

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Montaje y modelado 3D de una caja de cambios automática para las prácticas de laboratorio

Autor: María Reyes Olivares Martín

Tutor: Francisco José Morales Sánchez

**Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y
del Transporte**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Montaje y modelado 3D de una caja de cambios automática para las prácticas de laboratorio

Autor:

María Reyes Olivares Martín

Tutor:

Francisco José Morales Sánchez

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Montaje y modelado 3D de una caja de cambios automática para las prácticas de laboratorio

Autor: María Reyes Olivares Martín

Tutor: Francisco José Morales Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mis padres y hermanos

A mis abuelos

A mis amigos

A Pablo

Agradecimientos

Considero este texto como una oportunidad para agradecer a todas las personas que me han acompañado durante la carrera, no solo durante la realización de este trabajo, que tan importante es para mí. Me considero una persona afortunada por tener a tanta gente buena alrededor y, aunque creo que es imposible acordarme de todos, pretendo intentarlo.

En primer lugar, a mi familia. Papá, mamá, Agu, Marta: gracias por aguantarme en mis peores días, y por intentar escucharme a pesar de todo, que no es poco. Gracias por la educación que me habéis dado, basada en el amor, la educación, el respeto y la constancia. Gracias por haberme ayudado a crecer como persona, soy la mujer que soy gracias a vosotros. A mis abuelos, claro ejemplo de lo que, para mí, significa tener éxito en la vida: el amor. Gracias por animarme, por las conversaciones, y sobre todo por rezar por mí. Qué bendición es teneros.

A Pablo. Gracias por todos los consejos, por tener siempre algo que decir, por convertir los días malos en buenos, y los buenos en mejores. Gracias simplemente por estar ahí. Tienes mucho que ver en que este proyecto haya salido adelante tal y como está.

A mis amigos. Gracias por estar pendiente de mí durante tantos años, por vuestra disponibilidad siempre para hablar, para desahogarme, para sacarme de casa y estar un rato juntos. Gracias, sobre todo, por reír y llorar conmigo.

A mis profesores, a todos cuyas enseñanzas me han llevado a estudiar lo que he estudiado y a llegar hasta aquí. Gracias en especial a Fran y a Antonio Valverde, por atenderme siempre que lo necesitara, y ayudarme a resolver las dudas con admirable disponibilidad y paciencia.

María Reyes Olivares Martín

Sevilla, 2024

Resumen

El proyecto realizado consiste en el montaje y modelado en 3D, mediante un programa de diseño asistido por ordenador, de una caja de cambios automática de un BMW, que actualmente se encuentra en el laboratorio de Automóviles perteneciente al departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, que pertenece a la Universidad de Sevilla.

En primer lugar, se presenta una breve explicación de las cajas de cambio, su historia y función, para ayudar al lector a descubrir de dónde surge la necesidad de este sistema. A continuación, se han explicado conceptos teóricos fundamentales para el buen entendimiento del funcionamiento de la caja y del sistema completo de transmisión en vehículos. Una vez explicados estos conceptos, se han calculado las relaciones de transmisión de la caja a través de un esquema gráfico, que ayuda a su comprensión.

Por último, y como parte fundamental de este proyecto, se ha realizado el modelado mediante el programa Catia V5 de cada uno de los elementos de la caja de cambios. Se han realizado mediciones y modelados de cada elemento de la caja por individual, referenciando brevemente su función en este proyecto. Por último, una vez modelados todos los elementos de la caja que participan en las relaciones de transmisión, se ha realizado un ensamblaje de todas estas piezas, dando lugar a una representación bastante fiable de la caja de cambios al completo.

Todos los conceptos teóricos presentados en este proyecto tienen como finalidad clarificar las posteriores explicaciones acerca de la función de cada elemento, y del funcionamiento al completo de la caja. Por otro lado, el objetivo principal del proyecto en sí es facilitar el entendimiento de la caja de cambios a los alumnos interesados, además de colaborar con los profesores del departamento para que la caja de cambios pueda ser utilizada en las prácticas de la asignatura.

Abstract

The project undertaken consist of the assembly and 3D modeling of an automatic gearbox from a BMW, using a computer-aided design program. This gearbox is currently located in the Automobile Laboratory belonging to the Department of Materials and Transportation Engineering and Science, at the Higher Technical School of Engineering, part of the University of Seville.

Firstly, a brief explanation of gearboxes, their history, and their function is presented in order to help the reader understand the necessity of this system. Subsequently, fundamental theoretical concepts have been explained to ensure a clear understanding of the gearbox's operation and the complete vehicle transmission system. Once these concepts have been outlined, the gearbox transmission ratios have been calculated using a graphic scheme that aids in its comprehension.

Finally, and as a fundamental part of this project, each of the gearbox components has been modeled using the Catia V5 program. Measurements and modeling of each element of the gearbox have been carried out individually, with a brief reference to their specific function within the project. Once all the elements involved in the transmission ratios had been modeled, an assembly of all these parts has been made, resulting in a reliable representation of the complete gearbox.

All the theoretical concepts presented in this project aim to clarify the subsequent explanations regarding the function of each component and the overall operation of the gearbox. Furthermore, the main objective of the project is to facilitate the understanding of the gearbox for interested students, while also collaborating with the department's professors so that the gearbox can be used in course practice sessions.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xviii
Índice de Figuras	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Objeto del proyecto</i>	1
1.2 <i>Alcance del proyecto</i>	1
1.3 <i>Recursos y herramientas empleados</i>	2
2 Contexto	4
2.1 <i>La caja de cambios</i>	4
2.1.1 Contexto histórico	4
2.1.2 Funcionamiento	6
2.2 <i>Tipos</i>	9
2.2.1 Manual	9
2.2.2 Automática	10
2.3 <i>La caja de cambios estudiada</i>	15
3 Principios previos al funcionamiento	18
3.1 <i>Engranajes</i>	18
3.1.1 Geometría de los engranajes	20
3.2 <i>Trenes epicicloidales</i>	23
3.2.1 Ecuación de Willis	24
3.3 <i>Tren de engranajes de tipo Ravigneaux</i>	26
3.4 <i>Embragues</i>	26
3.5 <i>Instalación hidráulica</i>	27
3.6 <i>Ejes de entrada y de salida</i>	28
4 Relaciones de transmisión	31
4.1 <i>Primera marcha</i>	32
4.2 <i>Segunda marcha</i>	34
4.3 <i>Tercera marcha</i>	35
4.4 <i>Retroceso</i>	36
4.5 <i>Neutro</i>	37
4.6 <i>Parking</i>	37
5 Elementos de la caja de cambios	39
5.1 <i>Carcasa exterior</i>	39

5.2	<i>Elementos internos de transmisión</i>	42
5.2.1	El eje de entrada y E1	43
5.2.2	Carcasa gris y E2	46
5.2.3	Eje interior verde	47
5.2.4	Carcasa Negra, E3 y E4	49
5.2.5	Rueda libre, tope de ajuste de discos de embrague y E5	51
5.2.6	Tren planetario de tipo Ravigneaux	54
5.2.7	Eje de salida y carcasa exterior al eje	60
6	Montaje y funcionamiento	64
6.1	<i>Montaje completo del sistema</i>	64
6.2	<i>Comparación con el esquema de la transmisión</i>	67
7	Conclusiones	70
8	Trabajos futuros	72
	Referencias	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de dientes de los engranajes	31
Tabla 2. Combinación de embragues disponibles	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Pie de rey	2
Figura 1-2. Logo del programa Catia V5	2
Figura 2-1. Boceto del invento de Leonardo Da Vinci	4
Figura 2-2. Maqueta del invento de Leonardo Da Vinci	5
Figura 2-3. Automóvil de Panhard & Levassor	5
Figura 2-4. Modelo Ford T	6
Figura 2-5. Caja de cambios Hydra-Matic	6
Figura 2-6. Curva del par y potencia para un motor de combustión interna de 2000 cm ³ [26]	7
Figura 2-7. Principio de transmisión del par	8
Figura 2-8. Relación entre la velocidad del vehículo y la del motor [8]	9
Figura 2-9: Caja de cambios manual	9
Figura 2-10. Selector de marchas de una caja de cambios manual	10
Figura 2-11. Ejes de una caja de cambios manual	10
Figura 2-12. Palanca de un vehículo automático	11
Figura 2-13. Convertidor de par	11
Figura 2-14. Embrague de una caja de cambios automática	12
Figura 2-15. Embrague con engranaje interior y exterior	12
Figura 2-16. Caja de cambios de transmisión automática convencional	13
Figura 2-17. Caja de cambios de transmisión de doble embrague	13
Figura 2-18. Caja de cambios de transmisión continuamente variable	13
Figura 2-19. Caja de cambios de transmisión manual automatizada	14
Figura 2-20. Caja de cambios de transmisión automática hidrostática	14
Figura 2-21. Caja de cambios de transmisión automática electrónica	14
Figura 2-22. Caja de cambios de transmisión de varios modos	15
Figura 2-23. Modelo BMW Serie 5 de primera generación	15
Figura 2-24. Modelo Serie 3 de primera generación	16
Figura 2-25. Bocetos de la caja de cambios ZF 3HP22 [13, 15]	16
Figura 3-1. Engranaje de dientes rectos	18
Figura 3-2. Engranaje de dientes helicoidales	19
Figura 3-3. Engranajes cónicos	19

Figura 3-4. Engranajes hioides	19
Figura 3-5. Engranajes de tornillo sin fin	20
Figura 3-6. Engranajes de cremallera	20
Figura 3-7. Parámetros de un engranaje	21
Figura 3-8. Parámetros de un diente de engranaje [23]	22
Figura 3-9. Representación del ángulo de hélice	22
Figura 3-10. Parámetros de una pareja de engranajes	23
Figura 3-11. Tren de engranajes epicicloidal	23
Figura 3-12. Sentidos de giro en un tren de engranajes epicicloidal con el portasatélites retenido [26]	24
Figura 3-13. Sentidos de giro en un tren de engranajes epicicloidal [26]	25
Figura 3-14. Tren de engranajes Ravigneaux	26
Figura 3-15. Embragues y portadiscos	26
Figura 3-16. Sistema hidráulico de activación de los embragues	27
Figura 3-17. Bomba de la caja de cambios estudiada	27
Figura 3-18. Conjunto de tuberías y válvulas de la caja de cambios estudiada	28
Figura 3-19. Elementos del sistema de transmisión completo de un coche	28
Figura 3-20. Junta Cardan	29
Figura 3-21. Elementos de un diferencial	29
Figura 4-1. Esquema de las relaciones de transmisión	31
Figura 4-2. Esquema de las relaciones de transmisión para la primera marcha	33
Figura 4-3. Esquema de las relaciones de transmisión para la segunda marcha	34
Figura 4-4. Esquema de las relaciones de transmisión para la tercera marcha	35
Figura 4-5. Esquema de las relaciones de transmisión para la marcha atrás	36
Figura 4-6. Esquema de las relaciones de transmisión para el punto muerto	37
Figura 4-7. Trinquete de estacionamiento	37
Figura 5-1. Carcasa exterior azul, primera perspectiva	40
Figura 5-2. Carcasa exterior azul, segunda perspectiva	40
Figura 5-3. Carcasa exterior azul, tercera perspectiva	40
Figura 5-4. Carcasa exterior azul, cuarta perspectiva	41
Figura 5-5. Guía para el eje de salida, primera perspectiva	41
Figura 5-6. Guía para el eje de salida, segunda perspectiva	41
Figura 5-7. Guía para el eje de salida, tercera perspectiva	42
Figura 5-8. Montaje de la carcasa exterior azul y la guía para el eje de salida	42
Figura 5-9. Discos de arrastre modelados	43
Figura 5-10. Discos de compresión	43
Figura 5-11. Embrague compuesto por varios discos	43
Figura 5-12. Fotografía real del eje de entrada	44
Figura 5-13. Modelo del eje de entrada	44
Figura 5-14. Modelo del eje de entrada con E1	45

Figura 5-15. Modelo del eje de entrada con E1 y pieza amarilla	45
Figura 5-16. Conjunto del eje de entrada con E1, la pieza amarilla y la azul	45
Figura 5-17. Pieza de transmisión amarilla	46
Figura 5-18. Pieza de transmisión azul	46
Figura 5-19. Carcasa gris, primera perspectiva	47
Figura 5-20. Carcasa gris, segunda perspectiva	47
Figura 5-21. Eje verde	48
Figura 5-22. Esquema con los ejes interiores marcados	48
Figura 5-23. Conjunto del eje verde, la carcasa gris y el E2	49
Figura 5-24. Carcasa negra modelada, primera perspectiva	49
Figura 5-25. Carcasa negra modelada, segunda perspectiva	49
Figura 5-26. Carcasa negra y E3, primera perspectiva	50
Figura 5-27. Carcasa negra y E3, segunda perspectiva	50
Figura 5-28. Agujeros de la carcasa negra	51
Figura 5-29. Agujeros de la carcasa exterior azul	51
Figura 5-30. Rueda libre	52
Figura 5-31. Conjunto del eje verde y la rueda libre	52
Figura 5-32. Tope azul	53
Figura 5-33. Conjunto del eje verde, la rueda libre, el tope azul y E5, primera perspectiva	53
Figura 5-34. Conjunto del eje verde, la rueda libre, el tope azul y E5, segunda perspectiva	53
Figura 5-35. Esquema con el tren Ravigneaux señalado	54
Figura 5-36. Portasatélites del primer conjunto planetario, PS1, primera perspectiva	54
Figura 5-37. Portasatélites del primer conjunto planetario, PS1, segunda perspectiva	55
Figura 5-38. Engranaje helicoidal que actúa como satélite	55
Figura 5-39. Corona del primer conjunto planetario, C1	55
Figura 5-40. Primer conjunto planetario, primera perspectiva	56
Figura 5-41. Primer conjunto planetario, segunda perspectiva	56
Figura 5-42. Portasatélites del segundo conjunto planetario, PS2, primera perspectiva	56
Figura 5-43. Portasatélites del segundo conjunto planetario, PS2, segunda perspectiva	57
Figura 5-44. Eje y corona del segundo conjunto planetario, C2, primera perspectiva	57
Figura 5-45. Eje y corona del segundo conjunto planetario, C2, segunda perspectiva	57
Figura 5-46. Esquema de las relaciones de transmisión con el eje interior y la corona	58
Figura 5-47. Segundo conjunto planetario, primera perspectiva	58
Figura 5-48. Segundo conjunto planetario, segunda perspectiva	58
Figura 5-49. Tope metálico	59
Figura 5-50. Tope plástico	59
Figura 5-51. Tren de engranajes Ravigneaux completo	59
Figura 5-52. Corte del tren de engranajes completo, primera perspectiva	60
Figura 5-53. Corte del tren de engranajes completo, segunda perspectiva	60

Figura 5-54. Eje de salida, primera perspectiva	60
Figura 5-55. Eje de salida, segunda perspectiva	61
Figura 5-56. Eje de salida y conjunto planetario Ravigneaux	61
Figura 5-57. Carcasa amarilla	62
Figura 5-58. Conjunto del eje de salida, tren Ravigneaux y carcasa amarilla	62
Figura 6-1. Subconjunto desmontado del eje de entrada y E1	64
Figura 6-2. Subconjunto desmontado de la carcasa gris y E2	65
Figura 6-3. Subconjunto desmontado de la carcasa negra, E3 y E4	65
Figura 6-4. Subconjunto desmontado de la rueda libre, el tope del embrague, E5 y el eje verde	65
Figura 6-5. Subconjunto desmontado del tren planetario de tipo Ravigneaux	66
Figura 6-6. Subconjunto desmontado del tren Ravigneaux, con el eje de salida y la carcasa amarilla	66
Figura 6-7. Elementos de la caja de cambios ordenados	66
Figura 6-8. Subconjuntos de la caja de cambios ordenados	66
Figura 6-9. Fotografía real de la caja de cambios completa	67
Figura 6-10. Modelo de la caja de cambios completa	67
Figura 6-11. Modelo con corte de la caja de cambios completa	67
Figura 6-12. Esquema de los elementos de la caja de cambios	68
Figura 6-13. Modelo de la caja de cambios completa, segunda perspectiva	68

1 INTRODUCCIÓN

“La educación es el pasaporte hacia el futuro. El mañana pertenece a aquellos que se preparan para él en el día de hoy.”

- Malcom X -

Este proyecto consiste en la explicación y el modelado mediante el programa CATIA V5 de una caja de cambios automática existente en el laboratorio del departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Se pretende así que la caja de cambios pueda ser utilizada para las prácticas, facilitando la comprensión al alumno acerca del funcionamiento de la misma.

1.1 Objeto del proyecto

La caja de cambios llegó al departamento en 2014, donde fue cortada, pintada y preparada para su utilización en las prácticas de la asignatura de Automóviles del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales.

Una vez adaptada para uso académico, este trabajo tiene como objetivo facilitar la comprensión del alumnado, pudiendo servir como guía para la explicación de las prácticas relacionadas con la caja de cambios automática.

1.2 Alcance del proyecto

El objetivo fundamental de este proyecto es el modelado con un programa de CAD de la caja de cambios ya existente en el laboratorio. Para poner en contexto, se incluye una introducción que parte desde una visión generalista de las cajas de cambio tradicionales, para acabar en la caja de cambios a la que refiere este trabajo. Adicionalmente, se dan explicaciones acerca del cálculo de las relaciones de transmisión y del funcionamiento de la caja y sus elementos mecánicos más básicos, como son los engranajes o los embragues.

La caja de cambios ha sido desmontada y medida en el taller pieza a pieza para su modelaje. Aun así, no todas las medidas han podido realizarse de manera certera, debido al propio desgaste de algunos de los elementos, o a encontrarse en zonas de difícil acceso. Estas medidas han sido aproximadas o reajustadas, de manera que el ensamblaje posterior de la caja fuera posible y pudiera realizarse de la manera más fiable posible.

Respecto a los límites establecidos, cabe destacar que el fundamento de este proyecto se basa en el funcionamiento mecánico de la caja, por lo que quedan excluidos los elementos hidráulicos, como la bomba o el circuito hidráulico. Dado que son importantes para el buen entendimiento de la caja, se hará referencia a ellos durante el proyecto, pero no han sido modeladas en 3D. Respecto a la carcasa exterior de la caja, sí ha sido modelada, aunque cuidando únicamente sus detalles más importantes relacionados con la mecánica.

1.3 Recursos y herramientas empleados

Para las mediciones de los distintos elementos de la caja, se ha utilizado un pie de rey digital, también conocido como calibre digital. A diferencia del pie de rey tradicional, muestra las mediciones en una pantalla electrónica, lo que facilita la lectura y reduce el riesgo de errores de interpretación. El pie de rey utilizado tiene un rango de medida de 0-150 mm y una precisión es de 0.01 mm. Todo el modelo se ha realizado utilizando esta precisión centesimal, a pesar de que algunas de las medidas, como se ha comentado anteriormente, han tenido que ser aproximadas debido a la imposibilidad de obtener la medida real con el calibre.



Figura 1-1. Pie de rey

Los engranajes son algunos de los elementos para los que se han presentado dificultades para medir con certeza, debido al desgaste de sus dientes. Para el modelado de éstos, se ha realizado un estudio previo sobre el funcionamiento de los trenes de engranajes, las ecuaciones que gobiernan el movimiento y los puntos fundamentales de su geometría que han de ser iguales para que dos ruedas engranen. De ésta manera, se han aproximado las medidas de la manera más fiable posible.

Para el modelado 3D de la caja de cambios, se ha utilizado la herramienta CATIA V5, una de las herramientas de diseño más utilizadas a nivel mundial. Catia V5 es un software de diseño asistido por ordenador (*Computed-Aided Design, CAD*) desarrollado por *Dassault Systèmes*, conocido por su potencia y versatilidad. Se ha elegido esta herramienta debido su utilización en la industria y en el mercado laboral, particularmente en los sectores relacionados con la automoción y la aeronáutica.



Figura 1-2. Logo del programa Catia V5

2 CONTEXTO

“La mente que se abre a una nueva idea jamás vuelve a su tamaño original.”

- Albert Einstein -

Este capítulo tiene como objetivo realizar una revisión de la evolución histórica de las cajas de cambios en los automóviles, abordando desde sus orígenes hasta la necesidad que impulsó el desarrollo de la caja de cambios automática. Durante esta revisión, se aporta una explicación teórica de lo que constituye una caja de cambios y su funcionamiento. Asimismo, se analizarán los diferentes tipos de cajas de cambios, terminando en la caja de cambios a la que refiere este proyecto.

2.1 La caja de cambios

Según la Real Academia Española, una caja de cambios es un “mecanismo que permite modificar la potencia de un automóvil, variando la relación de velocidades de giro entre el motor y las ruedas” [1]. El desarrollo de las cajas de cambio ha sido fundamental para permitir a los vehículos funcionar de manera eficiente y adaptarse a los distintos modos de conducción.

2.1.1 Contexto histórico

En torno al año 1500, el inventor Leonardo Da Vinci creó un mecanismo, considerado la primera caja de cambios de la historia [2]. Dicho mecanismo estaba compuesto por dos piezas, una cónica y una cilíndrica, que, conectadas mediante una serie de engranajes, permitía variar la relación entre la fuerza y la velocidad transmitidas.

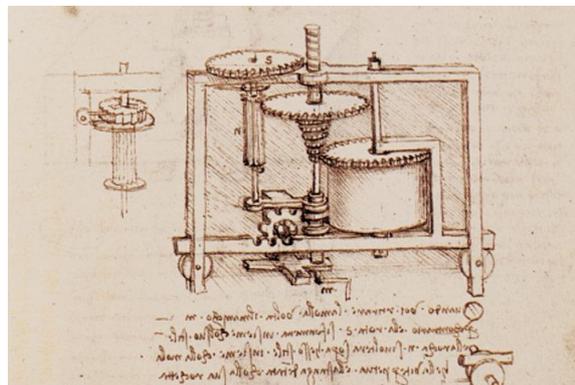


Figura 2-1. Boceto del invento de Leonardo Da Vinci



Figura 2-2. Maqueta del invento de Leonardo Da Vinci

En el siglo XIX surge el motor de combustión interna. Los motores de combustión interna tienen un rango limitado de revoluciones por minuto de operación en el que trabajan a potencia máxima, mientras que la demanda de potencia y de velocidad de giro de un vehículo en movimiento es muy amplia. Esto provocó la necesidad de desarrollar sistemas de transmisión más avanzados, ya que, sin una caja de cambios, el motor tendría que operar directamente.

En el año 1891, Émile Levassor y René Panhard diseñaron uno de los primeros automóviles con motor de combustión interna, basado en el motor Daimler. Este primer modelo contenía la primera transmisión con un sistema de engranajes, capaz de accionar el cambio entre sus marchas con una palanca dirigida por un embrague de pedal. La empresa fundada por ambos, *Panhard & Levassor*, fue una de las primeras en producir automóviles en serie, lo más parecido hasta entonces a lo que hoy en día conocemos como la industria automovilística [5].



Figura 2-3. Automóvil de Panhard & Levassor

De manera casi paralela, Fred Lanchester diseñó un sistema de transmisión epicíclica, que permitía que la transmisión del motor continuara durante el cambio de velocidad, debido a la unión del engranaje con varios piñones a la vez. Este avance provocó mayor suavidad y eficiencia en los cambios.

Años después, en el año 1908, el americano Henry Ford adoptó la idea de Fred Lanchester en su modelo *Ford T*, famoso por su gran producción debido a la implementación de la fabricación en cadena [6]. Dicho modelo contaba con una transmisión planetaria de dos marchas más el retroceso accionadas mediante pedales en lugar de una palanca, como se había hecho hasta ahora.



Figura 2-4. Modelo Ford T

En la década de 1920 se desarrollaron las cajas de cambio sincronizadas. Hasta entonces, el conductor debía igualar manualmente la velocidad del motor con la de los engranajes, utilizando la técnica del “doble embrague”. La caja de cambios sincronizada igualaba estas dos velocidades automáticamente, permitiendo cambios de marcha más suaves y evitando así dañar la transmisión [7].

Fue en la década de 1940 cuando *General Motors* desarrolló e introdujo en la industria la primera caja de cambios automática conocida como *Hydra-Matic*, que no requería el uso de embrague [4]. Este sistema utilizaba un convertidor de par accionado de manera hidráulica para seleccionar la marcha conveniente a raíz de la velocidad y la potencia requeridas por el vehículo.

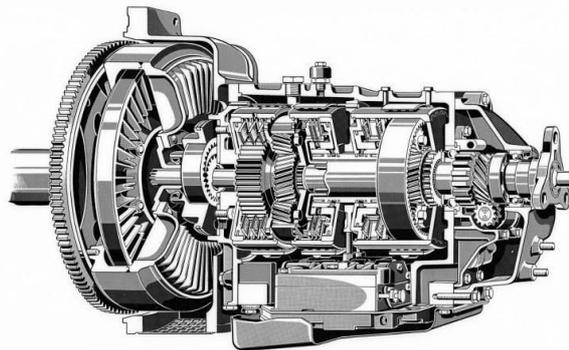


Figura 2-5. Caja de cambios Hydra-Matic

El avance en las distintas tecnologías hasta hoy en día ha provocado un progreso en las cajas de cambio, que han dejado de tener un diseño puramente mecánico para pasar a tener cierta composición electromecánica y automática, siempre buscando la eficiencia, rendimiento y comodidad del automóvil. Por ejemplo, actualmente existen cajas de cambios automáticas que llegan hasta diez velocidades, mientras que las primeras eran de tres. Las cajas de cambio seguirán evolucionando de manera paralela a los avances tecnológicos para adaptarse a las necesidades del sector automovilístico.

2.1.2 Funcionamiento

El motor genera fuerza, revoluciones, par de giro y potencia, aunque requiere que se trabaje dentro de un rango determinado. La función principal de la caja de cambios consiste en adaptar la potencia del motor a las necesidades de velocidad y potencia requeridas por el vehículo, de manera que, recibiendo el par necesario en las ruedas, el motor pueda trabajar en su rango óptimo de funcionamiento. Esto se consigue a través de la selección de las distintas marchas con sus respectivas relaciones de transmisión.

La gráfica de la Figura 2-6 representa, para un motor de combustión interna, la relación entre la velocidad de rotación del motor, expresado en revoluciones por minuto [r.p.m.], y dos parámetros relacionados con su

rendimiento: la potencia P , expresada en kilovatios [kW], y el par motor M , expresado en Newton metros [Nm].

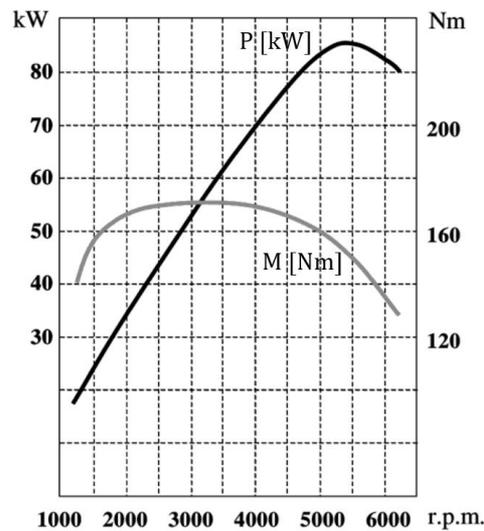


Figura 2-6. Curva del par y potencia para un motor de combustión interna de 2000 cm³[26]

El par alcanza su máximo a una velocidad de giro media, en torno a 3000 r.p.m., que se corresponde con el tramo donde el motor puede generar más fuerza de torsión. El par representa el esfuerzo de rotación que es capaz de desarrollar un motor venciendo a las fuerzas que se oponen a su movimiento. Por tanto, cuando el valor de las fuerzas resistentes al movimiento y el valor del par de rotación aplicado sobre las ruedas de un vehículo se igualan, el vehículo se mueve con velocidad constante. Si es mayor el valor de las fuerzas resistentes, el vehículo disminuirá su velocidad, y si es mayor el par ejercido sobre las ruedas, la velocidad de éste aumentará.

La potencia es el resultado del producto entre el par motor multiplicado por la velocidad de rotación del motor, calculada según la expresión (1) [25]. Sin embargo, la potencia no aumenta indefinidamente con las revoluciones, ya que depende de la curva del par motor.

$$P = M \cdot \omega \quad (1)$$

En la ecuación (1) debe expresarse la potencia en vatios [W], el par en Newton metros [Nm] y la velocidad de rotación en radianes por segundo [rad/s].

A raíz de esta explicación y de la gráfica, puede definirse un rango de revoluciones del motor para el que éste funciona de manera estable y eficiente. Se trata del intervalo de revoluciones comprendido entre el punto de máxima potencia y el de máximo par, es decir, entre 3000 y 5400 r.p.m. Dentro de éste rango, cuando las resistencias a vencer por el vehículo son más grandes, por ejemplo en una pendiente, las revoluciones del motor son más pequeñas que en el caso contrario, provocando un aumento del par motor.

Esta variación de velocidad de giro se hace siempre dentro del régimen óptimo, puesto que fuera de éste se estarían disminuyendo a la vez el par y la potencia, provocando una caída del régimen del motor hasta llegar a calarse. Ésta es la afirmación que hace evidente la necesidad de una caja de cambios, que no es más que un sistema mecánico que actúa como multiplicador del par y desmultiplicador de la velocidad, o viceversa, favoreciendo que el motor trabaje siempre dentro del régimen de velocidad de rotación estable a pesar de las resistencias a vencer.

Para modificar el par, es suficiente con variar los radios o número de dientes de los engranajes involucrados en la transmisión. La Figura 2-7 muestra este principio, suponiendo que la rueda A es la transmisora y la B la receptora [25].

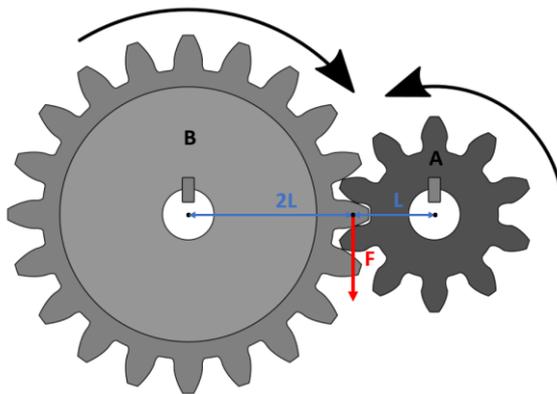


Figura 2-7. Principio de transmisión del par

Siendo F la fuerza que se transmite entre los dos engranajes, y siguiendo la regla de la mano derecha para el cálculo del par M :

- El par que transmite la rueda A será:

$$M_A = F \cdot L \quad (2)$$

- El par que recibe la rueda B será:

$$M_B = F \cdot 2L \quad (3)$$

Además de entenderse la caja de cambios como un multiplicador del par, puede entenderse como un desmultiplicador de la velocidad. La velocidad de giro de ambas ruedas dentadas es diferente, debido a que la potencia permanece constante durante este proceso. Siguiendo la ecuación (1), se puede llegar a una relación entre ambas velocidades:

$$P = M_A \cdot \omega_A = M_B \cdot \omega_B \quad (4)$$

$$\omega_B = \frac{\omega_A}{2} \quad (5)$$

El concepto de multiplicación del par es el concepto básico de funcionamiento de las cajas de cambio, de manera que se consiguen varias relaciones de transmisión en función de los engranajes que participen en cada una de ellas. De esta manera, se consigue que el motor permanezca dentro de su régimen estable, mientras satisface las necesidades del vehículo, adaptando el par que se transmite a las ruedas.

Manteniendo, por tanto, la velocidad angular del motor dentro del mismo rango de revoluciones; para marchas bajas, la caja de cambios aumenta el par motor para proporcionar al vehículo la potencia suficiente para poner al vehículo en movimiento, a la vez que disminuye la velocidad de rotación de las ruedas para adaptarse a una velocidad del vehículo más baja. Para marchas altas, se necesita menos par para mantener la velocidad del vehículo, por lo que el par motor disminuye, mientras se aumenta la velocidad de rotación de las ruedas.

En la gráfica de la Figura 2-8 se observa la relación entre la velocidad de giro del motor y la velocidad del vehículo en una caja de cambios de cinco velocidades (g), representadas como las rectas de color rojo. Se observa que las rectas están limitadas por arriba y por abajo en cuanto a la velocidad del motor, que sería precisamente el rango estable del que se ha hablado anteriormente. Conforme se sube de marcha, el vehículo es capaz de alcanzar mayor velocidad, manteniendo las revoluciones del motor.

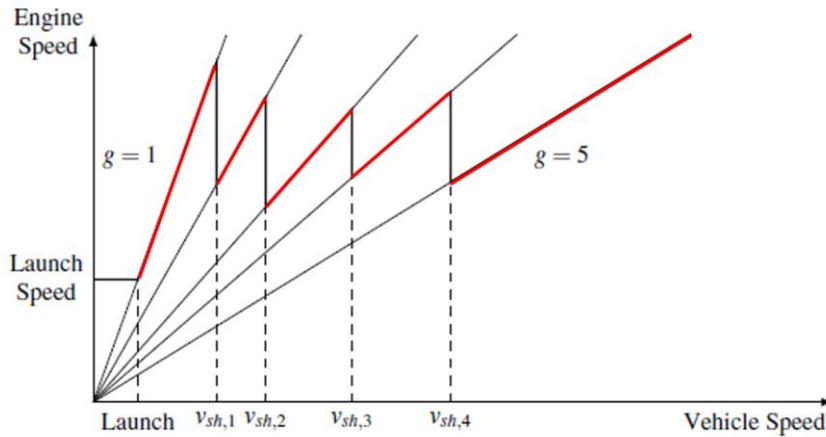


Figura 2-8. Relación entre la velocidad del vehículo y la del motor [8]

2.2 Tipos

Existen varios tipos de cajas de cambio, que se han introducido de cierta manera al explicar el contexto histórico de las mismas. A continuación, se presenta una breve explicación acerca de la caja de cambios manual, la automática y la semiautomática.

Para todos estos tipos de caja de cambios, los elementos deben ser lubricados constantemente para facilitar el movimiento relativo entre ellos, por lo que se incluyen en el interior de una carcasa, que se convierte así en una cámara de aceite. El aceite utilizado, conocido como “valvulina”, es seleccionado debido a sus características favorables en cuanto a la evacuación del calor.

2.2.1 Manual

En un vehículo cuya caja de cambios sea manual, el conductor actúa sobre ella a través del embrague y la palanca de cambio, eligiendo así la marcha con la que se desea que circule el vehículo. Todos los componentes de la caja son de tipo mecánico, y sus elementos principales son los tres ejes con los que cuenta (primario, secundario e intermedio), los engranajes, tanto rectos como helicoidales, y el selector de marchas.

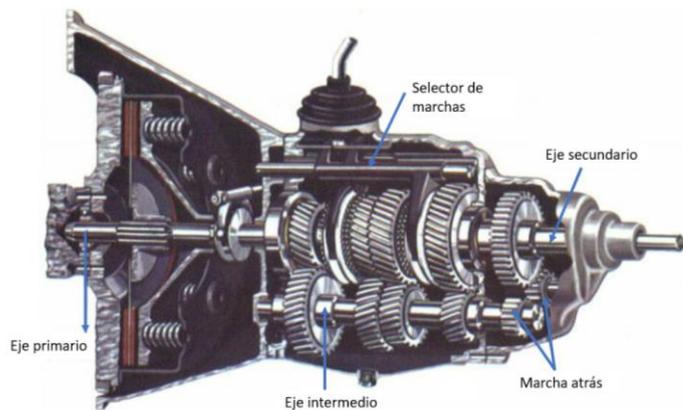


Figura 2-9: Caja de cambios manual

El par del motor es transferido al eje primario, que a su vez lo lleva al intermedio, para acabar en el secundario, que es el que se conecta con las ruedas. Las transmisiones entre ejes se hacen a través de los engranajes, que son seleccionados por el selector de marchas, dirigido por el conductor a través de la palanca de cambio y el embrague. El selector elige una horquilla determinada, que se mueve en una dirección u otra seleccionando el

engranaje adecuado. La combinación de los engranajes seleccionados es lo que genera cada una de las relaciones de transmisión.



Figura 2-10. Selector de marchas de una caja de cambios manual

Para la marcha atrás, debe provocarse que el par que sale por el secundario tenga el sentido contrario al que tendría para cualquier marcha hacia delante. Esto se consigue interponiendo un engranaje más entre el eje intermedio y el secundario al seleccionar esta marcha, de manera que ambos giren en el mismo sentido.

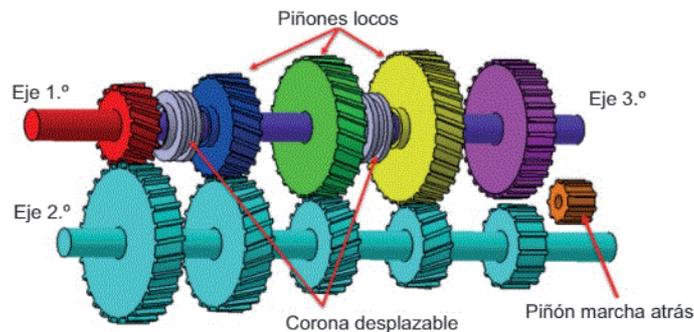


Figura 2-11. Ejes de una caja de cambios manual

2.2.2 Automática

Las cajas de cambio automáticas son sistemas de transmisión diseñados para seleccionar de manera automática las relaciones de velocidades adecuadas según las condiciones de conducción. A diferencia de las manuales, su composición no es completamente mecánica, sino que tiene una gran influencia hidráulica y electrónica. Este diseño elimina el pedal de embrague para el conductor, facilitando así la conducción, a la vez que aumenta la eficiencia de combustible.

Aunque no exista pedal de embrague en los vehículos automáticos, sí existe una palanca que permite al conductor seleccionar el modo de conducción que desea. Normalmente, esta palanca tiene las siguientes posiciones:



Figura 2-12. Palanca de un vehículo automático

- **D (Drive):** Conducción hacia delante, al ser la caja de cambios automática, cambiará las marchas sin necesidad de que el conductor lo comunique mediante el pedal de embrague, como pasaba con la caja de cambios manual.
- **L (Low):** Conducción hacia delante, indicándole a la caja de cambios que debe seleccionar marchas más bajas de la que le correspondería a determinada velocidad, buscando más potencia de las ruedas.
- **R (Reverse):** Conducción marcha atrás.
- **N (Neutra):** Caja de cambios parada, en punto muerto.
- **P (Parking):** Cuando la palanca está en esta posición, el coche está parado, independientemente de que además exista un freno de mano en el vehículo. Al arrancar y apagar el motor del coche, el vehículo debe estar en esta posición.

La gran mayoría de automóviles con transmisión automática contiene también un convertidor hidráulico de par, un elemento colocado al principio de la cadena de transmisión, que suele ser también frecuente en vehículos pesados. El convertidor de par conecta el motor con la caja de cambios automática, permitiendo que el par motor se transfiera de manera continua, actuando también como un amortiguador hidráulico para aportar más suavidad, especialmente durante los cambios de marchas. También tiene la capacidad de multiplicar el par a bajas velocidades, gracias a composición (contiene bomba, reactor y turbina), consiguiendo más fuerza a la hora del arranque del vehículo. Por último, el convertidor de par permite desacoplar el motor de la transmisión, muy útil cuando el vehículo está parado, ya que el motor sigue funcionando al ralentí, pero no quiere transmitirse ese movimiento a las ruedas [25].



Figura 2-13. Convertidor de par

Las cajas automáticas no tienen eje intermedio, por lo que el par se transmite desde el eje primario hasta el secundario a través de los engranajes. Existen además varios embragues, cada uno compuesto por discos de arrastre, que se mueven solidariamente con el engranaje interior correspondiente, y por cuatro discos de presión, conectados con el engranaje exterior, cuya función es comprimir los discos de arrastre para que se muevan todos como un solo bloque. En la Figura 2-14 se pueden ver los embragues, y la Figura 2-15 representa estos

engranajes, el interior y el exterior, para facilitar la comprensión de este concepto. De esta manera, cuando esos discos se comprimen, gracias al fluido que llega desde la bomba, el engranaje interior y el exterior se mueven solidariamente. La mayoría cuenta también con un tren de engranajes, que transmite el par desde el eje primario hasta el secundario.



Figura 2-14. Embrague de una caja de cambios automática

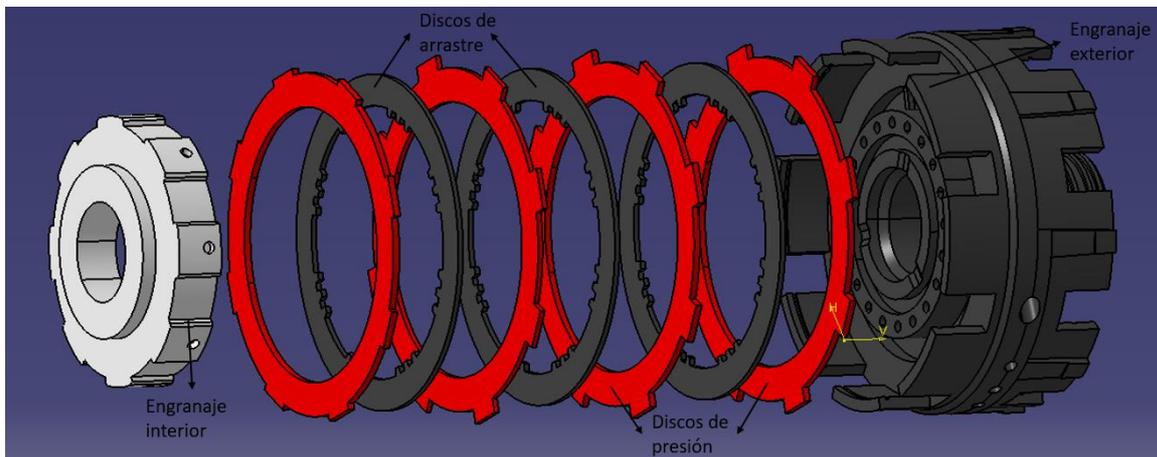


Figura 2-15. Embrague con engranaje interior y exterior

Existen varios tipos de cajas de cambio automática, a continuación se describen las más comunes [9]:

- **Transmisión automática convencional:** Es el más utilizado a día de hoy. Utiliza un convertidor de par y trenes de engranajes planetarios para proporcionar las distintas relaciones de transmisión, y sistemas hidráulicos y electrónicos para activar las distintas velocidades. Es suave en los cambios, aunque no tan eficiente en cuanto a consumo del combustible.



Figura 2-16. Caja de cambios de transmisión automática convencional

- **Transmisión de doble embrague:** Utiliza dos embragues separados para activar las marchas pares e impares alternamente, combinando características de las cajas de cambio manuales y automáticas. Los cambios de marcha se vuelven más rápidos al estar preseleccionada la siguiente marcha, aunque es más compleja en cuanto a su mantenimiento.



Figura 2-17. Caja de cambios de transmisión de doble embrague

- **Transmisión continuamente variable (CVT):** No utiliza engranajes fijos, sino un sistema de poleas cuyo diámetro es variable, lo que permite un número infinito de relaciones de transmisión dentro de un rango. Es eficiente en cuanto al gasto de combustible, y los cambios de marcha son suaves, aunque la falta de conexión directa con el motor puede no ser adecuada para vehículos de alto rendimiento.

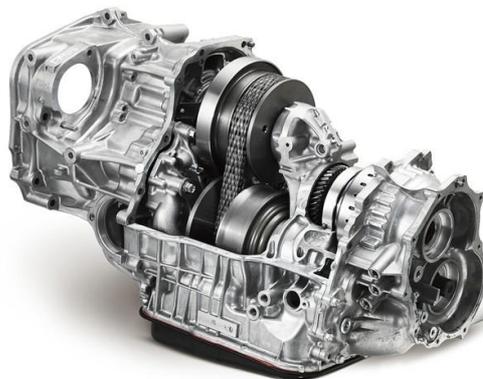


Figura 2-18. Caja de cambios de transmisión continuamente variable

- **Transmisión manual automatizada:** Es una transmisión manual estándar que ha automatizado el cambio de marcha mediante actuadores electrónicos o hidráulicos. Aunque tiene aparentemente las ventajas en cuanto a la conducción de una caja de cambio automatizada, los cambios suelen ser más lentos. Como ventaja, tiene menor coste de fabricación y mantenimiento.



Figura 2-19. Caja de cambios de transmisión manual automatizada

- **Transmisión automática hidrostática:** Una bomba hidráulica genera presión del fluido para accionar un motor hidráulico conectado a las ruedas. Consigue aportar más potencia a baja velocidad, aunque es menos eficiente para velocidades altas. Por este motivo, es más utilizada en vehículos del tipo de trabajo de campo, como tractores o excavadoras.



Figura 2-20. Caja de cambios de transmisión automática hidrostática

- **Transmisión automática electrónica (e-CVT):** Es el tipo de transmisión utilizada en vehículos híbridos. Combina la transmisión CVT con elementos electrónicos, además de tener un motor eléctrico y otro de combustión que combinan entre ellos el flujo de potencia. Mejora la eficiencia del combustible y aporta transiciones suaves, aunque es más compleja y de mantenimiento más caro.



Figura 2-21. Caja de cambios de transmisión automática electrónica

- **Transmisión de varios modos (MMT):** Permite la elección del modo de conducción, ya sea automático o manual. Tiene gran versatilidad y adaptabilidad, aunque al ser más compleja, el mantenimiento es más caro [11].

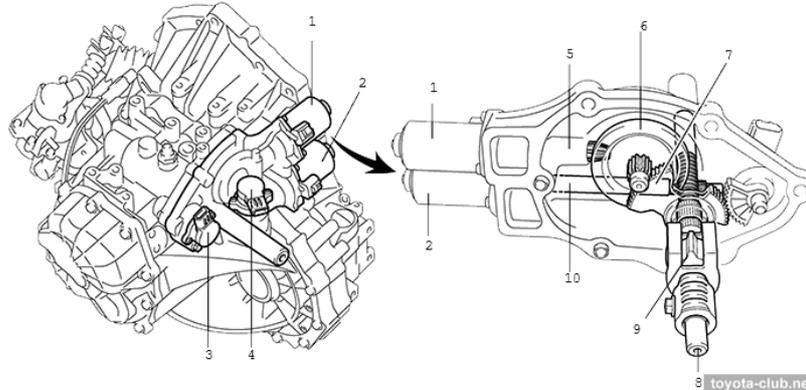


Figura 2-22. Caja de cambios de transmisión de varios modos

2.3 La caja de cambios estudiada

La caja de cambios a la que refiere este proyecto es una caja de cambios automática convencional, que llegó al laboratorio del departamento en torno al año 2014. A modo introductorio, en cuanto a la estructura de la caja de cambios, cuenta con convertidor de par, un tren de engranajes epicicloidales del tipo *Ravigneaux*, que se explicará más adelante, y cinco tramos de embragues de accionamiento hidráulico. Tiene tres marchas hacia adelante, y una hacia atrás, cuyas relaciones de transmisión están calculadas en el cuarto capítulo.

La información que se tenía acerca de la caja era escasa, únicamente la caja de cambios física, ya adaptada para uso estudiantil (pintada y con cortes), y algunas fotos del estado en el que llegó. No existe ningún código ni placa con números de serie, puesto que se perdieron al adaptarla, lo cual habría sido fundamental para averiguar el modelo. Después de haber trabajado con ella, haber calculado sus relaciones de transmisión, y haber realizado una investigación para intentar averiguar el modelo exacto al que pertenecía esta caja, se ha llegado a una conclusión final.

La caja pertenece a un modelo de la marca BMW anterior al 2014, que fue el año en el que se compró. Sabiendo que debía pertenecer a un modelo automático, de tres marchas hacia adelante, y sus relaciones de transmisión, se cerraron las opciones a únicamente dos modelos de esta marca: el E12, perteneciente a un Serie 5 de primera generación fabricado entre 1972 y 1981, y el E21, un Serie 3 de primera generación fabricado entre 1975 y 1983 [3].



Figura 2-23. Modelo BMW Serie 5 de primera generación



Figura 2-24. Modelo Serie 3 de primera generación

La caja de cambios ZF 3HP22, desarrollada por la empresa ZF Friedrichshafen AG, fue utilizada en ambos modelos [14]. Sus relaciones de transmisión, según el catálogo, encajan con las calculadas, por lo que se ha llegado a la conclusión de que la caja de cambios estudiada es ésta. La Figura 2-25 presenta algunos bocetos de la misma:

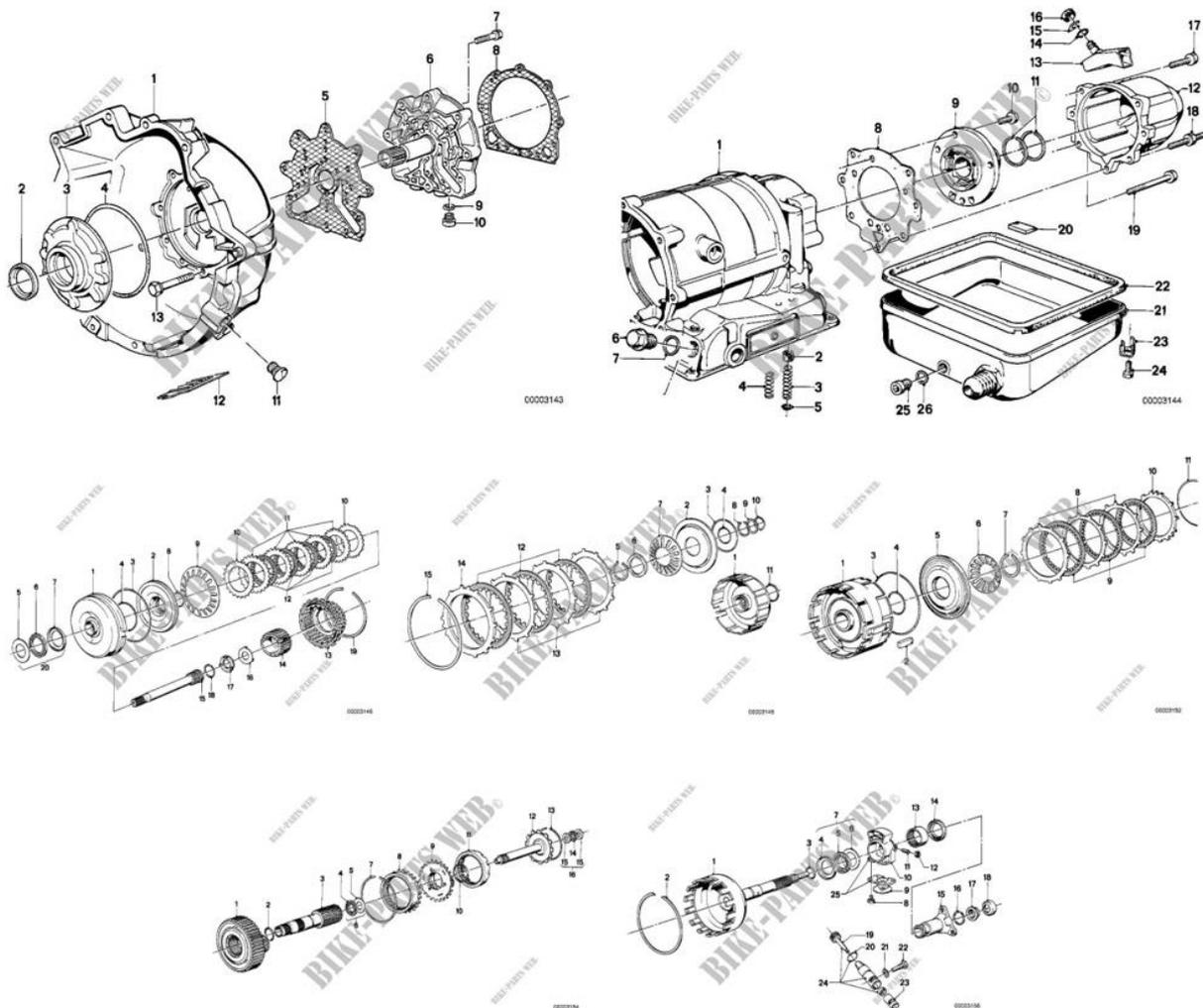


Figura 2-25. Bocetos de la caja de cambios ZF 3HP22 [13, 15]

3 PRINCIPIOS PREVIOS AL FUNCIONAMIENTO

“El estudioso es el que lleva a los demás a lo que él ha comprendido: la verdad.”

- Santo Tomás de Aquino -

Es importante explicar antes del proyecto ciertos conceptos relacionados con el funcionamiento de la caja de cambios, ya que sin haberlos visto antes, la comprensión de la caja se dificulta notablemente. Este capítulo contiene una explicación teórica general de dichos aspectos.

3.1 Engranajes

Los engranajes son elementos mecánicos que consisten en ruedas dentadas que se acoplan entre sí para transmitir movimiento y fuerza a través de un sistema mecánico. Los dientes de un engranaje están diseñados para encajar con los de otro, permitiendo la transferencia de potencia entre ambos ejes. Son fundamentales en la ingeniería debido a su capacidad para modificar la velocidad, el par y la dirección del movimiento.

El principio de funcionamiento de los engranajes se basa en la interacción de los dientes de varias ruedas dentadas que están en contacto directo. Cuando un engranaje gira, sus dientes empujan contra los dientes del siguiente, lo que causa que este también gire. La velocidad de giro y la fuerza transmitida dependen del tamaño y la forma de los engranajes afectados.

Existen varios tipos de engranajes, clasificados según su forma [16, 17]:

- **Engranajes rectos:** Están formados por un cilindro y dientes cuya directriz no tiene ángulo con respecto al eje de rotación del engranaje. Se utilizan cuando los ejes son paralelos al eje de rotación, y las velocidades que se requieren son moderadas. Son fáciles de fabricar y mantener, lo que significa que suelen ser más económicos que otros tipos de engranajes. Suelen ser requeridos por su gran capacidad de transmisión, además de que no producen empujes axiales.



Figura 3-1. Engranaje de dientes rectos

- **Engranajes helicoidales:** Están formados por un cilindro y dientes cuya directriz forma cierto ángulo con respecto al eje de rotación. El contacto entre dos engranajes con diente helicoidal se hace de manera progresiva, por lo que el proceso es más gradual y suave, lo que reduce el ruido y el desgaste de los dientes. Los engranajes helicoidales se utilizan cuando se requiere alta velocidad de rotación, una transmisión de carga más alta, o menos vibraciones con respecto a los rectos.



Figura 3-2. Engranaje de dientes helicoidales

- **Engranajes cónicos:** Tienen dientes en forma de cono y son diseñados para transmitir potencia entre ejes que se cruzan formando cierto ángulo, que normalmente suele ser de 90°. Sus dientes pueden ser rectos o helicoidales.



Figura 3-3. Engranajes cónicos

- **Engranajes hipoides:** Son parecidos a los engranajes cónicos, pero utilizados cuando sus ejes no se cruzan.



Figura 3-4. Engranajes hioides

- **Engranajes de tornillo sin fin:** Consiste en un tornillo sin fin con dientes helicoidales que engrana con una rueda dentada, conocida como piñón. Son autobloqueantes, lo que quiere decir que solo permiten que el mecanismo gire en un sentido. Son utilizados cuando se requiere una reducción de velocidad, y cuando no se dispone de mucho espacio, ya que son compactos.



Figura 3-5. Engranajes de tornillo sin fin

- **Engranajes de cremallera:** Constituido por una barra de dientes, considerada como un engranaje de diámetro infinito, y un engranaje de diente recto de menor diámetro. Sirve para transformar un movimiento de rotación del engranaje pequeño, conocido como piñón, en uno de traslación de la barra de dientes, conocida como cremallera.



Figura 3-6. Engranajes de cremallera

La caja de cambios estudiada contiene solo engranajes rectos y helicoidales, por lo que son los únicos que se van a tratar más allá de la definición dada.

3.1.1 Geometría de los engranajes

Las características geométricas de los engranajes son esenciales a la hora de diseñarlos, ya que son las que definen su capacidad de acoplamiento y de transmisión de carga, en definitiva, su funcionamiento. A continuación, se explican las características geométricas más importantes de los engranajes [22, 23].

- **Número de dientes:** Representado con la letra Z , es el número de dientes que tiene un engranaje en su circunferencia.
- **Diámetro primitivo:** Representado como d_p , también conocido como diámetro de paso. Es el diámetro de la circunferencia teórica en la que los dientes de dos engranajes contiguos se acoplan sin deslizamiento relativo entre ellos, conocida como circunferencia primitiva.
- **Punto primitivo:** Representado como P , es el punto de tangencia existente entre las circunferencias primitivas de dos ruedas dentadas conjugadas. Está situado donde el perfil del diente corta la circunferencia primitiva,
- **Módulo o paso diametral:** Representado con la letra m , es una medida del tamaño de los dientes. Es la relación entre el diámetro primitivo y el número de dientes.

$$m = \frac{d_p}{Z} \quad (6)$$

- **Diámetro exterior o de cabeza (addendum):** Representado como d_e , es el diámetro de la circunferencia exterior del engranaje, que limita los extremos exteriores de los dientes, conocida como circunferencia

de addendum.

$$d_e = d_p + 2 \cdot m \quad (7)$$

- **Diámetro interior o de base (dedendum):** Representado como d_i , es el diámetro de la circunferencia que pasa por la base de los dientes del engranaje, que limita el fondo de los dientes, conocida como circunferencia de dedendum.

$$d_i = d_p - 2.5 \cdot m \quad (8)$$

- **Diámetro de altura de trabajo:** Es el diámetro de la circunferencia de altura de trabajo, que marca la distancia que el diente conjugado proyecta en el espacio entre dientes. El diente conjugado, por tanto, no debe sobrepasar esta circunferencia.
- **Paso circular:** Representado con la letra p , es la distancia medida en el círculo primario entre puntos iguales de dientes contiguos. Se calcula con la siguiente expresión:

$$p = \frac{\pi \cdot d_p}{Z} = m \cdot \pi \quad (9)$$

- **Altura del diente:** Representada por la letra h , es la suma entre la altura de cabeza y la altura de pie. La altura de cabeza, h_a , es la distancia entre la circunferencia primitiva y la de addendum. La altura de pie, h_f , es la distancia entre la circunferencia primitiva y la de dedendum.

$$h_a = m \quad (10)$$

$$h_f = 1.25 \cdot m \quad (11)$$

$$h = h_a + h_f = 2.25 \cdot m \quad (12)$$

- **Espesor del diente:** Representado con s , es el espesor medido sobre la circunferencia primitiva.

$$s = \frac{p}{2} \quad (13)$$

- **Juego de cabeza:** Representado con la letra c , es la distancia entre la cabeza de un diente y la base del diente con el que engrana. Es una holgura necesaria para permitir la lubricación y evitar interferencias.

La Figura 3-7 y la Figura 3-8 muestran los parámetros mencionados en dos dibujos explicativos.

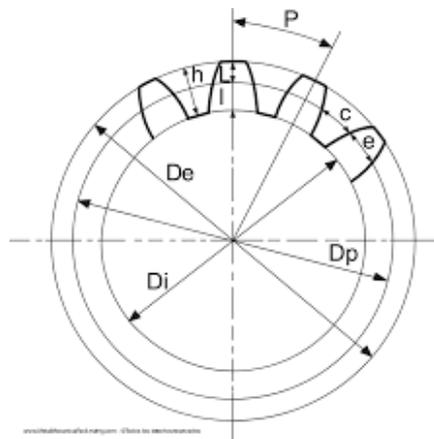


Figura 3-7. Parámetros de un engranaje

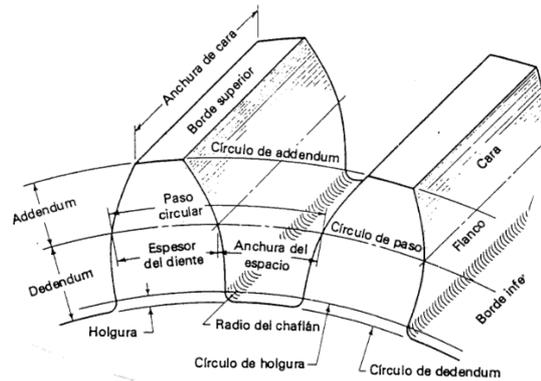


Figura 3-8. Parámetros de un diente de engranaje [23]

- **Ángulo de hélice:** Representado como β , solo tiene sentido en los engranajes helicoidales, ya que es el ángulo que forman el eje de rotación del engranaje con la dirección de sus dientes.

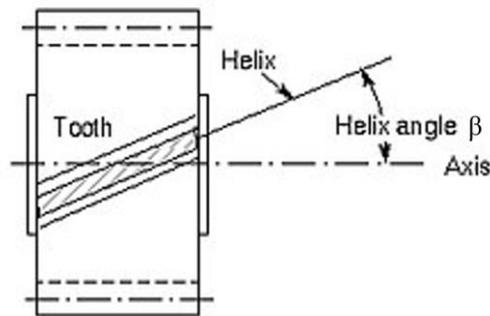


Figura 3-9. Representación del ángulo de hélice

- **Perfil de diente:** Entre las posibles configuraciones para diseñar el perfil del diente, la más común es la evolvente, que cuenta con dos ventajas fundamentales: son fáciles de fabricar, y su montaje se vuelve más sencillo, ya que la distancia entre ejes de dos engranajes conjugados puede modificarse manteniendo constante su relación de transmisión.
- **Línea de acción o de presión:** Es una línea imaginaria tangente a las dos circunferencias de dedendum de dos engranajes conjugados. El punto de contacto entre los dos perfiles evolventes de dos dientes conjugados está siempre sobre esta línea.
- **Ángulo de presión:** Representado con ϕ , es el ángulo que se forma entre la línea de acción, línea a lo largo de la que se transmite la fuerza entre los dientes, y la línea tangente a la circunferencia primitiva. Suele ser de 20° .

La Figura 3-10 muestra una representación sobre un dibujo de la línea de presión y el ángulo de presión.

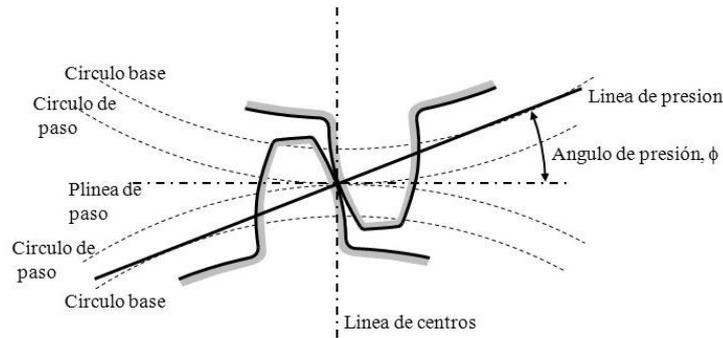


Figura 3-10. Parámetros de una pareja de engranajes

Para que dos engranajes encajen, es necesario que coincidan en algunos aspectos de su geometría:

- Deben tener el mismo módulo m , asegurando así que los dientes tengan el mismo tamaño y forma.
- Deben tener el mismo ángulo de presión ϕ , para asegurar un contacto suave entre ambas ruedas dentadas.
- Los diámetros primitivos de ambos engranajes deben ser tangentes entre sí.
- Deben tener el mismo ángulo de hélice β , en caso de que fueran engranajes helicoidales.

3.2 Trenes epicicloidales

La base de la transmisión en las cajas de cambio automáticas está en los trenes de engranajes epicicloidales. El tren epicicloidal o tren de engranajes planetarios, es un sistema que se utiliza para transmitir el movimiento entre dos ejes, adaptando el número de revoluciones y el par de giro. Una de sus principales ventajas es la variedad de relaciones de transmisión capaz de aportar, ocupando un espacio relativamente pequeño.

Está compuesto por varios engranajes helicoidales:

- El engranaje situado en el centro del sistema es conocido como planeta, va dentado de manera exterior.
- El engranaje más externo, conocido como corona, que va dentado de manera interior.
- Varios engranajes, los satélites, que engranan al mismo tiempo con el planeta y la corona. Además de rotar sobre su eje, giran alrededor del planeta. Puede haber varios, colocados de manera equidistante alrededor del planeta.
- El portasatélites es una estructura que, girando sobre su propio eje, sostiene los satélites para que éstos giren alrededor del planeta.

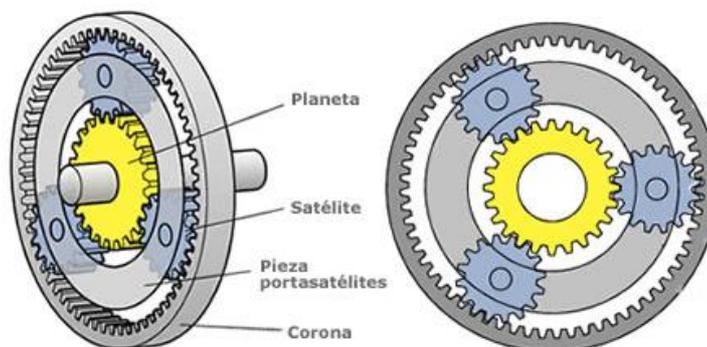


Figura 3-11. Tren de engranajes epicicloidal

El principio de funcionamiento de un tren epicicloidal se basa en las posibilidades existentes para la transmisión, ya que el planeta, la corona y el portasatélites pueden actuar de manera tanto receptora como transmisora del

movimiento hacia fuera del propio tren. Por tanto, se tendrán varias configuraciones en función de qué ejes sean seleccionados como entrada y como salida:

- Si la entrada es el planeta, la salida el portasatélites, y la corona está retenida: el giro del eje de salida será en el mismo sentido que el de entrada, pero a menos velocidad. Sucede, por tanto, una gran desmultiplicación de la velocidad hacia una velocidad mucho más lenta.

Si, por el contrario, el planeta es la salida y el portasatélites es la entrada: sucede una gran desmultiplicación hacia una velocidad mucho más rápida.

- Si la entrada es la corona, la salida es el portasatélites y el planeta está retenido: el eje de salida gira en el mismo sentido que el de entrada, pero se produce una pequeña desmultiplicación de la velocidad hacia una más lenta.

Si, por el contrario, la corona es la salida y el portasatélites es la entrada: sucede una pequeña desmultiplicación hacia una velocidad más rápida.

- Si el planeta y el portasatélites están bloqueados cinemáticamente, es decir, giran solidariamente con la corona, siendo ésta la entrada: todo el sistema forma un bloque y gira a la misma velocidad, por lo que no ocurre ninguna desmultiplicación de la velocidad.
- Si la entrada es el planeta, la salida es la corona, y el portasatélites está retenido: el eje de salida gira en sentido contrario al de entrada, con una gran desmultiplicación de la velocidad de giro a una bastante más lenta.

3.2.1 Ecuación de Willis

Las relaciones de transmisión en los trenes de engranajes planetarios se calculan a través de la ecuación de Willis. La ecuación de Willis relaciona las velocidades angulares de los tres elementos principales de los trenes, el planeta, la corona y el portasatélites, con el número de dientes de cada uno de los elementos implicados. Se demuestra a continuación la obtención de esta ecuación [24]:

Siendo r_a la relación de transmisión aparente que tendría un tren de engranajes ordinario, es decir, como si el portasatélites estuviera retenido, tal y como se ve en la Figura 3-12:

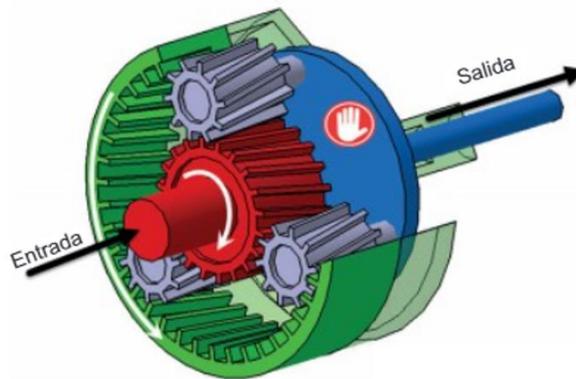


Figura 3-12. Sentidos de giro en un tren de engranajes epicicloidales con el portasatélites retenido [26]

$$r_a = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{Z_s}{Z_e} \quad (14)$$

Siendo:

- ω_e es la velocidad angular de la rueda de entrada
- ω_s es la velocidad angular de la rueda de salida
- Z_e es el número de dientes de la rueda de entrada

- Z_s es el número de dientes de la rueda de salida

Para igualar un tren de engranajes epicicloidal a uno ordinario, se introduce en la ecuación el giro del portasatélites, pero en sentido contrario. Además, al igualar ahora los sentidos de las velocidades de giro de entrada y de salida, se introduce un signo negativo en la ecuación. Los sentidos de giro del tren de engranajes epicicloidal se pueden ver en la Figura 3-13.

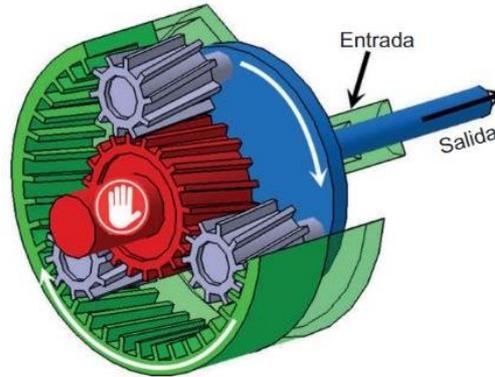


Figura 3-13. Sentidos de giro en un tren de engranajes epicicloidal [26]

La expresión queda:

$$r_a = \frac{\omega_e - \omega_{ps}}{\omega_s - \omega_{ps}} = -\frac{Z_s}{Z_e} \quad (15)$$

Siendo:

- ω_{ps} es la velocidad angular del portasatélites

Ésta es, por tanto, la ecuación de Willis, que de forma general puede expresarse como [19]:

$$\frac{\omega_c - \omega_{ps}}{\omega_p - \omega_{ps}} = \pm \frac{Z_p}{Z_c} \quad (16)$$

Siendo:

- ω_c es la velocidad angular de la corona del tren
- ω_p es la velocidad angular del planeta del tren
- ω_{ps} es la velocidad angular del portasatélites del tren
- Z_c es el número de dientes de la corona
- Z_p es el número de dientes del planeta
- El signo será negativo si los sentidos de giro de los ejes de entrada y salida son contrarios.

Para calcular cada una de las relaciones de transmisión de la caja de cambios, habrá que adaptar la ecuación de Willis a las velocidades que se estén dando, siempre con idea de despejar la relación entre la velocidad del eje de entrada y el de salida, que es lo que conocemos propiamente dicho como relación de transmisión, r_t :

$$r_t = i_t = \frac{\omega_e}{\omega_s} \quad (17)$$

3.3 Tren de engranajes de tipo Ravigneaux

Las cajas de cambio automáticas actuales contienen sistemas que incluyen varios trenes de engranajes acoplados entre ellos, consiguiendo así aún más relaciones de transmisión en un espacio compacto. La caja de cambios estudiada contiene un sistema de engranajes planetarios de tipo Ravigneaux. Consiste en la combinación de dos trenes epicicloidales en un único conjunto, compartiendo entre ellos la corona o el planeta.

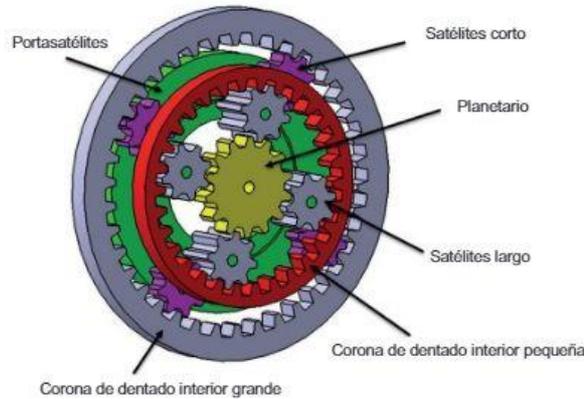


Figura 3-14. Tren de engranajes Ravigneaux

Concretamente, el tren de engranajes de la caja de cambios estudiada tiene un solo planeta que es compartido entre los dos trenes de engranajes. Además, cada uno de ellos tiene una corona y un conjunto de cuatro satélites unidos mediante un portasatélites.

3.4 Embragues

Los embragues sirven para acoplar el giro de dos elementos rotativos que normalmente no girarían a la misma velocidad. Los embragues de las cajas de cambio automáticas están compuestos por varios discos, dispuestos de manera alterna según tengan dentado exterior o interior. Los discos de embrague con dentado exterior son conocidos como discos de compresión, mientras que los dentados interiormente son los discos de arrastre. Los discos de compresión están unidos mecánicamente, y, por tanto, giran de manera solidaria, con la carcasa que los incluye, el portadiscos exterior. Los discos de arrastre están encajados, y, por tanto, giran solidariamente con el portadiscos interior.

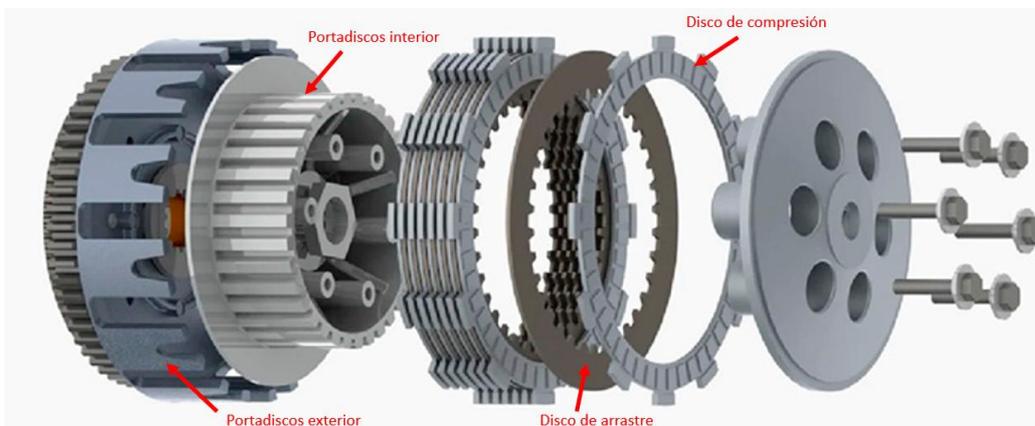


Figura 3-15. Embragues y portadiscos

Cuando el embrague no está activado, los discos están separados, y puede darse el giro relativo entre ellos. Para activar el embrague, se inyecta fluido a presión en la zona del embrague. Este aumento de presión provoca que

un émbolo comprima los discos entre ellos, provocando la unión de éstos, lo que a su vez conlleva que el portadiscos exterior y el interior giren de manera solidaria [26].

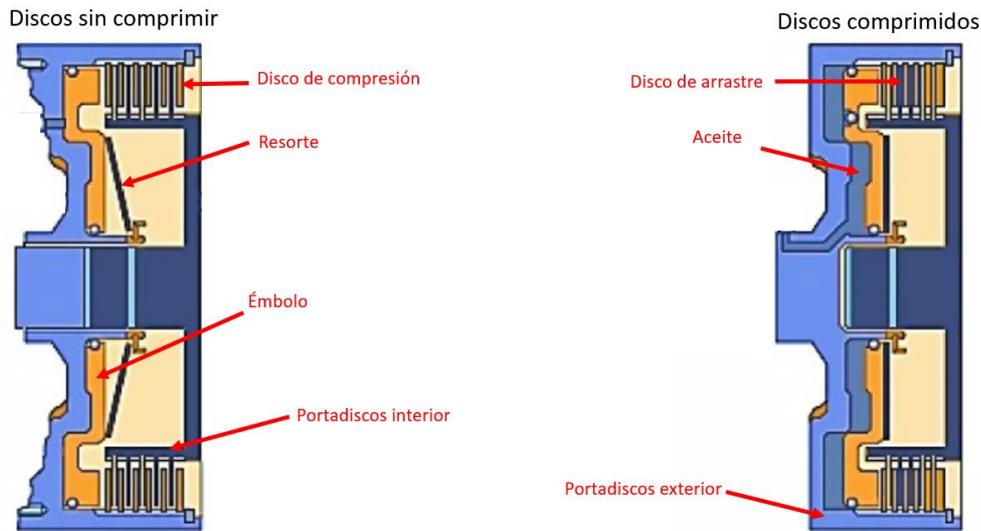


Figura 3-16. Sistema hidráulico de activación de los embragues

3.5 Instalación hidráulica

La caja de cambios está contenida en una carcasa, que actúa como contenedor de un fluido conocido como “valvulina”. Este fluido consigue la continua lubricación de los elementos internos de la caja, además de participar como disipador de calor. Además, en las cajas de cambio automáticas, existe un circuito hidráulico más complejo, que participa directamente en la transmisión y el control de las relaciones de la caja. Este circuito hidráulico es cerrado, lo que significa que es el mismo fluido el que circula constantemente por el sistema, sin supuestas pérdidas ni fugas. Los componentes principales de la instalación hidráulica son: el depósito, la bomba, los filtros, las tuberías y válvulas, los intercambiadores de calor y los elementos de control. La Figura 3-17 y la Figura 3-18 muestran respectivamente la bomba y un conjunto de tuberías y válvulas, pertenecientes a la caja de cambios estudiada.



Figura 3-17. Bomba de la caja de cambios estudiada

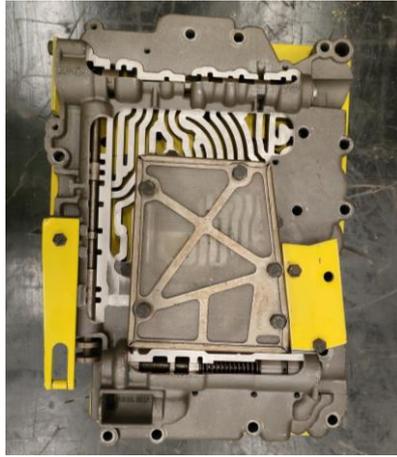


Figura 3-18. Conjunto de tuberías y válvulas de la caja de cambios estudiada

La bomba hidráulica convierte la energía mecánica del motor en presión hidráulica, que envía a través de las tuberías a las válvulas, para su posterior distribución. El sistema de control ordena a las válvulas que se abran o se cierren para la correcta distribución del fluido por todos los elementos, cuidando especialmente de la activación de los embragues correspondientes, además de la lubricación y la disipación del calor. Una vez que el fluido ha pasado por los elementos de la caja cumpliendo su función, es conducido de vuelta hasta el depósito, pasando por los filtros y disipadores de calor. El depósito no solo cumple la función de almacenaje del fluido, sino que también actúa como regulador de su temperatura, asegurando que sea óptima para las funciones que se le requieren.

3.6 Ejes de entrada y de salida

En este epígrafe se pretende explicar la transmisión completa del par, desde que sale del motor hasta que llega a las ruedas, provocando así el movimiento del vehículo. Los elementos que participan en la transmisión son, en el siguiente orden: el motor, el convertidor de par, la caja de cambios, el árbol de transmisión, el diferencial, los palieres, y por último, las ruedas [24]. Se muestran estos elementos en la Figura 3-19, referida a un coche de motor delantero con propulsión trasera.

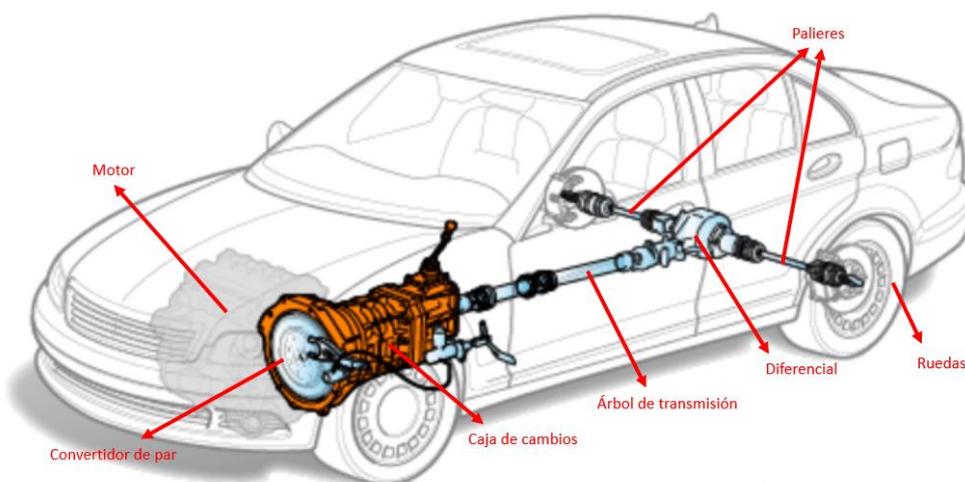


Figura 3-19. Elementos del sistema de transmisión completo de un coche

El motor genera un movimiento, que gracias al cigüeñal tiene forma rotativa. Este par pasa por el convertidor antes de llegar a la caja de cambios, donde se produce su desmultiplicación para poder asegurar una conducción

eficiente que supla las necesidades. El eje de salida de la caja de cambios está unido al árbol de transmisión a través de juntas homocinéticas o de tipo Cardan. Las juntas Cardan son elementos de unión que permiten la transmisión del movimiento entre dos ejes que no están alineados, hecho que sucede en un vehículo, debido en gran parte a su comportamiento con respecto a las irregularidades del terreno. El árbol de transmisión está conectado con el diferencial a través de otra junta Cardan.



Figura 3-20. Junta Cardan

Cuando el vehículo circula en línea recta, las dos ruedas giran a la vez, pero en las curvas, cada una de las ruedas del mismo eje debe ir a una velocidad distinta, ya que hacen recorridos distintos. El diferencial es un elemento fundamental en el sistema de tracción, ya que permite que las dos ruedas entre las que va situado giren a distinta velocidad. Existe pues, un diferencial por cada eje de ruedas que tenga tracción; si el vehículo tiene solo tracción trasera o delantera, tendrá un solo diferencial, situado entre las ruedas referidas. Por el contrario, si el vehículo tiene tracción a las cuatro ruedas, habrá tres diferenciales: uno situado en el eje delantero, otro en el trasero, y otro intermedio entre ambos ejes.

El diferencial convencional se compone de varios elementos para conseguir que las velocidades de giro de las ruedas sean distintas. En primer lugar, el eje que recibe el movimiento del árbol de transmisión termina en forma de engranaje cónico, el piñón de ataque, que engrana y transmite el movimiento a una corona dentada. El conjunto formado por el piñón de ataque y la corona es conocido como grupo reductor. La corona va unida a una carcasa en cuyo interior se encuentran otros cuatro engranajes cónicos: dos planetarios, unidos a los palieres, y dos satélites, cuyo eje va unido a la carcasa. La Figura 3-21 muestra un diferencial y sus principales elementos.

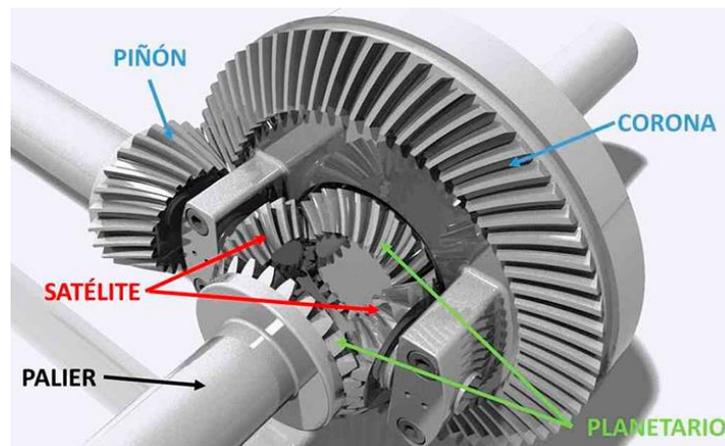


Figura 3-21. Elementos de un diferencial

El movimiento es transmitido, por tanto, a los palieres, dos ejes que van unidos cada uno a una de las ruedas, a través de más juntas homocinéticas. El giro de las ruedas provoca el avance del vehículo.

4 RELACIONES DE TRANSMISIÓN

“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.”

- Aristóteles -

En este capítulo se va a describir las relaciones de transmisión calculadas. Las relaciones de transmisión determinan cómo se transmite la potencia del motor a las ruedas del vehículo, y están ligadas a cada una de las marchas o velocidades del vehículo. Su valor es la división de la velocidad de giro del eje de entrada entre la del eje de salida. Las relaciones de transmisión bajas están ligadas a las velocidades cortas, ya que proporcionan mayor par y menor velocidad de las ruedas. En cambio, para velocidades del vehículo altas, se utilizan relaciones de transmisión más altas, que conllevan una disminución del par.

La Figura 4-1 muestra el esquema del funcionamiento de la caja de cambios estudiada:

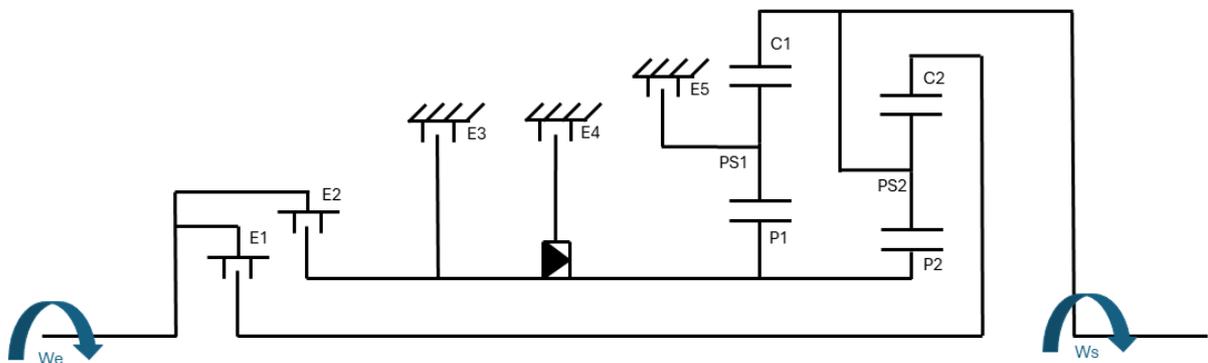


Figura 4-1. Esquema de las relaciones de transmisión

Las velocidades de giro de entrada (la que aporta el motor) y salida (la que llega a las ruedas) están representadas como ω_e y ω_s respectivamente. La caja de cambios incluye dos trenes de engranajes epicicloidales, cada uno con su planeta (P1 y P2), corona (C1 y C2) y portasatélite (PS1 y PS2). La Tabla 1 contiene el número de dientes de cada uno de estos engranajes.

Tabla 1. Número de dientes de los engranajes

Engranaje	P1	PS1	C1	P2	PS2	C2
Número de dientes	$Z_{P1} = 33$	$Z_{PS1} = 20$	$Z_{C1} = 73$	$Z_{P2} = 33$	$Z_{PS2} = 20$	$Z_{C2} = 73$

Como se puede observar, entran en juego cinco embragues. La activación de los embragues se hace por parejas, aunque no todas las combinaciones son posibles, por diversos motivos. La Tabla 2 muestra las posibilidades de combinación de embragues que habría, y si dicha combinación es posible o no lo es.

Tabla 2. Combinación de embragues disponibles

E1	E2	E3	E4	E5	¿Es posible?
X	X				Sí. Representa una marcha hacia delante.
X		X			Sí. Representa una marcha hacia delante.
X			X		No. No se transmite el par al eje de salida.
X				X	Sí. Representa una marcha hacia delante.
	X	X			No. Se estaría bloqueando el eje que debe transmitir el par.
	X		X		No. Se estaría bloqueando el eje que debe transmitir el par.
	X			X	Sí. Representa la marcha hacia atrás.
		X	X		No. No se transmite el par al eje de salida.
		X		X	No. No se transmite el par al eje de salida.
			X	X	No. No se transmite el par al eje de salida.

Las combinaciones posibles y su cálculo se muestran en los siguientes epígrafes. En los distintos esquemas para cada relación, el color rojo representa la velocidad de giro del eje de entrada, y el color verde representa la velocidad de giro del eje de salida. El color morado representa los elementos con velocidad de giro nula, y el color negro representa los elementos que no interfieren en la relación que se está trabajando en cada momento.

Por la disposición de los engranajes, y la conexión física existente entre ellos, ha de tenerse en cuenta para todas las relaciones que:

$$\omega_{P1} = \omega_{P2} \quad (18)$$

$$\omega_S = \omega_{PS2} = \omega_{C1} \quad (19)$$

4.1 Primera marcha

La primera relación de velocidades es seleccionada cuando se activan los embragues *E1* y *E5* a la vez, provocando que los ejes y engranajes del sistema se muevan a determinadas velocidades de giro. La Figura 4-2 muestra cómo intervienen los elementos de la caja de cambios al seleccionarse esta relación.

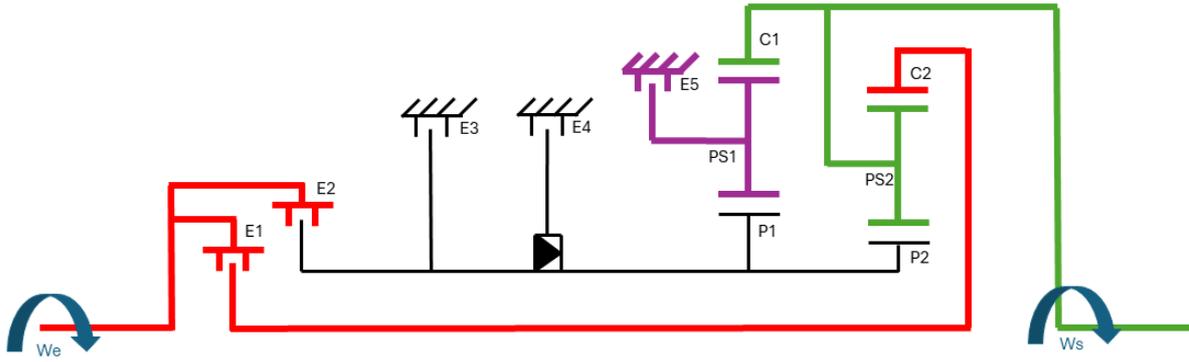


Figura 4-2. Esquema de las relaciones de transmisión para la primera marcha

Activar el embrague $E1$ conlleva que:

$$\omega_e = \omega_{C2} \quad (20)$$

Activar el embrague $E5$ conlleva que:

$$\omega_{PS1} = 0 \quad (21)$$

La ecuación de Willis para el primer tren epicicloidal es:

$$\frac{\omega_{C1} - \omega_{PS1}}{\omega_{P1} - \omega_{PS1}} = -\frac{Z_{P1}}{Z_{C1}} \quad (22)$$

Incluyendo las relaciones anteriores, se llega a:

$$\frac{\omega_s}{\omega_{P1}} = -\frac{Z_{P1}}{Z_{C1}} \quad (23)$$

Despejando ω_{P1} :

$$\omega_{P1} = -\frac{Z_{C1}}{Z_{P1}} \cdot \omega_s \quad (24)$$

La ecuación de Willis para el segundo tren epicicloidal es:

$$\frac{\omega_{C2} - \omega_{PS2}}{\omega_{P2} - \omega_{PS2}} = -\frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \quad (25)$$

Incluyendo las relaciones anteriores, se llega a:

$$\frac{\omega_e - \omega_s}{\omega_{P1} - \omega_s} = -\frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \quad (26)$$

Sustituyendo la relación obtenida de la ecuación de Willis del primer tren epicicloidal, y operando:

$$\frac{\omega_e - \omega_s}{\omega_s \cdot \left(\frac{Z_{C1}}{Z_{P1}} + 1\right)} = \frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \quad (27)$$

$$\omega_e = \omega_s \cdot \left[\frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \cdot \left(\frac{Z_{C1}}{Z_{P1}} + 1 \right) + 1 \right] \quad (28)$$

Por tanto, la relación de transmisión para la primera velocidad es:

$$i_1 = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \cdot \left(\frac{Z_{C1}}{Z_{P1}} + 1 \right) + 1 \quad (29)$$

Sustituyendo el número de dientes de cada engranaje:

$$i_1 = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{33}{73} \cdot \left(\frac{73}{33} + 1 \right) + 1 = 2.452 \quad (30)$$

4.2 Segunda marcha

La segunda relación de velocidades es seleccionada cuando se activan los embragues $E1$ y $E3$ a la vez, provocando que los ejes y engranajes del sistema se muevan a determinadas velocidades de giro. La Figura 4-3 muestra cómo intervienen los elementos de la caja de cambios al seleccionarse esta relación.

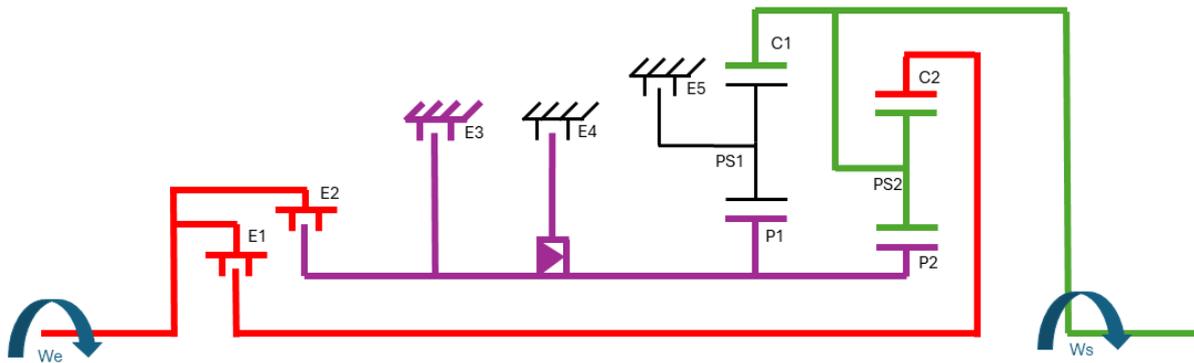


Figura 4-3. Esquema de las relaciones de transmisión para la segunda marcha

Activar el embrague $E1$ conlleva que:

$$\omega_e = \omega_{C2} \quad (31)$$

Activar el embrague $E3$ conlleva que:

$$\omega_{P1} = \omega_{P2} = 0 \quad (32)$$

La ecuación de Willis para el segundo tren epicicloidal es:

$$\frac{\omega_{C2} - \omega_{PS2}}{\omega_{P2} - \omega_{PS2}} = -\frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \quad (33)$$

Incluyendo las relaciones anteriores, se llega a:

$$\frac{\omega_e - \omega_s}{0 - \omega_s} = -\frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} \quad (34)$$

Operando para despejar la relación entre la velocidad de entrada y la de salida:

$$i_2 = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{Z_{P2}}{Z_{C2}} + 1 \quad (35)$$

Sustituyendo el número de dientes de cada engranaje:

$$i_2 = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{33}{73} + 1 = 1.452 \quad (36)$$

4.3 Tercera marcha

La tercera relación de velocidades es seleccionada cuando se activan los embragues $E1$ y $E2$ a la vez, provocando que los ejes y engranajes del sistema se muevan a determinadas velocidades de giro. La Figura 4-4 muestra cómo intervienen los elementos de la caja de cambios al seleccionarse esta relación.

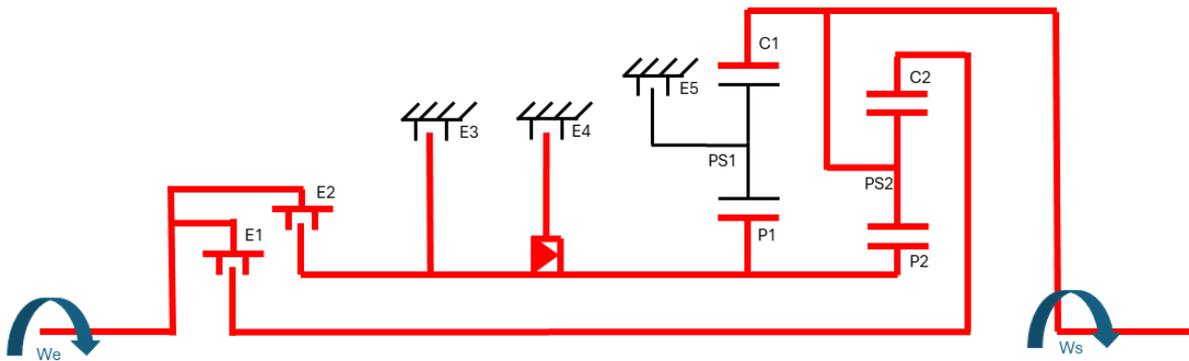


Figura 4-4. Esquema de las relaciones de transmisión para la tercera marcha

Puede observarse que la velocidad de giro del eje de entrada y el de salida es la misma, por lo que se prevé que la relación de transmisión sea 1. Se demuestra a continuación a pesar de ello.

Activar el embrague $E1$ conlleva que:

$$\omega_e = \omega_{C2} \quad (37)$$

Activar el embrague $E2$ conlleva que:

$$\omega_{P1} = \omega_{P2} = \omega_e \quad (38)$$

Observando el segundo tren epicicloidal, el hecho de que la velocidad de giro del planeta y la corona sean iguales

$$\omega_{C2} = \omega_{P2} = \omega_e \quad (39)$$

Conlleva que la velocidad de giro del portasatélites será la misma

$$\omega_{PS2} = \omega_{P2} = \omega_e \quad (40)$$

Por la relación dada anteriormente, se llega a la conclusión de que:

$$\omega_s = \omega_{PS2} = \omega_e \quad (41)$$

Por tanto, la relación de transmisión para la tercera marcha es:

$$i_3 = \frac{\omega_e}{\omega_s} = 1 \quad (42)$$

4.4 Retroceso

La marcha atrás es seleccionada cuando se activan los embragues $E2$ y $E5$ a la vez. La Figura 4-5 muestra cómo intervienen los elementos de la caja de cambios al seleccionarse esta relación.

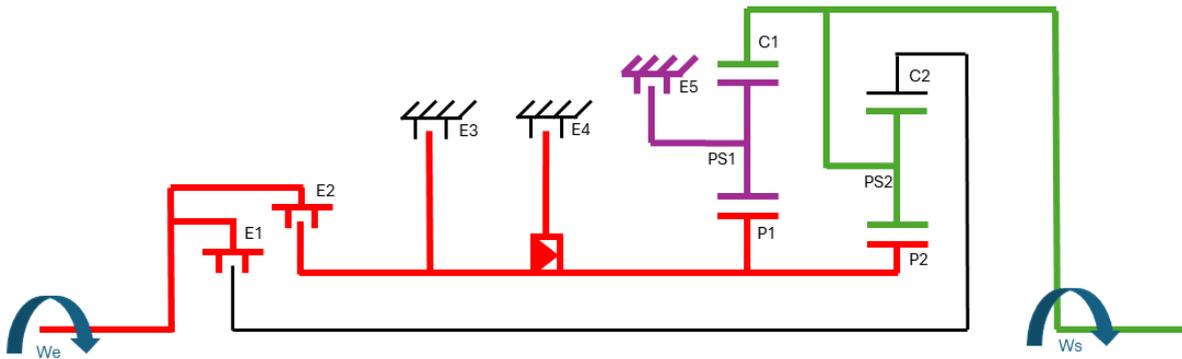


Figura 4-5. Esquema de las relaciones de transmisión para la marcha atrás

Activar el embrague $E2$ conlleva que:

$$\omega_{P1} = \omega_{P2} = \omega_e \quad (43)$$

Activar el embrague $E5$ conlleva que:

$$\omega_{PS1} = 0 \quad (44)$$

La ecuación de Willis para el primer tren epicicloidal es:

$$\frac{\omega_{C1} - \omega_{PS1}}{\omega_{P1} - \omega_{PS1}} = -\frac{Z_{P1}}{Z_{C1}} \quad (45)$$

Incluyendo las relaciones anteriores, se llega a:

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = -\frac{Z_{P1}}{Z_{C1}} \quad (46)$$

Operando sobre esta expresión:

$$i_r = \frac{\omega_e}{\omega_s} = -\frac{Z_{C1}}{Z_{P1}} \quad (47)$$

Por tanto, sustituyendo el número de dientes de cada engranaje, la relación de transmisión para la marcha atrás queda:

$$i_r = \frac{\omega_e}{\omega_s} = -\frac{73}{33} = -0.452 \quad (48)$$

5 ELEMENTOS DE LA CAJA DE CAMBIOS

“La educación no es la respuesta a la pregunta. La educación es el medio para encontrar la respuesta a todas las preguntas.”

- William Allin -

Este capítulo contiene una lista de todas las partes o elementos mecánicos que contiene la caja de cambios, empezando por la carcasa exterior, para luego seguir con el mismo orden que debe seguirse en el montaje de los elementos de la caja, desde el eje de entrada hasta el de salida. De cada elemento se han incluido fotografías reales y capturas de su modelado en Catia V5. Cabe destacar el detalle de que los colores de las piezas no son reales, sino que son una adaptación para uso estudiantil, ya que facilita el entendimiento del mecanismo.

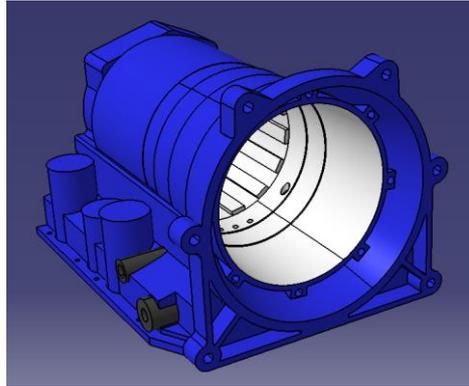
5.1 Carcasa exterior

En este apartado se incluyen dos elementos diferentes, la carcasa que cubre todos los elementos internos de la caja de cambios, que está pintada en azul, y el elemento que ejerce como guía para el eje de salida, que está pintado en amarillo. Ambos elementos están unidos a través de tornillos.

Una de las funciones principales de la carcasa exterior es asegurar el buen funcionamiento y durabilidad del sistema de transmisión, ya que proporciona un soporte rígido para los componentes internos. Va anclada al vehículo, por lo que no tiene ningún tipo de movimiento relativo con respecto a éste. Suele estar fabricada en aluminio o aleaciones ligeras. Además, la carcasa actúa como un recipiente para el fluido de transmisión, necesario para la lubricación, refrigeración y operación hidráulica de los embragues y frenos, a la vez que ayuda a disipar el calor generado por el funcionamiento del sistema. También protege los componentes internos contra contaminantes externos como polvo, humedad o suciedad.



a) Fotografía real

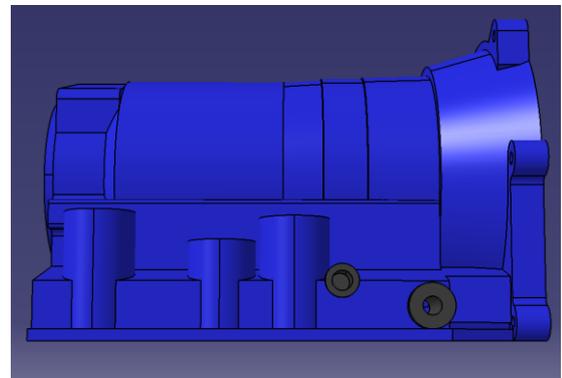


b) Modelo

Figura 5-1. Carcasa exterior azul, primera perspectiva



a) Fotografía real

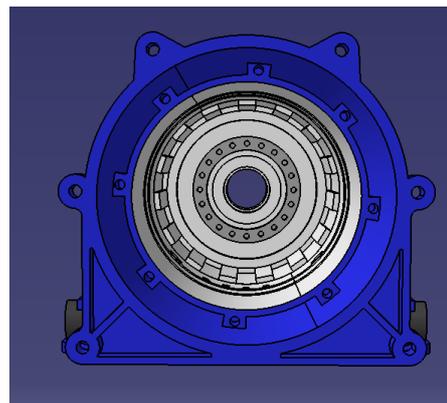


b) Modelo

Figura 5-2. Carcasa exterior azul, segunda perspectiva

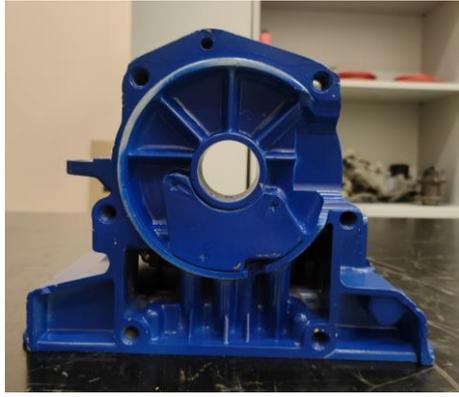


a) Fotografía real

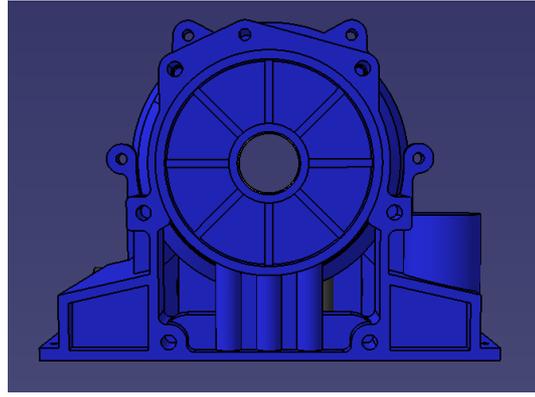


b) Modelo

Figura 5-3. Carcasa exterior azul, tercera perspectiva



a) Fotografía real



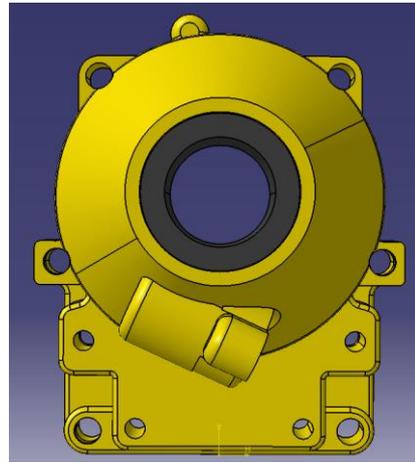
b) Modelo

Figura 5-4. Carcasa exterior azul, cuarta perspectiva

La función principal del elemento que hace de guía para el eje de salida, y que a su vez transmite el par directamente a las ruedas, es asegurar el alineamiento de los ejes, a la vez que minimiza los efectos vibratorios sobre él. Este elemento, pintado en amarillo, se muestra en las siguientes imágenes.



a) Fotografía real

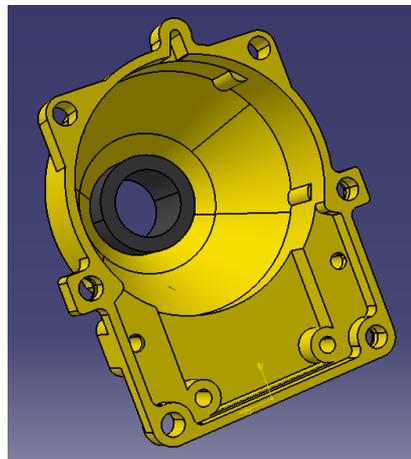


b) Modelo

Figura 5-5. Guía para el eje de salida, primera perspectiva

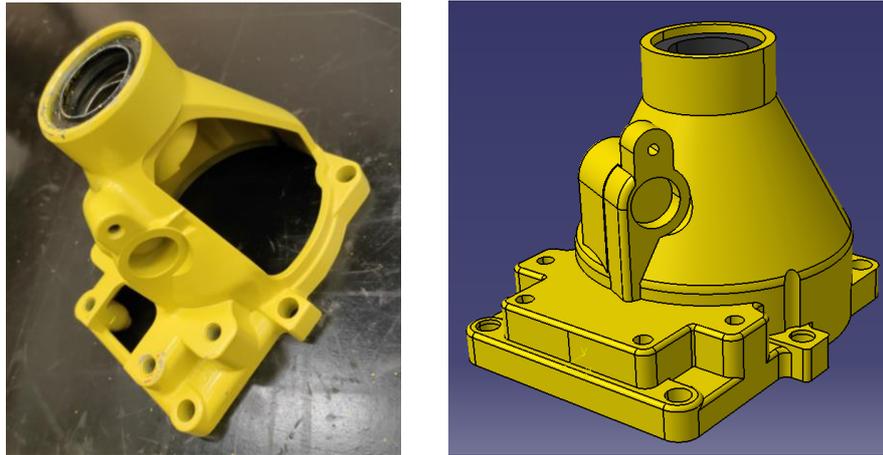


a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-6. Guía para el eje de salida, segunda perspectiva

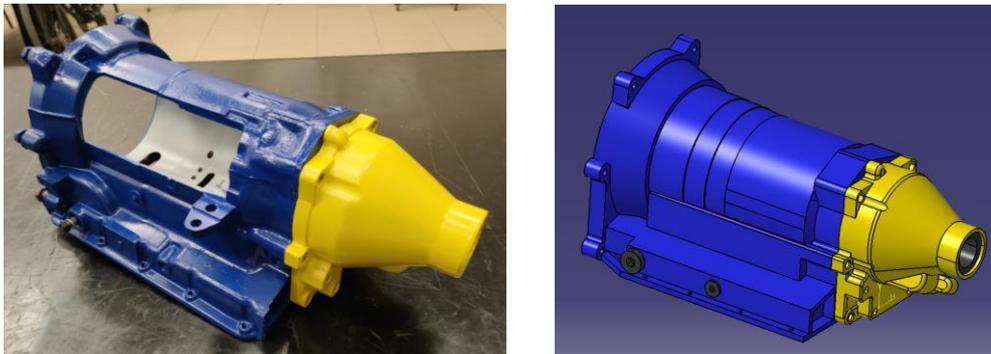


a) Fotografía real

b) Modelo

Figura 5-7. Guía para el eje de salida, tercera perspectiva

La pieza amarilla va fijada mediante tornillería a la carcasa exterior, tal y como se muestra en la Figura 5-8.



a) Fotografía real

b) Modelo

Figura 5-8. Montaje de la carcasa exterior azul y la guía para el eje de salida

5.2 Elementos internos de transmisión

Este capítulo es una lista de todos los elementos internos que participan en la transmisión del par, desde el eje de entrada hasta el de salida. Dada la cantidad de piezas existentes que componen la caja de cambios, se ha decidido hacer una separación por epígrafes, haciendo varios grupos de piezas que se encuentren físicamente cercanas entre sí. Estos grupos coinciden en su mayoría con los grupos de piezas de la caja de cambios del laboratorio que no han podido desmontarse.

Con idea de no expresar conceptos repetitivos, se introducen a continuación los embragues hidráulicos. Los embragues son grupos de discos que, al activarse de manera hidráulica, giran de manera solidaria entre ellos, como ya se explicó en el epígrafe 3.4. Al tener cada disco dientes interiores o exteriores de manera alterna, esta activación provoca que el elemento que vaya engranado en el interior y el que va engranado en el exterior giren con la misma velocidad angular, convirtiendo todo en un solo bloque. Estos discos se llaman discos de arrastre (Figura 5-9) y discos de compresión (Figura 5-10). En la caja de cambios estudiada, existen cinco grupos de embragues, como se ha visto en el capítulo 4 de este proyecto. Cumpliendo la misma función, pueden tener distinta geometría en función de los elementos a los que vayan fijados.

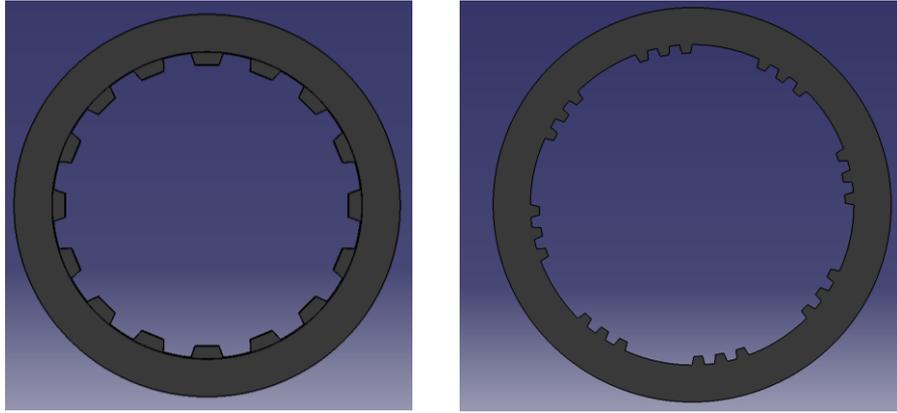


Figura 5-9. Discos de arrastre modelados

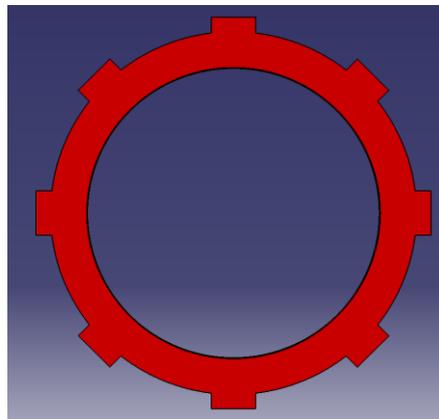
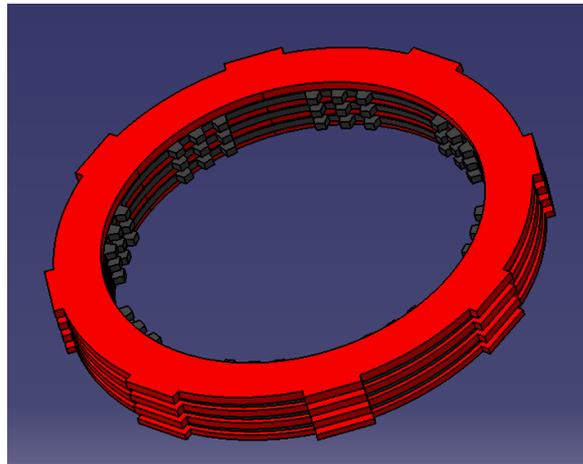


Figura 5-10. Discos de compresión



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-11. Embrague compuesto por varios discos

5.2.1 El eje de entrada y E1

El eje de entrada es el componente encargado de transmitir el par desde el motor hasta el resto de elementos internos de la transmisión. Este eje recibe la potencia directamente desde el motor, a través de un convertidor de par. El eje de entrada está diseñado para soportar fuerzas de torsión y vibraciones altas, procedentes del motor.

En la caja de cambios estudiada, el eje de entrada está acoplado a otro elemento que actúa como una carcasa exterior que alberga embragues en su interior, tal y como se ve en el modelo. Por lo tanto, el extremo de eje que hace de carcasa, rotará a las mismas revoluciones que el propio eje. Tiene el extremo del eje dentado con dientes rectos, extremo que recibe el par directamente desde el motor. Además, el escalón agujereado mediante patrones que puede verse en su interior, es una placa con muelles internos, que colaboran la distribución del fluido interior de la caja.



Figura 5-12. Fotografía real del eje de entrada

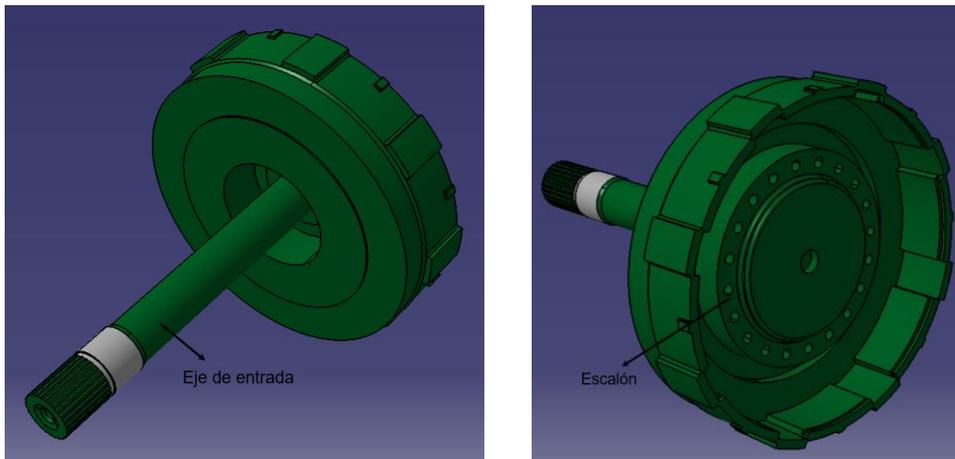


Figura 5-13. Modelo del eje de entrada

Dentro de esta carcasa, existe un grupo de embragues selectores compuesto por cuatro discos de compresión y cuatro discos de arrastre. Dicho grupo de embragues es el que anteriormente se ha denominado como *E1*, en la Figura 4-1. Al activarse de manera hidráulica, la pieza interior (amarilla) y la exterior (verde), a ellos se mueven de manera solidaria. Dicha pieza amarilla está representada en la Figura 5-17, mientras que la exterior es la que se observa en la Figura 5-13. La pieza amarilla, como se observa en la Figura 5-15, va fijada a los discos de arrastre, a la vez que transmite el par a través de sus dientes rectos al siguiente eje.

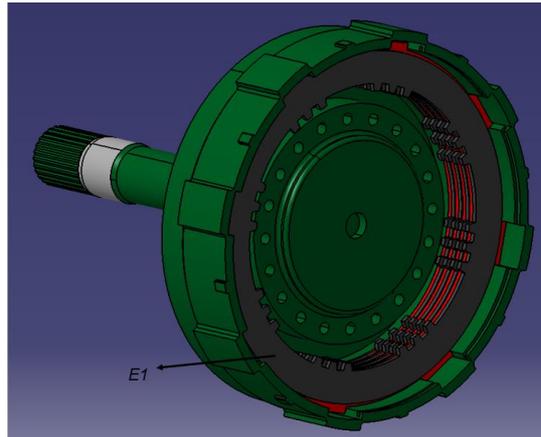


Figura 5-14. Modelo del eje de entrada con E1

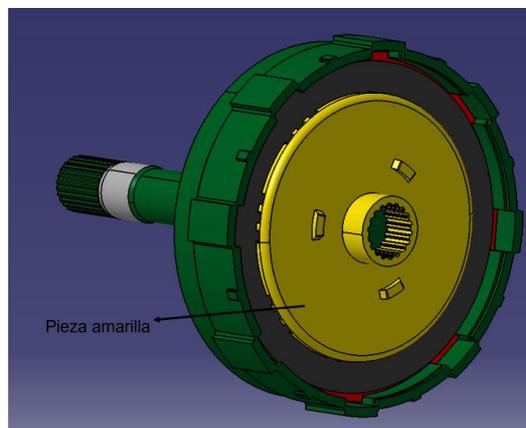
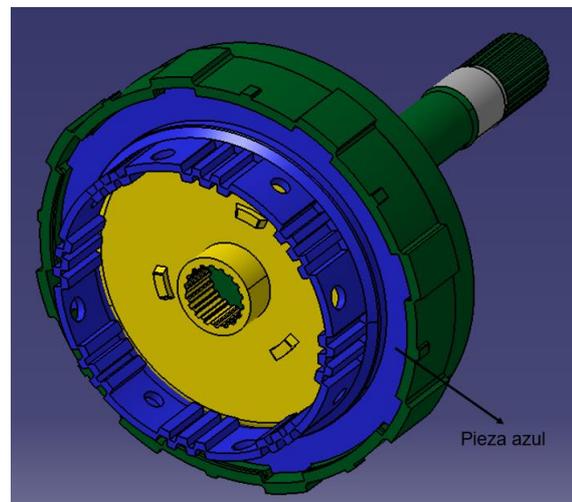


Figura 5-15. Modelo del eje de entrada con E1 y pieza amarilla

Además, a esta carcasa verde va fijada una pieza más, de color azul, a través de sus dientes, tal y como se ve en la Figura 5-16. Esta pieza encaja con los dientes interiores del siguiente grupo de embragues, denominado E2 en la Figura 4-1, que se verá en el siguiente apartado. Una vez ensamblados estos elementos, es así como queda el conjunto.



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-16. Conjunto del eje de entrada con E1, la pieza amarilla y la azul

A continuación, la Figura 5-17 y la Figura 5-18 muestran los elementos transmisores amarillo y azul, ambos ligados a discos de embragues con dientes interiores, *E1* y *E2* respectivamente. Las muescas de la pieza amarilla sirven para ajustar un rodillo de rodamientos junto con sus dos carcasas, que favorece la fricción y reduce el desgaste entre la pieza amarilla y la que se encuentra físicamente a continuación.

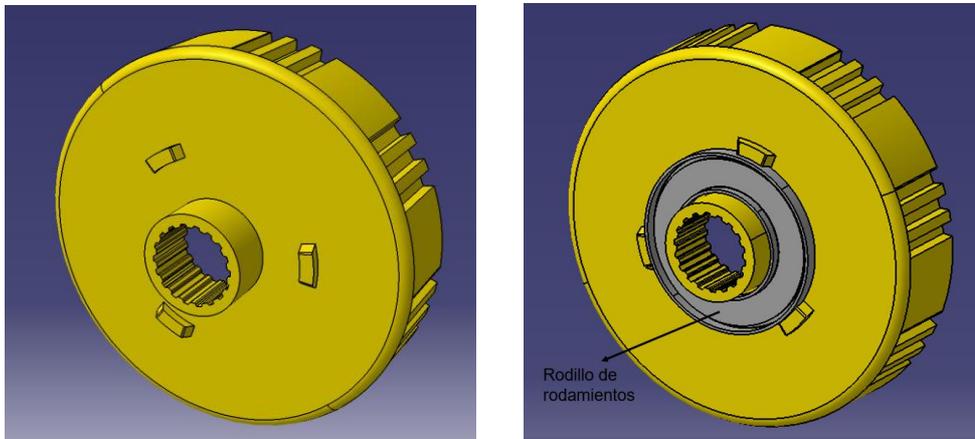


Figura 5-17. Pieza de transmisión amarilla

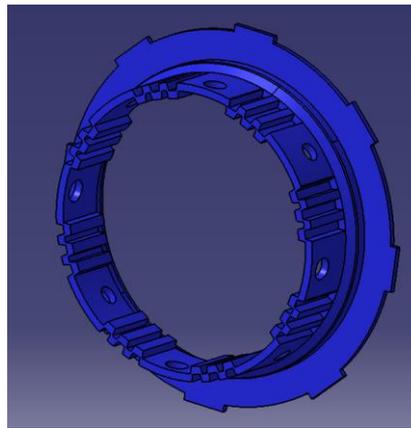
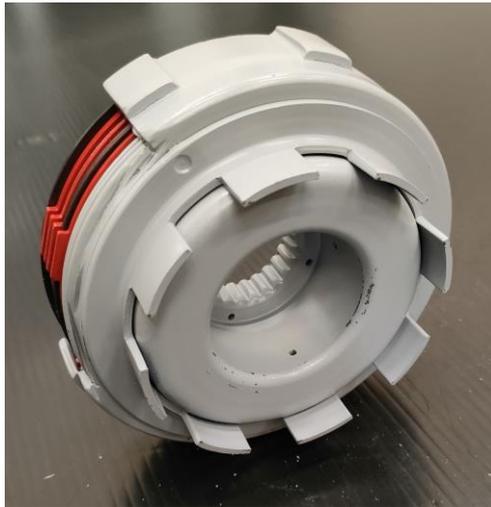


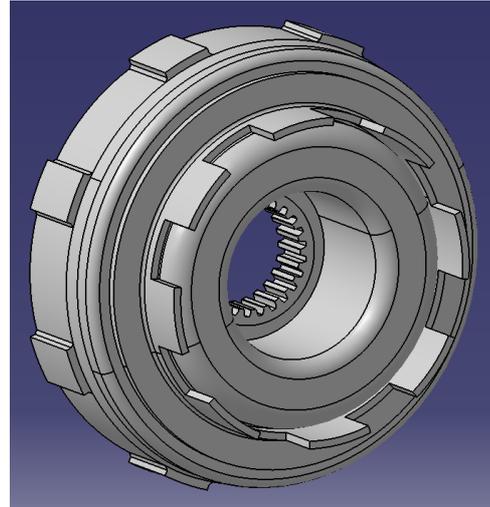
Figura 5-18. Pieza de transmisión azul

5.2.2 Carcasa gris y *E2*

El siguiente elemento en orden de montaje es una carcasa coloreada en gris, con dimensiones exteriores parecidas a la carcasa verde explicada en el epígrafe 5.2.1. Esta carcasa, al igual que la verde, contiene una placa sujeta por muelles para facilitar el movimiento y distribución del fluido por su interior. Los discos de embragues que van fijados a ella constituyen el *E2*. El elemento azul visto en el apartado anterior gira de manera solidaria con los discos de arrastre (negros), mientras que los discos de compresión (rojos) son solidarios a la carcasa gris.



a) Fotografía real

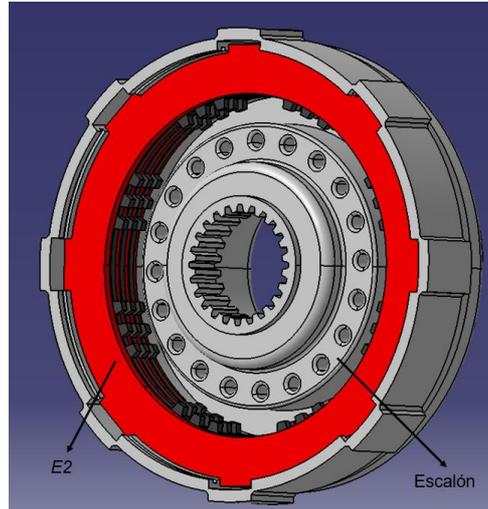


b) Modelo

Figura 5-19. Carcasa gris, primera perspectiva



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-20. Carcasa gris, segunda perspectiva

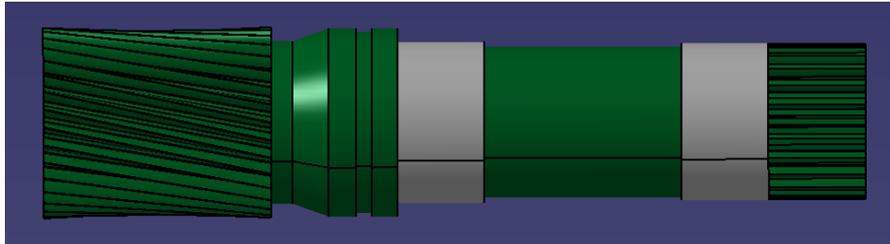
Se puede observar que la carcasa gris tiene una zona interior con dientes rectos. Estos dientes encajan con uno de los ejes interiores de la caja, explicado en el siguiente epígrafe.

5.2.3 Eje interior verde

El eje que engrana con los dientes rectos de la carcasa gris explicada en el epígrafe 5.2.2 es el representado en la Figura 5-21.



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-21. Eje verde

Se observa que en un extremo tiene dientes rectos y en el otro helicoidales. Los dientes helicoidales son el planeta de uno de los dos trenes de engranajes. Para entender este elemento, es más sencillo verlo sobre el esquema que ya se ha trabajado. En la Figura 5-22 se corresponde con el eje pintado en verde.

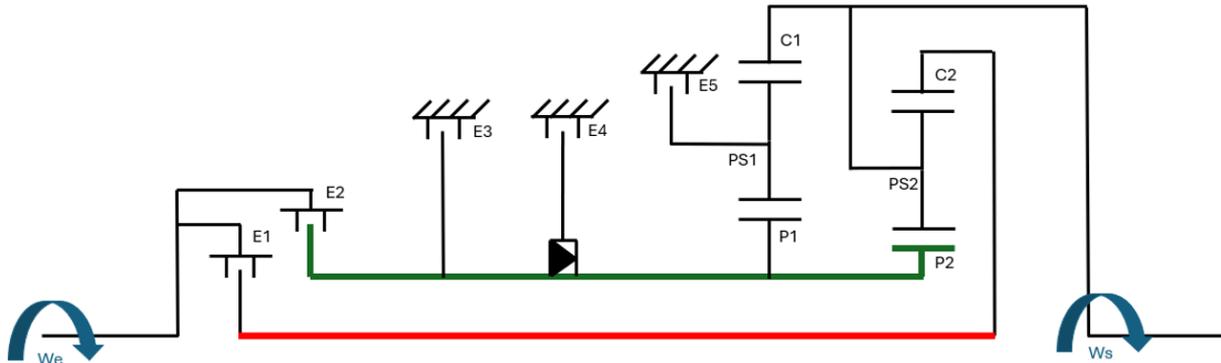


Figura 5-22. Esquema con los ejes interiores marcados

Este eje va de manera interna a todos los elementos de la caja salvo a uno, el otro eje, pintado de color rojo en el esquema de la Figura 5-22. El eje verde es hueco para que pueda ir por su interior éste otro, que se explicará más adelante.

En la Figura 5-23, se observa cómo encaja este eje con la pieza gris comentada anteriormente.

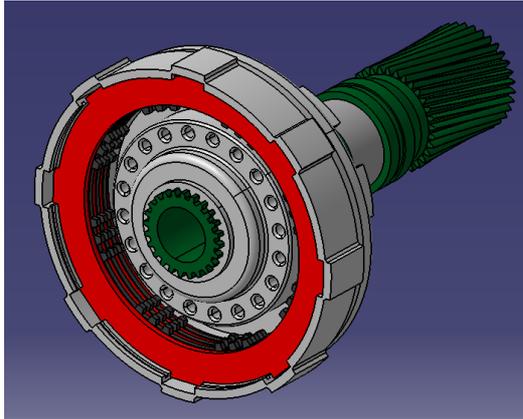


Figura 5-23. Conjunto del eje verde, la carcasa gris y el E2

5.2.4 Carcasa Negra, E3 y E4

La carcasa gris explicada en el epígrafe 5.2.2 tiene una parte de dientes rectos curvados formando arcos de circunferencia. La utilidad de estos dientes es encajar con los discos de arrastre del siguiente grupo de embragues, E3. Este grupo de embragues, a su vez, va ligado a través de los discos de compresión con una carcasa negra por uno de sus lados (ya que es la misma carcasa la que acoge E3 y E4, cada uno por un lado). En la Figura 4-1 pueden situarse E3 y E4 con claridad.

En las siguientes imágenes se puede ver la carcasa negra real y la modelada, primero sin los embragues y luego con ellos.



Figura 5-24. Carcasa negra modelada, primera perspectiva

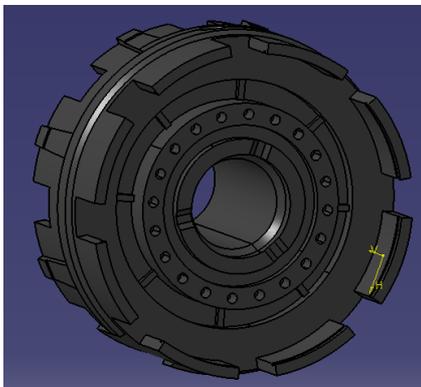


Figura 5-25. Carcasa negra modelada, segunda perspectiva

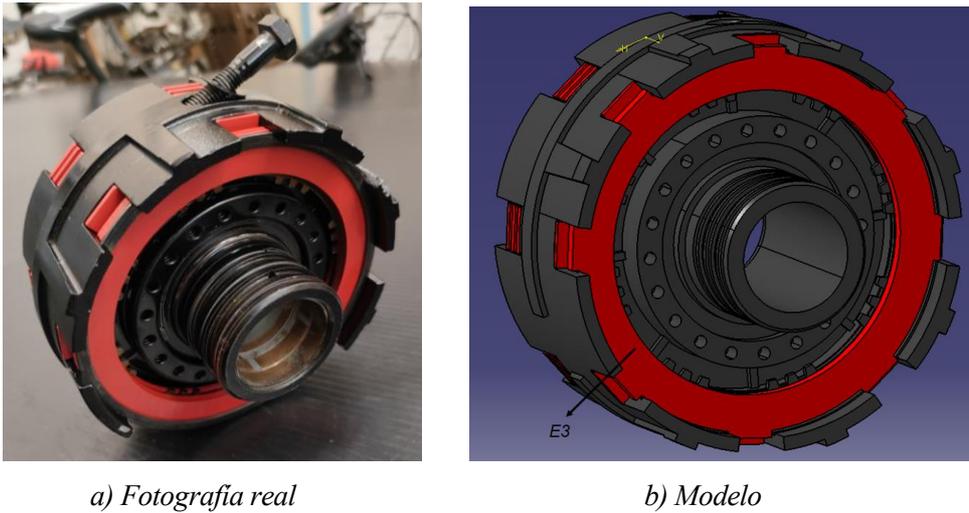


Figura 5-26. Carcasa negra y E3, primera perspectiva

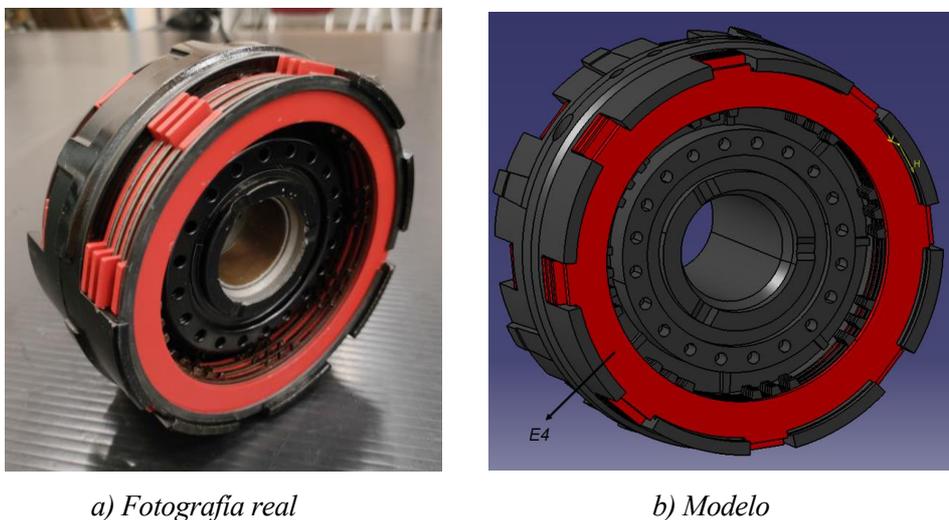


Figura 5-27. Carcasa negra y E3, segunda perspectiva

Se puede observar en la pieza negra que, al igual que las otras dos carcasas explicadas en los epígrafes 5.2.1 y 5.2.2, tiene dos cilindros huecos con agujeros en forma de patrón circular, en cuyo interior se encuentran los muelles ya mencionados.

Además, llaman la atención los agujeros de este mismo elemento. Los cuatro agujeros interiores sirven para introducir en el sistema el fluido, que entra a través de la carcasa exterior por otros cuatro agujeros que coinciden exactamente con éstos. Los dos agujeros de los extremos son huecos para tornillos de métrica M8, como elemento de fijación de esta carcasa con la carcasa exterior azul explicada en el epígrafe 5.1. En la Figura 5-28, se ven mejor estos agujeros, además de su correspondencia con la carcasa exterior azul en la Figura 5-29.

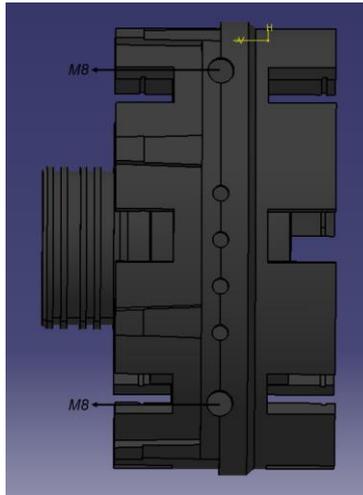
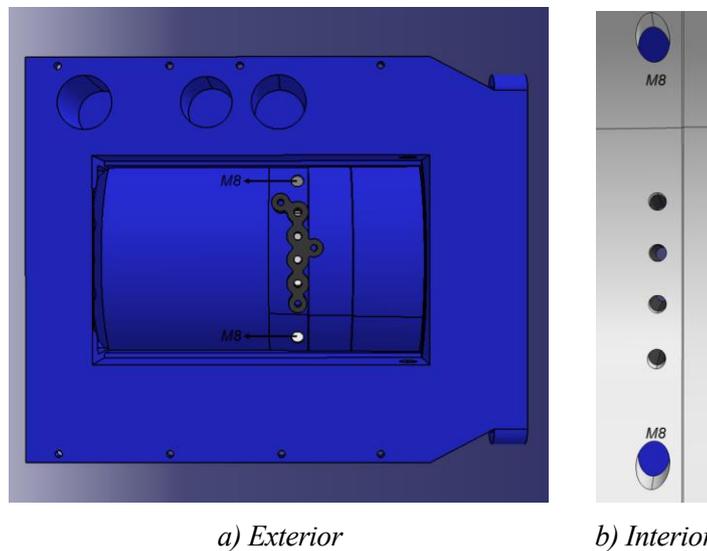


Figura 5-28. Agujeros de la carcasa negra



a) Exterior

b) Interior

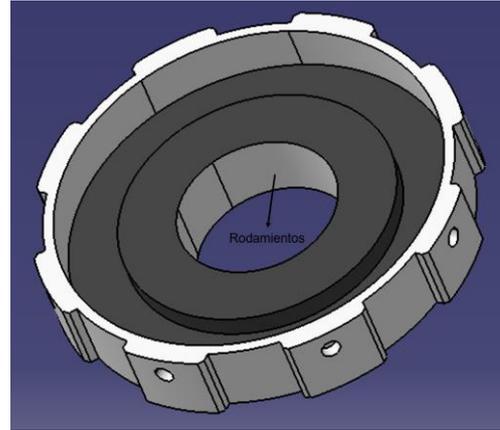
Figura 5-29. Agujeros de la carcasa exterior azul

5.2.5 Rueda libre, tope de ajuste de discos de embrague y E5

Es una rueda libre lo que encaja en los discos de embrague *E4*. Una rueda libre es un componente mecánico, con rodamientos en su interior, cuya función principal es permitir que el eje de salida gire libremente en una dirección mientras impide el movimiento en la dirección opuesta. Esto permite que los cambios de marchas se realicen de manera más suave y eficiente, evitando a su vez fricción innecesaria con otros componentes del sistema.



a) Fotografía real



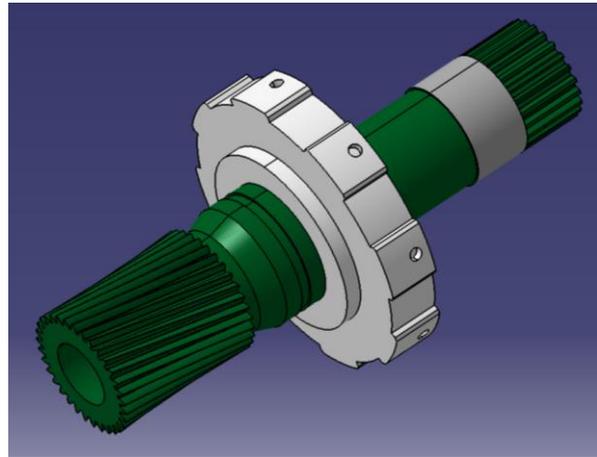
b) Modelo

Figura 5-30. Rueda libre

La rueda libre, además de moverse solidaria con los discos de arrastre de *E4*, va situada en el eje verde, tal y como se ve en las siguientes imágenes.



a) Fotografía real



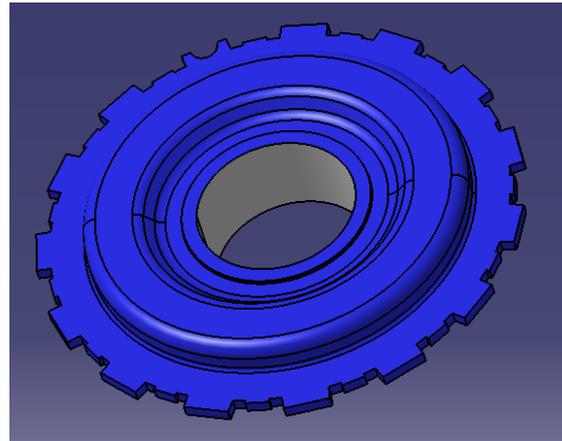
b) Modelo

Figura 5-31. Conjunto del eje verde y la rueda libre

A continuación de la rueda libre en cuanto al montaje, hay un tope que sirve de sujeción para los discos de embrague que hay después de éste, el *E5*. Este tope tiene la misma forma exterior que los discos de compresión, ya que estará ligado a ellos cuando el embrague se active de manera hidráulica. Al mismo tiempo, impide el contacto entre el *E5* y la rueda libre, ya que trabajan de manera independiente. El grupo de discos de embrague que forman *E5* son los que van inmediatamente después al tope azul.



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-32. Tope azul

La Figura 5-33 y la Figura 5-34 muestran la situación del tope azul y los discos que forman *E5* con respecto al eje verde, ya que el tope va fijado a éste.

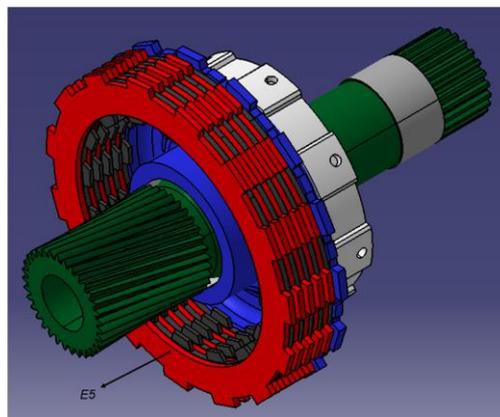


Figura 5-33. Conjunto del eje verde, la rueda libre, el tope azul y *E5*, primera perspectiva

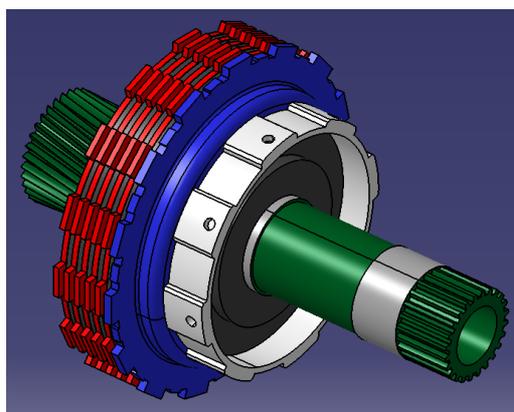


Figura 5-34. Conjunto del eje verde, la rueda libre, el tope azul y *E5*, segunda perspectiva

Los discos de arrastre de *E5* van solidarios al portasatélites de los engranajes helicoidales del primer tren de engranajes, como se verá en el siguiente apartado. Los discos de compresión están ajustados en la carcasa exterior azul del apartado 5.1.

5.2.6 Tren planetario de tipo Ravigneaux

Un tren de engranajes tipo Ravigneaux, es una configuración avanzada de engranajes planetarios utilizada para proporcionar las relaciones de transmisión de manera más compacta. Este tipo de tren de engranajes combina dos conjuntos planetarios en un solo sistema, por lo que se consiguen más relaciones de transmisión con menos componentes. En la caja de cambios estudiada, ambos conjuntos comparten el planeta, y cada uno tiene, además, una corona y un portasatélites con cuatro satélites. Para facilitar la comprensión, se han dibujado en el esquema de la transmisión ambos conjuntos planetarios, el primero de color morado y el segundo de color naranja.

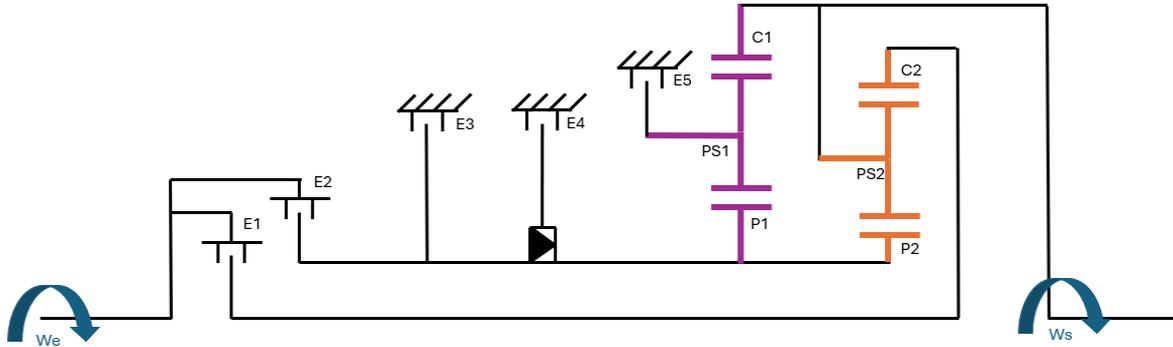


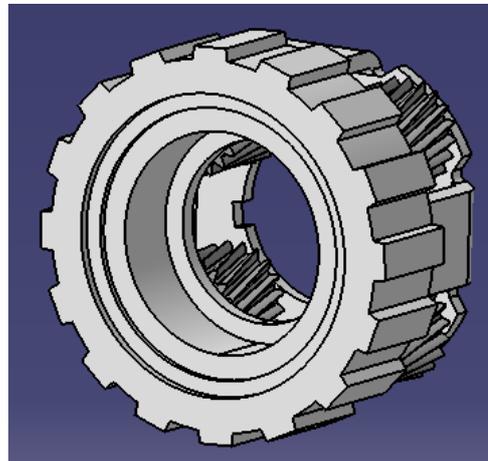
Figura 5-35. Esquema con el tren Ravigneaux señalado

5.2.6.1 Primer conjunto planetario

El portasatélites del primer tren de engranajes (PS1) encaja con los discos de arrastre de $E5$, de manera que, al activarse $E5$, el portasatélites se mueve de manera solidaria con la carcasa exterior azul del apartado 5.1, que es el elemento que encaja con los discos de compresión. Por tanto, dicho portasatélites tendría velocidad de giro nula, ya que la carcasa está fijada al chasis del vehículo. El portasatélites de este tren de engranajes, representado en la Figura 5-36 y en la Figura 5-37, soporta cuatro engranajes helicoidales que actúan como satélites, que se ven en la Figura 5-38.



a) Fotografía real

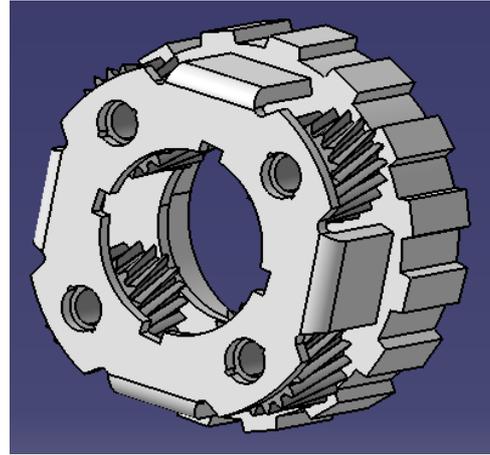


b) Modelo

Figura 5-36. Portasatélites del primer conjunto planetario, PS1, primera perspectiva



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-37. Portasatélites del primer conjunto planetario, PSI, segunda perspectiva

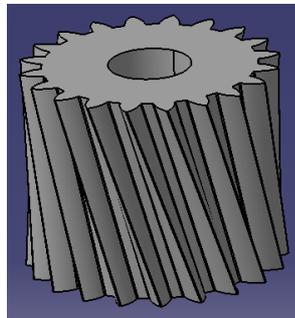


Figura 5-38. Engranaje helicoidal que actúa como satélite

El planeta de este tren de engranajes (P1) es el extremo helicoidal del eje verde explicado en el epígrafe 5.2.3. Su corona (C1) está dentada de manera helicoidal para que encaje con los satélites en su interior, y en su exterior está dentada de manera recta, para poder encajar con la carcasa que va soldada al eje de salida, como se verá en el epígrafe 5.2.7.

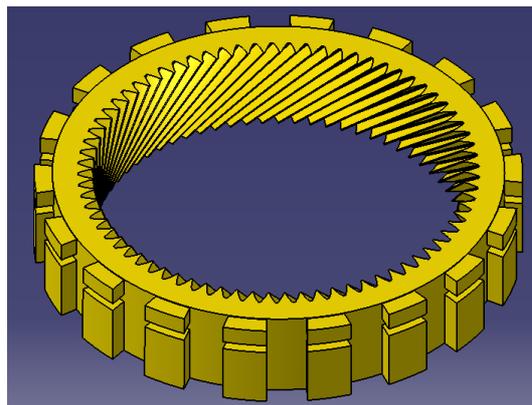


Figura 5-39. Corona del primer conjunto planetario, C1

En la Figura 5-40 y en la Figura 5-41 se observa el ensamblaje de los elementos pertenecientes a este primer conjunto planetario.

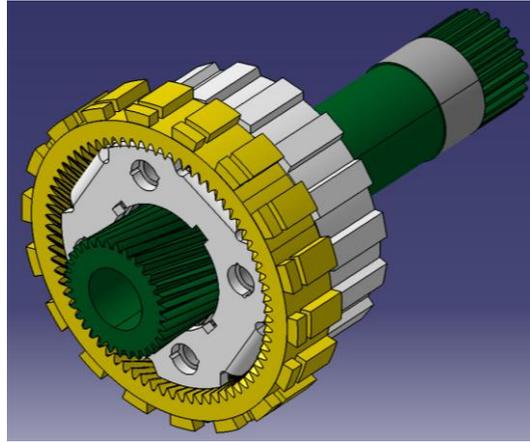


Figura 5-40. Primer conjunto planetario, primera perspectiva

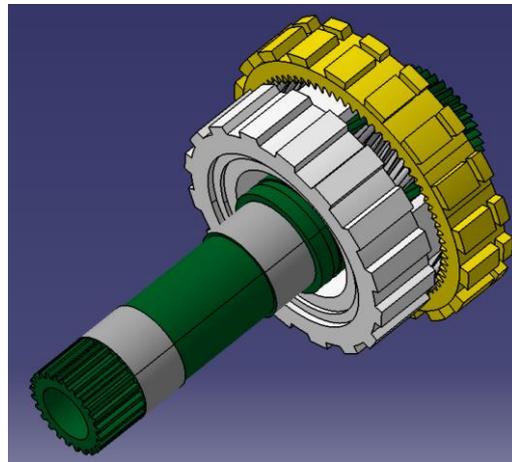


Figura 5-41. Primer conjunto planetario, segunda perspectiva

5.2.6.2 Segundo conjunto planetario

El portasatélites del segundo conjunto planetario (PS2) se mueve de manera solidaria con respecto al eje de salida, puesto que va fijado a la carcasa que pertenece a éste, al igual que pasaba con la corona del primer conjunto planetario. El portasatélites de este tren de engranajes soporta cuatro engranajes helicoidales que actúan como satélites, exactamente iguales a los del primer tren.

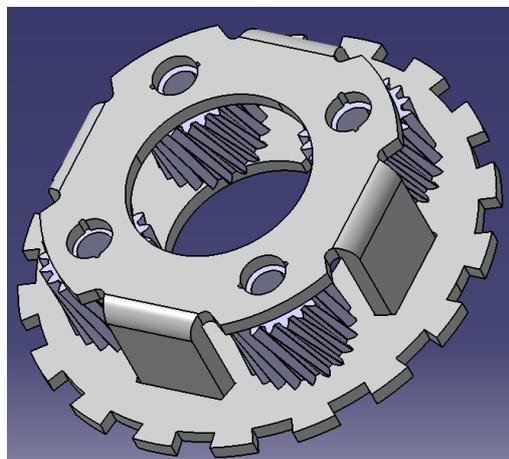


Figura 5-42. Portasatélites del segundo conjunto planetario, PS2, primera perspectiva

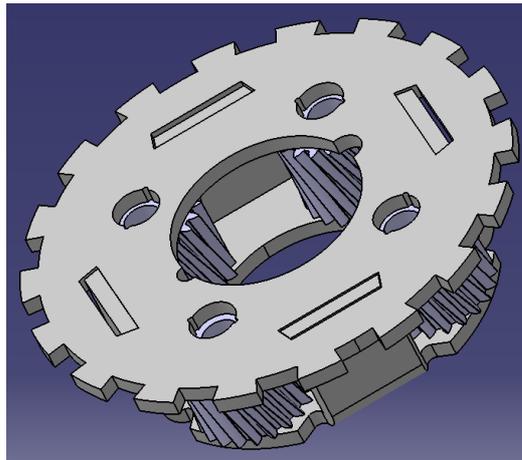


Figura 5-43. Portasatélites del segundo conjunto planetario, PS2, segunda perspectiva

El planeta de este tren de engranajes (P2) es el extremo helicoidal del eje verde explicado en el epígrafe 5.2.3. Con respecto a su corona (C2), está dentada de manera helicoidal para que encaje con los satélites en su interior, a la vez que ejerce del eje que recorre de manera interior todo el sistema. El extremo del eje con engrane recto va anclado a la pieza amarilla descrita en el epígrafe 5.2.1.

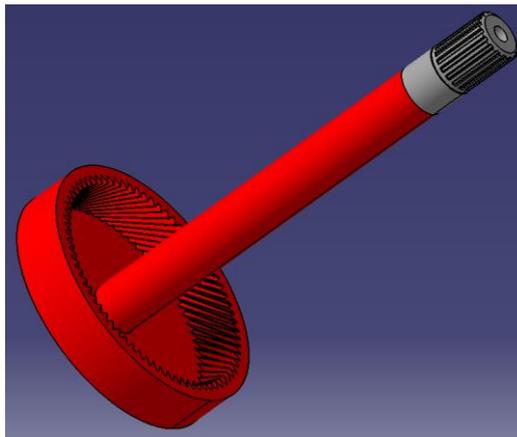


Figura 5-44. Eje y corona del segundo conjunto planetario, C2, primera perspectiva

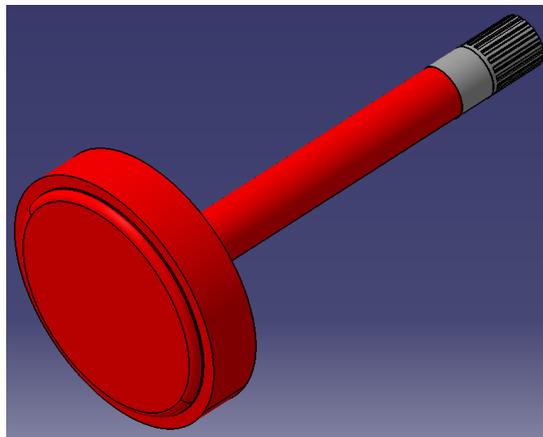


Figura 5-45. Eje y corona del segundo conjunto planetario, C2, segunda perspectiva

Para facilitar la comprensión de este eje, se ha dibujado esta pieza de color rojo en el esquema de la Figura 5-46:

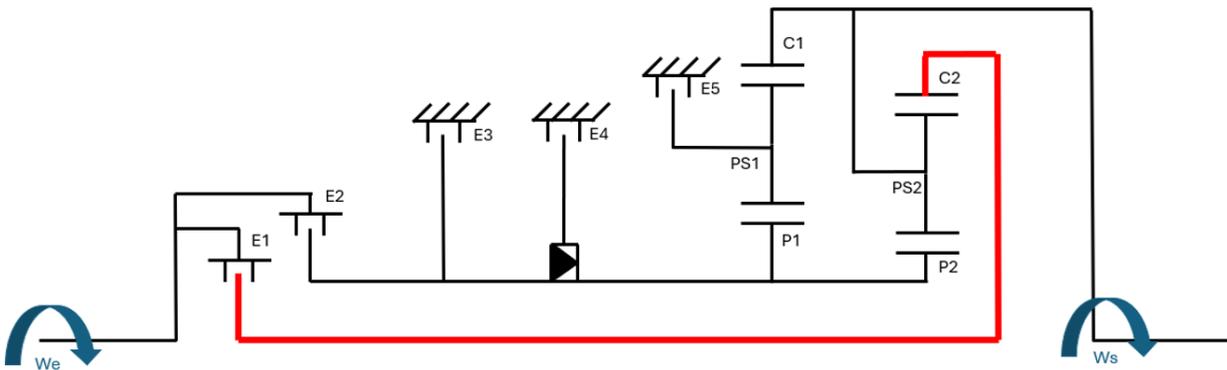


Figura 5-46. Esquema de las relaciones de transmisión con el eje interior y la corona

Por tanto, ensamblando los elementos que participan en el segundo conjunto planetario, se obtiene lo observado en la Figura 5-47 y la Figura 5-48:

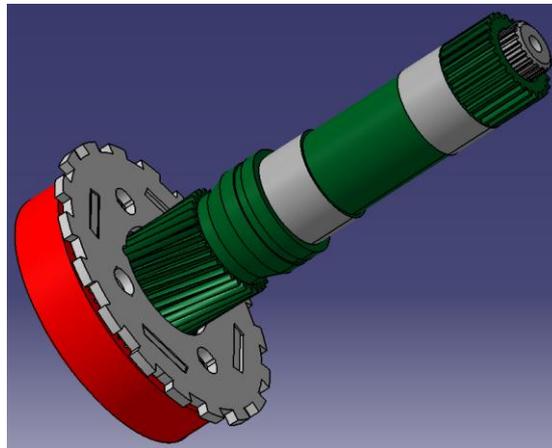


Figura 5-47. Segundo conjunto planetario, primera perspectiva

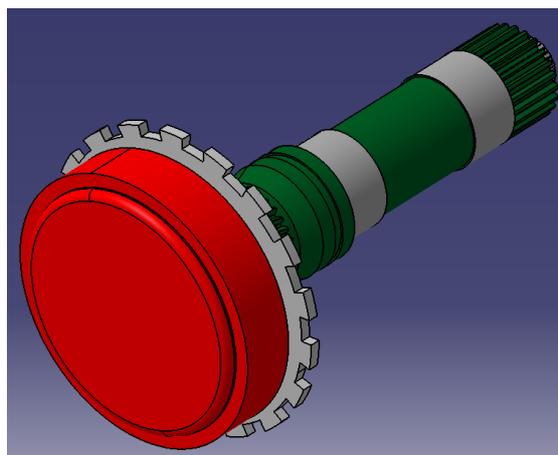


Figura 5-48. Segundo conjunto planetario, segunda perspectiva

5.2.6.3 Tren de tipo Ravigneaux completo

Cabe destacar el hecho de que entre ambos conjuntos existen dos topes, uno metálico que va fijado al

portasatélites del primer conjunto, representado en la Figura 5-49 y uno plástico que va fijado al portasatélites del segundo conjunto, representado en la Figura 5-50. Estos topes sirven para mejorar la fricción entre estos dos elementos, que no tienen por qué girar a la misma velocidad, a la vez que impide que el rozamiento entre ellos ocasione ningún daño físico en los elementos.

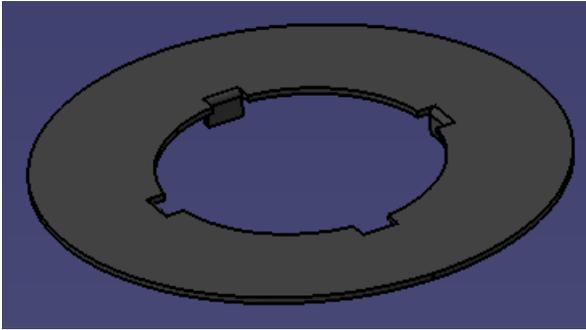


Figura 5-49. Tope metálico

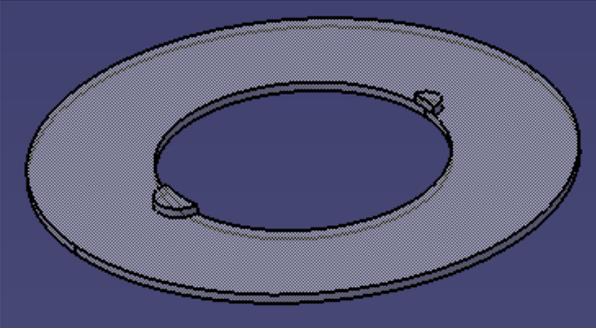


Figura 5-50. Tope plástico

El conjunto final del tren de engranajes tipo Ravigneaux quedaría tal y como aparece en la Figura 5-51. Se ha realizado también un corte de estas piezas, para que pueda verse mejor la relación entre ellas. La Figura 5-52 y la Figura 5-53 muestran este corte, desde dos perspectivas distintas.

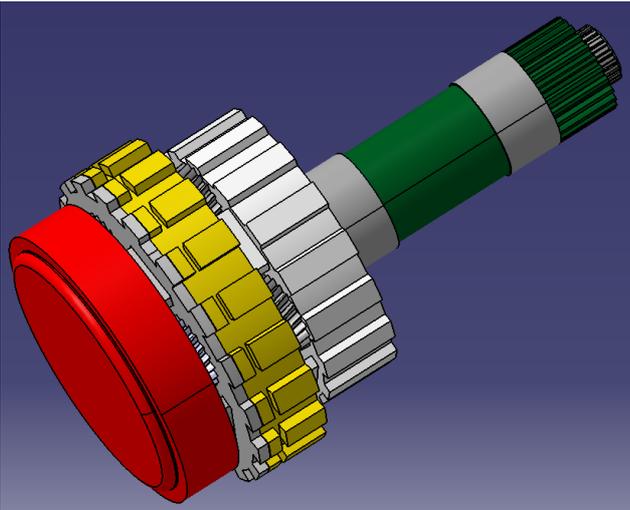


Figura 5-51. Tren de engranajes Ravigneaux completo

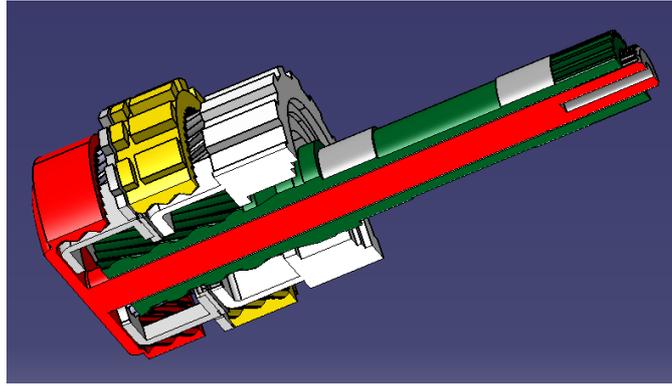


Figura 5-52. Corte del tren de engranajes completo, primera perspectiva

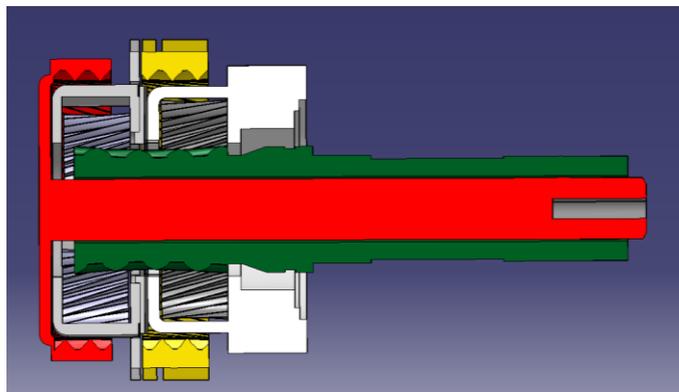


Figura 5-53. Corte del tren de engranajes completo, segunda perspectiva

5.2.7 Eje de salida y carcasa exterior al eje

El eje de salida es el último componente de transmisión de la caja de cambios, que transmite el par hacia el sistema de tracción del vehículo, el árbol de transmisión. Este eje puede rotar en ambas direcciones, lo que desencadenará que el vehículo se mueva hacia atrás o hacia delante. Tiene el extremo más exterior dentado con dientes rectos, que son los que seguirán transmitiendo el par al árbol de transmisión de las ruedas. Los dientes rectos en su propia carcasa sirven para fijar, como se ha dicho en el epígrafe anterior, la corona del primer conjunto planetario y el portasatélites del segundo.

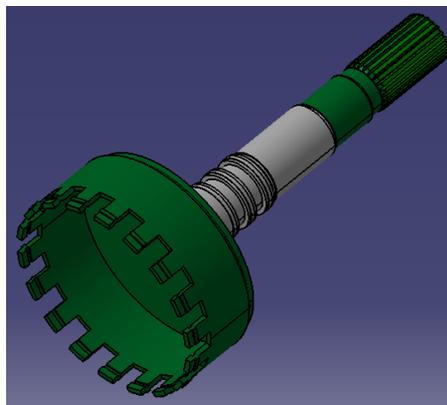


Figura 5-54. Eje de salida, primera perspectiva

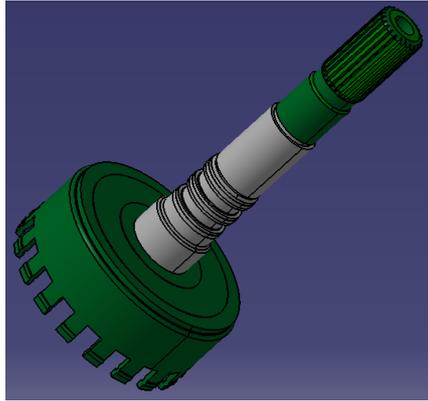
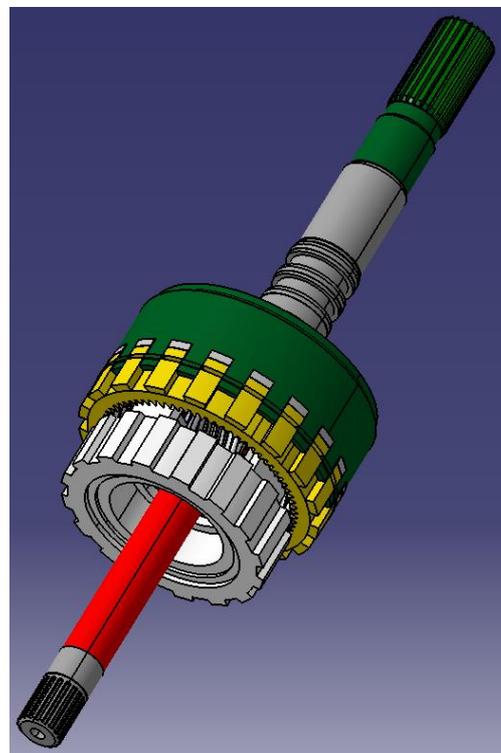


Figura 5-55. Eje de salida, segunda perspectiva

Ensamblando el eje de salida con el conjunto planetario completo, queda tal y como se ve en la Figura 5-56.



a) Fotografía real



b) Modelo

Figura 5-56. Eje de salida y conjunto planetario Ravigneaux

El último elemento que queda por describir es una carcasa exterior al eje de salida, representada en la Figura 5-57, que va fijada a la carcasa exterior azul de manera interna gracias a sus dientes. Estos dientes tienen la misma forma que los discos de compresión que pertenecen a E5, de manera que, al activarse este embrague, la carcasa amarilla se fijará a él.

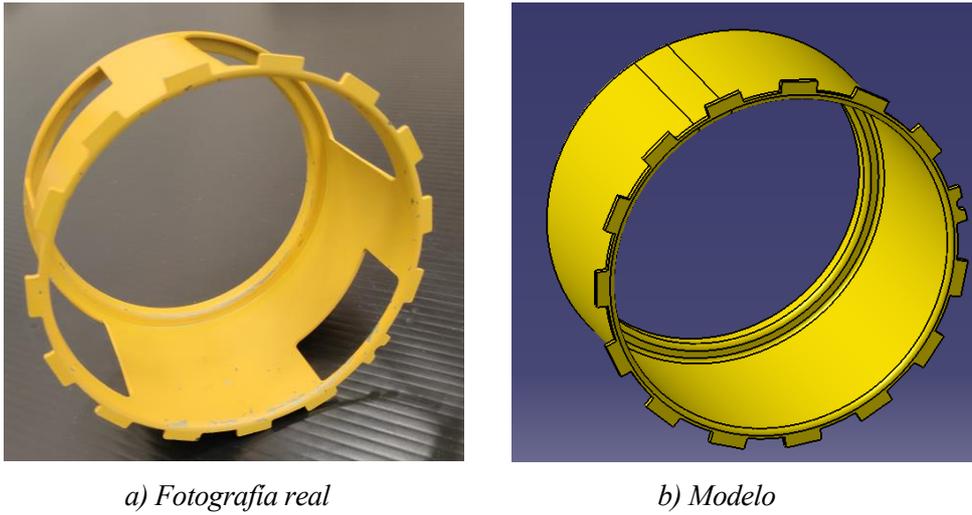


Figura 5-57. Carcasa amarilla

Por tanto, el conjunto de dicha carcasa con el eje de salida y el tren Ravigneaux completo, queda como se ve en la Figura 5-58.

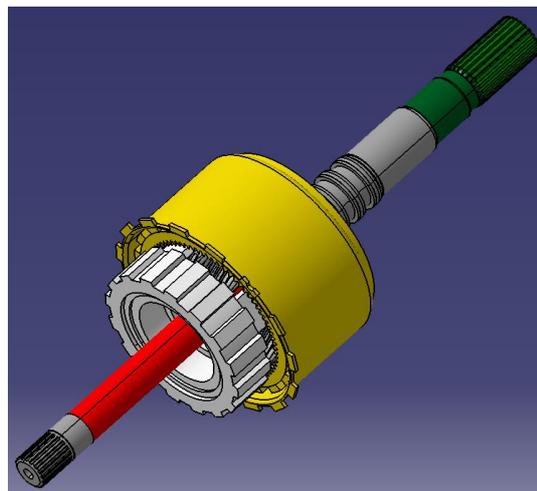


Figura 5-58. Conjunto del eje de salida, tren Ravigneaux y carcasa amarilla

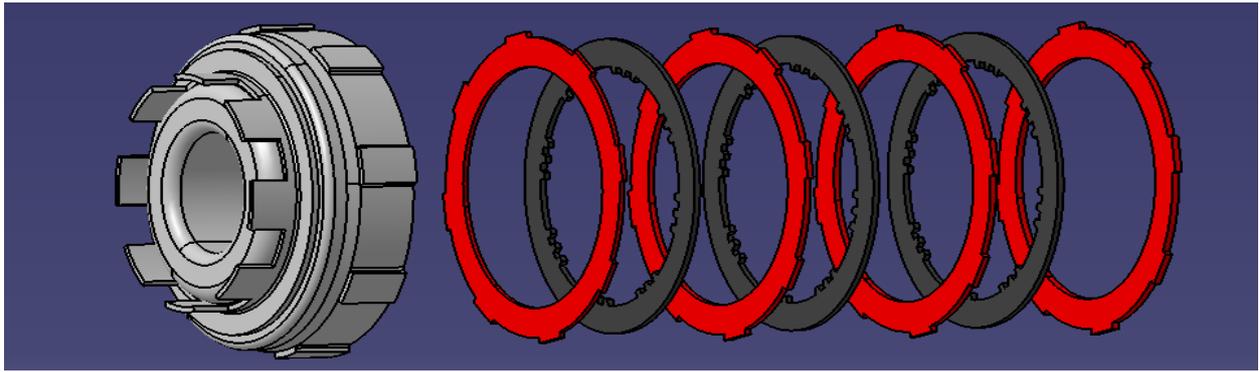


Figura 6-2. Subconjunto desmontado de la carcasa gris y E2

- La Figura 6-3 representa el subconjunto de la carcasa negra, E3 y E4 (epígrafe 5.2.4):

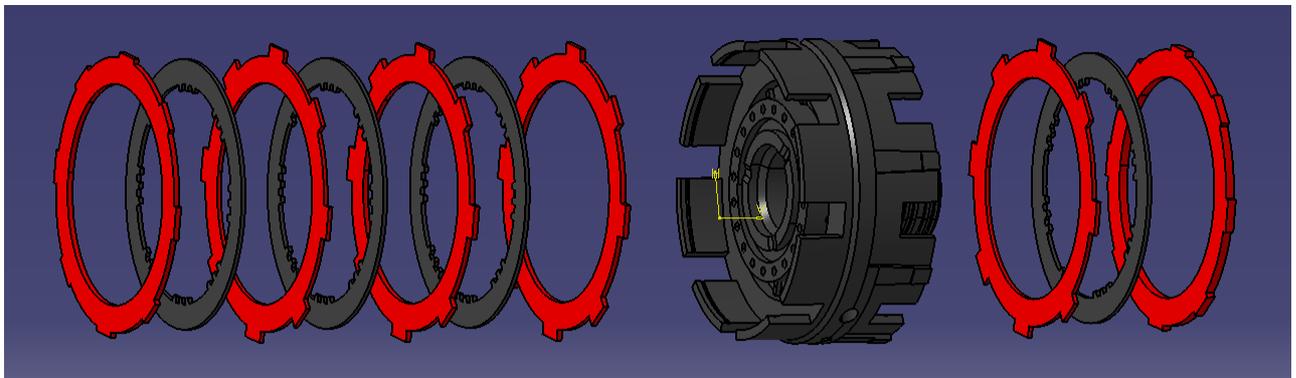


Figura 6-3. Subconjunto desmontado de la carcasa negra, E3 y E4

- La Figura 6-4 representa el subconjunto de la rueda libre, el tope de ajuste de los discos de embrague, E5 y el eje verde (epígrafe 5.2.5):

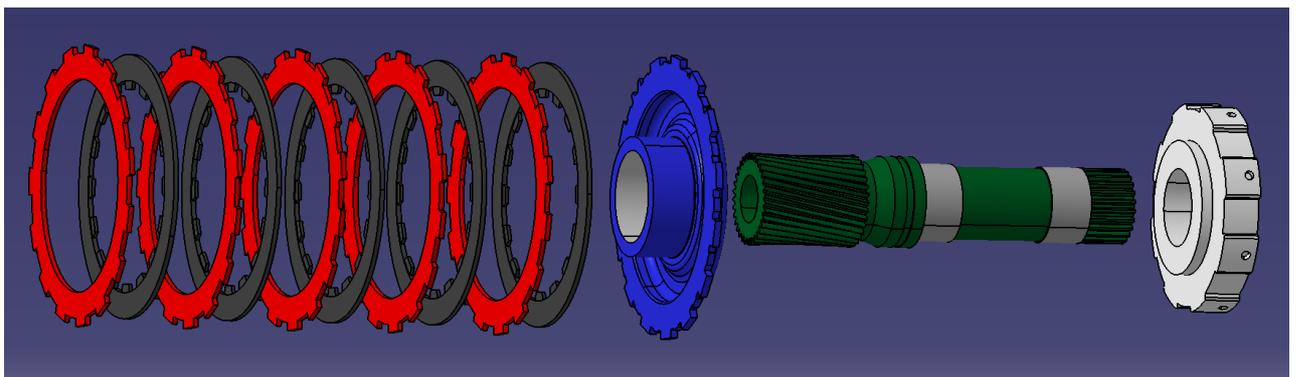


Figura 6-4. Subconjunto desmontado de la rueda libre, el tope del embrague, E5 y el eje verde

- La Figura 6-5 representa el subconjunto del tren planetario de tipo Ravigneaux (epígrafe 5.2.6):

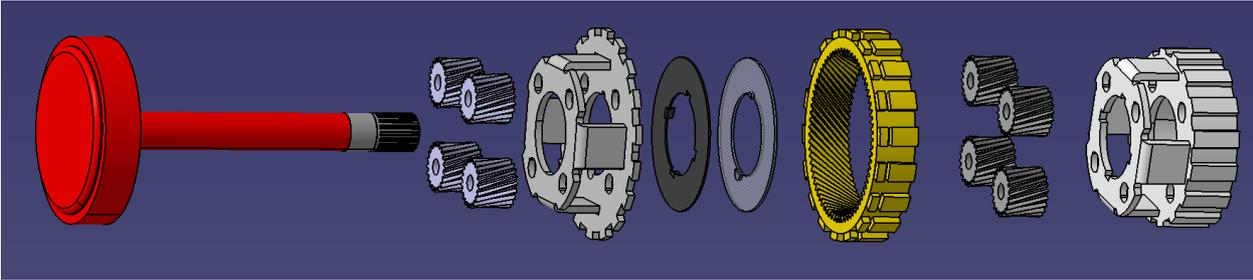


Figura 6-5. Subconjunto desmontado del tren planetario de tipo Ravigneaux

- La Figura 6-6 representa el subconjunto del tren planetario de tipo Ravigneaux, con el eje de salida y la carcasa amarilla (epígrafe 5.2.7):

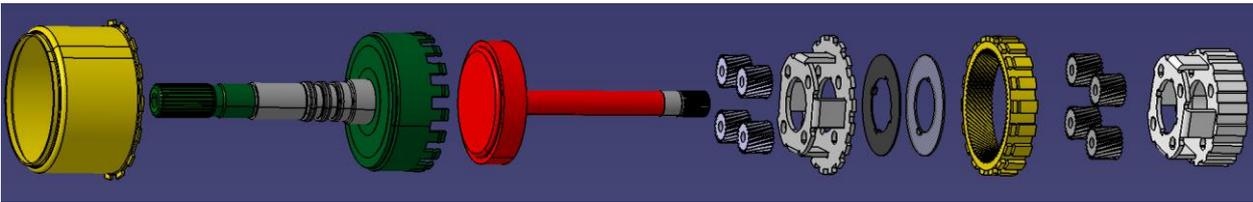


Figura 6-6. Subconjunto desmontado del tren Ravigneaux, con el eje de salida y la carcasa amarilla

Ensamblando estos subconjuntos, en el mismo orden en que se muestran los elementos, estaría lista la transmisión al completo, tal y como se desglosa en las imágenes de la Figura 6-7 y la Figura 6-8.



Figura 6-7. Elementos de la caja de cambios ordenados

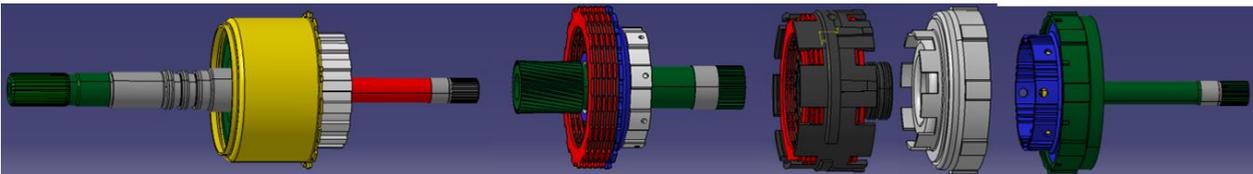


Figura 6-8. Subconjuntos de la caja de cambios ordenados

La Figura 6-9 representa una fotografía real de la caja de cambios estudiada, la Figura 6-10 representa el modelo al completo de dicha caja de cambios, y la Figura 6-11 representa un corte longitudinal de este modelo, para que puedan verse mejor sus componentes internos.



Figura 6-9. Fotografía real de la caja de cambios completa

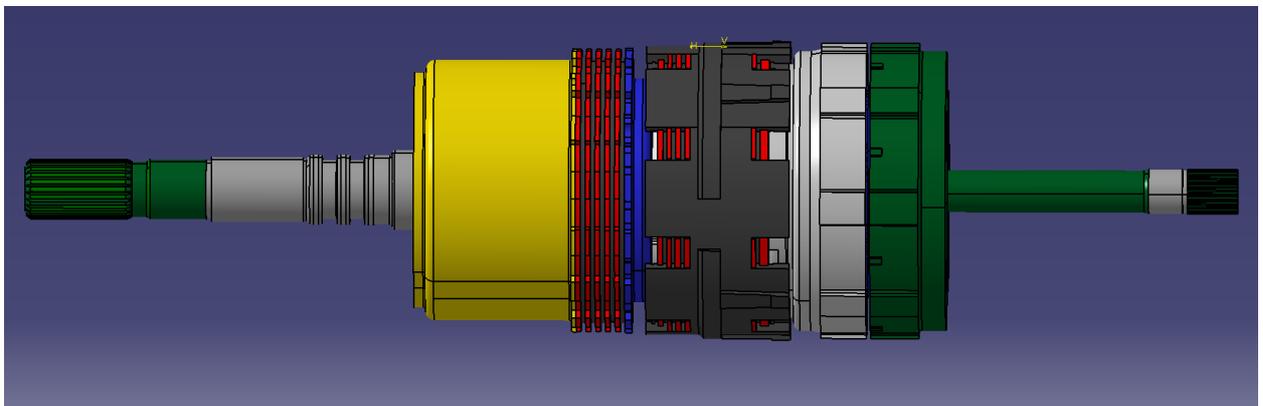


Figura 6-10. Modelo de la caja de cambios completa

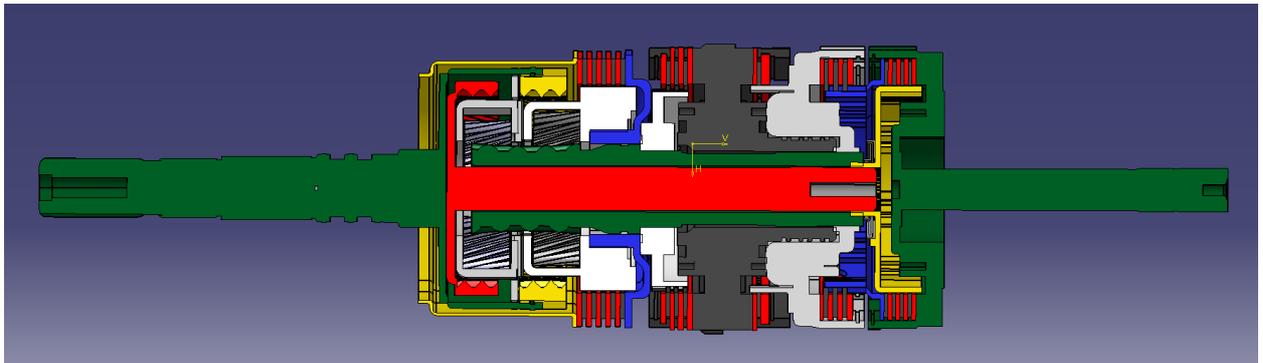


Figura 6-11. Modelo con corte de la caja de cambios completa

6.2 Comparación con el esquema de la transmisión

La Figura 6-12 muestra el esquema utilizado durante todo el proyecto, nombrando cada uno de los elementos que intervienen en la transmisión, dibujado con los mismos colores que las piezas. La Figura 6-13 muestra el modelo de la caja de cambios completa en el mismo orden que el esquema, para facilitar su comprensión.

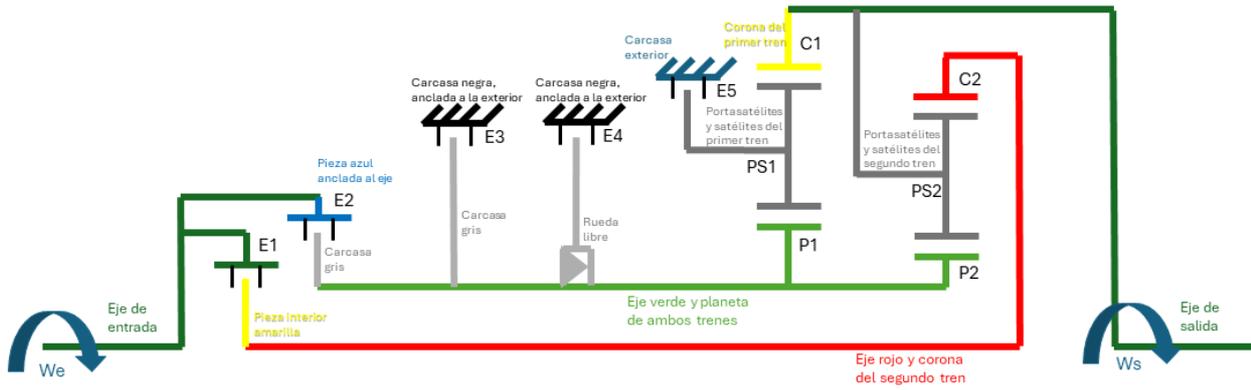


Figura 6-12. Esquema de los elementos de la caja de cambios

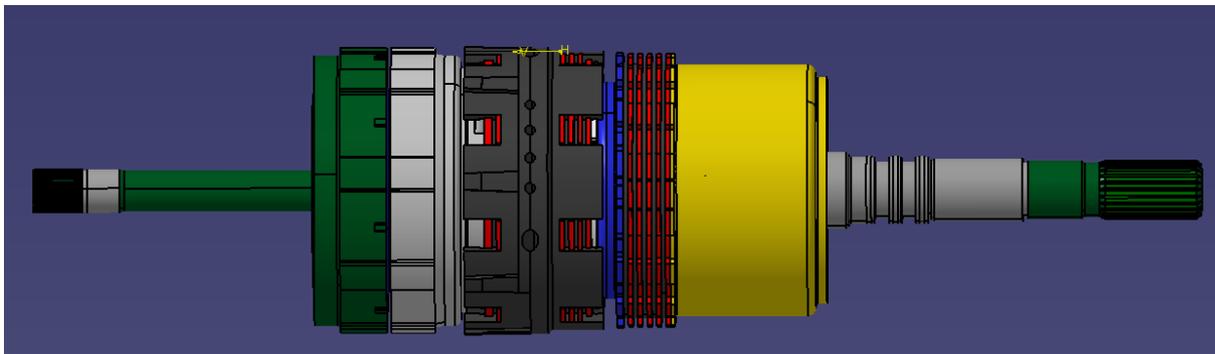


Figura 6-13. Modelo de la caja de cambios completa, segunda perspectiva

7 CONCLUSIONES

“Hay alegría en el trabajo. No hay felicidad excepto en la comprensión de que hemos logrado algo.”

- Henry Ford -

Este proyecto, como ya se adelantó en el primer capítulo, ha sido realizado principalmente con fines didácticos. Se pretende que la caja de cambios estudiada sea más accesible para toda persona interesada, ya sean los alumnos a los que se le presente, o incluso los profesores que quieran consultar algún dato del modelo, entender mejor el funcionamiento de la caja, o descubrir cómo debería ésta montarse. Después de haber leído este documento, por tanto, se entiende la función de cada uno de los elementos que componen la caja y su conexión con los demás, además del cálculo de las relaciones de transmisión y el accionamiento de cada uno de los componentes implicados en ellas.

Según la Real Academia Española, la ingeniería es un “conjunto de conocimientos orientados a la invención y utilización de técnicas para el aprovechamiento de los recursos naturales o para la actividad industrial” [28]. Se puede entender que la ingeniería consiste en aplicar el conocimiento teórico en soluciones prácticas, optimizando los recursos de los que se dispone, en cualquier ámbito. Las cajas de cambio son solo una prueba más de los avances de la ingeniería en el mundo, concretamente en el ámbito de la automoción. Para un problema dado, el hecho de que los motores de combustión sólo puedan trabajar de manera óptima dentro de un rango de revoluciones, y la incompatibilidad de este hecho con las necesidades de conducción de los vehículos, se buscó una solución: un mecanismo capaz de adaptar las revoluciones del motor, dentro de su rango estable, a las necesidades de las ruedas para poder circular a la velocidad que se requiera, aportando el par suficiente como para vencer las resistencias en contra del movimiento.

La ingeniería ha seguido avanzando en este ámbito a lo largo de la historia, avanzando en cuanto a las cajas de cambio manuales y creando cajas de cambio automáticas de distintos tipos, siempre con un objetivo claro: facilitar al hombre la conducción y proporcionar comodidad. En estos últimos años, se está desarrollando una transmisión inteligente a modo de colaboración entre las marcas KIA y HYUNDAI, capaz de anticiparse a las condiciones de conducción y preseleccionar la marcha adecuada, gracias a un sistema conocido como ICT, *Information and Communication Technology*, que combina información de las distintas partes del vehículo [20, 21]. Las principales ventajas de esta tecnología, aparentemente, serían el aumento de la comodidad, pues se evitarían cambios de marcha innecesarios, además de un ahorro del combustible.

Por último, la utilización del programa Catia V5 para el modelado de la caja de cambios ha sido una excelente elección, debido a las habilidades obtenidas con este programa en su módulo de *Mechanical Design*. Este programa, tal y como se comentó al principio de este documento, es muy utilizado la industria, especialmente en los sectores aeroespacial o automovilístico. Por tanto, no solo ha sido adecuado para el modelaje, sino que encaja con una utilidad real en el mundo industrial del diseño en la ingeniería.

8 TRABAJOS FUTUROS

“La ingeniería es bastante diferente a la ciencia. Los científicos intentan comprender la naturaleza, los ingenieros intentan hacer cosas que no existen en la naturaleza.”

- Aristóteles -

Se han querido presentar varias opciones de continuación de este proyecto, que ayudarían al mejor entendimiento y análisis de la caja de cambios y sus elementos.

En primer lugar, siguiendo el camino que aparentemente podría resultar más lógico para continuar este trabajo, se podría realizar un modelo cinemático a raíz del realizado, utilizando el programa Catia V5, para que pudieran verse los elementos de la caja de cambios en movimiento para cada una de las marchas.

Como segunda opción, podría realizarse un análisis de tensiones de cada uno de los elementos de la caja de cambios, calculando los esfuerzos a los que están sometidos cada uno de ellos. Analizando las tensiones y deformaciones que sufre cada elemento por individual podría entenderse mejor la selección de materiales utilizada para cada uno de ellos, además de características de su geometría que solo mirando su función no se entienden, como algunos nervios.

Siguiendo con la idea anterior, se podrían simular estos esfuerzos en cada uno de los elementos de la caja por individual, y en el conjunto completo del sistema. Quizás para este trabajo utilizaría el programa *Ansys Workbench*, puesto que admite el modelo realizado y las restricciones del ensamblaje, y es capaz de realizar mallados muy finos y con bastante exactitud, aunque Catia V5 tiene un módulo que podría resultar útil también: *Analysis & Simulation*. Entender así la conexión entre cada uno de los elementos de la caja y el esfuerzo que realiza cada uno de ellos sobre los demás, sería probablemente la mejor manera de averiguar los modos de fallo de los componentes de la caja. Colaborando con el sector industrial, se podrían realizar mantenimientos preventivos de las piezas que se consideraran, ayudando así a prevenir averías en las mismas.

Como tercera opción de continuación del trabajo, y siguiendo la línea del modelaje de elementos, se propone completar el modelado de los demás elementos implicados en la transmisión del vehículo, en cuanto a la mecánica se refiere. Es decir, se podría modelar, por un lado, cómo llega el par desde el cigüeñal del motor al eje de entrada de la caja, y por otro lado, cómo sigue el par desde el eje de salida de la caja, ya modelado, hacia el árbol de transmisión al completo, incluidas las ruedas del vehículo. De esta manera, podría presentarse de manera más gráfica el recorrido del par desde el motor hasta las ruedas.

Por último, se plantea hacer una simulación de la caja de cambios en cuanto a su parte hidráulica se refiere. Esta parte es fundamental en el funcionamiento de la caja, no solo por ser quien mantiene lubricados los elementos de la misma, o actuar como disipador de calor, sino porque es el circuito hidráulico de la caja quien se encarga de activar los embragues implicados en las relaciones de transmisión. Para completar esta idea, debería realizarse un estudio de las resistencias a vencer que sufre el vehículo y de qué manera afecta eso en profundidad a la relación de par que debe proporcionar la caja. De esta manera, haciendo una simulación de todos los circuitos

hidráulicos internos de la caja, y sabiendo el par que debe dar en función de las condiciones externas, podría hacerse una simulación capaz de activar de manera hidráulica la marcha correspondiente, y poner en funcionamiento la caja al completo a raíz de esto.

REFERENCIAS

- [1] Real Academia Española, «Diccionario de la lengua española,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/caja#0eN7jQv>. [Último acceso: 15 agosto 2024].
- [2] «Hydmotores,» [En línea]. Available: <https://hydmotores.com/evolucion-tecnica-de-la-caja-de-cambios-desde-su-creacion/>. [Último acceso: 18 agosto 2024].
- [3] «BMW,» [En línea]. Available: <https://www.bmw.com>. [Último acceso: 23 julio 2024].
- [4] M. Tixce, «Motor & Racing,» 4 noviembre 2016. [En línea]. Available: https://www.motoryracing.com/coches/noticias/conoce-la-historia-de-la-caja-de-cambios/?utm_campaign=twitter. [Último acceso: 17 agosto 2024].
- [5] D. Hasselberger, «Icon Road,» 4 junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.iconroad.es/historia/panhard-et-levassor/>. [Último acceso: 19 agosto 2024].
- [6] J. M. Sadurní, «National Geographic,» 4 abril 2022. [En línea]. Available: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/henry-ford-revolucion-industria-automovil_17863. [Último acceso: 18 agosto 2024].
- [7] I. Andatu, «Actualidad Motor,» [En línea]. Available: <https://www.actualidadmotor.com/sincronizador/>. [Último acceso: 20 agosto 2024].
- [8] A. Sciarretta y A. Vahidi, «Fundamentals of Vehicle Modeling. Internal Combustion Engine Vehicles. Engine,» de *Energy-Efficient Driving of Road Vehicles. Toward Cooperative, Connected, and Automated Mobility.*, Francia, Springer, 2019, pp. 42-603.
- [9] R. Fino, «RoDes,» [En línea]. Available: <https://www.ro-des.com/mecanica/tipos-cajas-de-cambio-automaticas/>. [Último acceso: 10 agosto 2024].
- [10] G. Lechner y H. Naunheimer, *Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application*, Alemania: Springer, 1999.
- [11] «Toyota Club,» junio 2021. [En línea]. Available: https://toyota-club.net/files/faq/21-06-10_faq_multimode_es.htm. [Último acceso: 11 agosto 2024].
- [12] «ZF Press Market,» [En línea]. Available: https://press.zf.com/press/en/releases/release_3054.html. [Último acceso: 8 julio 2024].
- [13] «BMW Autolux Service,» [En línea]. Available: https://www.recambios-bmw.es/bmw-coche/Serie-3/1987/320i/Cambio-automatico/ZF-3hp22-piezas-d-caja-aliment-aceite/5/24_0008/24/472751462. [Último acceso: 10 julio 2024].

- [14] BMW, «4 Automatic Transmission ZF 3 HP - 22,» de *BMW E21 Service Manual*, Munich, Bayerische Motoren Werke AG Service Department.
- [15] «BMW Autolux Service,» [En línea]. Available: https://www.recambios-bmw.es/bmw-coche/Serie-3/1983/316/Cambio-automatico/ZF-3hp22-juego-de-ruedas-satelite/5/24_0275/24/472681352. [Último acceso: 10 julio 2024].
- [16] «Eonsi Industrial Development,» 26 septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://eonsi.eu/tipos-engranajes/#:~:text=Existen%20cinco%20tipos%20de%20engranajes%20b%C3%A1sicos%20clasificados%20en%20funci%C3%B3n%20de,c%C3%B3nicos%20de%20tornillo%20e%20hipoide..> [Último acceso: 5 septiembre 2024].
- [17] V. Harutyunyan, «HVH Industrial,» [En línea]. Available: <https://hvhindustrial.com/es/blog/tipos-comunes-de-engranajes>. [Último acceso: 5 septiembre 2024].
- [18] J. A. Ligeró, «Engranajes,» de *Fundamentos del KBE (Knowledge Based Engineering). Aplicación al diseño de engranajes de ejes paralelos con Catia v5*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 189-268.
- [19] «Tec Science,» 3 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/willis-equation-for-planetary-gears/>. [Último acceso: 13 agosto 2024].
- [20] A. Noguero, «ABC,» 2 agosto 2020. [En línea]. Available: https://www.abc.es/motor/consejos/abci-como-seran-futuro-cambios-marchas-coches-202008020144_noticia.html. [Último acceso: 10 septiembre 2024].
- [21] J. Álvarez, «Motor 1,» 24 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://es.motor1.com/news/399977/hyundai-kia-itc-cambio-inteligente/>. [Último acceso: 10 septiembre 2024].
- [22] A. Simon, A. Bataller, J. A. Cabrera, F. Ezquerro, A. J. Guerra, F. Nadal y A. Ortiz, *Fundamentos de Teoría de máquinas*, Madrid: Bellisco Ediciones, 2014.
- [23] V. M. Faires, *Diseño de elementos de máquinas*, México: Limusa, 1998.
- [24] J. M. Alonso, *Sistemas de Transmisión y Frenado*, Madrid: Thomson Paraninfo, 2001.
- [25] P. Luque, D. Álvarez y C. Vera, *Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico*, Madrid: Thomson Paraninfo, 2004.
- [26] E. Águeda Casado, T. Gómez Morales, J. Martín Navarro y U. Martín Díaz, *Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje*, Madrid: Thomson Paraninfo, 2012.
- [27] A. Hueso y J. L. Fuentes, *El gran libro de CATIA*, Barcelona: Marcombo, 2010.
- [28] Real Academia Española. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/ingenier%C3%ADa>. [Último acceso: 15 septiembre 2024].

