaciones en ANSYS y CES EduPack.
Se fabricó un prototipo por CNC y se realizaron pruebas de desgaste aplicando la ley de Archard. Los resultados permitieron proponer una solución de mantenimiento correctivo que reduce costos, evita reemplazos internos.

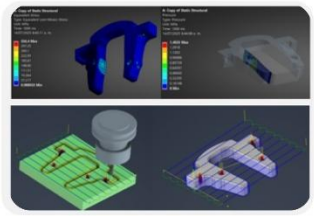
Objetivos

- Analizar las características técnicas y mecánicas del actuador de embrague actual y las condiciones del sistema del sensor.
- Identificar el material del cual está fabricada la guía del sensor, mediante una caracterización.
- Identificar materiales alternativos y procesos de fabricación adecuados para producir la guía del sensor con mayor resistencia al desgaste y diseñar una estrategia de fabricación
- Validar el rendimiento del nuevo componente mediante pruebas en condiciones reales de operación.
- Establecer un protocolo de mantenimiento correctivo que permita reemplazar solo la guía, reduciendo el reemplazo completo del actuador.

Metodología

La metodología se desarrollo en cinco etapas las cuales incluyen:

1. Análisis del sistema de embrague en tractomulas DAF.
2. Caracterización de polímeros.
3. Selección de materiales.
4. Análisis de elementos finitos en ANSYS.
5. Elaborar estrategia de fabricación CNC.





Resultados

La guía original en resina fenólica presentó un desgaste acelerado, perdiendo un 27,5 % de su volumen en las pruebas, mientras que la fabricada en Nylon Molibdeno perdió solo un 23,55 %, es decir, un 14,4 % menos.
Desde el punto de vista económico, la pieza alternativa tiene un costo de $180.000 frente a $3.600.000 del original, representando un 95% en ahorro.

Conclusiones

- Se desarrolló una solución viable mediante un proceso ingenieril que culminó en un prototipo funcional.
- Los cálculos analíticos no siempre reflejan el comportamiento real, por lo que es indispensable validarlos con pruebas experimentales. La combinación de análisis teóricos y ensayos prácticos asegura un diseño más confiable.
- El proyecto demuestra la viabilidad técnica y económica de fabricar una guía alternativa para el sensor del embrague DAF CF480, con menor costo y buena resistencia. Aunque no se validó en operación real, se desarrolló una estrategia de fabricación y bases sólidas para futuras pruebas.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR:
3188811233 +57 3188811233 joseph.martinez@udea.edu.co JosephJair128