



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Trabajo de fin de Carrera titulado:

“Mejora del Rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para Rally a través del Diseño de Nuevas Relaciones de Transmisión y la Fabricación de Piñones Rectos”

Realizado por:

VÍCTOR GEOVANNY VACA SÁNCHEZ

Director del proyecto:

MSC. ELI BENJAMÍN FALCON CÁRDENAS

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

QUITO, Marzo del 2025

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Víctor Geovanny Vaca Sánchez, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1803326683, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.

VÍCTOR GEOVANNY VACA SÁNCHEZ

1803326683

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Director de proyecto

MSC ELI BENJAMÍN FALCON CÁRDENAS

LOS PROFESORES INFORMANTES:

MSC. JAIME VINICIO MOLINA OSEJOS

MSC. EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su
defensa oral ante el tribunal examinador.

MSC. JAIME VINICIO MOLINA OSEJOS

MSC. EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Quito, 20 de marzo de 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

VÍCTOR GEOVANNY VACA SÁNCHEZ

1803326683

Agradecimientos

Concluido este proyecto académico, me complace expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis. Empiezo dedicando mis agradecimientos a mis queridos padres, Don Eduardo Vaca y Doña Herminia Sánchez, quienes me han dado el apoyo incondicional y el amor constante, por haberme enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación que han sido la base de todos mis logros. Con su guía, sacrificios, y apoyo incondicional han sido fundamentales en mi vida, sin su ejemplo este camino habría sido mucho más difícil para la realización de esta tesis.

A mi amada esposa, la Sra. Ing. Mayra Vera, cuyo amor y comprensión han sido mi refugio en los momentos difíciles por su paciencia, comprensión y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por estar siempre a mi lado, por tus palabras de aliento y por tu inquebrantable fe en mis capacidades, tu amor y aliento me han dado la fuerza necesaria para superar los desafíos y seguir adelante.

A mis adorados hijos, Ayison, Camila y Valeria, por su alegría y por recordarme constantemente la importancia de seguir persiguiendo mis sueños. Su sonrisa es mi mayor motivación y el mayor regalo en mi vida. Finalmente, quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Internacional SEK por ofrecerme la valiosa oportunidad de desarrollarme académicamente. En particular, deseo destacar mi profundo reconocimiento hacia el MSc. Eli Falcon y el MSc. Jaime Molina, cuya orientación, sugerencias, aportaciones y críticas constructivas han sido de inmensa utilidad en esta última etapa de mi formación. Su apoyo ha sido fundamental para el éxito de este proyecto

A todos ustedes, les debo no solo esta tesis, sino también una gratitud eterna por estar en mi vida y por ayudarme a alcanzar este importante hito.

Resumen

Este Proyecto se centró en la mejora del rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para rally mediante el diseño de nuevas relaciones de transmisión y la fabricación de piñones rectos. El objetivo principal fue optimizar la transmisión para la mejorar de la eficiencia y capacidad de respuesta del vehículo en competiciones, adaptándose a las exigencias extremas del deporte. El primer paso consistió en un análisis de las características y requisitos específicos de la caja de cambios para rally, apoyado en una revisión bibliográfica detallada. Este análisis permitió identificar áreas para la mejora de las relaciones de transmisión y establecer los parámetros necesarios para maximizar el rendimiento de la caja de cambios.

Con base en esta información, se diseñaron nuevas relaciones de transmisión utilizando herramientas avanzadas de cálculo y simulaciones de esfuerzo. Estos diseños fueron creados para adaptarse a las condiciones específicas de rally, tales como cambios bruscos de velocidad y altas demandas de potencia. El objetivo del presente trabajo fue, optimizar la eficiencia del sistema de la transmisión para mejorar la respuesta dinámica del vehículo en terrenos difíciles, mediante cálculos de nuevas relaciones de transmisión y la construcción de piñones rectos con estos nuevos valores. La fabricación de piñones rectos, componentes cruciales en el sistema de transmisión, se realizó prestando especial atención a los resultados de las simulaciones. Estos piñones se diseñaron para optimizar la transferencia de potencia y minimizar las pérdidas mecánicas. Además, se aplicó un tratamiento térmico de cementación y revenido para aumentar la dureza de los piñones, garantizando así su y resistencia al desgaste.

Una vez fabricados y tratados los piñones, se instaló el nuevo sistema de transmisión en el Renault Clio. Se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento de la caja de cambios mejorada en comparación con la original, utilizando un dinamómetro para medir el incremento de potencia transmitida a las ruedas. Los resultados mostraron una mejora

significativa en el rendimiento del vehículo, con un aumento en la potencia y una mayor eficiencia en la transmisión. Esta mejora destaca la efectividad de las nuevas relaciones de transmisión y los piñones rectos en la optimización de la caja de cambios para rally.

Palabras clave: caja de cambios de piñones rectos, Rally, relaciones de transmisión piñones rectos, diseño de relaciones de transmisión, simulación de esfuerzos, tratamiento térmico

Abstract

This thesis focuses on enhancing the performance of the Renault Clio's gearbox for rally through the design of new gear ratios and the manufacture of straight-cut gears. The primary goal is to optimize the transmission to improve the vehicle's efficiency and responsiveness in rally competitions, adapting to the extreme demands of the sport. The first step involved a thorough analysis of the specific characteristics and requirements of the rally gearbox, supported by a detailed literature review. This analysis helped identify critical areas for improving gear ratios and establish the necessary parameters to maximize gearbox performance.

Based on this information, new gear ratios were designed using advanced calculation tools and stress simulations. These designs were tailored to the specific rally conditions, such as sudden speed changes and high-power demands. The objective was to enhance transmission efficiency and vehicle response in challenging terrains. The manufacture of straight-cut gears, which are crucial components in the transmission system, was carried out with particular attention to the simulation results. These gears were designed to optimize power transfer and minimize mechanical losses. Additionally, a thermal treatment of carburizing and tempering was applied to increase the gears' hardness, ensuring their durability and wear resistance. Once the gears were manufactured and treated, the new transmission system was installed in the Renault Clio. Extensive testing was performed to evaluate the performance of the improved gearbox compared to the original one, using a dynamometer to measure the increase in power transmitted to the wheels. The results showed a significant improvement in vehicle performance, with increased power and greater transmission efficiency. This enhancement highlights the effectiveness of the new gear ratios and straight-cut gears in optimizing the rally gearbox.

Keywords

Straight-cut gears, Rally, Gear ratios, Gear design, Stress simulation, Thermal treatment

Índice de Contenidos

Agradecimientos.....	6
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Justificación.....	3
Objetivo General.....	4
Objetivos específicos.....	4
Hipótesis.....	5
Estudio del Arte.....	6
Sistema de transmisión.....	6
Caja de cambios.....	7
Función de la caja de cambios.....	8
Tipos de cajas de cambio.....	9
Importancia de la caja de cambio en vehículos de competencia.....	11
Averías y problemas de las cajas de cambio.....	12
Tipos de engranajes.....	13
Engranajes rectos.....	13
Engranajes helocoidales.....	15
Número de dientes de piñón.....	16
Fabricación de Piñones Rectos para Autos de Competición.....	18
Selección de materiales.....	18
Propiedades mecánicas de los materiales.....	19

Consideraciones específicas de la aplicación automotriz.....	20
Simulación de los piñones.....	23
Metodología.....	25
Tipo de investigación.....	25
Método.....	29
Determinación de las relaciones de transmisión	29
Pasos para la Determinación de Las relaciones de Transmisión	29
Fundamentos para el diseño de las nuevas relaciones de transmisión de la caja de cambios del Renault Clio.....	30
Análisis y Evaluación de las Relaciones de Transmisión Actuales.....	32
Relaciones de Transmisión de Fábrica	34
Conceptualización y Modelado de Relaciones de Transmisión	37
Diseño de los engranajes de las nuevas relaciones de transmisión	38
Determinación de las Dimensiones	40
Diagrama del Rediseño de la Caja de Cambios para el Renault Clio de Competencia...	43
Análisis de Elementos Finitos (FEA)	44
Pruebas en Campo y Simulaciones	44
Metodología de Fabricación y Tratamiento Térmico.....	51
Proceso de Mecanizado	52
Fabricación de Piñones Rectos.....	52
Fresado	54
Cementado.....	56
Acabado Final	57

Ensamblaje y Ajuste	58
Pruebas y Validación	58
Resultados.....	61
Conclusiones	66
Recomendaciones.....	67
Referencias Bibliográficas.....	68

Índice de Tablas

Tabla 1 Averías y problemas de las cajas de cambio.....	12
Tabla 2 Número de dientes del piñón, engranajes rectos	16
Tabla 3 Propiedades del acero.....	25
Tabla 4 Velocidades finales con caja original	35
Tabla 5 Velocidades finales con caja modificada	37
Tabla 6 Datos constructivos de tabla de módulos y medidas constructivas	43
Tabla 7 Comparación de las relaciones transmisión originales con modificadas	62
Tabla 8 Relación de transmisión y velocidad máxima	64

Índice de Figuras

Figura 1 Sistema de transmisión.....	6
Figura 2 Caja de cambios / Renault Clio	8
Figura 3 Caja de cambio automática	10
Figura 4 Engranajes rectos	14
Figura 5 Engranajes helocoidales.....	16
Figura 6 Diseño y Modelado	21
Figura 7 Tratamiento térmico	21
Figura 8 Rectificado y acabado.....	22
Figura 9 <i>Diseño en Inventor de piñones a medida</i>	23
Figura 10 <i>Simulación de piñones en SimSolid</i>	24
Figura 11 <i>Diagrama de flujo</i>	28
Figura 12 Relación de transmisión de la caja original.....	34
Figura 13 Relaciones de caja modificadas	36
Figura 14 Formulario de fabricación de piñones	39
Figura 15 Rediseño de caja	44
Figura 16 <i>Diseño de piñones acorde a las medidas calculadas</i>	45
Figura 17 <i>Extrusión de dientes del piñón</i>	45
Figura 18 <i>Conexiones para la simulación</i>	46
Figura 19 <i>Creación de material y selección del mismo en Sim Solid</i>	47
Figura 20 <i>Simulación de piñones en SimSolid</i>	48
Figura 21 <i>Simulación de piñones en SimSolid Von Misses</i>	49
Figura 22 <i>Simulación de piñones en SimSolid</i>	50
Figura 23 <i>Simulación de piñones en SimSolid</i>	51
Figura 24 <i>Tipo de acero para fabricación de piñones</i>	52
Figura 25 <i>Material en bruto para ser torneado</i>	53
Figura 26 <i>Inserción de coronilla, piezas procesadas o terminadas</i>	53

Figura 27 <i>Materiales en bruto para los insertos</i>	54
Figura 28 <i>Piñón en bruto</i>	54
Figura 29 <i>Mortajador Vertical</i>	55
Figura 30 <i>Tallado de los dientes por la fresadora de eje motriz</i>	55
Figura 31 <i>Buril trabajando y piñón en medida para tallado</i>	56
Figura 32 <i>Horno eléctrico para tratamiento térmico</i>	57
Figura 33 <i>Ensamblaje y ajuste</i>	58
Figura 34 <i>Prueba de dinamómetro con piñones originales</i>	59
Figura 35 <i>Prueba de dinamómetro con piñones de nueva relación de transmisión</i>	60
Figura 36 <i>Piñonería de la caja de cambios</i>	62

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo llevar a cabo una propuesta de diseño y fabricación de nuevos piñones rectos con las relaciones de transmisión calculadas en la propuesta, que permitan mejorar el rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para Rally. La evolución y fabricación de los piñones rectos para cajas de cambios de automóviles de competición son aspectos de gran relevancia en el desarrollo de vehículos de alto rendimiento dado que estos componentes son muy importantes en la transmisión de potencia desde el motor hasta las ruedas, siendo piezas clave para optimizar el rendimiento en las competiciones automovilísticas (Martínez & Vallejo, 2020).

La investigación en curso ha sido realizada debido al actual rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio, la misma que puede ser optimizada por medio de transmisión de piñones que mejoren el rendimiento de la caja de cambios en carreras de competencia de Rally. En este contexto, la durabilidad específica de una caja de cambios puede variar según el diseño y la marca del vehículo, así como las condiciones específicas de cada carrera. Bajo este enfoque, Hernández et al. (2022), determina que se ha observado un avance en el diseño y fabricación de piñones rectos dado que, en sus primeras etapas, estos componentes eran fabricados mediante procesos de mecanizado tradicionales, lo que resultaba en limitaciones en términos de precisión y resistencia. Sin embargo, con las innovaciones tecnológicas en el campo automotriz, así como el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, en el que se destaca el fresado CNC y la fabricación aditiva, se ha logrado una mejora destacada en la calidad y rendimiento de los piñones rectos (Delcid, Perdomo, & Ordoñez, 2020).

Como respuesta a la situación planteada, se pretende diseñar y fabricar nuevas relaciones de transmisión de piñones rectos que permitan mejorar optimizar el rendimiento de una caja de cambios de un Renault Clio para Rally, además de planificar una serie de

pasos que permitan evaluar de una manera idónea el funcionamiento de estas nuevas relaciones de transmisión que contribuyen a un mejor rendimiento de la caja de cambios.

Para la consecución de los objetivos planteados, la propuesta en mención se inicia con la justificación, que establece el contexto del tema de estudio, seguida por la exposición del problema que motiva la idea, así como los objetivos de la intervención propuesta. Posteriormente, se aborda el Marco Teórico, donde se definen conceptos relevantes, y se presentan las conclusiones orientadas al mejoramiento de la caja de cambios, considerando las variables consideradas en el diseño.

Planteamiento del problema

Un buen diseño tanto de transmisión como de la caja de cambios permiten el funcionamiento óptimo de un vehículo, principalmente en el Rally donde se busca minimizar el tiempo necesario para cambiar de velocidades y optimizar las relaciones de transmisión según la potencia del motor (Lázaro, 2023). De manera que, la estructura de la caja de cambios en el caso del Renault Clio para rally, debe ser sustituida debido a la necesidad de mejorar el rendimiento de su caja de cambios para optimizar su desempeño en las variadas condiciones de terreno y las demandas extremas de este tipo de competencias.

En este punto, es importante considerar el cambio de los piñones puesto que están sujetos a altas cargas y condiciones de operación extremas, lo que puede resultar en roturas prematuras y fallas que afectan negativamente el rendimiento. Por lo que, se tiene la necesidad de implementar piñones rectos, ya que no solo son fáciles de fabricar, sino que no presentan inconvenientes de ruidos o producción de vibraciones (Díaz, Suero, & López, 2020). Además, tienen mayores ventajas dentro de las competencias por su eficiencia en la transmisión del torque, aunque su construcción sea compleja (Muñoz & Sánchez, 2021).

Una vez modificada la caja de cambios también se debe modificar la transmisión actual debido a que no maximiza el rendimiento del vehículo, por lo cual, se implementan cambios para que cumplan con las nuevas exigencias (Muñoz & Sánchez, 2021), proporcionando así la potencia requerida en el vehículo para facilitar las maniobras, mejorar el confort y garantizar la seguridad (Vivas, 2021). De acuerdo con estas modificaciones, se pretende mejorar el rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para rally.

Justificación

En las competencias automovilísticas de alto rendimiento, se emplean diversas configuraciones de cajas de cambios adaptadas a los requisitos específicos de cada disciplina, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los vehículos al máximo. En este tipo de competencias se distinguen distintas disciplinas como La Fórmula 1, que ha alcanzado una gran notoriedad y autoridad en las últimas décadas gracias a su amplia cobertura televisiva. Este deporte consiste en una competición de monoplazas que cuentan con tecnología de vanguardia, disputada en circuitos cerrados de asfalto Barazas (2020). A diferencia de la Fórmula 1, la competencia de Rally es una disciplina del automovilismo en la que los participantes compiten por completar tramos de carretera los cuales pueden variar en superficie, en el menor tiempo posible y a diferencia de otras modalidades, en este tipo de deporte, los vehículos compiten uno a la vez. En efecto, no hay carreras directas entre pilotos en la pista, es decir, la competencia se centra en superar el cronómetro, no en adelantar o seguir a otros pilotos.

La mejora del rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para rally, permite mantener la competitividad y la fiabilidad del vehículo, ya que una caja optimizada no solo mejora el rendimiento en carrera, sino que reduce los tiempos de vuelta en pista, mejorando el desempeño general del equipo. El diseño de nuevas relaciones de transmisión y la fabricación de piñones rectos permiten una mejora significativa en la

respuesta del vehículo y la eficiencia de la transmisión, así como una mayor resistencia del sistema a condiciones extremas.

Para Smith & Johnson (2018), uno de los factores a destacar en la fabricación de piñones rectos para autos de competencia es el tratamiento térmico, proceso que se utiliza para modificar las propiedades mecánicas del material como la dureza y la resistencia al desgaste, con el fin de aumentar la vida útil y la fiabilidad de los piñones bajo condiciones extremas de operación. Los tratamientos térmicos más comunes incluyen la cementación y revenido, que aumentan la dureza del material, y el nitrurado, que mejora la resistencia al desgaste (Brown, 2021). Además de la fabricación, el diseño de los piñones rectos también ha experimentado avances significativos dado que los ingenieros se esfuerzan por optimizar la geometría de los dientes, los materiales utilizados y otros aspectos para maximizar la eficiencia de la transmisión de potencia y minimizar la pérdida de energía por fricción y desgaste (Smith et al., 2022).

Objetivo General

Mejorar el Rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio a través del Diseño de Nuevas Relaciones de Transmisión y la Fabricación de Piñones Rectos para Competencias de Rally

Objetivos específicos

- Analizar las características y requisitos específicos de la caja de cambios para rally, mediante revisión bibliográfica, para la mejora en la relación de transmisión.
- Diseñar nuevas relaciones de transmisión por medio de cálculo y herramientas de análisis estructural, que se adapten a las condiciones de manejo para una competición en rally.
- Fabricar los piñones rectos que presenten mejor comportamiento en el proceso de simulación e inflación del nuevo sistema de transmisión en el vehículo.

- Realizar el tratamiento térmico en los piñones contruidos mediante el proceso de cementación y revenido para el incremento de dureza necesaria.
- Evaluar el incremento de potencia a las ruedas entre la caja original y la fabricada a través de mediciones en el dinamómetro, generando los valores de rendimiento entre las dos relaciones de transmisión.

Hipótesis

La combinación de nuevas relaciones de transmisión y piñones rectos en la caja de cambios del Renault Clio para rally resultará en una mejora general en la eficiencia de la transmisión de potencia, lo que se traducirá en un aumento de la confiabilidad del vehículo durante las competiciones de rally.

Estudio del Arte

La optimización del rendimiento y la durabilidad de la caja de cambios en vehículos de rally, como el Renault Clio, es fundamental para competir en condiciones extremas. En este sentido, el diseño de relaciones de transmisión innovadoras y la utilización de piñones rectos son áreas de investigación clave para mejorar la eficiencia y la resistencia de estas transmisiones.

Sistema de transmisión

El sistema de transmisión está compuesto por varios componentes como el embrague, la caja de cambios, el grupo reductor, el diferencial, los semiejes, entre otros. Además, el tipo de transmisión depende de dos factores: la posición del motor y las ruedas motrices, determinando así el eje o ejes que reciben el par motor (Bolaños, Pinto, & Álvarez, 2022). Siendo un conjunto de elementos que permiten el desplazamiento del automóvil, trasladando el movimiento de giro del cigüeñal y se reconoce la relación con las ruedas ya que esta varía en función de las exigencias de la carga, así como del perfil de la calzada (Dirección General de Tráfico, 2017).

Figura 1

Sistema de transmisión



Nota. Imagen tomada de (Bolaños, Pinto, & Álvarez, 2022).

La transmisión de un automóvil se determina principalmente por la posición del motor y por las ruedas motrices, es decir, que cuando las ruedas delanteras y su eje reciben la transmisión, se llama tracción delantera, pero si las ruedas traseras y su eje son los que reciben la transmisión, se denomina tracción trasera o propulsión. Cuando las cuatro ruedas son motrices, el vehículo se clasifica como de tracción total o 4x4 y a pesar de que los componentes de la transmisión en las configuraciones de tracción delantera, tracción trasera y 4x4 varían en diseño, funcionan bajo principios similares (Caiza & Puebla, 2022).

En síntesis, las transmisiones han estado en continua evolución, por ello, se ha buscado continuamente no sólo la sofisticación sino también la adaptación a las necesidades de los conductores. En el caso de Renault, en 1997 desarrollaron una caja de cambios diseñada para hacer más accesibles las transmisiones automáticas al público. Esta transmisión auto adaptativa de cuatro velocidades es capaz de adaptarse a las condiciones de funcionamiento mediante leyes de paso en el que Siemens construyó el procesador para esta caja de cambios. Aunque Renault, Citroën y Peugeot utilizan la misma transmisión, cada marca ajusta la gestión electrónica según el modelo y el motor específico (Ares, 2014).

Caja de cambios

También conocida como caja de velocidades se compone principalmente de conjuntos de engranajes como se observa en la Figura 2. A través de la multiplicación o reducción del número de revoluciones, se produce un incremento o decremento en el torque. Por ejemplo, si un piñón con un número de dientes z_1 está conectado con otro piñón con un número de dientes z_2 , el torque aumenta o disminuye en función de la relación $R=z_1/z_2$. Es decir, si el piñón conducido tiene más dientes que el piñón conductor, el torque se incrementa en la salida de la transmisión, mientras que, si tiene menos dientes, el torque se reduce (Dirección General de Tráfico, 2017).

Figura 2

Caja de cambios / Renault Clio



Nota. Imagen tomada Taller/ Autor.

Función de la caja de cambios

La función principal de la caja de cambios es transformar el par motor y ajustar las revoluciones del motor en relación con la velocidad de las ruedas ya que esto permite al conductor arrancar desde el reposo utilizando un alto torque y luego, por ejemplo, alcanzar una velocidad de 30 km/h a 4000 rpm, reduciendo las revoluciones a 2500 rpm, pero aumentando la velocidad a 45 km/h con solo cambiar la relación de transmisión en la caja de cambios. Cabe mencionar que, el motor por sí solo no puede satisfacer todas las demandas de manejo, por lo que la caja de cambios es esencial para superar todas las fuerzas que actúan sobre un vehículo en reposo, especialmente el peso y la resistencia a la rodadura, además de incrementar progresivamente la velocidad reduciendo el torque en cada marcha hasta alcanzar la velocidad deseada (Muñoz & Sánchez, 2021).

Para generar los distintos cambios de velocidad, es necesario contar con un conjunto de engranajes y sincronizadores, que permiten este proceso. Además, es el embrague, que tiene la función de acoplar o desacoplar el movimiento del motor al eje primario de la caja de cambios. Cuando se enciende el vehículo, el embrague estará

acoplado al eje primario, permitiendo el paso de movimiento hacia los piñones. Este eje incluye un engranaje denominado piñón de arrastre, que siempre está engranado con otro piñón en el eje intermedio, lo que permite el movimiento de ambos ejes (Campoverde & Conchambay , 2023).

Tipos de cajas de cambio

Manual

En el manejo de una caja de cambios manual, es el conductor quien opera la palanca de cambios ubicada dentro del vehículo para seleccionar la marcha adecuada en cada momento. El conductor elige las velocidades según lo necesite. Dentro de la caja de cambios, hay parejas de piñones dentados engranados entre sí para cada velocidad (Alzallú, 2016). Los engranajes están tallados con dientes helicoidales y están dispuestos de manera que los piñones del eje intermediario y los del eje secundario permanezcan siempre en engrane (Dirección General de Tráfico, 2017)

Dependiendo de la marcha seleccionada, se activan diferentes parejas de piñones. La selección de estos piñones la realiza el conductor mediante la palanca de cambios. Esta acción dentro de la caja de cambios permite seleccionar la velocidad deseada a través de mecanismos precisos e ingeniosos llamados sincronizadores. Este proceso se explica con más detalle en el tema específico de las cajas de cambio manuales (Alzallú, 2016).

Automático

En este tipo de cajas de cambios, todos los procedimientos de selección de marchas se realizan automáticamente, eligiendo la más adecuada según las condiciones de carga del vehículo. El conductor solo necesita establecer la velocidad deseada y puede concentrarse por completo en las condiciones del tráfico. La mayoría de los mecanismos automáticos están equipados con un convertidor de par, un conjunto de engranajes planetarios de varias etapas y un sistema de control hidráulico (Dirección General de Tráfico, 2017).

El sistema de control hidráulico es operado por la palanca selectora, que controla el desplazamiento del pistón, y por el pedal del acelerador, que regula el suministro de combustible. La palanca selectora cuenta con 5 posiciones: D y L, para velocidades distintas, cortas y largas respectivamente; N, punto muerto; P, estacionamiento; y R, marcha atrás. Es importante destacar que esta denominación puede variar dependiendo del fabricante (Dirección General de Tráfico, 2017).

Algunos fabricantes de automóviles producen cajas de cambio automáticas con hasta nueve velocidades, y es probable que este número aumente con el tiempo. En el mercado, hay una variedad de vehículos que lo utilizan, incluyendo todoterrenos, automóviles y motocicletas, entre los ejemplos disponibles en el mercado se tiene a: Toyota Rav4 2.0 Dual VVTi 4x2 CVT, Toyota Corolla CVT, Mitsubishi Outlander CVT, Nissan Sentra Xtronic CVT, Nissan X-Trail CVT, Nissan Murano CVT, Toyota Prius Híbrido y Chevrolet Silverado Híbrido (Caiza & Puebla, 2022).

Figura 3

Caja de cambio automática



Nota. Imagen tomada Taller/ Autor.

De doble embrague o semiautomática

También llamada transmisión manual automatizada, la caja de doble embrague es comúnmente utilizada en vehículos de competición, aunque también se encuentra en algunos vehículos de calle. Esta tecnología permite realizar los cambios sin necesidad de usar el embrague, gracias a la utilización de dos embragues y dos conjuntos de selectores: uno para las marchas pares y otro para las impares (Campoverde & Conchambay , 2023).

Importancia de la caja de cambio en vehículos de competencia

La necesidad de una caja de cambios modificada para competición surge de la exigencia de eliminar por completo los tiempos muertos durante el cambio de marcha y de la conveniencia. En ciertos casos, de poder realizar el cambio de marcha sin necesidad de presionar el pedal del embrague, lo que también evita una caída abrupta en las RPM. Todos los vehículos de competición inicialmente utilizaron cajas de cambios manuales mecánicas, pero conforme los motores evolucionaron, también lo hicieron estas cajas. Los ingenieros se dieron cuenta de que se podía optimizar al máximo el rendimiento del motor mediante una caja de cambios que pudiera cumplir con sus exigencias (Muñoz & Sánchez, 2021).

En 2014, en la Fórmula 1, se produjo un cambio de era en el deporte, donde los motores redujeron drásticamente su tamaño y pasaron a ser motores de 6 cilindros con una capacidad de 1600 centímetros cúbicos sobrealimentados. En esta categoría, se utilizaban cajas de 7 velocidades, pero con el cambio a motores más pequeños se añadió una marcha adicional, por lo que actualmente son de 8 velocidades. Desde entonces, los vehículos han demostrado ser altamente eficientes y han logrado alcanzar velocidades máximas nunca antes vistas, sin sacrificar la capacidad de aceleración que los caracteriza ni su agresividad en el manejo (Muñoz & Sánchez, 2021).

Otro ejemplo en el mundo de las competencias corresponde a NASCAR, aunque su tecnología es muy distinta a la de los Fórmula 1. Equipan motores de aproximadamente

700 CV y disponen de una caja de cambios manual en H con cuatro marchas. Esta configuración de marchas es relativamente larga, ya que el objetivo principal no es la aceleración, sino alcanzar una alta velocidad con la cuarta marcha que les permita completar el óvalo lo más rápido posible durante muchas vueltas, sumando un total de unas 500 millas de recorrido (Barazas, 2020).

Averías y problemas de las cajas de cambio

A continuación, se explican las posibles fallas que pueden presentarse en la parte interna de una caja de cambios clasificada en grupos:

Tabla 1

Averías y problemas de las cajas de cambio

Avería	Síntoma
Problemas de ruidos	Pueden deberse al desgaste de los engranajes o a la rotura de uno o más dientes, holgura en los rodamientos de apoyo de ambos árboles, desalineación de alguno de los árboles, presencia de residuos metálicos en el interior de la caja de cambios debido al desgaste excesivo de piñones o sincronizadores, o falta de nivel de aceite.
Dureza para seleccionar las velocidades	Puede ser causada por el endurecimiento de las varillas desplazables debido a depósitos sólidos o suciedad en el aceite, rotura de los muelles de enclavamiento del sincronizador, o un sistema de embrague en mal estado o mal regulado.

Avería	Síntoma
Des engranaje de velocidades	Esto puede ocurrir por el desgaste prematuro o rotura de los muelles fijadores de los desplazables o la pérdida del coeficiente de elasticidad de los muelles.
Rascado de velocidades	Suele ser resultado del desgaste del sincronizador correspondiente a la velocidad seleccionada o del embrague en mal estado.
Pérdida de aceite	Puede ser causada por un nivel de aceite excesivamente alto, lo que genera sobrepresión dentro de la caja de cambios y provoca filtraciones por el tubo de respiro.

Nota. Esta tabla muestra información de los problemas que pueden generarse en la caja de cambio (Campoverde & Conchambay , 2023).

Tipos de engranajes

Se denomina engranaje a la unidad utilizada para la transferencia de movimiento rotatorio entre partes de una máquina. Estos dispositivos se acoplan mediante dientes, de manera que, son ruedas que encajan entre sí, generalmente comenzando a engranar de manera gradual a lo largo de su recorrido. Se emplean para transmitir potencia de una parte de la máquina a otra. Un ejemplo es en un automóvil, los engranajes transfieren energía desde el cigüeñal al eje de transmisión, que luego la transmite a las ruedas (Chimbo & Velásquez, 2020)

Engranajes rectos

Los engranajes rectos son el tipo más sencillo de engranajes disponibles y se utilizan principalmente para velocidades relativamente bajas y medias. En estos

engranajes, los dientes están dispuestos de forma paralela al eje de transmisión, lo que permite transmitir el movimiento entre ambos ejes. Son usados para transmitir potencia y movimiento angular. De manera que, el elemento de menor tamaño se conoce como piñón, mientras que el de mayor tamaño se llama engrane. (Chimbo & Velásquez, 2020).

Figura 4

Engranajes rectos



Nota. Imagen tomada Taller/ Autor.

Este tipo de engranaje está compuesto por el piñón de arrastre y de 4° velocidad o directa, y el piñón que mueve el árbol intermediario. El árbol intermedio está equipado con piñones solidarios de 1°, 2°, y 3° velocidad, así como piñones locos para 1°, 2°, y 3° velocidad. También incluye el piñón de marcha atrás y el piñón solidario de M.A. El eje secundario o de salida trabaja junto con los sincronizadores de 1° y 2° velocidad, y de 3° y 4° velocidad, y se completa con el piñón de engranaje de M.A. (Campoverde & Conchambay , 2023).

Los piñones rectos son componentes esenciales en la caja de cambios de un automóvil de rally, y su fabricación influye directamente en la durabilidad y la eficiencia del sistema de transmisión. La utilización de tecnologías avanzadas de fabricación, como el fresado por generación, ha demostrado ser efectiva para producir piñones rectos con tolerancias ajustadas y una calidad superficial óptima (Smith & Johnson, 2018). Además, la

introducción de nuevos materiales, como el acero de alta resistencia, puede mejorar la durabilidad y reducir el peso de los piñones, lo que beneficia el rendimiento del vehículo (Martínez et al., 2021).

En un auto de competición como el de rally los piñones rectos ofrecen una eficiencia de transmisión superior en comparación con otros tipos de piñones, como los helicoidales (Litvin & Fuentes, A., 2004). Esta mayor eficiencia se debe a la disposición de los dientes rectos, que permiten una transferencia directa de potencia con menor pérdida de energía debido a la reducida fricción y flexión de los dientes durante la transmisión de fuerza (Salgado et al., 2019).

La construcción de piñones rectos proporciona una mayor resistencia y durabilidad debido a su diseño robusto, lo que los hace más adecuados para soportar cargas de torsión extremas, características comunes en las condiciones de competición de los autos de carreras (Pyzalla, 2016). Esta resistencia adicional es esencial para mantener un rendimiento óptimo del vehículo durante períodos prolongados de uso intensivo (Dieter & Schmidt, 2018).

Engranajes helicoidales

Los engranajes helicoidales pueden considerarse como engranajes rectos, pero han sido mecanizados en un equipo especial donde las láminas delgadas se han girado ligeramente una con respecto a la otra. Esta modificación en la forma de los dientes permite una transición más suave y silenciosa de la potencia, ya que los dientes se engranan de manera progresiva. Cada vez que transmiten potencia, ambos engranajes experimentan una carga de empuje, lo que genera una fuerza axial que debe ser soportada por los rodamientos del sistema.

Se distinguen por tener dientes inclinados en relación con el eje de rotación, lo que permite que la carga se distribuya de manera más uniforme y mejora la capacidad de carga del engranaje. Los ejes de estos engranajes pueden ser paralelos o cruzarse, siendo

común en este último caso un ángulo de 90°, lo que los hace adecuados para aplicaciones en las que se requiere un cambio de dirección en la transmisión de potencia, como en los diferenciales de vehículos o en sistemas de dirección (Chimbo & Velásquez, 2020).

Figura 5

Engranajes helicoidales



Nota. Imagen tomada Taller/ Autor.

Número de dientes de piñón

Para seleccionar el número mínimo de dientes que deben tener un par de engranajes, se deben usar conjuntamente la Tabla 2 (Duque, 2017). También se debe considerar que la configuración de ser de acuerdo con el tipo de vehículo, los pares de engranajes deben mantener una distancia entre ejes uniforme y deben tener el mismo módulo (Sarria, 2018).

Tabla 2

Número de dientes del piñón, engranajes rectos

Dientes	Observaciones
7-9	El número mínimo de dientes no se recomienda debido a varias razones:

Dientes	Observaciones
	<p>a. Requiere un desplazamiento de perfil positivo para evitar la socavación en cualquier ángulo de presión.</p> <p>b. En caso de ángulo de presión de 20°, se reduce el diámetro exterior de forma proporcional al espesor del diente para evitar que los dientes se vuelvan puntiagudos.</p> <p>c. Siempre que sea posible, se recomienda utilizar un ángulo de presión de 25°.</p> <p>d. En pasos diametrales finos, puede resultar una relación de contacto deficiente debido a la acumulación de tolerancias, especialmente cuando $m_n \leq 1,25$.</p> <p>e. Existe el riesgo de fallas por deslizamiento plástico y desgaste.</p>
10	<p>Número mínimo práctico con un ángulo de presión de 20°:</p> <p>a. Requiere un desplazamiento de perfil positivo para evitar la socavación en ángulos de presión de 20° o menores.</p> <p>b. La relación de contacto puede ser crítica en pasos finos.</p>
12	<p>Número mínimo práctico para engranajes de potencia con módulos superiores a 2 mm:</p> <p>a. Requiere un desplazamiento de perfil positivo para evitar la socavación en ángulos de presión de 20° o menores.</p> <p>b. Puede considerarse "estándar" el número mínimo de dientes si el ángulo de presión es de 25°.</p>

Dientes	Observaciones
	c. Este es el número mínimo de dientes recomendado para engranajes de potencia donde la durabilidad es crucial.
25	Ofrece un equilibrio adecuado entre la resistencia y el desgaste en el caso de aceros endurecidos. Además, asegura que el contacto, definido por el diámetro primitivo, se encuentre distante de la región crítica del círculo base.
50	Ofrece una resistencia al desgaste excepcional y es especialmente adecuado para aplicaciones en engranajes de alta velocidad debido a su operación silenciosa. Es esencial para garantizar la resistencia en todos los piñones, excepto aquellos de baja dureza.

Nota. Esta tabla muestra información del número de engranajes rectos que pueden utilizarse. Tomado de (Duque, 2017).

Fabricación de Piñones Rectos para Autos de Competición

La fabricación de piñones rectos para autos de competición es un proceso altamente especializado que requiere un profundo conocimiento de la ingeniería mecánica, la metalurgia y los materiales. Se explorarán los aspectos relacionados con la fabricación de estos componentes críticos, desde la investigación de nuevos materiales hasta la implementación de técnicas de fabricación avanzadas. Se presentarán estudios de caso, datos experimentales y análisis teóricos para proporcionar una visión integral de este tema. Además, se abordarán los desafíos y oportunidades que enfrentan los fabricantes de piñones rectos en el contexto de la competición automovilística de alto nivel.

Selección de materiales

La elección del material adecuado es fundamental para la fabricación de piñones rectos que cumplan con los rigurosos requisitos de rendimiento y durabilidad de los autos de competición. Ashby (2011), proporciona una guía detallada sobre los factores a

considerar al seleccionar materiales para aplicaciones de alta carga y alta velocidad, conocido como un proceso crítico que requiere un profundo conocimiento de la metalurgia, la ingeniería de materiales y las demandas específicas de las aplicaciones automotrices de alto rendimiento.

Se examinarán las consideraciones que influyen en la selección de materiales para piñones rectos, desde sus propiedades mecánicas hasta su resistencia al desgaste y su capacidad para soportar cargas extremas y velocidades elevadas. Además, se discutirán las implicaciones prácticas de la selección de materiales en el diseño, fabricación y rendimiento de los piñones rectos en el exigente mundo de la competición automovilística de alto nivel.

Propiedades mecánicas de los materiales

Una de las consideraciones más importantes en la selección de materiales para piñones rectos es su resistencia mecánica. Los materiales utilizados deben ser capaces de soportar cargas extremas sin deformarse permanentemente o fracturarse. La resistencia a la tracción, la resistencia a la fatiga y la tenacidad son algunas de las propiedades mecánicas clave que se deben tener en cuenta al seleccionar materiales para piñones rectos (Ashby, 2011).

Resistencia al desgaste

Otro aspecto en la selección de materiales para piñones rectos es su resistencia al desgaste. Los piñones rectos están sujetos a condiciones de operación extremas, que pueden incluir altas velocidades, cargas pesadas y frecuentes cambios de dirección. Por lo tanto, los materiales utilizados deben ser capaces de soportar el desgaste abrasivo y adhesivo para garantizar una vida útil prolongada del componente.

Estabilidad dimensional

La estabilidad dimensional es otra consideración importante en la selección de materiales para piñones rectos. Los materiales utilizados deben ser capaces de mantener

sus dimensiones y tolerancias bajo condiciones de carga y temperatura variables. La expansión térmica, la contracción y la deformación son factores que pueden afectar la precisión y el rendimiento de los piñones rectos durante la operación. Por lo tanto, es importante seleccionar materiales con una alta estabilidad dimensional para garantizar un funcionamiento óptimo del componente (Ashby y Jones, 2012).

Corrosión y Fatiga

Además de las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la fatiga también son consideraciones importantes en la selección de materiales para piñones rectos. La corrosión puede debilitar la estructura del material y provocar fallas prematuras, mientras que la fatiga puede ocurrir debido a cargas cíclicas y conducir a fracturas catastróficas del componente (Alireza et al., 2013).

Consideraciones específicas de la aplicación automotriz

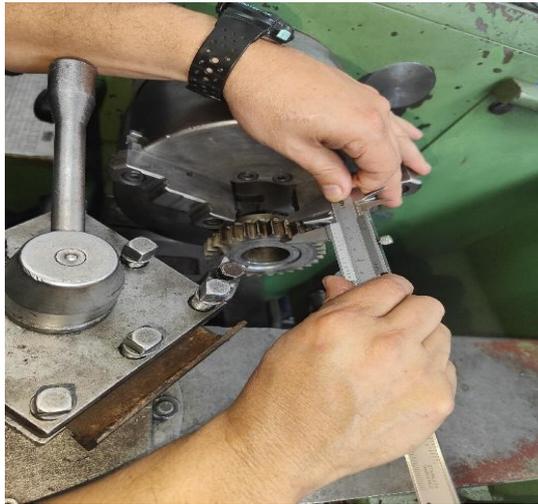
Es necesario considerar la resistencia al desgaste, la estabilidad dimensional, la corrosión y la fatiga, existen consideraciones específicas de la aplicación automotriz que deben tenerse en cuenta al seleccionar materiales para piñones rectos. Por ejemplo, los piñones rectos utilizados en autos de competición están sujetos a cargas extremas y velocidades elevadas, lo que puede requerir materiales con propiedades excepcionales en términos de resistencia y durabilidad. Además, los piñones rectos deben ser ligeros para minimizar la masa no suspendida y maximizar la eficiencia y la aceleración del vehículo (Rensburg, 2015).

Diseño y Modelado

El diseño y modelado de los piñones rectos es un paso crucial en el proceso de fabricación. Se utilizan software de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis de elementos finitos (FEA) para optimizar la geometría de los dientes y predecir su comportamiento bajo carga (Pandey et al., 2018).

Figura 6

Diseño y Modelado



Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un paso muy importante en la fabricación de piñones rectos, ya que influye en sus propiedades mecánicas y su resistencia al desgaste. Se utilizan diferentes técnicas de tratamiento térmico, como el temple y revenido, para optimizar la dureza y tenacidad de los piñones rectos (Raut et al., 2016).

Figura 7

Tratamiento térmico



Rectificado y Acabado

El rectificado y acabado final de los piñones rectos es un paso para garantizar su precisión dimensional y su suavidad de funcionamiento. Se utilizan técnicas avanzadas de rectificado, como el rectificado por generación y el rectificado de perfil, para lograr tolerancias estrechas y acabados superficiales de alta calidad (Radzevich, 2018).

Figura 8

Rectificado y acabado



Pruebas de Validación

Una vez fabricados, los piñones rectos deben someterse a pruebas para garantizar su rendimiento y durabilidad. Se utilizan pruebas de fatiga, resistencia y desgaste para evaluar la calidad y confiabilidad de los piñones rectos en condiciones de operación reales (Singh et al., 2019). Si bien la fabricación de piñones rectos para autos de competición presenta numerosos desafíos, también ofrece oportunidades para la innovación y la mejora continua. Los avances en materiales, procesos de fabricación y tecnologías de prueba están llevando a la creación de piñones rectos más ligeros, resistentes y eficientes.

La literatura técnica y de investigación en este campo es extensa y en constante evolución, lo que proporciona un amplio campo para la exploración y el descubrimiento. La fabricación de piñones rectos para autos de competición es un proceso complejo que requiere un enfoque integral desde la investigación y la práctica. La selección de materiales adecuados, el diseño preciso, el uso de técnicas avanzadas de fabricación y la

validación son clave para garantizar la calidad y confiabilidad de los piñones rectos en las condiciones exigentes de la competición automovilística de alto nivel.

Se concluye que el avance en el diseño de relaciones de transmisión y la fabricación de piñones rectos ofrece oportunidades significativas para mejorar el rendimiento y la durabilidad de la caja de cambios del Renault Clio para rally. La combinación de relaciones de transmisión innovadoras y piñones rectos de alta calidad puede proporcionar una ventaja competitiva en el mundo del rally.

Simulación de los piñones

Realice el diseño de la piñonería en el programa Inventor acorde a las medidas base de los piñones originales posterior a calculo se define el diagrama de diseño para transportar a Sim Solid y generar la simulación de las fuerzas aplicadas en la operación de los piñones como son esfuerzo máximo, tensión de la materia (Von Misses).

Figura 9

Diseño en Inventor de piñones a medida

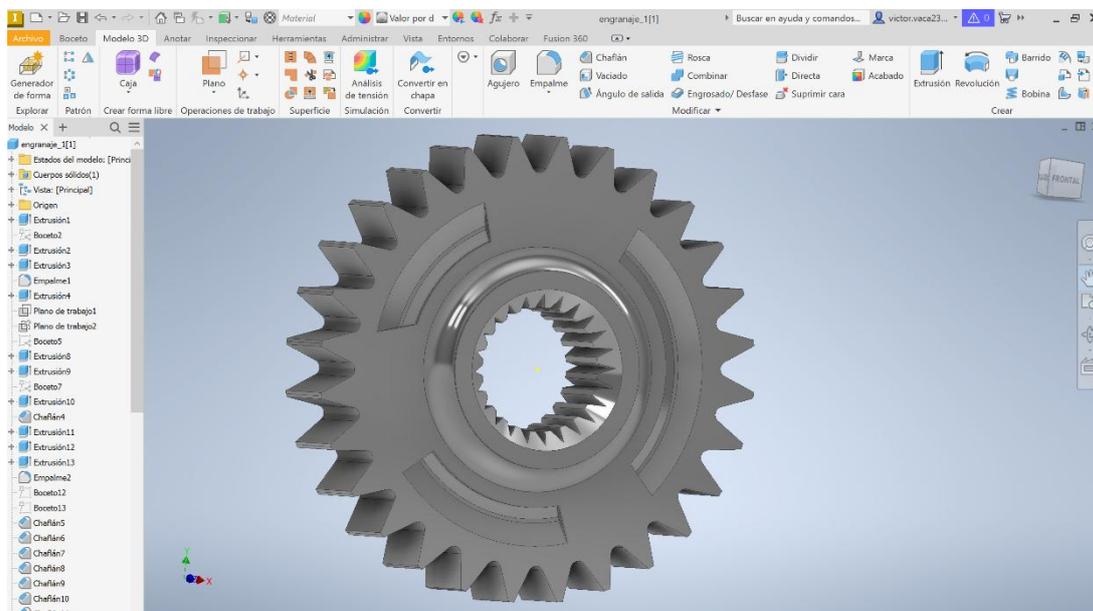
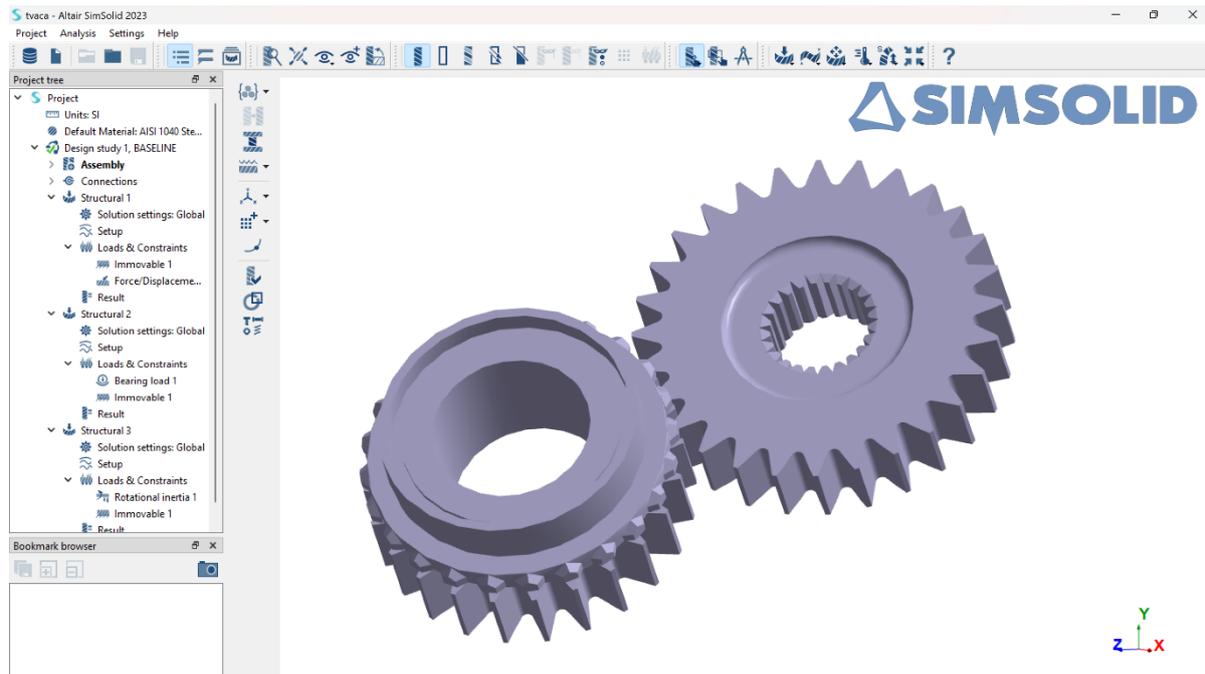


Figura 10

Simulación de piñones en SimSolid



Metodología

Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva que tiene como objetivo caracterizar el fenómeno estudiado (Ramos, 2020), de manera que, se basa en la revisión de la literatura existente sobre diseño de piñones rectos, procesos de fabricación, así como estudios previos sobre su impacto en el rendimiento de los vehículos de competición. También es de tipo aplicada que utiliza toda la información existente en un área concreta para resolver problemas particulares. Sus resultados se centran en validar posibles implementaciones de productos, prototipos o modelos, evaluando su transferencia y madurez tecnológica (Castro et al., 2023). De manera que, se realizan los siguientes puntos para cumplir con el objetivo:

- **Selección de materiales:** Para la fabricación de los piñones rectos, se compararon tres tipos de aceros Bohler disponibles en el país, luego de analizar las propiedades mecánicas de los tres tipos de aceros se optó por el acero Bohler E410, siendo este el acero más idóneo para fabricación de piñones, por su dureza final de 58 a 62 HRC luego del tratamiento de cementado, mientras que los otros dos aceros dan una dureza final luego del tratamiento de 48 a 52 HRC, y coincide con la recomendación de Aceros Bohler del Ecuador. En Tabla 3 se comparan las características de los tres tipos de aceros.:

Tabla 3

Propiedades del acero

Propiedades	Acero bohler E410	Acero bohler V320	Acero bohler V155
	C 0.14-0.19	C 0.38-0.45	C 0.30-0.38
Composición	Si ≤0.40	Si ≤0.40	Si ≤0.40
	Mn 1.0-1.30	Mn 0.60-0.90	Mn 0.50-0.80

	Cr 0.80-1.10	Cr 0.90-1.20	Cr 1.30-1.70
	Mo 0.15-0.30	Mo 0.15-0.30	Mo 0.15-0.30
	Ni -	Ni -	Ni 1.30-1.70
	~1.7131	~1.7225	~1.6582
Normas DIN	16MnCr5	42CrMo4	34CrNiMo6
			Acero bonificado al
			CrNiMo
	Acero de	Acero bonificado al	especialmente apto
	cementación al	CrMo de alta	para altas
	CrMn para piezas	resistencia y	exigencias de
	de construcción	tenacidad en	resistencia y
	mecánica	medianas y	tenacidad en
	resistentes al	pequeñas	secciones
	desgaste. Usos:	secciones. Usos:	grandes. Usos:
Usos/Aplicación	fabricación de	construcción de	fabricación de
	repuestos de	partes y piezas de	repuestos
	automotores y	automotores,	aeronáuticos,
	maquinaria como:	motorreductores,	automotores
	bielas, bujes,	árboles de	pesados y
	engranajes,	transmisión, ejes,	construcción de
	piñones, ejes sin	bielas, etc.	maquinaria como
	fin, etc.		hélices y ejes de
			torsión.
Temperatura temple	Cementación	840-860 °C	840-860 °C
°C	880-950 °C		
Medio de Temple	Aceite,	Aceite,	Aceite,
		baño de sales	baño de sales

	baño de sales,		
	agua		
Dureza máxima alcanzada	58-62 HRC	48-52 HRC	48-52 HRC

Fuente: Ficha técnica de aceros bohler

- **Experimentación y Pruebas:** Realización de pruebas en laboratorio y en campo para evaluar el rendimiento y durabilidad de los piñones rectos diseñados y fabricados
- **Diseño Basado en Normativas:** Aplicación de normativas y estándares de ingeniería para el diseño y fabricación de piñones rectos, asegurando que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad necesarios para su uso en competiciones automovilísticas.

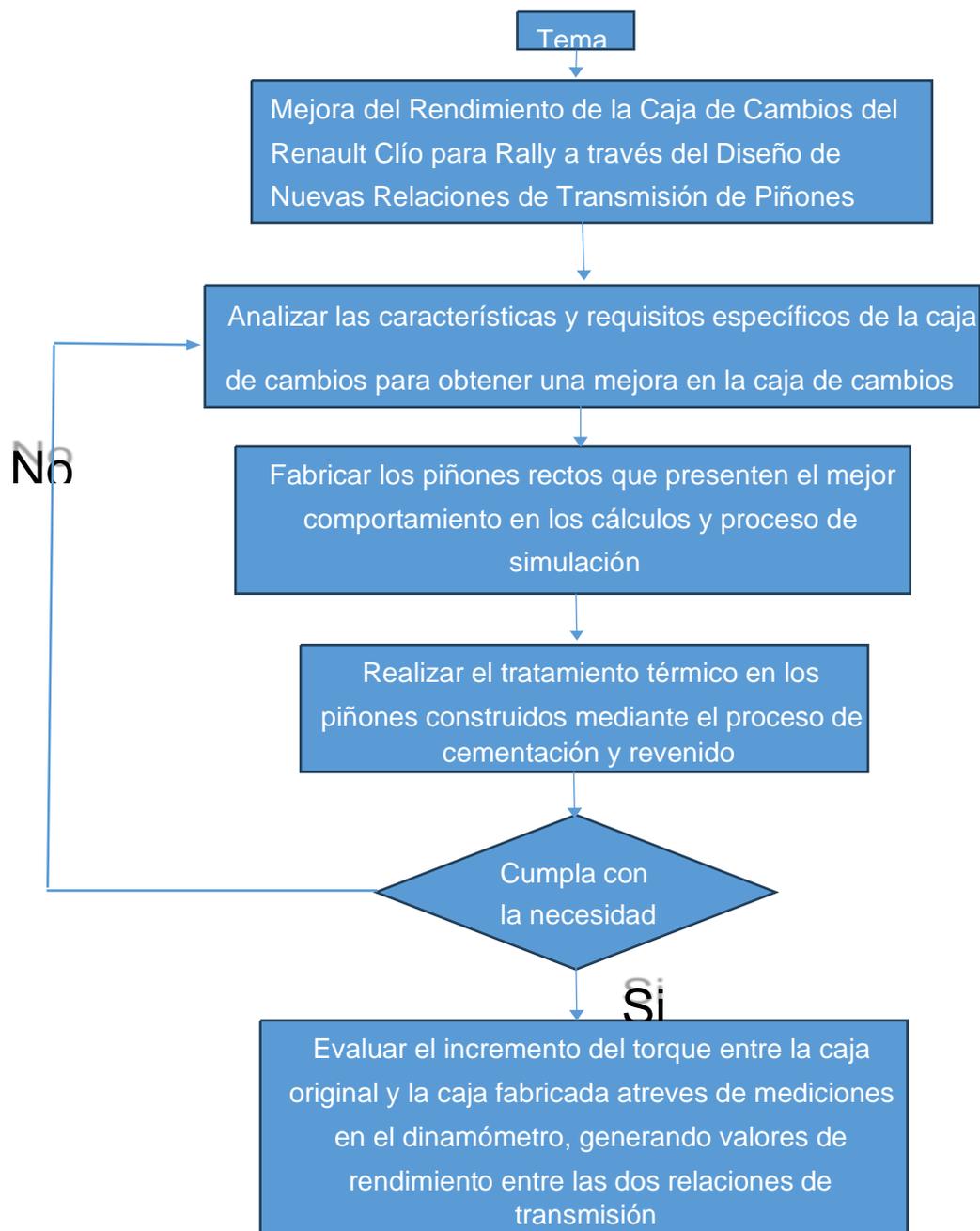
Los piñones rectos de acero utilizados en una caja de cambios de autos de competencia, son fabricados siguiendo la norma ANSI/AGMA 2101-D04, siendo ésta es la principal. La cual describe los fundamentos del diseño de engranajes rectos y helicoidales de acero, definiendo los criterios de diseño, cálculos de resistencia y durabilidad del engranaje utilizado en transmisiones de alto rendimiento para los autos de competencia. Otras de las normas relevantes, se encuentran: La norma ANSI/AGMA 2003-C10, la que guía cuáles son los materiales utilizados en engranajes de alto rendimiento y por último la norma SAE J499, la que da las especificaciones de los aceros para engranajes.

- **Prototipado rápido** utilizando tecnologías de fabricación aditiva para acelerar el proceso de desarrollo de prototipos (García et al., 2020).

- **Implementación de técnicas de optimización topológica** para optimizar la geometría de los piñones y reducir el peso sin comprometer su resistencia (Brown, 2021).
- **Pruebas de bancada** para evaluar el desempeño de los piñones rectos en condiciones de funcionamiento realistas (Jones & Brown, 2019).

Figura 11

Diagrama de flujo



Método

Determinación de las relaciones de transmisión

Una relación es la comparación entre dos o más elementos, y en este caso de estudio se refiere a la "relación de transmisión", que representa la proporción entre los piñones. Estos piñones, también conocidos como ruedas dentadas, son los encargados de transmitir el movimiento dentro de un sistema mecánico. Es la relación del número de dientes de un piñón motriz y del otro piñón transmitido, de tal forma que si el piñón de fuerza o motriz tiene 10 dientes y el de trabajo o transmitido 40 dientes, se deduce que el primero da un giro (360° angulares), el transmitido da $\frac{1}{4}$ de giro (90° grados angulares), siendo el transmitido cuatro veces mayor, por lo tanto la relación de transmisión será (4:1), igual a dividir el número de dientes del piñón transmitido para el número de dientes del piñón transmisor. Por lo tanto, la fuerza será multiplicada por cuatro veces y las revoluciones serán disminuidas en la misma proporción, porque la caja de cambios cumple doble función, que consiste en que mientras aumenta la fuerza disminuye las revoluciones o viceversa.

Pasos para la Determinación de Las relaciones de Transmisión

Se conocen tres métodos básicos para determinar las relaciones de transmisión;

- **Método 1:** Conociendo las revoluciones de cada uno de los piñones, se identifica el piñón transmisor y el número de revoluciones de éste, dividiendo para el número de revoluciones del piñón transmitido, y el resultado será la relación de transmisión (i).
- **Método 2:** Identificando los diámetros primitivos “do” del piñón transmitido, éste dato se divide para el diámetro primitivo del piñón transmisor y se obtiene la misma relación de transmisión (i). Cómo obtener el diámetro primitivo se verá más adelante.

- **Método 3:** se divide el número de dientes del piñón transmitido para el número de dientes del piñón transmisor, y el resultado es la relación de transmisión (i).

Fórmula General de la Relación de Transmisión.

La fórmula de la relación de transmisión considerada en conjunto quedaría así:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{o2}}{d_{o1}} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1)$$

Fundamentos para el diseño de las nuevas relaciones de transmisión de la caja de cambios del Renault Clio

Existen diversos estudiosos que han intentado explicar el funcionamiento de la caja de cambios a partir de las leyes de la física, pero la realidad es que no se ha logrado describir una fórmula mágica que permita determinar cómo se diseña la caja de cambios o la relación de transmisión adecuada para cada modelo de vehículo. De hecho, se ha constatado que hay casi tantas relaciones de transmisión como cajas de cambios existen en el mercado y esto se debe a que cada fabricante de automóviles elige las relaciones de transmisión en función de diversos factores como los costos de producción, el mercado al que se dirige el vehículo, el tipo de carrocería (sedán, deportivo, etc.), el uso previsto del vehículo (transporte de carga, trayectos cortos o largos, pasajeros, etc.) y las condiciones de operación (nivel del mar, altitud, etc.). Por lo tanto, se puede considerar que las decisiones sobre las relaciones de transmisión en las cajas de cambios son el resultado de las experiencias, aplicaciones y decisiones tomadas por los fabricantes en el campo mismo, a través de un proceso de experimentación y adaptación a las necesidades específicas de cada modelo de vehículo.

En este contexto, las variaciones en el rendimiento de vehículos de igual cilindrada, incluso dentro de la misma marca y potencia, se pueden atribuir a la influencia de la caja de cambios en el desempeño del vehículo y a pesar de que el motor es un factor importante, la transmisión también tiene un impacto significativo, cercano a la media, en el rendimiento global del vehículo. Para abordar este tema de manera más efectiva, es

necesario considerar un enfoque de diseño y cálculo de caja de cambios. En este sentido, se ha elegido el enfoque de Alonso (1996), presentado en el libro "Técnicas del Automóvil Chasis", que plantea un principio de diseño interesante y proporciona fundamentos importantes para su aplicación. Sin embargo, se considera necesario complementar este enfoque con otros aspectos mencionados anteriormente para lograr el objetivo de la tesis, que se centra en la mejora del rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para Rally a través del diseño de nuevas relaciones de transmisión piñones rectos.

Bajo esta premisa, Alonso (1996) considera el porqué de los cambios de marchas cuando plantea la siguiente ecuación:

$$Potencia = Resistencia \quad (2)$$

La potencia del motor es igual a la resistencia del vehículo, dicho en otra forma:

$$CxWxu = C^1xW^1 \quad (3)$$

Donde se reemplaza potencia por fuerza del motor (C), multiplicada por la relación de transmisión (W), y por un coeficiente (μ) o porcentaje de pérdida por arrastre de los elementos de transmisión, dando por igualdad a la potencia requerida (C^1), por la relación de transmisión total (W^1) necesaria. Si se relaciona dará la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{C^1} = \frac{W^1}{W} x \frac{1}{u} \quad (4)$$

De esta ecuación se deduce que: Cuando la fuerza resistente (C^1) aumenta la fuerza de motor (C) disminuye, por lo tanto, para mantener la igualdad, debemos variar también la relación de transmisión.

$$\frac{W^1}{W} \quad (5)$$

En otras palabras, hay que cambiar la marcha por otra de mayor rendimiento o más fuerte, según sea la necesidad y requerimiento de la conducción, lo que evidencia cuando el carro en ascenso en una carretera, siendo esta tan pronunciada que, el vehículo pierde

paulatinamente la velocidad, el motor baja de revoluciones, al punto de requerir una marcha más fuerte, a fin de que el motor recupere revoluciones altas, donde se desarrolla la potencia máxima del mismo motor, y se recupere y puedas vencer la cuesta. Luego el autor plantea el principio básico para el diseño general de las revoluciones de las marchas de las cajas de cambios, en función de determinar los rangos límites operativos del motor, datos obtenidos de un dinamómetro y que se recopilan como datos técnicos en cualquier ficha técnica del respectivo motor.

El diseño de la caja de cambios debe considerar las revoluciones del motor en todas las marchas y velocidades del vehículo, por lo que debe mantener el motor dentro de las revoluciones de 4500 a 7200 rpm en todas las marchas y velocidades. En este sentido, se debe trabajar dentro de la granja elástica del motor, considerando la velocidad máxima del vehículo. La velocidad inicial de la última marcha debe ser la final de la anterior marcha, y así sucesivamente, hasta llegar a la velocidad de la primera marcha, lo que implica que la primera marcha debe acelerarse hasta las revoluciones máximas del motor. Luego disminuir hasta las revoluciones del torque máximo, y mantener la velocidad inicial para iniciar la nueva aceleración. Las velocidades máximas obtenidas permiten calcular las relaciones de transmisión, un tema que no ha sido considerado por el autor y que, por lo tanto, permanece inconcluso. Además, se plantea que la primera marcha debe superar las fuerzas del peso del automóvil, la carga, la resistencia del aire, la resistencia de la fricción de la rueda y las fuerzas producto de la descomposición del peso en el plano inclinado, un tema de física que implica la descomposición de fuerzas en el plano inclinado y otras fuerzas que inciden en la determinación de la primera marcha.

Análisis y Evaluación de las Relaciones de Transmisión Actuales

En el análisis de la caja de cambios, se hace uso de cierto diagrama, producto de los datos de una hoja de cálculo, y se comparan los resultados con otros casos de vehículos de la misma cilindrada, diferentes potencias y aplicaciones. A partir de esta comparación, se llega a la siguiente conclusión: los fabricantes de automóviles se han

acogido a un principio básico de determinación, que hace referencia a la relación peso y potencia. En general, los automóviles guardan una relación muy similar ya que, si fueran demasiado pesados para el motor o muy livianos, no serían muy rentables o poco comerciables.

Para el caso de un automóvil de serie con prestaciones casi deportivas, a diferencia de otros, el fabricante garantiza la calidad y las prestaciones de un vehículo familiar o sedán. Sin embargo, antes de abordar este caso, se debe comprender la fórmula como primer aporte a ese planteamiento, con la cual se pueden determinar las velocidades finales o máximas de cada una de las marchas, al igual que su relación de transmisión. La velocidad final (v_f) de cada marcha y, por ende, la velocidad máxima del vehículo, si se considera la última marcha, es el producto de las revoluciones del motor como fuente de energía. La ecuación que describe este fenómeno sería:

$$v_f = \frac{nm(60)(d\pi)}{im.if.1000} \quad (6)$$

Donde:

- **v_f** la velocidad final de cada marcha por separado
- **nm** las revoluciones máximas del motor
- **60** constante para transformar las **RPM** a horas
- **$d.m$** perímetro de la rueda para determinar el recorrido por revolución de la rueda en metros
- **im** relación de transmisión de la marcha a calcular
- **if** relación de transmisión del diferencial
- **1000** constante para transformar los metros en kilómetros

Quedando así la ecuación:

$$v_f = \frac{nm(60)(d\pi)}{im.if.1000} = Km/h \quad (7)$$

Relaciones de Transmisión de Fábrica

El Renault Clio es un auto compacto, liviano y de muy buena maniobrabilidad para competencias de rally, trayendo unas relaciones de transmisión que son excelentes para el uso cotidiano, pero no son las ideales para las demandas extremas de las competiciones de rally. Al evaluar las relaciones de transmisión originales del Renault Clio, se identifica sus limitaciones y áreas de mejora en términos de eficiencia mecánica y capacidad de respuesta. El Renault Clio viene de fábrica con una caja manual de cinco velocidades y marcha atrás o retro, la misma que está diseñada para proporcionar un equilibrio entre el confort de avance en ruta, economía de combustible y desempeño en general, con las siguientes relaciones de transmisión.

- 1ª marcha: 3.727
- 2ª marcha: 2.136
- 3ª marcha: 1.414
- 4ª marcha: 1.108
- 5ª marcha: 0.848
- Relación de diferencial: 4.214

Figura 12

Relación de transmisión de la caja original

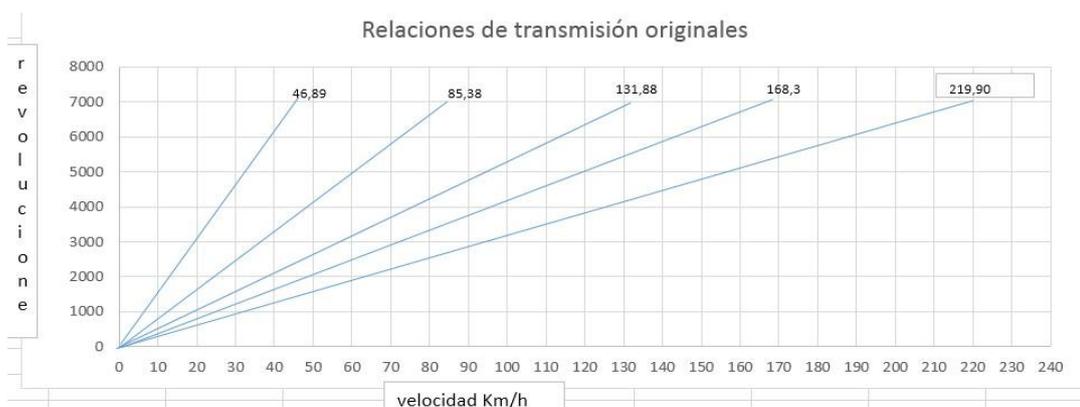


Tabla 4*Velocidades finales con caja original*

Marcha	Rpm	Diferencial	Relacion De Transmisión	Tamaño De Rueda 185/65 R 14	Velocidad Final Km/H
1 ^a	700	4.5	3.727	1.871	46.89
	0				
2 ^a	700	4.5	2.047	1.871	85.33
	0				
3 ^a	700	4.5	1.4141.321	1.871	131.88
	0				
4 ^a	700	4.5	0.966	1.871	168.3
	0				
5 ^a	700	4.5	0.731	1.871	219.90
	0				

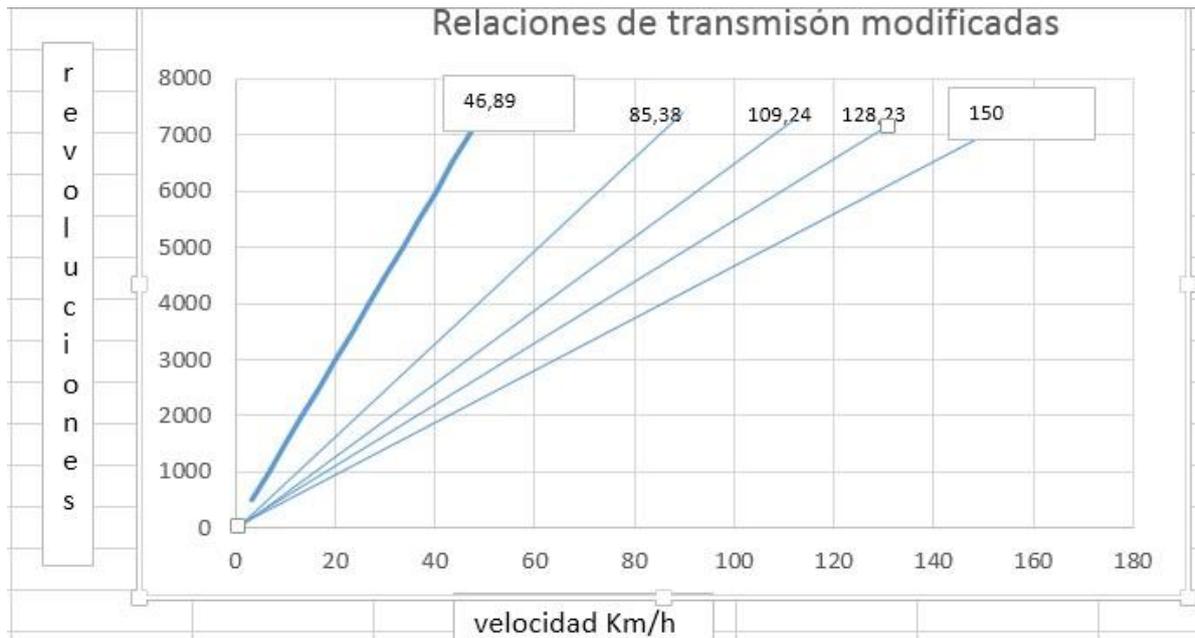
Luego de analizar el comportamiento de las relaciones de transmisión originales se calculan las nuevas relaciones de transmisión que son:

- 1^a marcha: 3.727
- 2^a marcha: 2.047
- 3^a marcha: 1.6
- 4^a marcha: 1.363
- 5^a marcha: 1.166
- Relación de diferencial: 4.5

En la figura 13 se tiene las nuevas relaciones de transmisión modificadas

Figura 13

Relaciones de caja modificadas



Ecuación de Velocidad final

$$Vf = \frac{0.06 * RPM * P}{R_T * R_D} \quad (8)$$

Donde:

Vf: velocidad final

RPM: Revoluciones

R_T: Relación de transmisión de cada marca

R_D: Relación de diferencial de cono y corona

P: Perímetro de la rueda

Factor de conversión de metros sobre minuto a kilómetros por hora: 0.06 km/h

Tabla 5*Velocidades finales con caja modificada*

Marcha	Rpm	Diferencial	Relación De Transmisión	Perímetro De la Rueda 185/65 R 14	Resolución de la Ecuación $\frac{0.06 * RPM * P}{R_T * R_D}$	Velocidad Final Km/H
1 ^a	7000	4.5	3.727	1.871	$\frac{0.06 * 7000 * 1.871}{3.727 * 4.5}$	46.89
2 ^a	7000	4.5	2.047	1.871	$\frac{0.06 * 7000 * 1.871}{2.047 * 4.5}$	85.38
3 ^a	7000	4.5	1.600	1.871	$\frac{0.06 * 7000 * 1.871}{1.600 * 4.5}$	109.24
4 ^a	7000	4.5	1.363	1.871	$\frac{0.06 * 7000 * 1.871}{1.363 * 4.5}$	128.23
5 ^a	7000	4.5	1.165	1.871	$\frac{0.06 * 7000 * 1.871}{1.165 * 4.5}$	150

En la figura 13 se puede observar cómo las caídas de revoluciones entre marcha y marcha no baja del torque máximo, por lo cual en las relaciones de transmisión modificadas garantizan que el motor siempre va a estar empujando. Mientras que con las relaciones de transmisión originales al cambio de marcha caen las revoluciones por debajo del torque máximo y el motor no logra empujar el auto hasta que las revoluciones lleguen al torque máximo, lo cual hace que el vehículo desmaye su marcha perdiendo segundos valiosos en competencia.

Conceptualización y Modelado de Relaciones de Transmisión

Basado en los datos recolectados, se procederá al diseño conceptual de nuevas relaciones de transmisión. Utilizando software de diseño asistido por computadora en el programa Inventor y una simulación en Sim Solid, se crearán modelos tridimensionales de

los piñones rectos. El objetivo es diseñar relaciones de transmisión que optimicen la entrega de potencia y la velocidad del vehículo en diversas condiciones de rally en el que se considerarán varios factores, como el diámetro de los piñones, el número de dientes y la geometría del perfil.

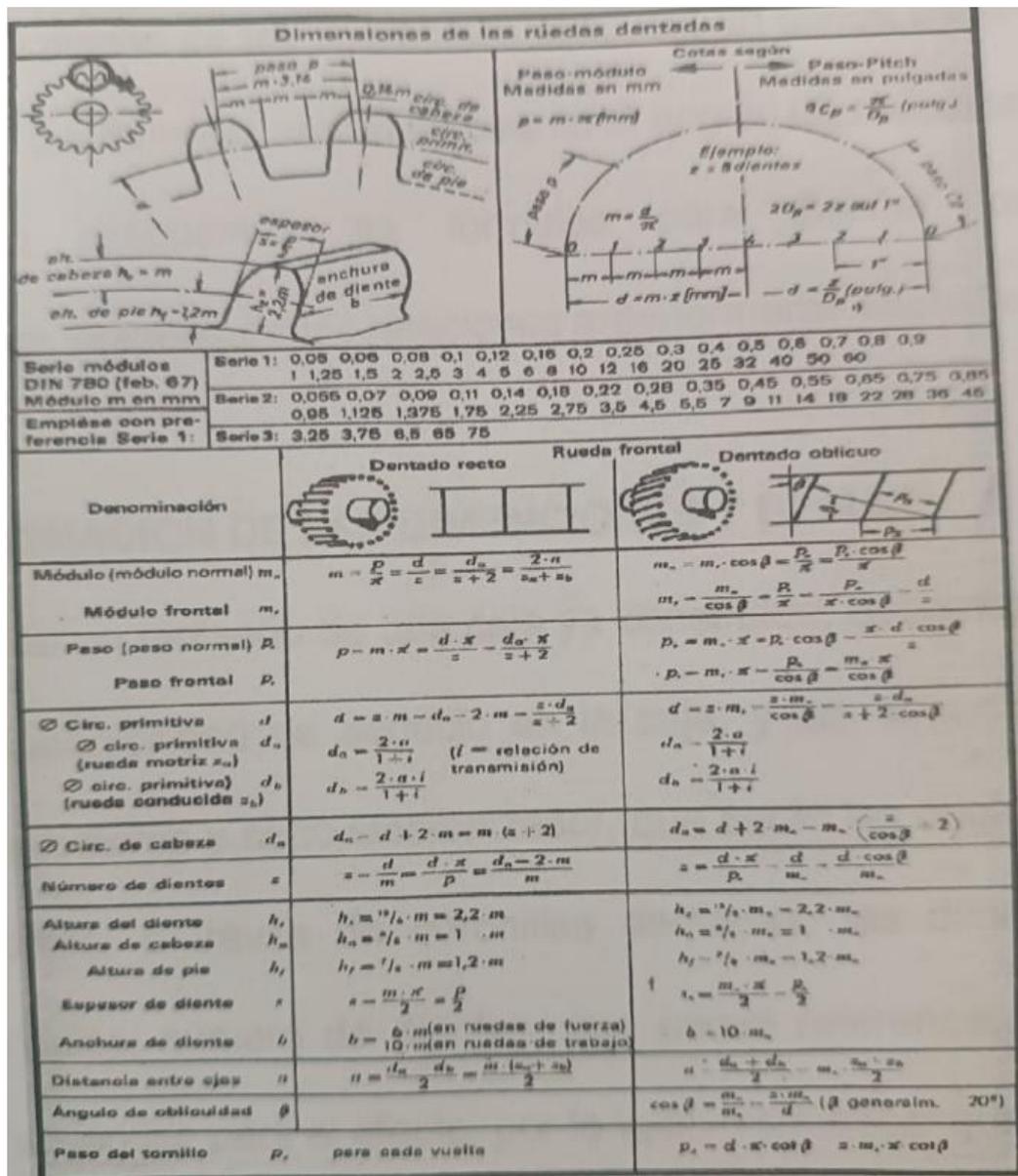
Diseño de los engranajes de las nuevas relaciones de transmisión

Se determinará las relaciones definitivas como los demás datos constructivos de los engranajes de la caja de cambios del Renault Clio, en la que aplicará un enfoque práctico para rediseñar la nueva piñonería de la caja de cambios, dejando en evidencia que puede ser sencillo la determinación de las nuevas relaciones de transmisión, si se conoce lo que se pretende obtener. El diseño teórico debe integrarse con su aplicación práctica en la construcción, lo que requiere una coordinación efectiva con quienes participan diariamente en la fabricación de partes y piezas. En este proceso, los talleres de mecánica industrial desempeñan un papel clave, ya que pueden proporcionar orientación sobre cómo cumplir con los requisitos de la caja de cambios.

La disponibilidad de las fresas de forma dependerá del módulo, el número de dientes y el tamaño de los piñones, en función del espacio disponible o la distancia entre centros. En otras palabras, se evaluará el costo, el grado de dificultad en la fabricación de cada pieza y la viabilidad de reutilizar componentes originales como materia prima para reducir costos. Además, aprovechar el material original no solo garantiza calidad, sino que también permite, mediante métodos técnicos de ajuste, insertar una coronilla dentada con nuevas relaciones de transmisión en el piñón original, optimizando tiempo, recursos y simplificando el proceso de trabajo.

Figura 14

Formulario de fabricación de piñones



En el recuadro superior izquierdo de la figura 14, se presentan los datos del diseño de los engranajes según las normas DIN (alemanas), aplicables en el Sistema Internacional de Pesos y Medidas. En el recuadro de la derecha, se encuentran las variantes de estas normas, haciendo referencia al Sistema Inglés de Pesos y Medidas. En las siguientes tres filas, se anotan los módulos disponibles en los diferentes mercados bajo normas DIN, los cuales son de uso genérico y están estandarizados en medidas enteras. Sin embargo, estos módulos son aplicables únicamente en el ámbito industrial y no en el

automotriz. En las columnas, se encuentra la denominación seguida de las fórmulas necesarias para el diseño de engranajes rectos mientras que, en la tercera columna, se presentan las fórmulas para el diseño de engranajes helicoidales, donde se puede constatar que las fórmulas varían únicamente en cuanto al ángulo de helicoidalidad. A continuación, se aplicarán las fórmulas para diseñar los engranajes correspondientes, respetando las relaciones anteriormente indicadas.

Determinación de las Dimensiones

Dado que se trata del rediseño de una caja de cambios ya construida, es necesario limitar los cálculos a la disponibilidad de espacio en la caja de cambios y a las dimensiones interiores, tales como los selectores y el cono sincronizador, que serán los originales. Por lo tanto, se modificarán únicamente las dimensiones de los diámetros, módulos y número de dientes de las coronillas dentadas, que afectan la relación de transmisión requerida para el rediseño. Se reitera que los cálculos realizados hasta ahora son tentativos y dependerán de este análisis para su confirmación definitiva. El primer dato necesario es poder delimitar la distancia entre ejes, que por lógica será un valor común para cada una de las marchas, ya que en este punto se insertarán todos los engranajes, cuya medida es de 60 (66 mm). Además, se ha determinado el módulo que el fabricante ha escogido, utilizando el formulario correspondiente.

$$m = \frac{2a}{z_1+z_2} \quad (9)$$

$$m = \frac{2(60)}{41+12} \quad (10)$$

$$m = 2.26 \quad (11)$$

Aquí se puede constatar que este resultado no coincide con los módulos normados o estándares registrados en la hoja de cálculo. Por ello, se decide tomar el valor más cercano como referencia para la construcción, confiando en que este dato ya ha sido

seleccionado por el fabricante: el módulo 2.25. Utilizando la misma fórmula, se podría determinar el número de dientes de cada piñón.

$$z_1 + z_2 = \frac{2a}{m} \quad (12)$$

$$z_1 + z_2 = 120/2.25 \quad (13)$$

$$z_1 + z_2 = 53.33 \quad (14)$$

Se presenta una ecuación con dos incógnitas que es necesario despejar y reducir a una sola incógnita de la siguiente manera. Se sabe que la relación de transmisión se obtiene al dividir el número de dientes del piñón transmitido por el número de dientes del piñón transmisor.:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \quad (15)$$

Se despeja

$$z_2: z_2 = i z_1 \quad (16)$$

Se reemplaza en la ecuación anterior

$$Z_1 + (i z_1) = 53.33 \quad (17)$$

Despejando valor común

$$Z_1 (1 + i) = 53.33 \quad (18)$$

Quedaría así:

$$z_1 = 53.33 / (1 + i) \quad (19)$$

Este resultado se aplica en la fórmula de la relación, y se obtiene la segunda incógnita, así resolviendo el número de dientes necesarios en cada una de las marchas, se obtienen los siguientes resultados.

$$1^a \quad z_1 = 53.33 / 4.081 = 13.06 \quad (20)$$

Una forma de obtener z_2 , $z_2 = 3.081 \times 13 = 40.05$ apx 40 (no hay medios dientes)

La relación definitiva o real de la primera marcha será:

$$i = 41 / 11 = 3.727 \quad (21)$$

$$2^a \quad 53.33 / 3.277 = 16 \quad (22)$$

otra forma de obtener z_2

$$\text{de la ecuación } z_1 + z_2 = 53.33 \quad z_2 = 53 - 16 = 37 \quad i = 37/16 = 2.047 \quad (23)$$

$$3^a \quad 53.33/2.744 = 21 \quad z_2 = 53 - 21 = 32 \quad i = 32/20 = 1.6 \quad (24)$$

$$4^a \quad 53.33/2.232 = 23 \quad z_2 = 53 - 23 = 30 \quad i = 30/22 = 1.363 \quad (25)$$

$$5^a \quad 53.33/2.232 = 24 \quad z_2 = 53 - 25 = 28 \quad i = 28/24 = 1.166 \quad (26)$$

Es importante tener en cuenta que la suma del número de dientes, dado en decimales, puede variar ligeramente en términos de incremento o decremento dentro de un rango de tres dígitos como máximo. Esto es importante siempre y cuando se calculen correctamente los diámetros primitivos, considerando que una disminución en los dientes podría afectar la resistencia mecánica. La variación en el número de dientes debe realizarse con un criterio técnico riguroso, asegurando la concordancia entre piñones y manteniendo el paso, respetando las demás fórmulas, como la distancia entre centros y los diámetros primitivos. Para definir las dimensiones de los piñones y comprobar la viabilidad del diseño, es necesario determinar los diámetros primitivos en función de la distancia entre centros y para ello, se utiliza la ecuación que relaciona la distancia entre centros con los diámetros primitivos.

$$a = \frac{do_2 + do_1}{2} \quad (27)$$

A fin de obtener los diámetros primitivos (do), también es de suma importancia hacerlas coincidir con las relaciones de transición definitivas o ya reales; para ello, se utiliza la ecuación que hace referencia a esta relación.

$$do1 = \frac{2a}{1+i} \quad y \quad do2 = \frac{2a*i}{1+i} \quad (28)$$

Para determinar el diámetro de la cabeza, o el diámetro exterior listo para el maquinado o tallado de los dientes, se debe sumar al diámetro primitivo el resultado de multiplicar el módulo por 2. De esta manera, se obtienen todas las dimensiones necesarias para la construcción de los engranajes, lo cual se registra en una tabla de datos constructivos.

Tabla 6

Datos constructivos de tabla de módulos y medidas constructivas

Relación de diseño	módulo	Número de dientes transmitido (z_2)	Número de dientes transmisor (z_1)	Relación definitiva	Diámetro primitivo (z_2)	Diámetro primitivo (z_1)	Diámetro de cabeza (z_2)	Diámetro de cabeza (z_1)
1 ^a	2.25	41	11	3.772	90.60	29.40	95.10	33.90
2 ^a	2.25	43	21	2.047	82.80	37.20	87.30	41.70
3 ^a	2.25	32	20	1.600	76.30	43.70	80.80	48.20
4 ^a	2.25	30	22	1.363	70.90	49.10	75.40	53.60
5 ^a	2.25	28	24	1.166	66.70	53.30	71.20	57.80

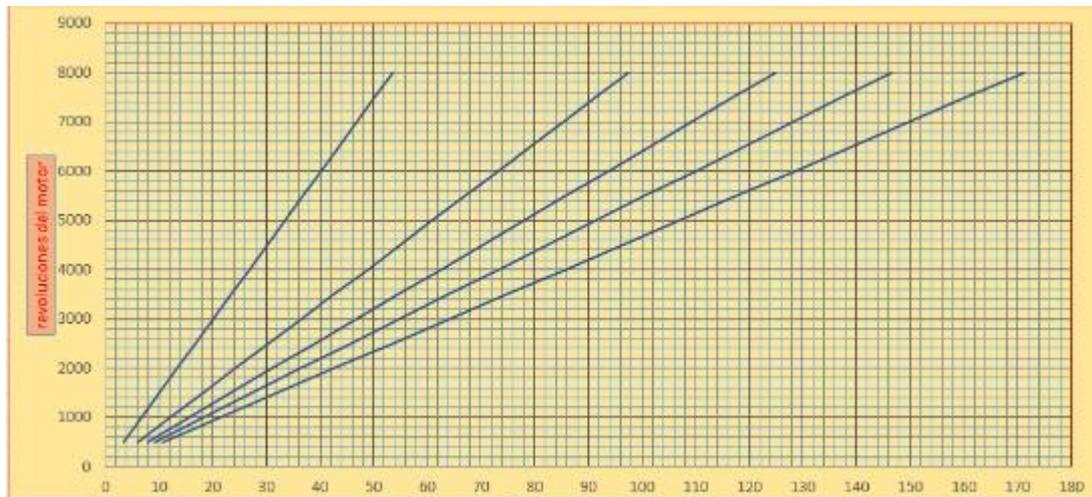
Diagrama del Rediseño de la Caja de Cambios para el Renault Clio de Competencia.

Se verificaron las pendientes de marcha del rediseño, constatando que el comportamiento y rendimiento de la caja de cambios es equilibrado y cumple con los requerimientos planteados para competencias de rally. Es importante señalar que, en la práctica, el número de revoluciones que cae entre cada marcha se recupera debido a la inercia del vehículo al conectarse el embrague. Por lo tanto, en este análisis, se debe considerar que solo el 50-60% del número de revoluciones registrado en el gráfico representa la caída real de revoluciones, un dato que será comprobado en pruebas reales utilizando un dinamómetro. El motor se recuperará rápidamente y alcanzará las

velocidades máximas de cada marcha, considerando además que la distancia a cubrir es relativamente corta.

Figura 15

Rediseño de caja



Análisis de Elementos Finitos (FEA)

Pruebas en Campo y Simulaciones

En el diseño de piñones rectos para cajas de cambios de autos de competición, la optimización de cada componente es muy importante para maximizar el rendimiento y la eficiencia del vehículo. En este sentido, uno de los elementos en el sistema de transmisión es el piñón recto, ya que permite la transferencia de potencia desde el motor hasta las ruedas. Su correcto dimensionamiento y selección de materiales son factores que permiten garantizar la resistencia a las altas cargas a las que son sometidos.

Cabe mencionar que los piñones rectos son preferidos en aplicaciones de alta velocidad y alto rendimiento debido a su capacidad para transmitir mayores fuerzas sin deslizamiento y su menor complejidad en comparación con los piñones helicoidales. Además, su diseño permite una respuesta más rápida en la entrega de potencia, lo que los hace ideales para situaciones en las que la precisión y la eficiencia mecánica son esenciales.

Figura 16

Diseño de piñones acorde a las medidas calculadas

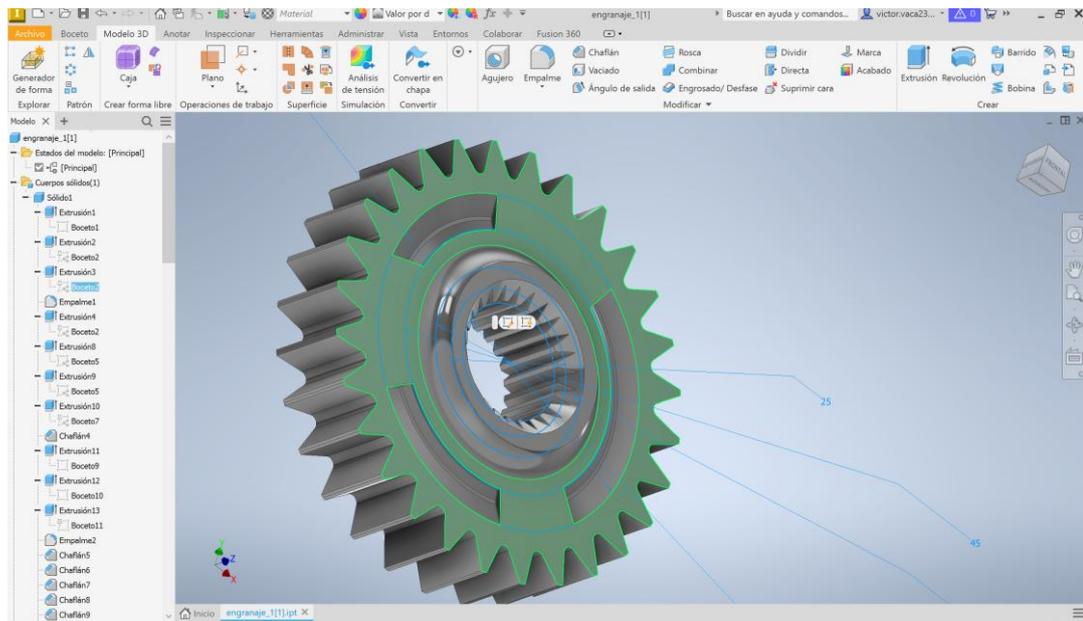
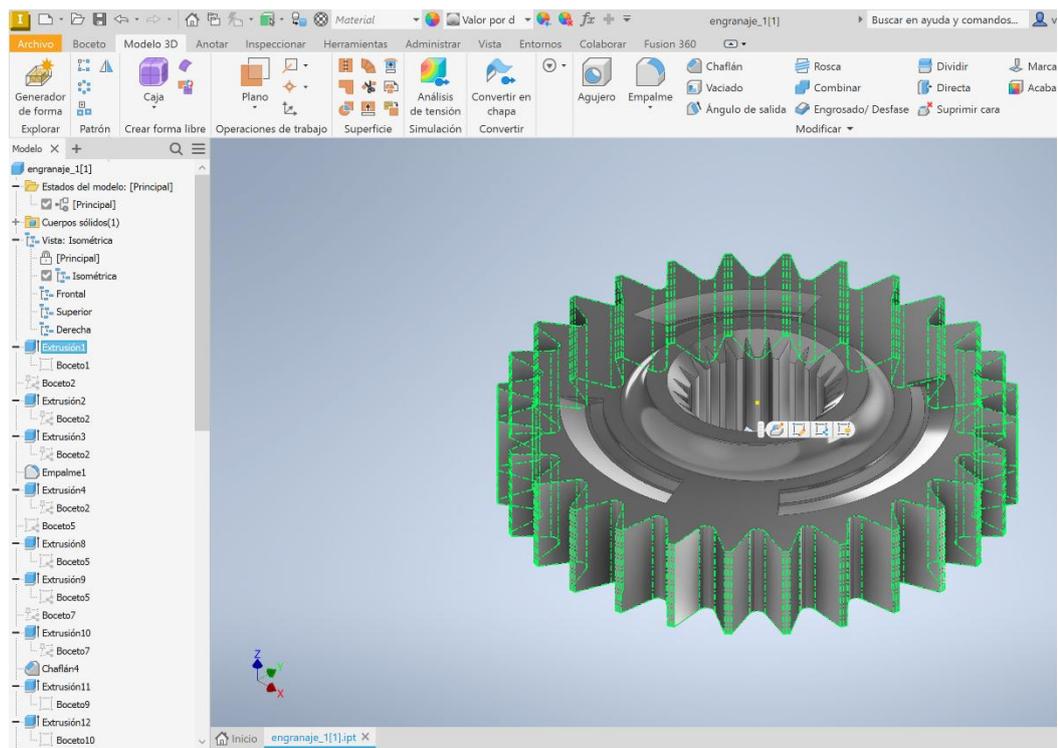


Figura 17

Extrusión de dientes del piñón

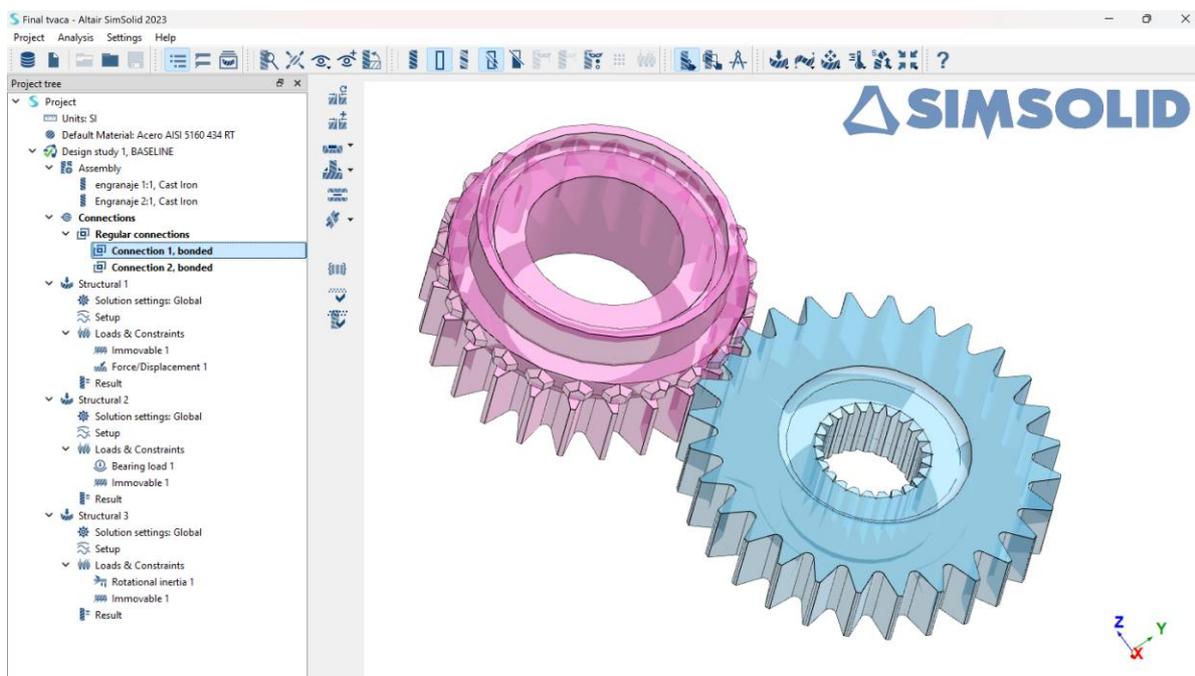


La simulación en SimSolid de los piñones rectos para una caja de cambios de auto de competición permite realizar un análisis detallado de las tensiones y la deformación

bajo diversas condiciones operativas. A través de esta simulación, es posible identificar puntos críticos de tensiones y deformaciones, evaluar la distribución de la carga y optimizar el diseño geométrico para mejorar la eficiencia de los piñones. Utilizando SimSolid, que permite análisis rápidos y precisos sin la necesidad de un mallado complejo, se puede iterar rápidamente sobre diferentes diseños y materiales para encontrar la configuración óptima.

Figura 18

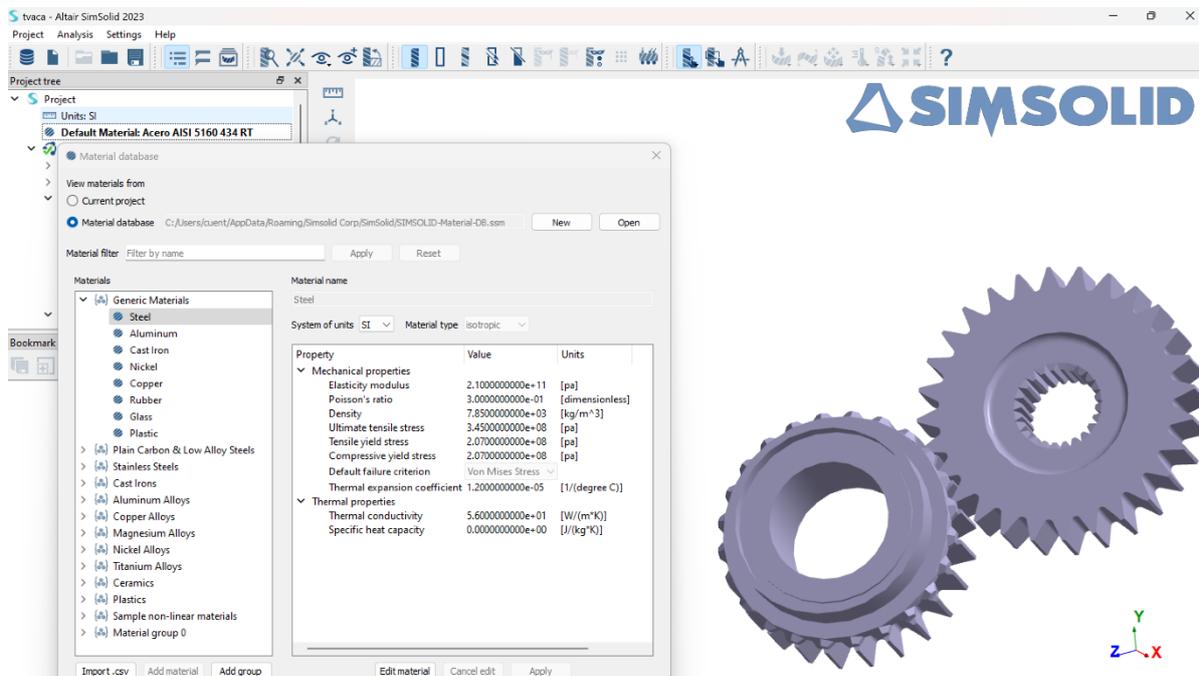
Conexiones para la simulación



La conexión entre dos piñones se establece a través de un contacto mecánico que permite la transmisión de esfuerzos y torque. Este tipo de conexión se modela considerando la interacción entre superficies de los dientes, donde se generan zonas de alta concentración de esfuerzos. A través del criterio de Von Mises, se evalúa la distribución de tensiones en los materiales, identificando posibles puntos de falla o deformación. Además, el análisis de esfuerzo máximo permite determinar si el material soporta las cargas aplicadas sin exceder su límite elástico, asegurando así un diseño óptimo y resistente en condiciones de operación.

Figura 19

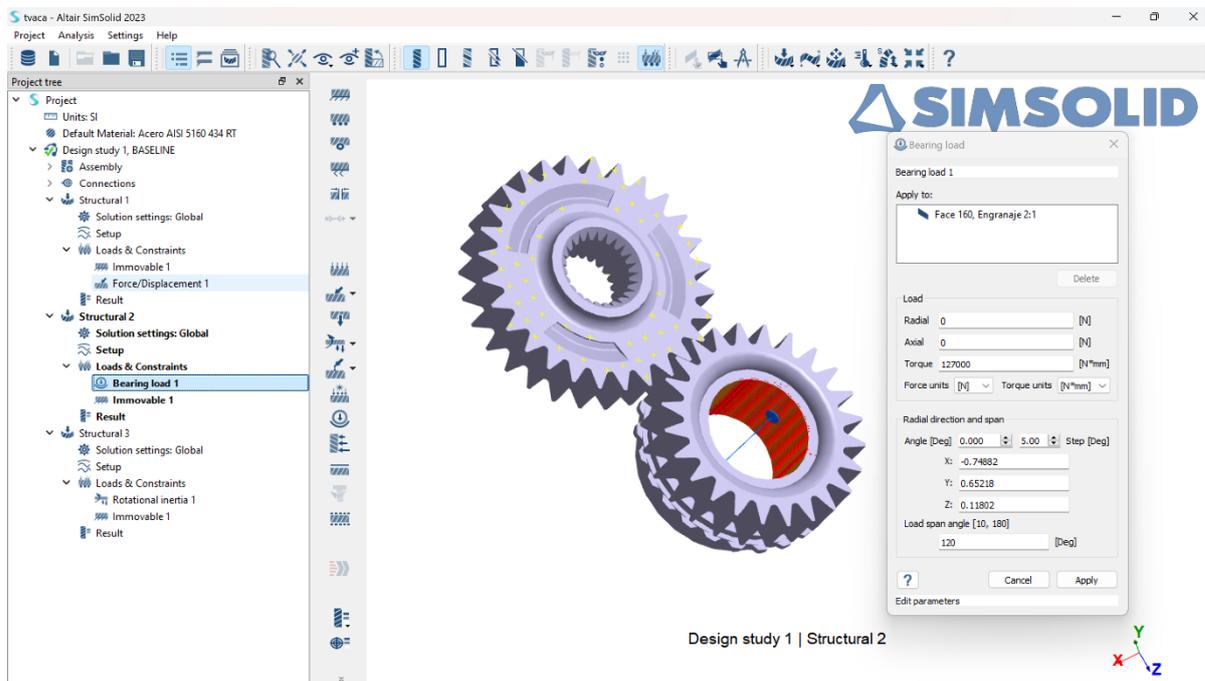
Creación de material y selección del mismo en Sim Solid



Además, la simulación proporciona valiosa información sobre el comportamiento dinámico de los piñones, permitiendo evaluar cómo interactúan bajo condiciones extremas de carga y velocidad, aspectos que son relevantes en el diseño de autos de competición. Con estas simulaciones avanzadas, es posible prever el rendimiento de los piñones rectos en diferentes escenarios, asegurando que no solo cumplan con los requisitos de potencia y eficiencia, sino que también sean capaces de soportar las exigentes condiciones de las carreras, como las altas temperaturas y fuerzas G. De esta forma, se garantiza la fiabilidad y competitividad del vehículo en pista, reduciendo el riesgo de fallos mecánicos y maximizando la duración de cada componente en un entorno de alto rendimiento.

Figura 20

Simulación de piñones en SimSolid

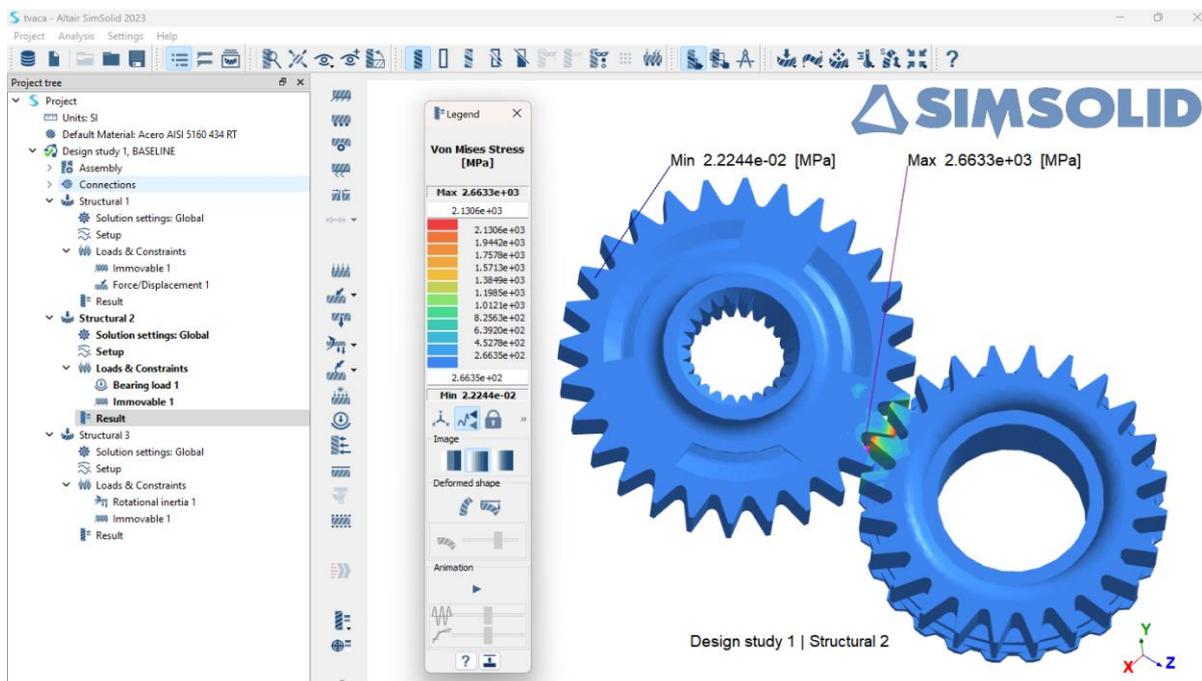


En la simulación realizada en Simsolid, se aplica un torque de 127,000 Nm. a los piñones y se definen las magnitudes y parámetros necesarios para la simulación. En una caja de cambios, los piñones están sujetos a fuerzas tangenciales, radiales y axiales que, combinadas, generan tensiones en los dientes de los piñones. El criterio de la tensión de Von Mises se utiliza para evaluar estas tensiones, comparándolas con la resistencia del material del piñón. Si la tensión de Von Mises es inferior al límite elástico del material, el piñón podrá funcionar sin sufrir deformaciones plásticas, pero si esta tensión supera el límite elástico del material, el piñón podría experimentar deformaciones permanentes o incluso fracturarse. Este análisis es especialmente crítico en aplicaciones de competición, donde los piñones están sometidos a cargas extremadamente altas de manera continua, lo que podría comprometer la integridad del sistema de transmisión si no se garantiza la resistencia adecuada.

En resumen, el criterio de Von Mises es una herramienta esencial en la simulación de piñones de cajas de cambios para asegurar que el diseño sea capaz de soportar las tensiones inducidas durante el funcionamiento, especialmente en las condiciones extremas de una competición de rally.

Figura 21

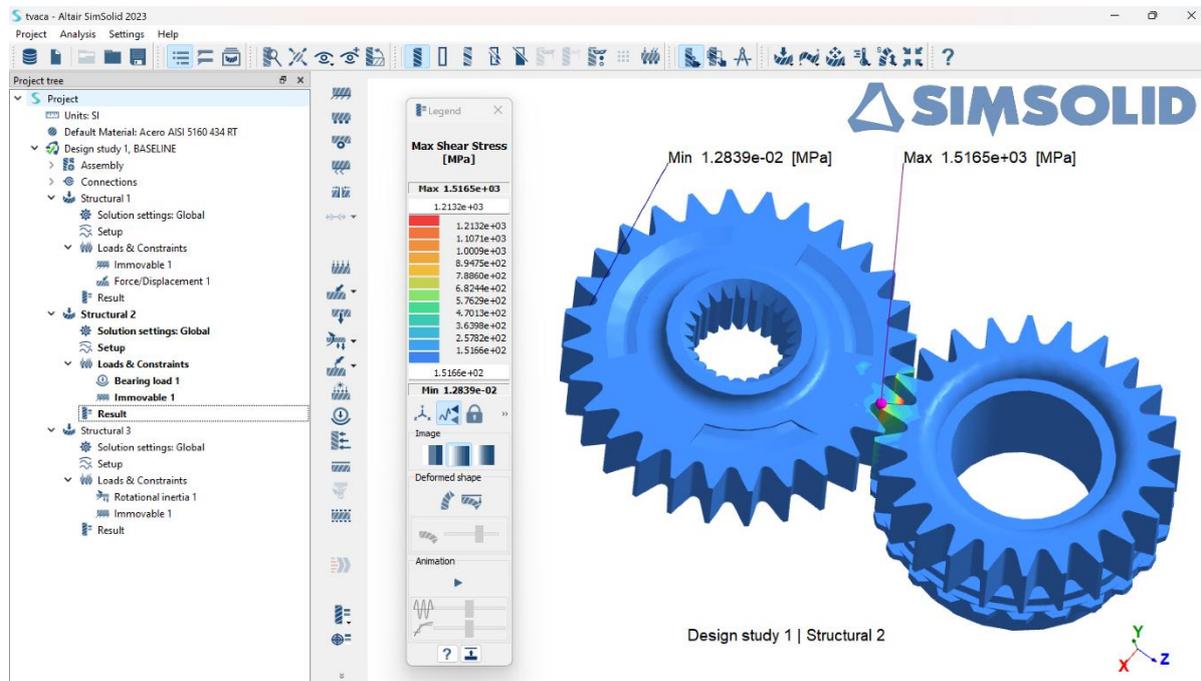
Simulación de piñones en SimSolid Von Misses



Se llevó a cabo una simulación de dos piñones en la que se aplicó un torque al segundo piñón. Como resultado, se obtuvo un esfuerzo de 2.13×10^3 MPa, valor que se encuentra dentro del rango de tolerancia del criterio de Von Mises, establecido entre 2.66×10^{-2} MPa y 2.66×10^3 MPa.

Figura 22

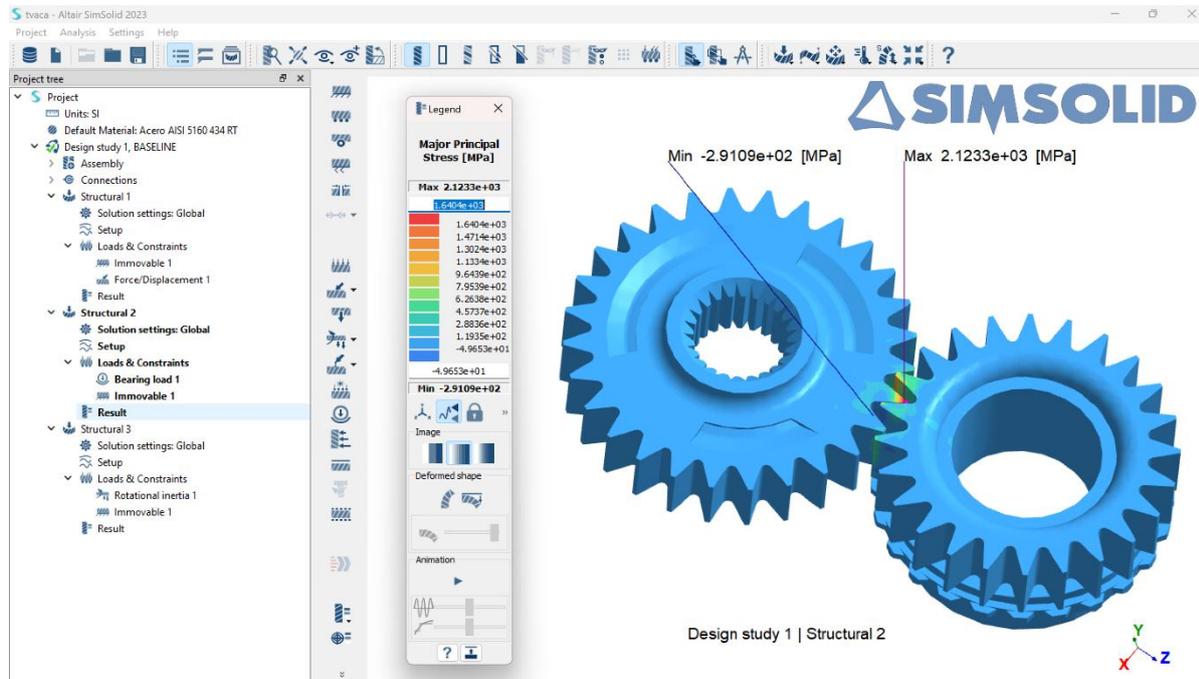
Simulación de piñones en SimSolid



Los piñones están dispuestos de forma horizontal, lo que permite que entren en contacto entre sí, generando una fuerza sobre el piñón de mayor tamaño. En este piñón se observa una zona de alta concentración de esfuerzos, que se representa en color rojo en la simulación, indicando el punto crítico para una posible falla del material. Este análisis es fundamental para identificar áreas vulnerables que puedan comprometer la integridad del sistema. Cabe mencionar que el esfuerzo máximo permitido para el material es de 1.51×10^3 MPa, mientras que el esfuerzo mínimo es de 1.28×10^{-2} MPa. La simulación arrojó un valor de 1.21×10^3 MPa, lo cual se encuentra dentro del rango admisible, lo que sugiere que el piñón puede soportar las cargas aplicadas sin superar los límites de resistencia del material. Sin embargo, es importante continuar monitorizando estas zonas críticas para garantizar que, bajo condiciones extremas, el piñón mantenga su rendimiento sin riesgo de fallas estructurales.

Figura 23

Simulación de piñones en SimSolid



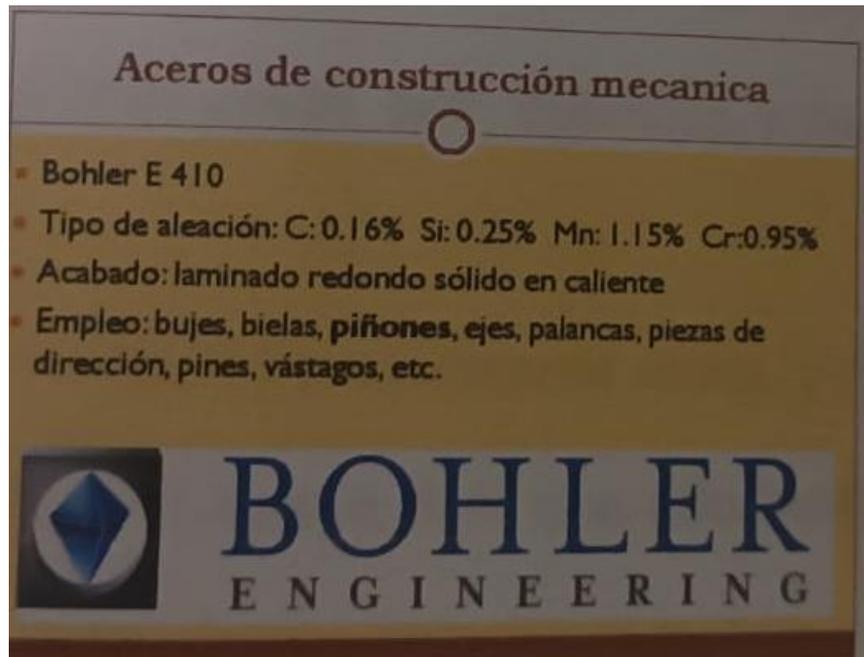
El piñón de mayor diámetro presenta una zona de ruptura identificada en color rojo, con un esfuerzo de 1.64×10^3 MPa, lo que representa el límite de resistencia del material utilizado en la simulación. En este estudio, todos los diseños emplean el mismo material de fabricación. Los valores de esfuerzo oscilan entre un mínimo de 2.91×10^2 MPa y un máximo de 2.12×10^3 MPa.

Metodología de Fabricación y Tratamiento Térmico

Para la fabricación de piñones rectos de cajas de cambios se seleccionó el material de acero Bohler E410. Este acero permite un endurecimiento superficial mediante tratamientos como la cementación o la nitruración, proporcionando una alta resistencia al desgaste en la zona de contacto de los dientes, sin comprometer la tenacidad del núcleo y cuyas características del material se pueden apreciar en la figura 24

Figura 24

Tipo de acero para fabricación de piñones



Proceso de Mecanizado

El piñón recto se mecaniza antes del tratamiento térmico, así se evitan distorsiones y se minimizan esfuerzos residuales. El proceso de torneado del piñón consta básicamente de tres etapas: El torneado inicial que se utiliza para dar forma al piñón y eliminar las imperfecciones superficiales, a continuación, se realiza el Tallado de dientes mediante fresado de alta precisión y finalmente se lleva a cabo el ajuste dimensional, permitiendo garantizar tolerancias antes del tratamiento térmico, aproximadamente de .010”

Fabricación de Piñones Rectos

Dimensionamiento del Material Base

Según las recomendaciones de los proveedores, se sugiere adquirir material sobredimensionado de acuerdo con el diámetro requerido, debido a que los lingotes suministrados, como resultado de su propio proceso de fabricación, presentan una capa dura o cascarilla generada por el brusco enfriamiento al salir de los altos hornos. Esta capa

sufre tensiones y puede presentar fisuras, las cuales son posibles causas de roturas y actúan como concentradores de fuerzas.

Figura 25

Material en bruto para ser torneado



Fuente: Taller Robin Gears

Debido a la complejidad del tamaño de los piñones, se decidió fabricar el eje motriz como un solo cuerpo, tal como se aprecia en la figura 25, destacando que en cada etapa del proceso se verifica su correcta terminación. Para los demás piñones, se optó por injertar una coronilla como se ve en la figura 26, y dimensionarla adecuadamente para el siguiente proceso de fresado o tallado de los dientes, como se ve en la figura 27 con el fin de abaratar costos y reducir el tiempo de construcción.

Figura 26

Inserción de coronilla, piezas procesadas o terminadas



Fuente: Taller Robin Gear

Figura 27

Materiales en bruto para los insertos



Fuente: Taller Robin Gear's

Figura 28

Piñón en bruto



Fuente: Taller Robin Gear's

Fresado

Se aplicaron varios procedimientos de tallado tal como se puede apreciar en las figuras 29, 30 y 31, incluyendo el tallado de dientes con fresa de forma circular, dado que algunos dientes requirieron el uso de una herramienta de forma denominada buril, asistida

por un cabezal vertical rotatorio. Adicionalmente, los dientes pequeños, como los de los discos de embrague, fueron tallados utilizando una fresadora con la ayuda de cabezal de avance con movimiento vertical como se ve en la figura 31

Figura 29

Mortajador Vertical



Fuente: Taller Robin Gear's

Figura 30

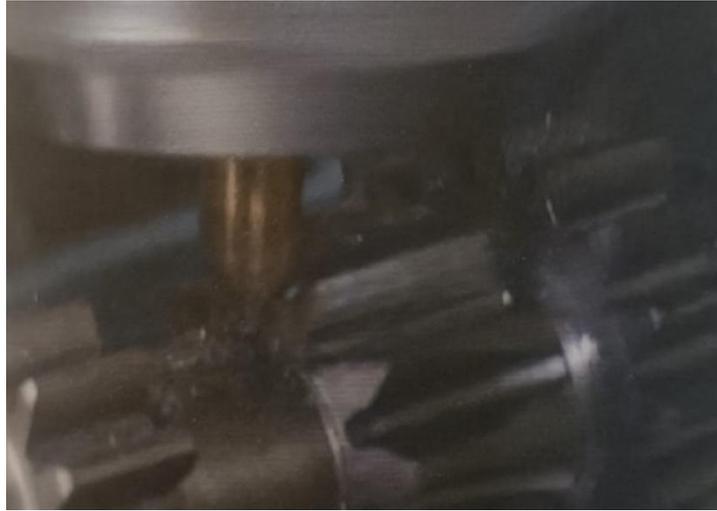
Tallado de los dientes por la fresadora de eje motriz



Fuente: Taller Robin Gear's

Figura 31

Buril trabajando y piñón en medida para tallado



Fuente: Taller Robin Gear's

Cementado

. El primer paso del proceso es la cementación, que implica la adición de una capa de carbón a la superficie del material, proporcionando a su vez una resistencia adecuada a la fricción durante el contacto entre los dientes del engranaje. La cementación se lleva a cabo elevando el material a una temperatura aproximada de 990 °C dentro de una cámara de gas rica en carbón o partículas sólidas del mismo material. El proceso se completa enfriando bruscamente el material en aceite, y la penetración o espesor de la capa de cementación depende del tiempo de exposición a esa temperatura específica.

Este paso sirve para incrementar la dureza superficial y resistencia del material con una capa superficial endurecida, calentando de 900 a 950 °C en un horno de atmósfera controlada rica en carbono, manteniendo la temperatura durante unos 2 a 6 horas, luego se enfría rápidamente en gas presurizado.

Figura 32

Horno eléctrico para tratamiento térmico



Fuente: Bohler

El siguiente paso, el temple es el proceso para dar al núcleo la suficiente tenacidad para que resista los esfuerzos de choque, a las que estarán sometidos cada uno de los dientes durante su trabajo. En sí, esto consiste en volver a elevar a ese material a la temperatura de 850 °C más o menos, a fin de que la estructura o núcleo, se forme moléculas cristalinas cúbicas centradas, siendo ésta, en la que adquiere la mayor resistencia mecánica a esos esfuerzos laterales, se lo consolida igualmente enfriando bruscamente en aceite. Cabe indicar que durante el proceso no pierde dureza la capa superficial cementada. Por último, es el proceso de revenido, por el cual se distorsiona el material por haber estado sometido a todos los anteriores procesos.

Acabado Final

Después del endurecimiento superficial, los piñones se someten a procesos de ajuste final:

- Rectificado de dientes: para garantizar la geometría precisa.
- Pulido superficial: para reducir fricción y ruido.

La metodología aquí descrita permite fabricar componentes con propiedades mecánicas superiores, asegurando la confiabilidad en aplicaciones de alto desempeño como las competencias automovilísticas.

Ensamblaje y Ajuste

Los piñones fabricados serán ensamblados en la caja de cambios del Renault Clio, un proceso que incluye el ajuste y calibración de los componentes para asegurar un funcionamiento suave y eficiente, en el que se utilizarán herramientas de metrología para verificar las dimensiones y el alineamiento de los piñones en la caja de cambios.

Figura 33

Ensamblaje y ajuste



Pruebas y Validación

Se realizaron pruebas finales para validar los ajustes y optimizaciones con el fin de confirmar que la caja de cambios cumple con los requisitos de rendimiento establecidos en el objetivo general de la tesis. Estas pruebas finales sirvieron para asegurar que el diseño y la fabricación de los piñones rectos han sido exitosos.

Inicialmente, la caja de cambios con los nuevos piñones rectos fueron sometidos a pruebas de banco (Dinamómetro) en un entorno controlado, las mismas que permitieron evaluar el rendimiento de la transmisión bajo condiciones simuladas de carga y velocidad

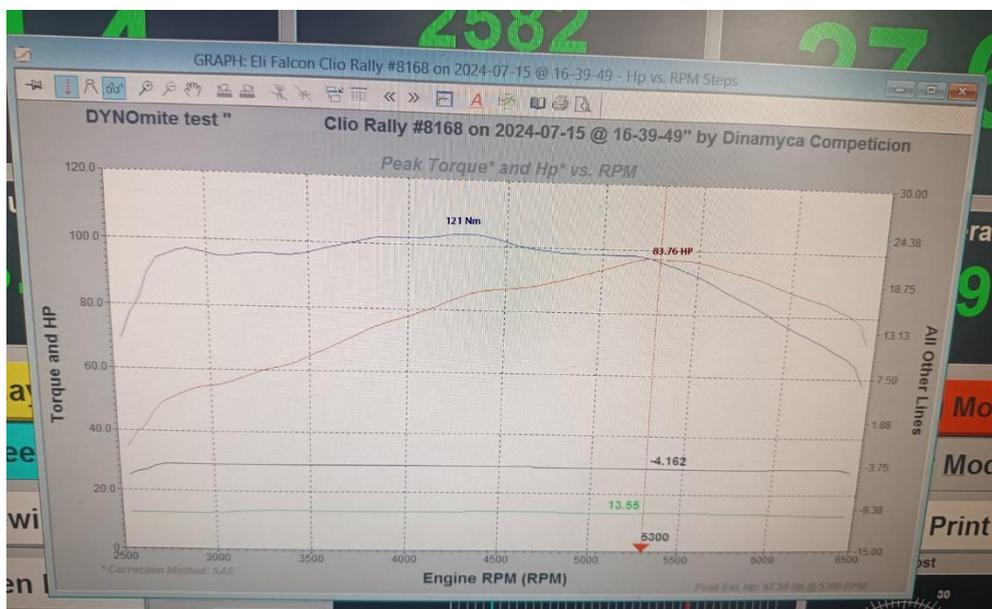
con lo que se midieron parámetros clave como la eficiencia mecánica, el ruido, la vibración y la temperatura de operación.

Pruebas de Dinamómetro

En la figura 34, la prueba realizada en el dinamómetro se puede observar que, con las relaciones de piñones originales, da un torque de 121 Nm y una potencia de 83,76 hp, valores que reflejan el desempeño estándar del motor en su configuración de fábrica. Estos datos sirven como referencia para comparar el impacto de las modificaciones en la transmisión.

Figura 34

Prueba de dinamómetro con piñones originales



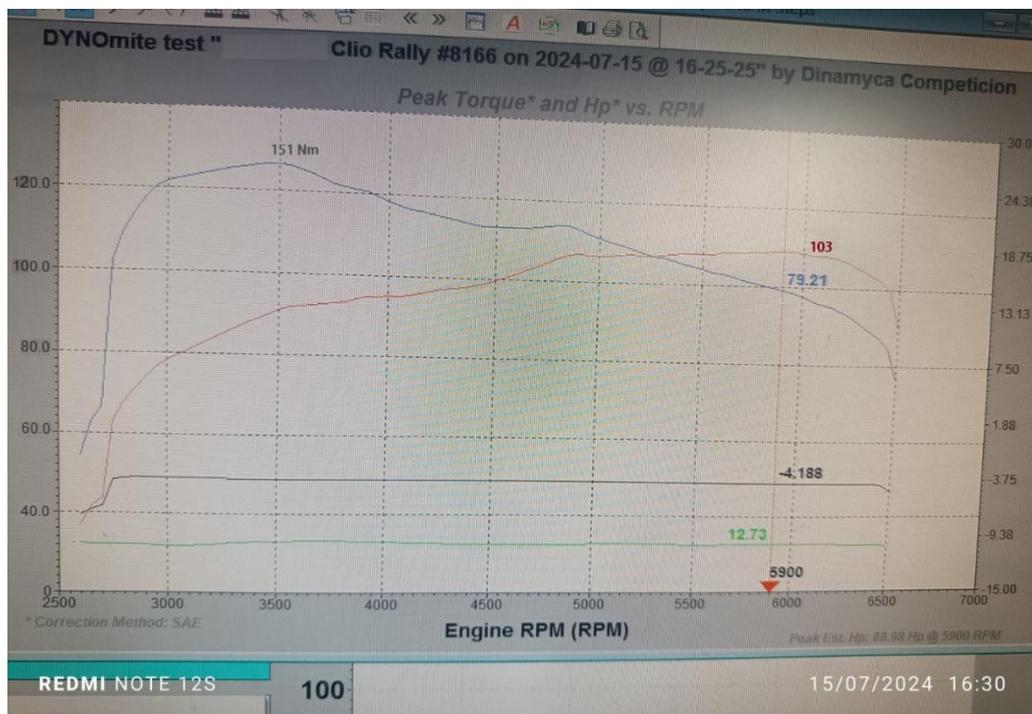
Fuente: Dinamómetro en Dinámica Competición

Se puede observar en la figura 35, realizada en el dinamómetro, los resultados obtenidos con los nuevos piñones de relaciones de transmisión optimizadas. En estas pruebas, se evidencia un notable incremento en el torque, pasando de los 121 Nm originales a 151 Nm, lo que representa una mejora significativa en la capacidad del motor para generar fuerza rotacional. Asimismo, se registra un aumento en la potencia final,

alcanzando los 103 hp. Estos resultados confirman el éxito de la modificación en la transmisión, optimizando el desempeño del vehículo al mejorar su capacidad de respuesta y eficiencia en diversas condiciones de operación.

Figura 35

Prueba de dinamómetro con piñones de nueva relación de transmisión



Fuente: Dinamómetro en Dinámica Competición

Resultados

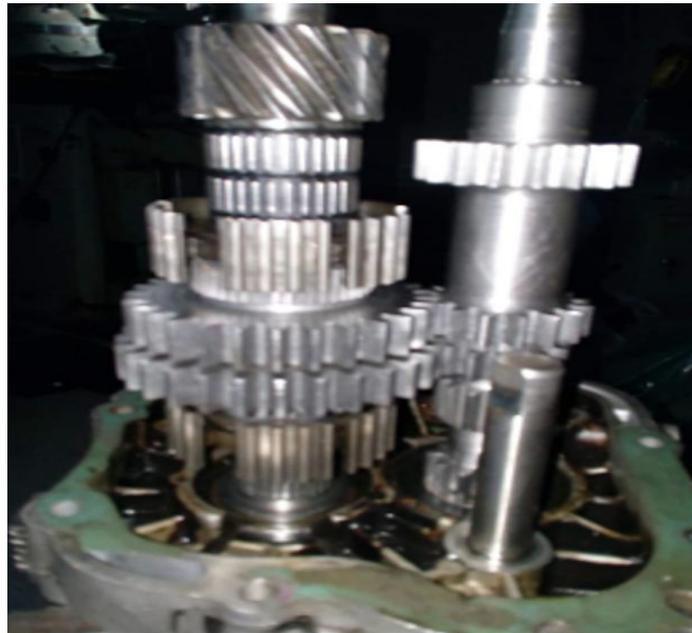
Una vez analizado cada aspecto que interviene en la caja de cambios y de haber explicado su funcionamiento, su diseño y su rediseño de relaciones de transmisión, se realizaron las simulaciones aplicando cargas para determinar los valores de esfuerzos a los que están sometidos los piñones, los cuales pasaron de una manera satisfactoria todas las pruebas a las que fueron sometidas en la simulación.

Asimismo, se llevó a cabo una prueba en el dinamómetro tal como se ve en las figuras 34 y 35, en donde se aprecia el incremento de torque de 121Nm a 151 Nm, además se sometieron los componentes (piñones) a cargas de trabajo reales mientras se calibraba la ECU programable, destacando que, durante este período, el conjunto de potencia y el conjunto de transmisión funcionaron de manera continua durante aproximadamente seis horas, sometiéndose a diversas cargas transmitidas al tren motriz. Las pruebas se realizaron en todas las marchas, desde la primera hasta la quinta velocidad, bajo condiciones máximas de revoluciones del motor y, por consiguiente, con cargas máximas.

Cabe mencionar que, durante estas pruebas, no se presentaron inconvenientes en ningún piñón, lo que significa que ninguna marcha se trabó y todas funcionaron de manera fluida tanto en ascenso como en descenso, sin generar ruidos extraños, golpes o agripamiento de las parejas de piñones. Una vez concluidas las pruebas, se procedió a drenar el aceite de la caja de cambios, el mismo que no mostró la presencia de limallas o limaduras de acero de piñones, que suelen ser de color gris, ni limaduras de color amarillo dorado, características del bronce de los sincronizados. Por seguridad, se desmontó la caja de cambios para realizar una verificación visual, en el que no se observó desgaste visible ni coloración azulada en los piñones debido al exceso de temperatura; estos se encontraban en perfectas condiciones, tal como estaban en el montaje inicial y como se puede apreciar en la figura 36.

Figura 36

Piñonería de la caja de cambios



Nota. Imagen tomada Taller/ Autor.

Al comparar las relaciones de transmisión originales con las modificadas, se observa que las nuevas relaciones de la quinta marcha están entre la tercera marcha y cuarta marcha de la relación de transmisión original como se puede observar en la tabla 7, por lo tanto, el motor empujará muy fuerte, aunque la velocidad de punta es de casi 160km/h pero, es más que suficiente para la modalidad rally y para un motor 1.4litros.

Tabla 7

Comparación de las relaciones transmisión originales con modificadas

Marcha	Rpm	Velocidad relación transmisión original km/h	Velocidad relación transmisión modificadas km/h
1 ^a	7000	50.03	50.03

2 ^a	7000	87.30	91.09
3 ^a	7000	131.88	116.54
4 ^a	7000	168.3	136.8
5a	7000	219.9	159.93

Discusión de resultados

Construir piñones rectos con nuevas relaciones de transmisión para mejorar el rendimiento de la caja de cambios de un auto de competencia, en este caso del Renault Clio para rally, es una perspectiva que ya se ha realizado en diversos estudios y proyectos. Se presenta una discusión de los resultados obtenidos en esta tesis, los cuales se compara con trabajos similares.

En esta tesis se realizó un rediseño de las relaciones de transmisión de los piñones de la caja de cambios del Renault Clio, en la cual se implementó nuevas relaciones de transmisión y la fabricación de piñones rectos. Con estas nuevas relaciones de transmisión la caída de revoluciones a la siguiente marcha no sobrepasa las 800RPM, por lo tanto, el motor no trabaja en el rango de revoluciones inferiores al torque máximo. Los resultados obtenidos en el dinamómetro, indicaron una mejora significativa de 121Nm a 4200RPM de las relaciones de transmisión originales mientras que, en las nuevas relaciones de transmisión, subió el torque a 151Nm a 3500RPM, dando por consiguiente una respuesta muy favorable a la aceleración y transmisión de fuerza a la rueda, lo cual es muy importantes en una competición de rally, ya que a cada instante se necesita una reacción muy rápida del auto al salir de una curva. Lógicamente el aumento del ruido es debido a que no se tiene el contacto helicoidal en los piñones, pero se tiene una transmisión más directa y sin pérdidas por fricción.

Estos resultados son similares con los resultados obtenidos por Santana Jiménez (2003), quien diseñó una caja de cambios secuenciales para vehículos de rally, el cual da mucha importancia de las relaciones de transmisión óptimas y la selección de materiales para los piñones. De la misma manera, Barazás López (2020) indica que” se tiene el resultado cinemático de la caja, con el que han hallado las relaciones de transmisión de cada marcha y las velocidades máximas de las mismas” tal como indica la siguiente tabla.

Tabla 8

Relación de transmisión y velocidad máxima

Marchas	Relación de transmisión	Velocidad máxima
1ra marcha	3.40	59
2da marcha	2.5	80
3ra marcha	1.86	108
4ta marcha	1.38	145
5ta marcha	1.00	200

Fuente: Barazás López (2020)

Las relaciones de transmisión son muy similares a las obtenidas en la presente tesis, tomando en cuenta que las relaciones de transmisión son para un el Renault clio 1600cc de 103hp, mientras que las relaciones de transmisión que propone Barazás López (2020) es de un auto FIA, que supera los 260 hp. Además, el autor da una preferencia e importancia en una caja de cambios secuencial, dando vital importancia y necesidad imperante en un diseño que permita los cambios de marcha, rápidos y precisos.

Por su parte, Tomás (2018) planteó la modificación de piñones de la caja de cambios de una motocicleta de competición, llegando a la conclusión, que la elección adecuada de las relaciones de transmisión y el uso de materiales adecuados de alta resistencia son los que determinan una mejora significativa y fiabilidad en el sistema de

transmisión, en el que indica “es conveniente para todos los circuitos de curvas cerradas, además se ha logrado un salto entre marchas mas estrecho con lo que se reduce la caída de revoluciones en los cambios de marcha ascendentes lo que provoca una aceleración más rápida” Tomas(2018)

Estos resultados, complementan los que se obtuvieron en la presente tesis, afirmando que, tanto en autos de competencia de 4 ruedas como en motocicletas de dos ruedas, las modificaciones realizadas en las relaciones de transmisión adecuadas, se evidencian en mejoras importantes en el desempeño en la competición.

Entre otros estudios realizados, tales como el de Granizo Espitia (2016), pone énfasis en la selección de materiales que tengan el menor desgaste y den su máxima eficiencia, y analiza las características mecánicas de los materiales en las cajas de cambios manuales. Según el autor en mención, los materiales existentes no permiten elaborar piezas de cajas de cambios, pero de acuerdo a las especificaciones de Aceros Bohler si existen aceros con propiedades mecánicas suficientemente resistentes para fabricar piñones de cajas de cambios, ya que ellos mismo recomiendan el acero AISI 410, el mismo material utilizado en la fabricación de los piñones de esta tesis. Además, en el parque automotor de competición en el Ecuador, muchos autos tienen piñones de fabricación local los cuales no presentan problemas, este análisis se complementa con la presente tesis, en donde se seleccionó el material para la fabricación de los piñones rectos.

Conclusiones

Se diseñaron y fabricaron nuevas relaciones de transmisión y piñones rectos que permitieron mejorar el rendimiento de la caja de cambios del Renault Clio para rally. Esta mejoría en el rendimiento fue comprobada en el dinamómetro, donde la potencia entregada al piso fue significativamente mayor que los valores originales del vehículo, registrando un aumento del 24% en la potencia. Este incremento se debió a la potenciación del motor, la ECU programable y el rediseño de las relaciones de transmisión.

Para un proceso éxito en el rediseño de la caja de cambios con piñones rectos, fue importante realizar un análisis al detalle de las características y requisitos específicos de una caja de cambios para rally. Este análisis se basó en una revisión bibliográfica detallada, con el objetivo de mejorar la relación de transmisión.

El diseño de las nuevas relaciones de transmisión se realizó mediante cálculos y herramientas de simulación de esfuerzos, adaptándose a las condiciones de manejo propias de una competición de rally, lo cual permitió culminar con éxito el proceso de construcción y garantizar así un funcionamiento eficaz y seguro.

Un aspecto a considerar para evitar el desgaste de los piñones fue el tratamiento térmico aplicado a los piñones construidos, mediante el proceso de cementación y revenido, con el fin de incrementar la dureza necesaria.

Finalmente, se logró evaluar con éxito el incremento de potencia a las ruedas comparando la caja original con la nueva caja fabricada, utilizando mediciones en el dinamómetro, resultados que mostraron una mejora significativa en el rendimiento entre las dos relaciones de transmisión.

Recomendaciones

El cálculo para el rediseño de nuevas relaciones de transmisión debe considerar varios factores importantes, entre los cuales se incluyen:

Es necesario determinar en qué tipo de competencia se utilizará la caja de cambios. Por ejemplo, en competencias de drag (pique o cuarto de milla), se requiere una caja de relaciones muy cortas de primera a tercera marcha, mientras que la cuarta y quinta marcha deben ser un poco más largas. En cambio, para competencias de pista, la primera y segunda marcha deben ser largas, y la tercera, cuarta y quinta marchas un poco más cortas.

Otro factor a considerar es la potencia y el torque máximo del vehículo, así como las revoluciones a las que estos se alcanzan. Estas variables son determinantes para el cálculo de las nuevas relaciones de transmisión, ya que influyen directamente en el desempeño y la eficiencia de la caja de cambios.

El diseño de los dientes de los piñones por su parte es muy importante para evitar que la caja de cambios sea excesivamente ruidosa. Un diseño adecuado contribuye a una operación más silenciosa y eficiente, mejorando la experiencia de manejo y reduciendo el desgaste de los componentes.

Referencias Bibliográficas

- Alzallú, J. (2016). *Introducción a las cajas de cambio manuales en los automóviles*.
Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/235858861.pdf>
- Ares, M. (2014). *Cambios automáticos y derivados*. Obtenido de
https://soteronina.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/09/cambios_automaticos.pdf
- Barazas López, J. (2020). *Diseño de una caja de cambios manual secuencial para vehículo de rally categoría R5 [Tesis de maestría, Universidad de Almería]*.
- Barazas, J. (2020). *Diseño de una caja de cambios manual secuencias. Análisis de soluciones constructivas*. Obtenido de <https://repositorio.ual.es/handle/10835/9843>
- Bolaños, J., Pinto, S., & Álvarez, E. (2022). Ventajas y desventajas del uso de fluidos para transmisiones automáticas y transmisiones manual. *Ciencias Técnicas y Aplicadas*.
- Caiza, J., & Puebla, C. (2022). *Implementación de un banco de pruebas de transmisión tipo CVT*. Obtenido de
<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11961/2/04%20MAUT%20167%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Campoverde, C., & Conchambay, J. (2023). *Implementación de una transmisión manual de 5 velocidades y reversa en el motor y carrocería de un vehículo Volkswagen Fox para la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Automotriz de Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE*. Obtenido de
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/35281/1/M-ESPEL-MAT-0193.pdf>
- Chimbo, F., & Velásquez, J. (2020). *Análisis del comportamiento de engranes cónicos y helicoidales sometidos a fatiga mediante simulación y validado en máquina de ensayo*. Obtenido de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19308/1/UPS%20-%20TTS178.pdf>

- Delcid, M., Perdomo, M., & Ordoñez, J. (2020). *Advantage of additive manufacturing in printed board circuits*. Obtenido de https://www.laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP32.pdf
- Diaz, J., Suero, F., & López, M. (2020). *Sistemas de Transmisión, suspensión, dirección y frenos*. Obtenido de <https://educacion.sanjuan.edu.ar/mesj/LinkClick.aspx?fileticket=FeUIngkiUpQ%3D&tabid=678&mid=1743>
- Dirección General de Tráfico. (2017). *Mecánica y entretenimiento simple del automóvil comprimido*. Obtenido de <https://www.garbitania.eus/wp-content/uploads/2020/12/Mecanica-y-entretenimiento-simple-del-automovil-comprimido.pdf>
- Duque, P. (2017). *Guía Técnica para el diseño y cálculo de engranajes para reductores de velocidad*. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/entities/publication/cf630282-9b2b-487d-8cbd-55511bbcf298>
- Granizo Espitia, I. (2016). *Estudio de las características mecánicas de los materiales en la caja de cambios manual mediante norma INEN 0109 [Tesis de maestría, Universidad Internacional del Ecuador]*.
- Hernández, L., Marin, H., Dumitrescu, L., & Martínez, J. (2022). Procedimiento para fabricar un piñón a partir de la evaluación del material. *Ciencias Holguín*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1815/181571550002/181571550002.pdf>
- Lázaro, M. (2023). *Reforma mecánica de un vehículo para su adaptación al rally*. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/59595/TFG-I-2496.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, J., & Vallejo, J. (2020). *Selección de un material sostenible para el mecanismo piñón cremallera de una barra de dirección hidráulica considerando el método de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM) y*

comprobación por elementos finitos (FEM). Obtenido de
<https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3908>

Muñoz, A., & Sánchez, C. (2021). *Modificación de prestaciones de una caja de velocidades de un vehículo de competencia Suzuki Forsa*. Obtenido de
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19971>

Santana Jiménez, N. (2003). *Caja de cambios secuencial para vehículo de rally [Tesis de maestría, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]*.

Sarria, I. (2018). *Cálculo y diseño de la transmisión de un automóvil*. Obtenido de
<https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/24896/3.DOCUMENTO-ANEXO%20DE%20C%3%81LCULOS.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Tomás, J. (2018). *Diseño y modificación de los piñones de la caja de cambios de la motocicleta Yamaha RD350 para su uso en competición [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de València]*.

Vivas, J. (2021). *Implementación del sistema de potencia y transmisión para el prototipo de vehículo Biplaza UTV 1 para la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Automotriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Obtenido de
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/34292/2/M-ESPEL-MAT-0063.pdf>