



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**REFORMA MECÁNICA DE UN VEHÍCULO  
PARA SU ADAPTACIÓN AL RALLY**

**Autor:**

**Lázaro Uña, Mario**

**Tutor:**

**López Ramón y Cajal, José Antonio**

**Dpto. CMelM - Ingeniería**

**Mecánica**

**Valladolid, abril 2023.**



## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, en especial a mi madre que me ha soportado durante 5 y años y medio que ha durado esta etapa en mi vida, con todos los cabreos y mal humor. Mi padre, no ha podido estar conmigo durante este tiempo, pero ha sido una fuente de motivación para llegar hasta donde estoy ahora desde que era pequeño.

Al resto de mi familia que siempre me han apoyado y se han alegrado con cada paso que iba dando.

Quiero agradecer al Dr. José Antonio López Ramon y Cajal, mi tutor, quien ha sido mi mentor durante todo este proyecto, sin su ayuda y orientación constante no habría sido posible llevarlo a cabo y sacar lo mejor de mí en todo momento. Gracias por todo lo que me ha enseñado dentro y fuera del aula.

A la Dra. Marta Herráez, quien me ha ofrecido siempre su ayuda en todo lo posible, aunque no tuviera que ver con las asignaturas que me ha impartido.

Y por último y no menos importante a los amigos que han aguantado a mi lado desde el principio de esta etapa y no se han ido y a los que he encontrado por el camino y se han convertido en personas muy especiales para mí siendo en muchas ocasiones una vía de escape en momentos no tan buenos.



## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado se centra en la modificación mecánica completa de un vehículo de serie para su adaptación a la categoría de rallyes, Rally 4. El objetivo principal es identificar las modificaciones necesarias para cumplir con las regulaciones y especificaciones de la categoría, así como mejorar el rendimiento. Se realizará un análisis exhaustivo de las opciones de modificación para cada uno de los componentes mecánicos del coche, teniendo en cuenta el impacto en el rendimiento y los costos. Para evaluar la eficacia de las modificaciones, se compararán los resultados de los cálculos antes y después de las modificaciones. Además, se realizará un análisis económico de las modificaciones. Se espera que este trabajo de fin de grado proporcione información valiosa sobre las modificaciones necesarias para adaptar un coche de serie a la categoría Rally 4, y sirva como guía para futuros proyectos de modificación de coches de rally.

## PALABRAS CLAVE

Automóvil, Rally, Motor, Transmisión, Suspensión.

## ABSTRACT

This final project degree focuses on the complete mechanical modification of a production car for adaptation to the rally category, Rally 4. The main goal is to identify the modifications needed to comply with the regulations and specifications of the category, as well as to improve performance. A thorough analysis of modification options shall be carried out for each of the mechanical components of the car, considering the impact on performance and costs. To evaluate the effectiveness of the modifications, the results of the calculations before and after the modifications shall be compared. In addition, an economic analysis of the modifications will be carried out. It is hoped that this final thesis will provide valuable information on the modifications needed to adapt a production car to the Rally 4 category and will serve as a guide for future rally car modification projects.

## KEYWORDS

Vehicle, Rally, Engine, Transmission, Suspension.



**ÍNDICE GENERAL**

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>PALABRAS CLAVE.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>KEYWORDS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>13</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES.....</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. El deporte del automóvil.....	1
1.2. Introducción a los rallyes.....	2
1.3. Vehículos y homologaciones .....	2
1.4. Objetivos .....	8
<b>2. PREPARACIÓN CATEGORÍA RALLY 4 .....</b>	<b>9</b>
2.1. Modificaciones del motor .....	9
2.2. Cálculos de las modificaciones del motor.....	18
2.3. Modificación del sistema de transmisión.....	24
2.4. Cálculos de las modificaciones del sistema de transmisión .....	29
2.4.1. Introducción.....	29
2.4.2. Diagramas de tracción.....	31
2.4.3. Aceleración .....	39
2.5. Modificación del sistema de suspensión .....	46
2.6. Cálculos en las modificaciones del sistema de suspensión.....	50
2.6.1. Introducción.....	50
2.6.2. Automóvil de serie en el eje delantero .....	56
2.6.3. Automóvil de serie en el eje trasero .....	60
2.6.4. Rally 4 con configuración de asfalto en el eje delantero .....	64
2.6.5. Rally 4 con configuración de asfalto en el eje trasero .....	68
2.6.6. Rally 4 con configuración de tierra en el eje delantero.....	72
2.6.7. Rally 4 con configuración de tierra en el eje trasero.....	76
2.6.8. Rigidez y amortiguación seleccionadas.....	79
2.7. Modificación del sistema de dirección .....	81

2.8.	Modificación de las ruedas y del sistema de frenado.....	83
3.	<i>PROCESO DE HOMOLOGACIÓN</i> .....	89
4.	<i>ESTUDIO ECONOMICO</i> .....	93
4.1.	Estudio económico del proyecto.....	93
4.1.1.	Introducción.....	93
4.1.2.	Jerarquía y recursos humanos del proyecto.....	93
4.1.3.	Fases del proyecto.....	94
4.1.4.	Costes directos.....	95
4.1.5.	Costes indirectos.....	101
4.1.6.	Kit de piezas.....	103
4.1.7.	Costes totales.....	105
4.2.	ESTUDIO ECONOMICO TFG.....	106
4.2.1.	Introducción.....	106
4.2.2.	Búsqueda y recopilación de información.....	106
4.2.3.	Realización de cálculos.....	107
4.2.4.	Redacción.....	107
4.2.5.	Coste total del TFG.....	108
5.	<i>CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO</i> .....	109
6.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	111

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 BENZ PATENT-MOTORWAGEN DE KARL BENZ.....	1
ILUSTRACIÓN 2: AUDI QUATTRO SPORT S1 .....	4
ILUSTRACIÓN 3: CATEGORÍAS DE VEHÍCULOS DE RALLY.....	7
ILUSTRACIÓN 4: (IZQ.: FUERA VANO / DCHA.: EN VANO) .....	10
ILUSTRACIÓN 5: PISTÓN ALIGERADO (IZQ.) / BIELA ALIGERADA (DCHA.) FORD FIESTA RALLY 4 .....	12
ILUSTRACIÓN 6: ÁNGULOS DE ASIENTO DE VÁLVULAS .....	13
ILUSTRACIÓN 7: PERFIL DE LEVA (COMERCIAL: ARRIBA / COMPETICIÓN: ABAJO) .....	14
ILUSTRACIÓN 8: LEVANTAMIENTO DE VÁLVULAS.....	15
ILUSTRACIÓN 9: MOTOR FORD FIESTA RALLY 4.....	17
ILUSTRACIÓN 10: DISCO DE EMBRAGUE FORD FIESTA RALLY 4 .....	24
ILUSTRACIÓN 11: CAJA DE CAMBIOS SECUENCIAL SADEV ST7514LW .....	25
ILUSTRACIÓN 12: ARCO DE CONDUCCIÓN DE ENTRADA Y DE SALIDA .....	26
ILUSTRACIÓN 13: DIFERENCIAL DESLIZANTE LIMITADO FORD FIESTA RALLY 4.....	27
ILUSTRACIÓN 14: CONFIGURACIONES DE LA ENTREGA DE POTENCIA EN LLANTA .....	39
ILUSTRACIÓN 15: SUSPENSIÓN MCPHERSON CON BRAZO INFERIOR EN L.....	46
ILUSTRACIÓN 16: MUELLES DELANTEROS PARA ASFALTO (ARRIBA IZQ.), PARA GRAVA (ARRIBA DCHA.) .....	47
ILUSTRACIÓN 17: AMORTIGUADORES DELANTEROS (ARRIBA) / AMORTIGUADORES TRASEROS (ABAJO) .....	48
ILUSTRACIÓN 18: MASA SUSPENDIDA Y NO SUSPENDIDA.....	50
ILUSTRACIÓN 19: MODELO ESQUEMÁTICO DE UN SISTEMA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD EN UN VEHÍCULO .....	51
ILUSTRACIÓN 20: VOLANTE FORD FIESTA RALLY 4.....	82
ILUSTRACIÓN 21: NEUMÁTICO DE ASFALTO (IZQ.), NEUMÁTICO DE TIERRA (DCHA.).....	83
ILUSTRACIÓN 22: DISCOS DE FRENO DELANTEROS (IZQ.), DISCOS DE FRENO TRASERO (DCHA.) .....	85
ILUSTRACIÓN 23: PINZA DE MONTANTE FIJO CON CUATRO PISTONES .....	86
ILUSTRACIÓN 24: FASES DEL PROYECTO DE HOMOLOGACIÓN.....	90
ILUSTRACIÓN 25: EJEMPLO DE FICHA DE I.T.V. DE COMPETICIÓN. ....	91
ILUSTRACIÓN 26: ORGANIGRAMA DE JERARQUÍA DE LA EMPRESA. ....	94
ILUSTRACIÓN 27: FASES DEL PROYECTO.....	95
ILUSTRACIÓN 28: FASES DEL TFG.....	106



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1: REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS DE POTENCIA DEL MOTOR.....	19
GRÁFICA 2: REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS DE PAR DE FUERZA.....	20
GRÁFICA 3: POTENCIA Y PAR DE FUERZA EN EL VEHÍCULO DE SERIE.....	21
GRÁFICA 4: POTENCIA Y PAR DE FUERZA EN EL VEHÍCULO DE SERIE REALES. FUENTE (AUTOMOBILE CATALOG, S.F.) .....	21
GRÁFICA 5: POTENCIA Y PAR DE FUERZA EN LA VERSIÓN R2T19.....	22
GRÁFICA 6: POTENCIA Y PAR DE FUERZA EN LA VERSIÓN RALLY 4.....	23
GRÁFICA 7: DIAGRAMA DE TRACCIÓN CORRESPONDIENTE AL VEHÍCULO DE SERIE.....	32
GRÁFICA 8: DIAGRAMA DE TRACCIÓN RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE ASFALTO .....	33
GRÁFICA 9: DIAGRAMA DE TRACCIÓN RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE TIERRA.....	33
GRÁFICA 10: DIAGRAMA DE TRACCIÓN DEL VEHÍCULO DE SERIE CON DIFERENTES RESISTENCIAS AL AVANCE EN LLANTA. ....	35
GRÁFICA 11: DIAGRAMA DE TRACCIÓN DEL RALLY 4 EN ASFALTO CON DIFERENTES RESISTENCIAS AL AVANCE EN LLANTA. ....	35
GRÁFICA 12: DIAGRAMA DE TRACCIÓN DEL RALLY 4 EN TIERRA CON DIFERENTES RESISTENCIAS AL AVANCE EN LLANTA. ....	36
GRÁFICA 13: DIAGRAMA DE POTENCIA EN LLANTA CORRESPONDIENTE AL VEHÍCULO DE SERIE. .....	37
GRÁFICA 14: POTENCIA EN LLANTA CORRESPONDIENTE AL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	37
GRÁFICA 15: POTENCIA EN LLANTA CORRESPONDIENTE AL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE TIERRA.....	38
GRÁFICA 16: ACELERACIÓN DEL VEHÍCULO DE SERIE.....	42
GRÁFICA 17: ACELERACIÓN DEL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	43
GRÁFICA 18: ACELERACIÓN DEL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE TIERRA.....	44
GRÁFICA 19: COMPARATIVA DE ACELERACIÓN ENTRE LAS TRES VERSIONES. ....	45
GRÁFICA 20: DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA ESPACIAL. .....	53
GRÁFICA 21: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE DELANTERO.....	56
GRÁFICA 22: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE DELANTERO.....	57
GRÁFICA 23: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE DELANTERO. ....	59
GRÁFICA 24: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE DELANTERO. ....	59
GRÁFICA 25: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE TRASERO.....	61
GRÁFICA 26: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE TRASERO.....	62

GRÁFICA 27: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE TRASERO. ....	63
GRÁFICA 28: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA VEHÍCULO DE SERIE EN EL EJE TRASERO. ....	63
GRÁFICA 29: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	65
GRÁFICA 30: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	65
GRÁFICA 31: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	67
GRÁFICA 32: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	67
GRÁFICA 33: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	69
GRÁFICA 34: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	69
GRÁFICA 35: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	71
GRÁFICA 36: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	71
GRÁFICA 37: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	73
GRÁFICA 38: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	74
GRÁFICA 39: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	75
GRÁFICA 40: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	75
GRÁFICA 41: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	77
GRÁFICA 42: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO DEL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	77
GRÁFICA 43: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	78
GRÁFICA 44: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA MASA NO SUSPENDIDA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	79
GRÁFICA 45: SALARIOS BRUTOS ANUALES TOTALES. ....	98
GRÁFICA 46: COMPARATIVA DE COSTES. ....	101
GRÁFICA 47: COSTES INDIRECTOS. ....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CATEGORÍAS Y CLASES DE VEHÍCULOS DE RALLY .....	6
TABLA 2: FICHA TÉCNICA DEL MOTOR DE SERIE .....	10
TABLA 3: FICHA TÉCNICA DEL MOTOR DE COMPETICIÓN .....	11
TABLA 4: COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS DE POTENCIA .....	19
TABLA 5: COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS DE TRANSMISIÓN. ....	29
TABLA 6: RENDIMIENTOS DE LA TRANSMISIÓN .....	30
TABLA 7: COEFICIENTES DE MASAS ROTATORIAS. ....	41
TABLA 8: TIEMPOS Y VELOCIDADES EN EL CAMBIO DE MARCHAS DEL VEHÍCULO DE SERIE. ....	42
TABLA 9: TIEMPOS Y VELOCIDADES EN EL CAMBIO DE MARCHAS DEL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	43
TABLA 10: TIEMPOS Y VELOCIDADES EN EL CAMBIO DE MARCHAS DEL RALLY 4 CON CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	44
TABLA 11: CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO SEGÚN LAS VERSIONES.....	51
TABLA 12: CARACTERÍSTICAS DE LA CALZADA. ....	52
TABLA 13: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO EN EL VEHÍCULO DE SERIE.....	56
TABLA 14: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE DELANTERO EN EL VEHÍCULO DE SERIE.....	57
TABLA 15: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO DEL VEHÍCULO DE SERIE. .....	60
TABLA 16: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO DEL VEHÍCULO DE SERIE. ....	61
TABLA 17: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE TRASERO DEL VEHÍCULO DE SERIE.....	62
TABLA 18: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO DEL VEHÍCULO DE SERIE. .....	64
TABLA 19: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	64
TABLA 20: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	66
TABLA 21: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	68
TABLA 22: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	68
TABLA 23: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO. ....	70
TABLA 24: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE ASFALTO.....	72
TABLA 25: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	73

TABLA 26: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	74
TABLA 27: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE DELANTERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	76
TABLA 28: RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN Y AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	76
TABLA 29: RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA.....	78
TABLA 30: ACELERACIONES DE LA SUSPENSIÓN EN EL EJE TRASERO EN EL RALLY 4 CONFIGURACIÓN DE TIERRA. ....	79
TABLA 31: RIGIDEZ Y AMORTIGUACIÓN SELECCIONADAS.....	80
TABLA 32: CALCULO DE DÍAS EN UN AÑO NATURAL.....	96
TABLA 33: CÁLCULO DE COSTES DE PERSONAL INDIVIDUAL.....	97
TABLA 34: MESES Y HORAS DE TRABAJO DEL PERSONAL.....	97
TABLA 35: CÁLCULO DE COSTES DE PERSONAL TOTAL.....	98
TABLA 36: AMORTIZACIONES DEL EQUIPO DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN. ....	99
TABLA 37: AMORTIZACIONES DEL MOBILIARIO DE OFICINA. ....	100
TABLA 38: AMORTIZACIONES DEL MATERIAL DE OFICINA. ....	100
TABLA 39: MATERIAL CONSUMIBLE DE OFICINA. ....	101
TABLA 40: COSTES INDIRECTOS. ....	102
TABLA 41: KITS DE MODIFICACIÓN.....	105
TABLA 42: COSTES TOTALES.....	105
TABLA 43: CÁLCULO DE DÍAS LABORALES .....	108
TABLA 44: COSTE MANO DE OBRA .....	108

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: RIGIDEZ DE UN MUELLE.....	15
ECUACIÓN 2: FUNCIÓN DE POTENCIA.....	18
ECUACIÓN 3: COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN DE POTENCIA.....	18
ECUACIÓN 4: FUNCIÓN DE PAR DE FUERZA.....	19
ECUACIÓN 5: GRADO DE RECUBRIMIENTO EN ENGRANAJES.....	26
ECUACIÓN 6: CALCULO DEL ARCO DE CONDUCCIÓN. ....	26
ECUACIÓN 7: RESISTENCIA A LA RODADURA.....	29
ECUACIÓN 8: POTENCIA EN LLANTA. ....	30
ECUACIÓN 9: FUERZA DE TRACCIÓN EN RUEDA.....	30
ECUACIÓN 10: RESISTENCIA AL AVANCE EN LLANTA.....	31
ECUACIÓN 11: POTENCIA EN LLANTA NECESARIA PARA VENCER LAS RESISTENCIAS AL AVANCE. .....	36
ECUACIÓN 12: COEFICIENTE DE MASAS ROTATIVAS.....	40
ECUACIÓN 13: EXPRESIÓN SIMPLIFICADA DEL COEFICIENTE DE MASAS ROTATIVAS. ....	40
ECUACIÓN 14: CURVA VELOCIDAD – TIEMPO.....	41
ECUACIÓN 15: FRECUENCIA NATURAL. ....	54
ECUACIÓN 16: RIDE RATE. ....	54
ECUACIÓN 17: COEFICIENTE DE AMORTIGUACIÓN.....	55
ECUACIÓN 18: FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA.....	55
ECUACIÓN 19: MODULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	56
ECUACIÓN 20: DENSIDAD ESPECTRAL DE LA ACELERACIÓN.....	58
ECUACIÓN 21: DENSIDAD ESPECTRAL TEMPORAL. ....	58
ECUACIÓN 22: DENSIDAD ESPECTRAL ESPACIAL. ....	58
ECUACIÓN 23: ACELERACIÓN DE LA SUSPENSIÓN.....	60

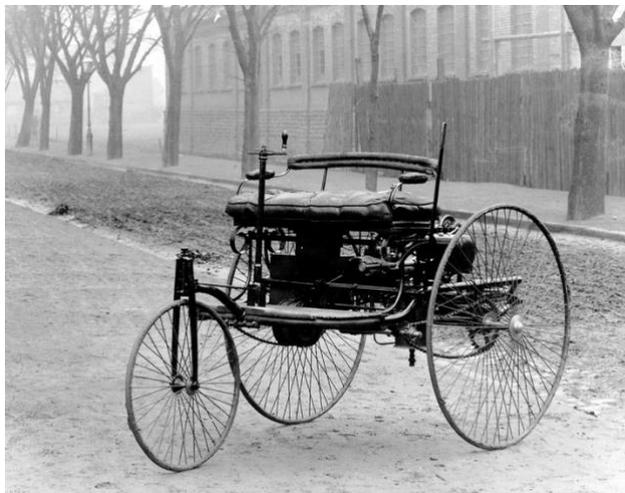


## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. El deporte del automóvil

En 1879 Georg Baldwin Selden presenta en Estados Unidos una patente en la que se describe todos los detalles acerca de la construcción de un vehículo de gasolina basado en el invento de Siegfried Marcus y todos los antecedentes de vehículos autopropulsados (por diferentes sistemas).

En base a esta patente, en 1885 vio la luz el Benz patent-Motorwagen, creación de un joven ingeniero alemán llamado Karl Benz. Para Muchos especialistas fue en este punto el comienzo del automóvil, pero todo lo anterior nos da una visión más detallada sobre la historia del automóvil.



*Ilustración 1 Benz Patent-Motorwagen de Karl Benz. Fuente: (Wikipedia, s.f.).*

Dos años más tarde, el 28 de abril de 1887 se celebra la primera carrera automovilística de la historia en Paris. En ella solo se presenta un único vehículo, un De-Dion Bouton que acaba la prueba sin incidentes.

En 1895 se celebra la que se considera la primera carrera automovilística verdadera entre Paris y Burdeos. El ganador fue un Peugeot que invirtió cerca de 60 horas en cubrir el trayecto

En 1900 el multimillonario Gordon Bennet (propietario del periódico New York Herald) organiza la primera carrera automovilística internacional entre Paris y Lyon. En ella participaron cinco pilotos de cuatro nacionalidades diferentes. La prueba la gano un Panhard francés pilotado por Fernand Charron, que mantuvo una velocidad media de 62 Km/h.

La evolución de las carreras se vio afectada en gran parte por la muerte de Marcel Renault (fundador de la empresa automovilística que lleva su nombre). En una prueba en 1903 entre Paris y Madrid sufre un accidente al esquivar una

mujer que se cruzó en la carretera, perdiendo la vida. El gobierno francés prohíbe las carreras por carretera y empieza a plantear la idea de crear circuitos para dicho fin. Un año más tarde, en 1904 se crea la Federación internacional del Automóvil.

El primer Grand Prix tal como los conocemos actualmente se celebra en 1906 en la localidad de Le Mans y fue ganada por el húngaro- francés Ferenc Szisz a los mandos de un Renault. En 1922 se celebra el primer Grand Prix de Monza y dos años más tarde dos pruebas con el mismo nombre en España y Bélgica. Ese mismo año se funda la asociación internacional de automóviles reconocidos y se empiezan a poner normas (CurioSfera, s.f.).

## 1.2. Introducción a los rallyes

Los rallyes son un deporte automovilístico consistente en completar un tramo de carretera (de diferentes superficies) en el menor tiempo posible. A diferencia de otras modalidades, en los rallyes los vehículos salen a disputar la prueba de uno en uno. No se trata de la lucha en pista contra otros pilotos adelantándose continuamente o siguiéndose, si no de la lucha contra un cronometro. Gana aquel que invierta menor tiempo en recorrer todos los tramos de los que está compuesto el rally. Otra peculiaridad de esta modalidad es la existencia de un copiloto, cuya función es ir leyendo unas notas que indican curvas, estado de la superficie y posibles obstáculos que vayan a ir apareciendo en el tramo con la suficiente antelación para que el piloto este prevenido.

Por lo general, los tramos suelen estar cerrados al tráfico durante la disputa de la prueba (no siempre), pero en los enlaces entre tramos, los vehículos deben circular por vías públicas en los que deben respetar las normas de tráfico del país.

Cabe observar que un vehículo de rally, aunque modificado, su apariencia se acerca mucho más a un vehículo de calle que cualquier otro diseñado y dedicado a pruebas de circuito o velocidad. En los rallyes no se tiene únicamente en cuenta la velocidad, sino también la robustez y resistencia de los diferentes elementos del vehículo.

## 1.3. Vehículos y homologaciones

En 1958 se comienza a utilizar lo que comúnmente se conoce hoy en día como fichas de homologación, en donde se detalla la especificación técnica completa del vehículo.

Todos los vehículos deben obedecer los criterios de homologación que aparecen indicados en el Anexo J promulgado por la FIA (redactado por primera vez en 1965).

En 1969 la FIA modifica el anexo J en él se hacía una clasificación de clases de los vehículos de aquella época (se clasificaban en 6 grupos):

- **Grupo 1:** Turismos de producción en serie de cuatro plazas. Era necesaria una fabricación mínima de 5.000 unidades de calle. Fue implantada en 1969.  
(P. ej.: Simca Rally 2)
- **Grupo 2:** Turismos de cuatro plazas en los que se permitía un cierto nivel de preparación. Era necesaria una producción mínima de 1.000 unidades de calle. Fue implantada en 1969  
(P. ej.: Renault 5 Alpine).
- **Grupo 3:** Automóviles GT (Gran Turismo) de dos plazas. Era necesaria una producción mínima de 500 unidades de calle. Fue implantada en 1957 y sufrió varias modificaciones hasta su desaparición.  
(P. ej.: Alpine A110).
- **Grupo 4:** automóviles GT de dos plazas en los que se permitía un cierto nivel de preparación. Era necesaria una producción mínima de 50 unidades que posteriormente fue reducida a 25 unidades de calle. Fue implantada en 1966.  
(P. ej.: Lancia Stratos)
- **Grupo 5:** Automóviles deportivos caracterizados por ser grandes de carrocería y gran potencia. Eran necesarios en un primer momento un mínimo de 25 unidades de calle. Mas tarde se elimina este mínimo de producción. Fue implantada en 1966.  
(P. ej.: Ferrari 512S).
- **Grupo 6:** Prototipos sport. No tenían mínimo de producción. Fue implantada en 1966.  
(P. ej.: Porsche 908).

Las producciones mínimas eran requeridas en un periodo de 12 meses consecutivos (FIA, 1969).

La mayoría de las marcas optaron por el “Grupo 4” que más tarde se convertiría en la categoría estrella de los rallyes con su renombramiento como “Grupo B” en el año 1982.

Fue a partir de este año que las anteriores clases desaparecieron y algunas fueron renombradas y modificadas. En esta nueva legislación aparecían cuatro clases (FIA, 1986):

- **Grupo C:** Esta categoría sustituía a los anteriores “Grupo 5 y Grupo 6” y se salió del mundo de los rallyes para ser lo que actualmente se conoce como WEC (campeonato mundial de resistencia)  
(P. ej.: Porsche 956).

- **Grupo B:** GT de gran potencia, ligeros y con grandes innovaciones técnicas. Eran necesarios un mínimo de 200 unidades en versión de calle (la mayoría de las marcas no cumplió con este requisito). Contaban con motores turboalimentados y fue la categoría que dio comienzo al desarrollo de tracciones 4x4, siendo Audi la pionera con su modelo Audi Quattro. Fue implantada en 1982 y prohibida en 1986 por su nivel de peligrosidad (MotorMania.info, s.f.).  
(P. ej.: Audi Quattro Sport S1, se puede ver en la Ilustración 2).



Ilustración 2: Audi Quattro Sport S1. Fuente: (Motor Mania, 2006).

- **Grupo A:** Esta categoría sustituía al anterior “Grupo 2”. Turismos derivados de la producción en serie modificados para competir. A diferencia de los dos anteriores grupos, éstos estaban limitados en potencia, peso, tecnología y coste. Su objetivo principal era atraer equipos privados. Eran necesarios un mínimo de 5.000 unidades de calle. Fue implantada en 1982 y continua hoy en día.  
(P. ej.: Toyota Celica ST185).
- **Grupo N:** Esta categoría sustituía al anterior “Grupo 1”. Turismos de producción en serie limitados en modificaciones. Eran necesarios un mínimo de 5.000 unidades de calle hasta que en 1997 se modificaría esta norma para producir 2.500 unidades. Fue implantada en 1982 y continua hoy en día.  
(P. ej.: Renault Mégane RS).

En el año 1997 se introducirían unas nuevas regulaciones para un nuevo grupo, este nuevo grupo continua hasta la actualidad.

- **WRC (World Rally Car):** En esta categoría se unificaban muchos criterios para la homologación de los coches de diferentes marcas. Debían tener un peso mínimo de 1.230 kg, una longitud mínima de 4 metros, con batalla y líneas generales idénticas. Está permitido ensanchar la carrocería con apéndices aerodinámicos, acoplar turbocompresor al motor, incluir motricidad en los dos ejes, cajas de cambios secuenciales y diferenciales activos.  
(P. ej.: Peugeot 206 WRC)
- **Kit Car:** Vehículos de tracción delantera con cajas de cambios secuenciales y motores atmosféricos, compuestos por un kit homologado de 50 unidades.  
(P. ej.: Renault Maxi Mégane).
- **S1600:** Vehículos de producción en serie. Se usa por lo general para el campeonato mundial de rally junior y para rallyes nacionales. Deben tener tracción delantera y un motor atmosférico de 1640cc como máximo.  
(P. ej.: Citroën Saxo S1600).
- **S2000:** Vehículos de producción en serie. Pueden tener tracción a las cuatro ruedas, motor atmosférico de como máximo 2.0 litros y menos de 280 CV.  
(P. ej.: Opel Corsa S2000).
- **RRC:** Categoría intermedia entre WRC y S2000. En esencia son WRC con evoluciones menores. Se utilizan en el campeonato europeo de rallyes.  
(P. ej.: Ford Fiesta RRC).

En 2014 la FIA establecía una nueva serie de categorías que engloban las diferentes regulaciones existentes hoy en día y que se dividen en cinco.

Recientemente, en 2019 la FIA realizaría unos cambios en el reglamento en el que se ven modificaciones en los nombres de las clases que componen las diferentes categorías. Se dividen en cinco clases (véase Tabla 1). (Fernández, 2020)

- **Rally 1 (R1):** En esta categoría se encuentran los actuales World Rally Car. Emplean motores de cuatro cilindros en línea de 1.6 litros turbo, inyección directa y con una potencia superior a los 380 CV, caja de cambios secuencial de seis velocidades, tracción total y diferencial central electrónico.  
El coste de estos vehículos ronda entre los 600.000€ y los 800.000€ por unidad.  
(P. ej.: Hyundai i20 Coupé WRC).

- Rally 2 (R5): Son la categoría que sustituye a los “S2000”. Utilizan motores de cuatro cilindros en línea de 1.6 litros, tracción total, con una potencia entre 280 – 300 CV y cambio secuencial de cinco velocidades. El coste de estos vehículos ronda los 200.000€ por unidad.  
(P. ej.: Skoda Fabia Rally 2 Evo).
- Rally 3: Esta es una categoría completamente nueva cuyo objetivo es servir de escuela a los pilotos que quieren pasar de la tracción delantera a la total. Tienen motores de entre 927 y 1620 cc con más de 200 CV. El precio ronda los 100.000€ por unidad.  
(P. ej.: Ford Fiesta Rally 3).
- Rally 4 (R2 y R2T): Es la categoría principal entre los vehículos de tracción delantera. Utilizan motores turbo, algunas marcas utilizan tricilíndricos de cilindradas entre 1.0 y 1.6 cc. Estos se utilizan en campeonatos internacionales junior o en rallyes nacionales. El precio ronda los 66.000€ por unidad.  
(P. ej.: Ford Fiesta Rally 4).
- Rally 5: Vehículos de tracción delantera con motores, por lo general, inferiores a 1.4 litros y potencias que rondan los 150 CV. Estos se utilizan por lo más general en rallyes nacionales como los “Rally 4”. El precio está entre los 40.000€ y los 45.000€ por unidad.  
(P. ej.: Renault Clio V Rally 5).

CATEGORIA	CLASE	CILINDRADA (cc)	TIPO	COMBUSTIBLE	PESO MIN	TRACCIÓN	UNIDADES REQUERIDAS (Por Año)
RC1	R1	1600	Turbo	Gasolina	1230	integral	2500
RC2	R4	+2000	Turbo	Gasolina	1300	Delantera o integral	-
	R5	1600	Turbo	Gasolina	1230	integral	-
RC3	R3C	1600 - 2000	Atmosférico	Gasolina	1080	Delantera	2500
	R3D	Hasta 2000	Sobrealimentado	Diesel	1150	Delantera	2500
	R3T	1600	Turbo	Gasolina	1080	Delantera	2500
RC4	R2B	1400-1600	Atmosférico	Gasolina	1030	Delantera	2500
	R2C	1600 - 2000	Atmosférico	Gasolina	1030	Delantera	2500
RC5	R1A	-1400	Atmosférico	Gasolina	980	Delantera	2500
	R1B	1400 - 1600	Atmosférico	Gasolina	1030	Delantera	2500
	R1T	1400	Turbo	Gasolina	-	Delantera	2500

Tabla 1: Categorías y clases de vehículos de rally. Fuente: (Fernández, 2020)

**Rally 1**

TECH: 4WD - 300 bhp / 450 Nm  
CONTACT: [R1@www.m-sport.co.uk](mailto:R1@www.m-sport.co.uk)  
+44 1900 808 911  
ADDRESS: M-SPORT Ltd,  
Doverby Hall,  
DOCKERMOUTH,  
Cumbria,  
CA13 0PN,  
UK

**Rally 2**

TECH: 4WD - 250 bhp / 450 Nm  
CONTACT: [R2@www.m-sport.co.uk](mailto:R2@www.m-sport.co.uk)  
+44 1900 808 888  
ADDRESS: M-SPORT Ltd,  
Doverby Hall,  
DOCKERMOUTH,  
Cumbria,  
CA13 0PN,  
UK

**Rally 3**

TECH: 4WD - 215 bhp / 400 Nm  
CONTACT: [Rally3Carsales@m-sport.co.uk](mailto:Rally3Carsales@m-sport.co.uk)  
+48 12 666 2005  
ADDRESS: M-SPORT Poland Sp. z o.o.,  
ul. Kralowska 4,  
32-083 Balice,  
Poland

**Rally 4**

TECH: FWD - 210 bhp / 315 Nm  
CONTACT: [Rally4Carsales@m-sport.co.uk](mailto:Rally4Carsales@m-sport.co.uk)  
+48 12 666 2005  
ADDRESS: M-SPORT Poland Sp. z o.o.,  
ul. Kralowska 4,  
32-083 Balice,  
Poland

**Rally 5**

TECH: FWD - 150 bhp / 200 Nm  
CONTACT: [Rally5Carsales@m-sport.co.uk](mailto:Rally5Carsales@m-sport.co.uk)  
+48 12 666 2005  
ADDRESS: M-SPORT Poland Sp. z o.o.,  
ul. Kralowska 4,  
32-083 Balice,  
Poland

WWW.M-SPORT.CO.UK

Ilustración 3: Categorías de vehículos de rally. Fuente: (Fernández, 2020).

#### 1.4. Objetivos

- El objetivo principal es la modificación mecánica del vehículo para su uso en competición, dentro de la modalidad de rallyes.
- Identificación de las modificaciones necesarias en el vehículo de serie para su homologación en la categoría Rally 4.
- Comprobar que los datos teóricos obtenidos son lo más lógicos y próximos a los datos reales proporcionados por la ficha del vehículo.
- Análisis económico de las modificaciones, evaluando el coste y rentabilidad del proyecto.

En todos estos apartados se justificarán las modificaciones mediante los cálculos pertinentes en base a la normativa actual de circulación por vías públicas y a la normativa impuesta por la RFEDA (Real Federación Española de Automovilismo).

Por último, se realizará una valoración de la mejora de las prestaciones derivadas de la reforma en cuestión. Este análisis estará basado en datos teóricos.

También se han incorporado una serie de competencias profesionales relacionadas con el grado de Ingeniero Mecánico:

- Capacidad de análisis y síntesis.
- Capacidad de expresión escrita.
- Capacidad de organización y planificación del tiempo
- Capacidad para aprender y trabajar de forma autónoma.
- Capacidad de resolución de problemas
- Capacidad de razonamiento crítico/análisis lógico
- Capacidad para aprender y trabajar de forma autónoma

## 2. PREPARACIÓN CATEGORÍA RALLY 4

El vehículo escogido para realizar la modificación mecánica para su competición en dicha categoría es el Ford Fiesta Rally 4. En este modelo, el fabricante M-Sport se ha encargado de desarrollar los kits necesarios para la preparación del turismo de serie y su homologación dentro de dicha categoría. Los cambios más significativos se encuentran en el grupo motriz, suspensiones y dirección.

Para dicha modificación se parte del vehículo con denominación comercial “Ford Fiesta MK8 ST Line” (del cual han sido producidas por lo menos 2.500 unidades idénticas durante los últimos 12 meses consecutivos), en el que empleará el Kit de conversión R2T19 y posteriormente se aplicará la evolución para la categoría “Rally 4”.

A continuación, se abordarán las diferentes modificaciones necesarias y justificadas, que deben ser llevadas a cabo en el vehículo de serie:

### 2.1. Modificaciones del motor

Un motor de competición tiene diferencias con un motor para su uso convencional. Los objetivos buscados en el motor para uso convencional son en primer lugar su durabilidad y los consumos, frente a lo buscado en competición que es obtener la máxima potencia permitida (dependiendo de la categoría en la que se desee homologar el vehículo), todo esto en detrimento del consumo y durabilidad.

Se definirá un motor de competición como un motor de combustión interna basado en los mismos principios de funcionamiento que aquellos destinados a un uso convencional como equipamiento de serie. Diferenciándolo únicamente, en que, para una misma cilindrada y disposición, se obtienen desarrollos de potencias mayores, todo debido a que trabajan sometidos a índices de compresión y regímenes de giro más elevados que los convencionales. También ayudan a conseguir estas potencias más elevadas los elementos auxiliares al motor, ya que muchos de estos componentes que vienen de serie son sustituidos por otros de mayores prestaciones (turbo, colectores de admisión y escape, etc.). Los elementos móviles del motor deben estar contruidos de manera más sólida y aligerados. Todos estos aspectos encarecen el precio por unidad de cada motor.

Además de los materiales de los que está constituido el motor, estos son modificados de diferentes formas con el objetivo de mejorar su “Performance”. El aumento de la relación de compresión es una de ellas. Esto permite un mayor paso de mezcla y como consecuencia se obtiene un aumento del rendimiento. Esto se consigue con un turbo que previo a la admisión en el motor, se ha

encargado de comprimir la masa de aire, amentando está en la cámara de combustión.

El turbocompresor está compuesto por un compresor y una turbina montados sobre el mismo eje, que aprovecha la energía residual presente en los gases de escape del motor. El turbocompresor no estará limitado por ninguna brida diferente a la que lleva de serie (FIA, 2019).

Una serie de problemas que podemos encontrar con el aumento de la relación de compresión puede ser el autoencendido o picado del motor (esto se produce cuando la mezcla de aire y combustible se enciende manera incontrolada en la cámara de combustión antes de que lo provoque el funcionamiento correcto del motor) y el aumento de las resistencias internas del motor entre otros.

El motor de origen del vehículo es un 1.0 EcoBoost turbo con la siguiente ficha técnica (véase Tabla 2) (Km77, 2018).

Combustible	Gasolina
Potencia máxima	140 CV / 104 kW
Revoluciones potencia máxima	6.000 R.P.M.
Par máximo	180 Nm
Revoluciones par máximo	1.500 – 6.000 R.P.M.
Situación (Disposición)	Delantero (Transversal)
N.º Cilindros	3
Disposición de los cilindros	En línea
Material del bloque	Hierro fundido gris
Material de la culata	Aluminio
Diámetro	71,9 mm
Carrera	82mm
Cilindrada	999 $cm^3$
Relación de compresión	10:1
Válvulas por cilindro	4
Tipo de distribución	2 árboles en cabeza
Alimentación	Inyección directa, turbo

Tabla 2: Ficha técnica del motor de serie. Fuente: (Km77, 2018).

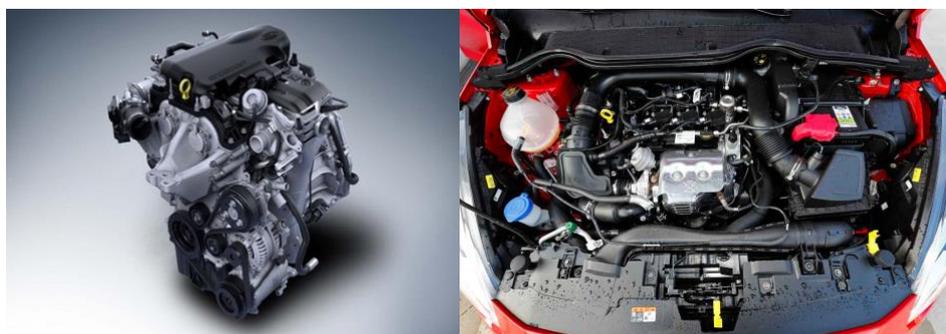


Ilustración 4: (Izq.: Fuera vano / Dcha.: En vano). Fuente: (Villareal, 2012).

Este motor de serie se sustituye por un motor de misma cilindrada ( $999 \text{ cm}^3$ ), capaz de entregar 200 CV de potencia a 6.500 R.P.M. y 290 Nm de par motor a 4.000 R.P.M.

Posterior a esta mejora que se introduce en el motor, M-Sport desarrolla a partir de esta configuración, una evolución del motor que lo mejora y lo adapta para su homologación en la categoría “Rally 4”. Dicha evolución aumenta la potencia que entrega a 210 CV de potencia a 6.500 R.P.M. y su par motor a 315 Nm a 4.000 R.P.M. Así mismo, se debe instalar un intercambiador de calor de aire (Intercooler) en el sistema de admisión, para disminuir la temperatura del aire que se introduce en el motor (considerablemente elevada, debido a la gran compresión a la que es sometido), para evitar riesgos de detonación dentro del motor. La ficha técnica de este motor es la siguiente (véase Tabla 3) (M-Sport, 2019).

Combustible	Gasolina
Potencia máxima	210 CV / 156 kW
Revoluciones potencia máxima	6.500 R.P.M.
Par máximo	315 Nm
Revoluciones par máximo	4.000 R.P.M.
Situación (Disposición)	Delantero (Transversal)
N.º Cilindros	3
Disposición de los cilindros	En línea
Material del bloque	Hierro fundido gris
Material de la culata	Aluminio
Diámetro	71,9 mm
Carrera	82mm
Cilindrada	$999 \text{ cm}^3$
Relación de compresión	10:1
Válvulas por cilindro	4
Tipo de distribución	2 árboles en cabeza
Alimentación	Inyección directa, turbo

Tabla 3:Ficha técnica del motor de competición. Fuente (M-Sport, 2019).

Se lleva a cabo un proceso de aligeramiento de bielas, el cigüeñal, el volante de inercia y los pistones, con el objetivo de reducir las inercias, permitiendo un mayor régimen de giro y un aumento de la potencia.

Los pistones son de los elementos de mayor importancia en el motor. Su cabeza debe asemejarse a la cámara de explosión, con el fin de poder elevar lo máximo posible el índice de compresión sin llegar a la detonación, elevar las

turbulencias en la mezcla con el objetivo de homogeneizar esta lo máximo posible y aumentar la velocidad de los gases de escape.

La zona principal sobre la que se actúa es en la falda, reduciéndola. Con esto se consigue un menor rozamiento con las camisas de los cilindros.



*Ilustración 5: Pistón aligerado (Izq.) / Biela aligerada (Dcha.) Ford Fiesta Rally 4. Fuente: (M-Sport, 2019).*

Las bielas, la zona donde más se podría reducir el peso, es en su parte inferior, donde se ancla al cigüeñal (cabeza). Otra parte que se puede reducir es la zona denominada caña, pero con cuidado de no reducir en exceso su resistencia para que sea capaz de soportar los grandes esfuerzos de funcionamiento del motor. Todo esto se consigue con un pulido

El cigüeñal es otro elemento esencial a la hora de buscar aligerar los componentes del motor y uno de los elementos más importantes del mismo. A pesar de ser un elemento que hoy en día se encuentra bastante optimizado, efectuando una reducción de peso en los contrapesos de este, realizando pequeños taladros y un posterior equilibrado (estático y dinámico). Haciendo que los contrapesos sean más finos y estrechos se consigue una mejor optimización, ya que se reducen las inercias y las fuerzas de fricción (con el aceite al existir una menor superficie de contacto). Otro punto a modificar son las superficies de rodadura aplicándolas un rectificado. Los casquillos es preferible conservar los de serie.

El volante de inercia se aligera en la parte más exterior del centro de giro para reducir las inercias que provoca el movimiento de rotación, pudiendo llegar a eliminar hasta dos tercios del peso original del volante.

Una vez aligerados todos los materiales se debe comprobar que el peso de todos los pistones y todas las bielas que componen el motor sea el mismo, a fin de evitar vibraciones provocadas por fuerzas de desequilibrio. Se debe realizar un equilibrado estático y dinámico de todo el conjunto, ya que si este desequilibrado se obtiene como consecuencia una pérdida de fiabilidad. Todo esto conlleva una mayor frecuencia de revisión y sustitución de elementos,

dado que las tensiones de trabajo que han de soportar se verán incrementadas (Edwardhergett, 2015).

Tras la modificación de los elementos móviles, se realiza la modificación de la culata, ya que la potencia que es capaz de desarrollar un motor de combustión interna es proporcional a la cantidad de combustible mezclado con aire que entra en este. La cantidad de masa de aire que entra en la mezcla y su compresión previa es muy importante para una combustión óptima y completa. Dado que la FIA prohíbe por reglamento la utilización de sistemas de admisión de geometría variable, lo único que se puede hacer para aumentar la masa de aire introducida en la mezcla, es pulir los conductos de la culata tanto de admisión y escape (estos últimos nos ayudan a aumentar la velocidad de los gases quemados). Dado que el proceso de fabricación de este elemento deja rugosidades relativamente grandes, el pulido es la mejor opción. Esto reduce la resistencia de los gases al circular por ellos. Se debe comprobar que no existan diferencias geométricas que provoquen un desequilibrio y una reducción de rendimiento del motor.

El pulido también ensancha los conductos, con lo que se necesita montar válvulas de mayor diámetro y con un ángulo de asiento diferente. La mayoría de los fabricantes utilizan un ángulo de  $45^\circ$  para las válvulas de escape, porque ofrece un cierre rápido y una mejor evacuación del calor. Luego, un ángulo de  $30^\circ$  son más grandes, ya que ofrecen más resistencia, pero ayudan a que la mezcla adquiera mayor velocidad facilitando al llenado del cilindro. Como estas no tienen que aguantar la temperatura y la presión que si aguantan las válvulas de escape se las puede dar esta forma que puede debilitarla.

Para un correcto funcionamiento se le tiene que dar el mismo ángulo de inclinación de la válvula al asiento de culata.

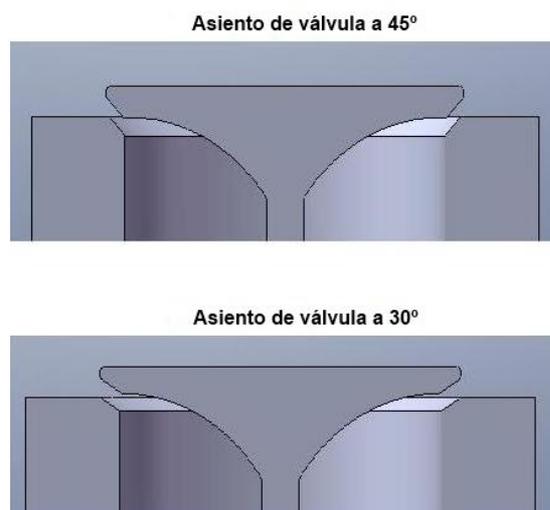


Ilustración 6: Ángulos de asiento de válvulas. Fuente: (Pirata Motor, s.f.).

Los árboles de levas se sustituyen por otros que tienen unas levas que logran una apertura de las válvulas que cumplen lo siguiente:

- Conseguir que la válvula de admisión abra más rápido y cierre más tarde que el sistema diseñado para el motor de uso convencional. Esto permite tener la válvula más tiempo abierta y en su posición más alta, consiguiéndose un mayor llenado del cilindro.
- Aumentar el tiempo en el que la válvula permanece abierta, aumenta el llamado cruce de válvulas (periodo en el tanto la válvula de admisión, como la válvula de escape se encuentran parcialmente abiertas al mismo tiempo). Esto aprovecha mucho más la inercia de los gases, mejorando el llenado y vaciado del cilindro.

El perfil de las levas es el responsable de estos efectos. A parte del tiempo que permanecen levantadas las válvulas, también determinan la manera en la que lo hacen (suave o brusco). En la ilustración 6 se puede ver una comparativa entre los dos tipos de levas, siendo el esquema superior el que corresponde a una leva comercial utilizada en motores de uso convencional y el esquema inferior el que corresponde a una leva utilizada en motores de competición. Se puede observar que, a igual ángulo de giro, la válvula con la leva de competición permanece más tiempo abierta que con la leva comercial.

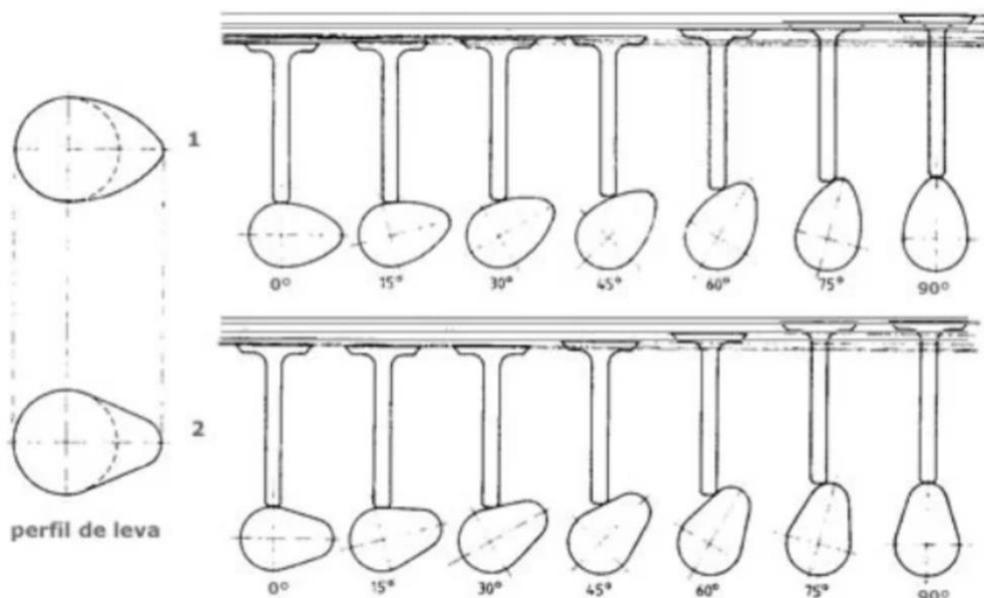


Ilustración 7: Perfil de leva (comercial: arriba / competición: abajo). Fuente (Trucaje de Mototres, s.f.).

En las siguientes graficas (Ilustración 7) se puede observar esta característica, en la que se relaciona el giro del cigüeñal con el levantamiento de la válvula.

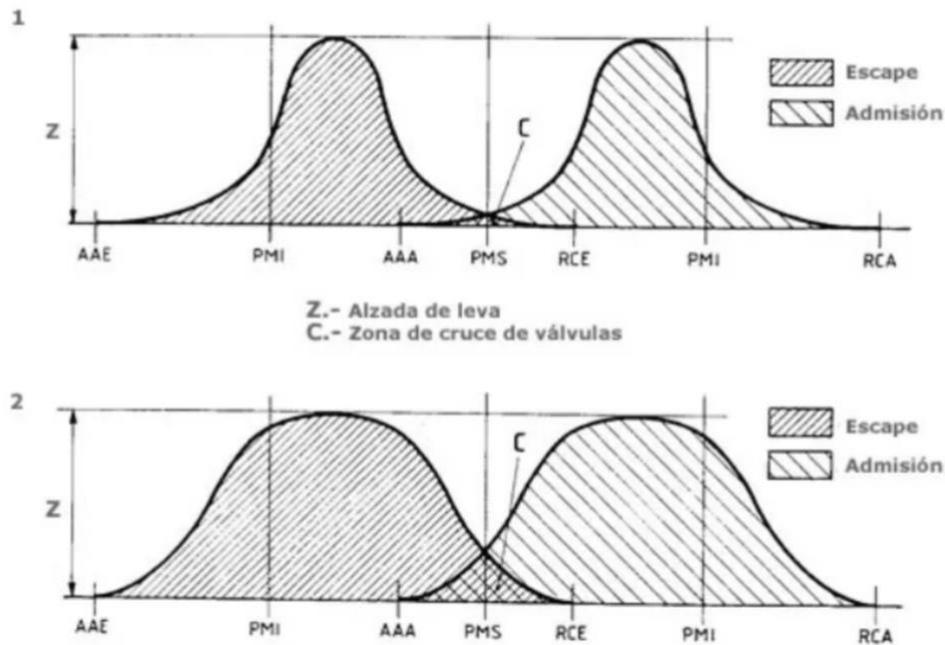


Ilustración 8: Levantamiento de válvulas. Fuente. (Trucaje de Mototres, s.f.).

La mayor superficie ocupada en la gráfica inferior respecto a la de arriba, nos indica una mayor admisión de masa de mezcla. También podemos ver en la parte inferior de ambas gráficas, las superficies que corresponden con el cruce de válvulas.

En un vehículo de rally es importante que el árbol de levas que se monta para optimizar el rendimiento del motor tenga unos valores de apertura y tamaño de levas medio, con el fin de obtener también prestaciones altas a bajos regímenes. La alzada máxima permitida por reglamento es de 11 mm (FIA, 2019).

A la hora de realizar estas modificaciones en las válvulas, es importante tener en cuenta los resortes de estas, para que el cierre sea correcto, ya que al haber cambiado las válvulas por unas de mayor tamaño y el árbol de levas por uno con mayor alzada, este permita un buen funcionamiento del motor. Serán necesarios unos resortes de mayor longitud, diámetro y rigidez

$$K = \frac{Gd^4}{8D^3N}$$

Ecuación 1: Rigidez de un muelle. (Heißing, 2011)

- **d** es el diámetro del hilo [mm].
- **G** es el módulo de elasticidad transversal de Coulomb.
- **D** es el diámetro medio de la espira [mm].
- **N** es el número de espiras útiles.

Los motores que están adaptados a competición tienen un problema con la lubricación debido a las fuertes aceleraciones longitudinales y transversales. Esto puede llevar a que la bomba hidráulica se quede descebada y no sea capaz de enviar lubricante a todas las partes móviles del motor, lo que conlleva un enorme riesgo de gripado. Esto se puede solucionar de dos maneras:

1. Una de ellas es tabicar el cárter de aceite, que como su nombre indica es colocar tabiques que dificulten el movimiento del lubricante y así asegurar el suministro a la bomba (la aspiración siempre se sitúa donde quedaría el aceite cuando el vehículo se encuentra en subida).
2. La opción más usada en competición (y en superdeportivos), en motores de aviación y motores que cambien continuamente de posición, es la denominada cárter seco, en la que el aceite es almacenado en un depósito auxiliar. Esto hace que el tamaño del cárter se reduzca al mínimo y por medio de una bomba de vaciado, el aceite que llega a él se conduce al depósito auxiliar. Este tiene una forma estrechada y suele estar en una zona elevada para que la bomba de suministro pueda devolver el lubricante al motor.

Esta opción está prohibida por la FIA para esta categoría, con lo que se debe emplear la primera opción, en la que el aceite solo podrá fluir por efecto de la gravedad (Gómez, 2020).

Otro punto que se debe modificar son los colectores de admisión y escape. Estos deben oponer la menor resistencia al paso de los gases. Al igual que los conductos de admisión y escape de la culata, a estos también se les realiza un pulido.

La línea de escape que va montada de serie es sustituida por una de competición, hecha para tener un flujo de gases de escape óptimo. La línea de escape de alto rendimiento consta de 3 partes: Un colector de escape 3 en 1, supresor de catalizador y silenciosos. El grosor de los tubos debe ser mayor o igual a 0,9 mm. La sección máxima de estos tubos deberá ser equivalente a la de un tubo con diámetro interior de 60 mm, según el reglamento. Se debe respetar la legislación vigente en cada país en materia de contaminación acústica (FIA, 2019).

La modificación de la ECU para la optimización del motor es un apartado fundamental (unidad central electrónica), ya que controla el sistema de inyección, entre otros. Puede controlar la cantidad de combustible que se introduce al cilindro en cada caso, con tal de sacar en todo momento el máximo rendimiento (la cantidad inyectada en cada momento depende del régimen de giro del motor, posición del pedal del acelerador, presión y más factores).

La ECU también se encarga del sistema de encendido (momento en el que se hace saltar la chispa que provoca la ignición de la mezcla dentro del cilindro). Al igual que la inyección, el momento de encendido también depende de diferentes factores iguales a los anteriores.

El software que utiliza la ECU esta desarrollada por el fabricante para cada motor en concreto, en la que busca la mejor manera de coordinar todos los elementos del motor controlados electrónicamente, para obtener el mejor rendimiento en varios campos: consumo, confort, aceleración, etc.

Cuando se quiere utilizar el motor para competición, esta es sustituida o reprograma con nuevos mapas (Taller Actual, 2020).

Según el reglamento, los elementos de la inyección pueden ser modificados si son posteriores al dispositivo de medición del caudal de aire. A los inyectores de combustible se les puede modificar el caudal, pero no se les puede modificar su principio de funcionamiento ni su montaje. Ocurre lo mismo con la rampa de inyección.

Por último, se debe instalar un sistema de refrigeración del aceite, ya que las temperaturas de trabajo superaran a las que se dan en un motor convencional. La bomba de agua debe ser la original. El radiador de serie se puede sustituir por uno más grande, con la condición de que no puede ir fuera de la carrocería, ni modificarse esta para su colocación, ya que el lugar para ello debe ser el de serie por reglamento (FIA, 2019).



Ilustración 9: Motor Ford Fiesta Rally 4. Fuente: (Race Market, s.f.).

## 2.2. Cálculos de las modificaciones del motor

En este apartado en base a los datos teóricos disponibles se calculan las curvas de potencia y par de fuerza del motor. Como es lógico diferirán de las curvas reales obtenidas en bancos de motor, pero serán lo más aproximadas posibles.

Para la representación se dispondrán en una misma gráfica curvas de potencia del vehículo de serie, la versión R2T19 y la de Rally 4. Las curvas de par de fuerza se dispondrán de igual manera.

La función de potencia utilizada para calcular las curvas de potencia es la siguiente:

$$P = a * \omega + b * \omega^2 + c * \omega^3$$

*Ecuación 2: Función de potencia. (Jazar, 2017).*

Esta función permite conocer la potencia máxima que entrega el motor en cada rango de revoluciones.

El cálculo de los parámetros de la Ecuación 2 es el siguiente:

$$a = \frac{P_m}{\omega}$$

$$b = \frac{P_m}{\omega^2}$$

$$c = \frac{P_m}{\omega^3}$$

*Ecuación 3: Coeficientes de la función de potencia. (Jazar, 2017).*

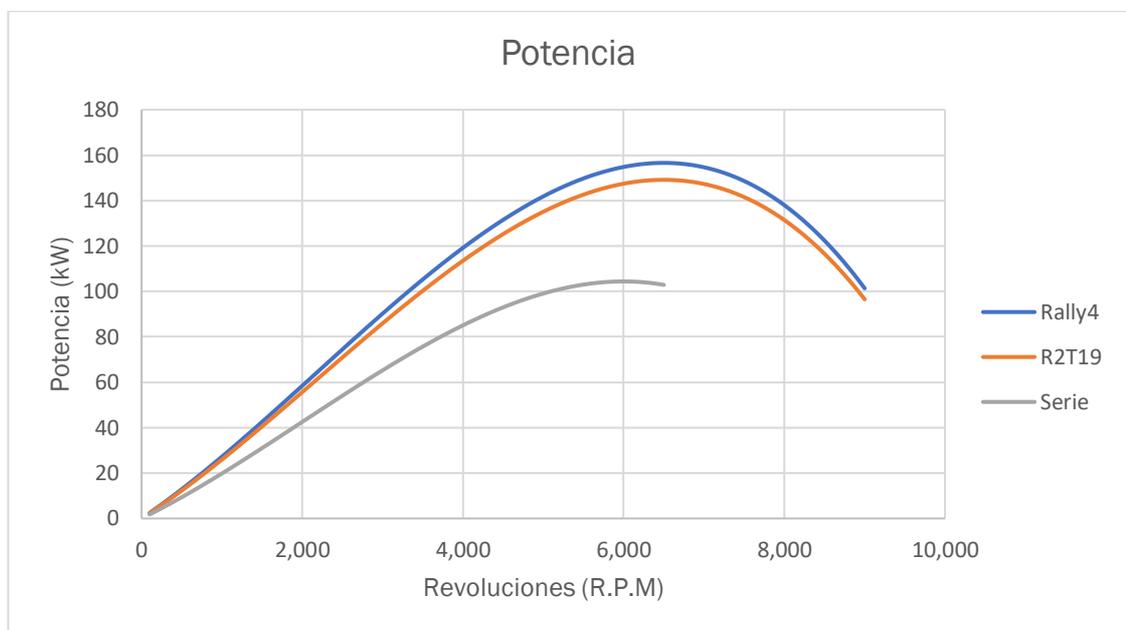
- **P** es la potencia a un cierto número de revoluciones del motor [kW].
- **$\omega$**  son las revoluciones del motor  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ .
- **$P_m$**  es la potencia nominal del motor [kW].
- **a, b y c** son coeficientes de potencia adimensionales.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

	Rally 4	R2T19	Serie
R.P.M.	6.500	6.500	6.000
$\omega_{max}$ (rad/s)	680,67	680,67	628,32
$P_{max}$ (kW)	156,59	149,14	104,39
a	0,2300	0,2191	0,1661
b	0,0003	0,0003	0,0002
c	4,96544E-07	4,72899E-07	4,20874E-07

Tabla 4: Coeficientes para el cálculo de las curvas de potencia

Con los datos de la Tabla 4 se realiza la representación gráfica, obteniéndose los siguientes resultados en la Gráfica 1, en la que se puede ver que los valores de potencia son muy similares a los valores reales indicados en la ficha que proporciona la empresa que desarrolló el vehículo.



Gráfica 1: Representación de las curvas de potencia del motor.

Existe muy poca diferencia entre la versión R2T19 y la versión Rally 4 debido a que esta última es solo una evolución de la anterior.

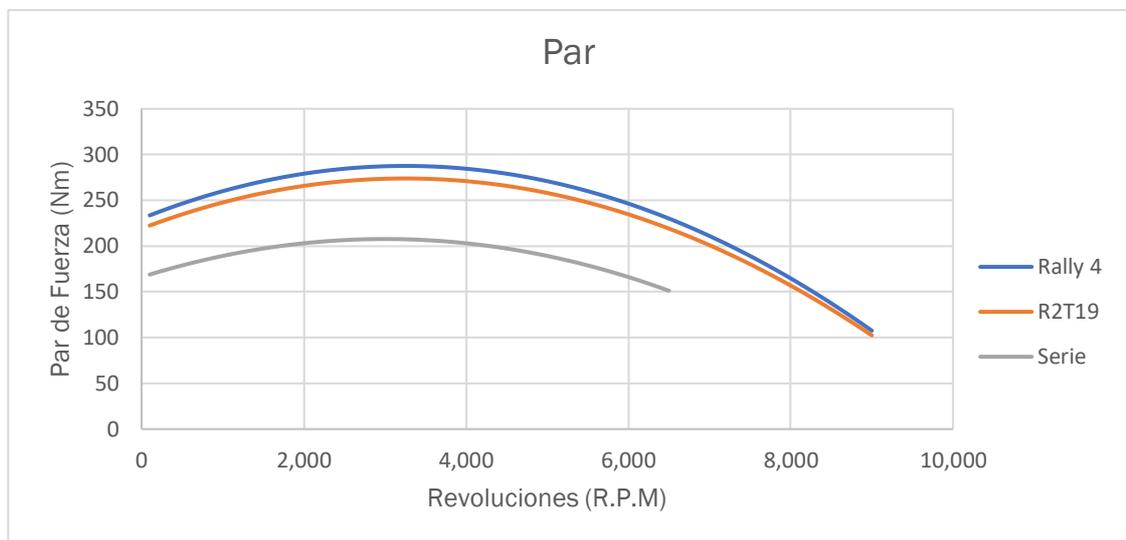
El par de fuerza se calcula a partir del valor de la potencia. La expresión utilizada para su representación gráfica será la siguiente.

$$T = 1000 * \frac{P}{\omega}$$

Ecuación 4: Función de par de fuerza. (Jazar, 2017).

- **T** es el par de fuerza [Nm].
- **P** es la potencia [kW].
- $\omega$  son las revoluciones del motor  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ .

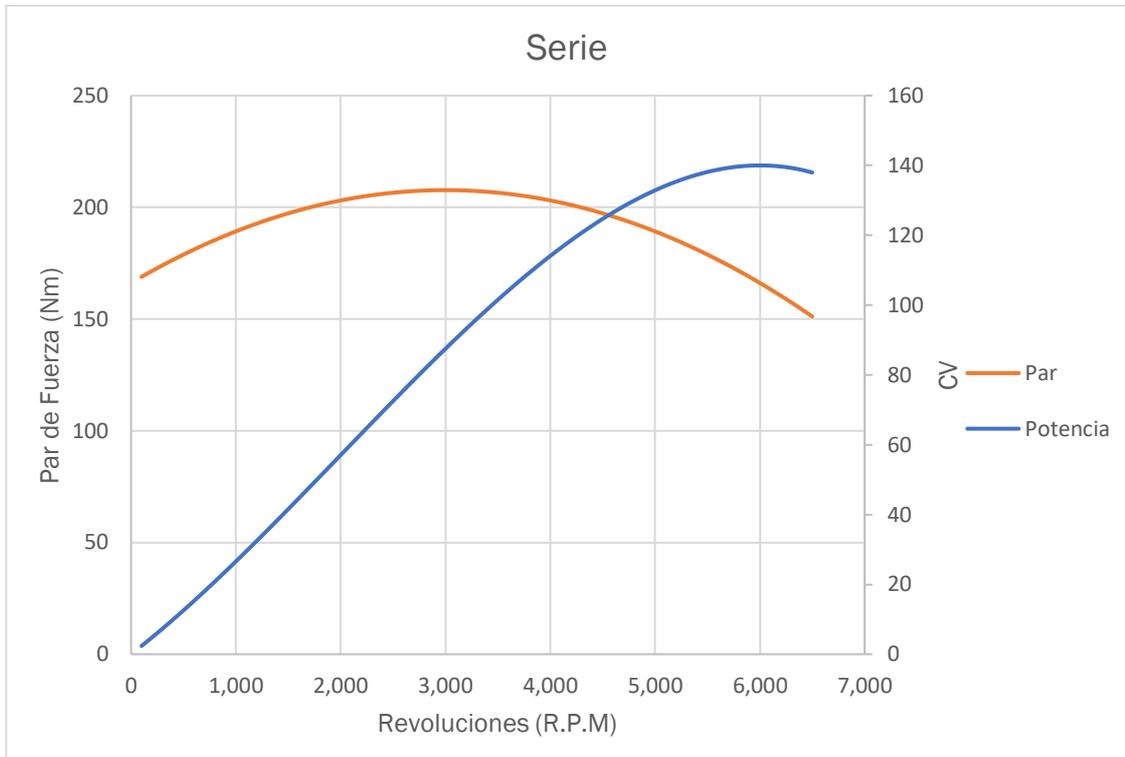
De la misma manera que antes, se representa gráficamente el par de fuerza comparativa entre las tres versiones como se hizo con la potencia. Al no calcular el par de manera independiente de una forma experimental, este diferirá en mayor medida del valor real como se puede observar en la Gráfica 2.



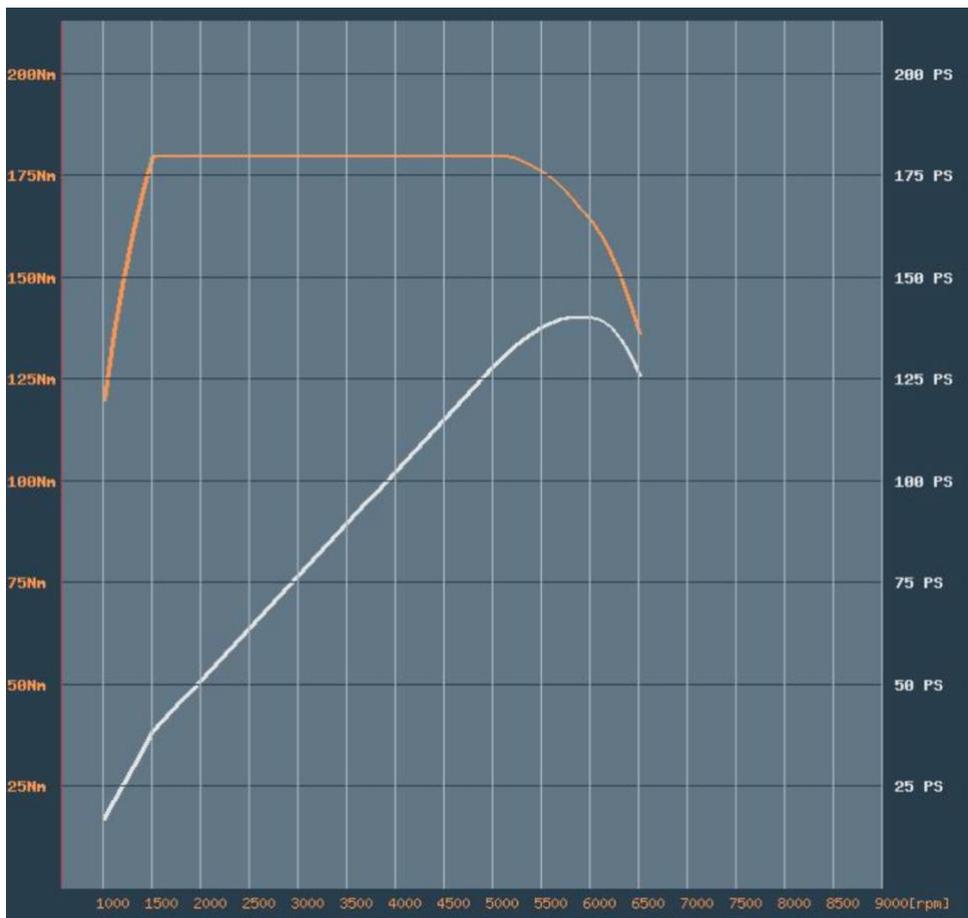
Gráfica 2: Representación de las curvas de par de fuerza.

Las gráficas representadas no son exactamente como las que se podrían obtener en un banco motor. Las gráficas en un banco motor presentan irregularidades y no son totalmente lineales como las que se ven aquí. Esto se debe a que están obtenidas a partir de ecuaciones lineales y con solo unos valores de partida, que en este caso son la potencia máxima y a las revoluciones del motor a las que este la entrega, y a partir de los cuales se han calculado el resto.

Estas dos últimas gráficas (Gráfica 1 y Gráfica 2) muestran la comparativa entre las potencias y los pares de fuerza como ya se ha dicho, pero ahora las siguientes que se observan serán las conjuntas entre potencia (CV) y par de fuerza separadas por versiones. La gráfica perteneciente a la versión de serie (Gráfica 3) se puede comparar con la real realizada en un banco motor (Gráfica 4).



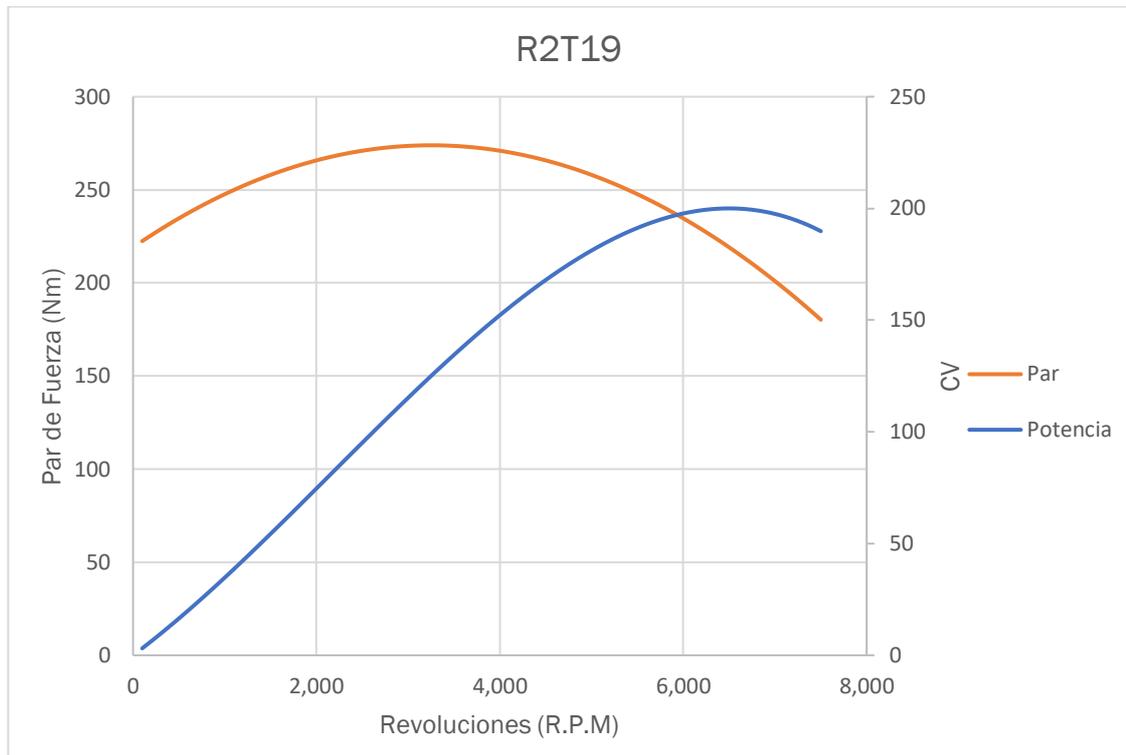
Gráfica 3: Potencia y par de fuerza en el vehículo de serie.



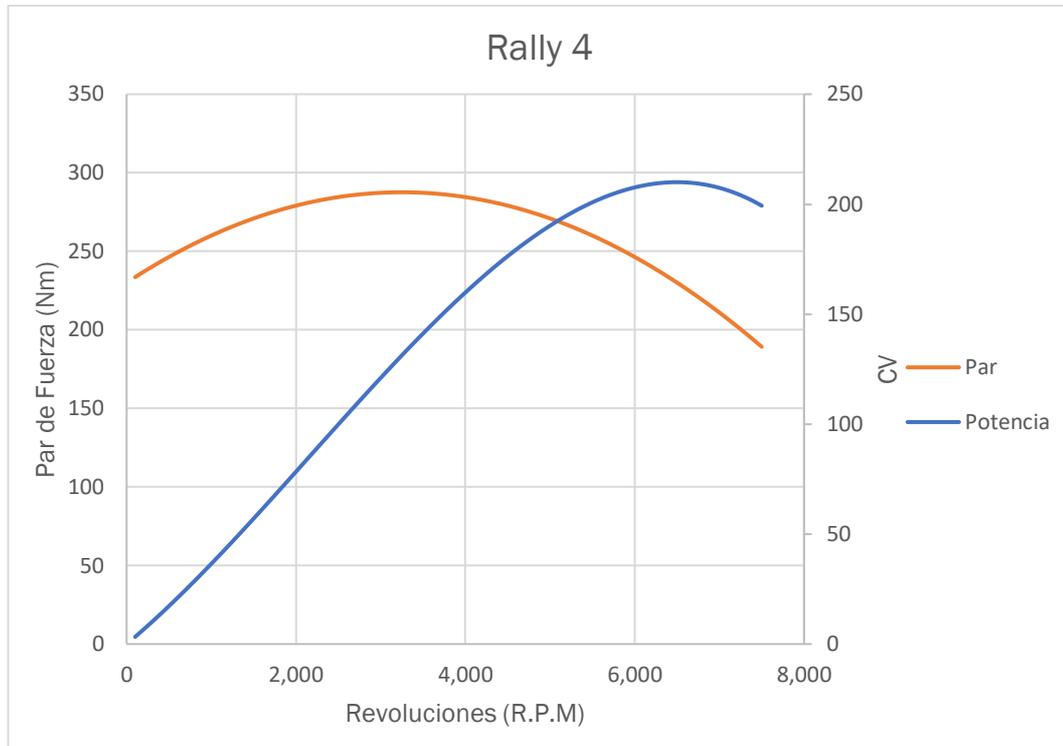
Gráfica 4: Potencia y par de fuerza en el vehículo de serie reales. Fuente (Automobile Catalog, s.f.)

Se puede observar rápidamente como la curva de potencia sí que se asemeja bastante a la obtenida teóricamente, pero la curva del par de fuerza al ser calculada teóricamente en función de la potencia y no independientemente como si se ha hecho en las reales a través del banco motor, se ve como difiere tanto en forma como valores, aunque estos últimos no es muy abultada la diferencia.

A continuación, se mostrarán las mismas gráficas, pero pertenecientes a las versiones R2T19 y Rally 4, (Gráfica 5 y Gráfica 6 respectivamente).



Gráfica 5: Potencia y par de fuerza en la versión R2T19.



Gráfica 6: Potencia y par de fuerza en la versión Rally 4.

### 2.3. Modificación del sistema de transmisión

La transmisión en un vehículo de competición es un sistema muy importante, del que depende un óptimo aprovechamiento del rendimiento que desarrolla el motor. Los elementos que más se deben tener en cuenta son: El embrague, la caja de cambios, la palanca de cambio de marchas, los diferenciales y los árboles y palieres de transmisión.

El embrague es un disco de material de fricción que se sitúa entre el motor y la caja de cambios, encargándose de acoplar y desacoplar estos dos elementos con la finalidad, en el primer caso, de transmitir todo el par de fuerza que es capaz de entregar el motor en cada momento. Y en el segundo caso, separarlos para poder realizar el cambio de marcha o detener el vehículo.

El disco de embrague de serie se sustituye por uno bidisco, de material cerámico con un índice de rozamiento superior al disco que viene montado de serie. Esto proporciona un menor deslizamiento, lo que se traduce en una menor pérdida de potencia transmitida a las ruedas.



Ilustración 10: Disco de embrague Ford Fiesta Rally 4. Fuente: (Rally store, s.f.).

La preparación de la caja de cambios tiene como objetivo reducir al máximo el tiempo empleado en el cambio de velocidades y optimizar las relaciones de desmultiplicación en función de la potencia que es capaz de entregar el motor. La caja de cambios original del vehículo se sustituye por una caja de cambios de marca “Sadev” secuencial de 5 velocidades (además de la marcha atrás). Esta caja de cambios con denominación comercial “SADEV ST7514LW” actualmente es una de las mejores opciones para vehículos con dos ruedas motrices.

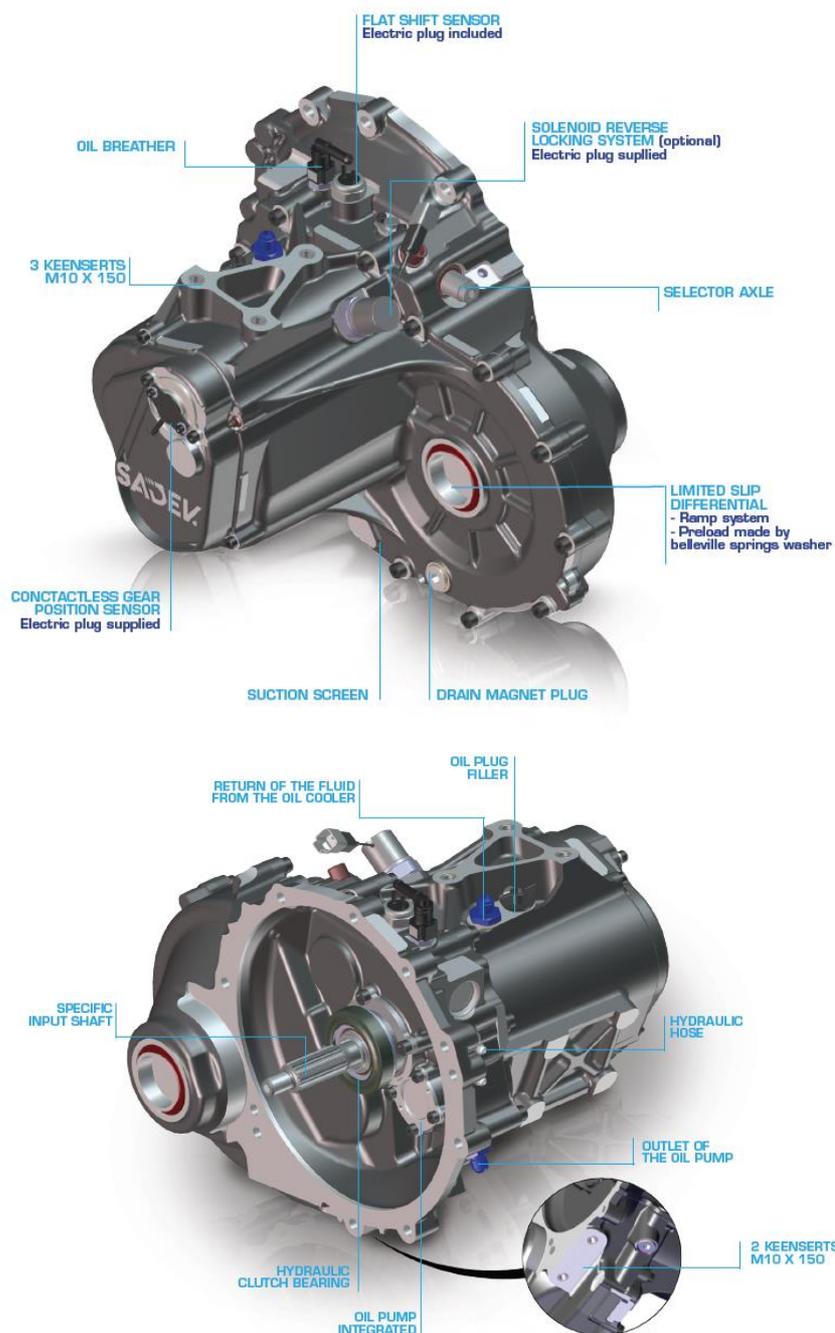


Ilustración 11: Caja de cambios secuencial SADEV ST7514LW. Fuente: (Sadev, s.f.).

El cambio secuencial lo que permite es una reducción de tiempo en el cambio de velocidades al eliminarse el uso del pedal de embrague para poder realizar el cambio (no sería tampoco necesario levantar el pedal del acelerador). El único momento en el que se necesita pisar dicho pedal es en las salidas desde parado.

Este tipo de cajas presentan una gran ventaja, y es que en la modificación de las relaciones de transmisión se ahorra mucho tiempo. Esta caja dispone de tres rampas de transmisión posibles (23/57) (27/57) (32/77). También disponen de más de un diente engranando a la vez con lo que se puede transmitir una mayor potencia. Esto significa que el grado de recubrimiento supera el valor de 2 en todo momento (número medio de dientes que se engranan).

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{g_{\alpha}}{m * \pi * \cos(\alpha)}$$

Ecuación 5: Grado de recubrimiento en engranajes. (Romano & Herráez).

- $g_{\alpha}$  es el arco de conducción.
- $M$  es el módulo.
- $\alpha$ : es el ángulo de la línea de fuerza con la tangente.

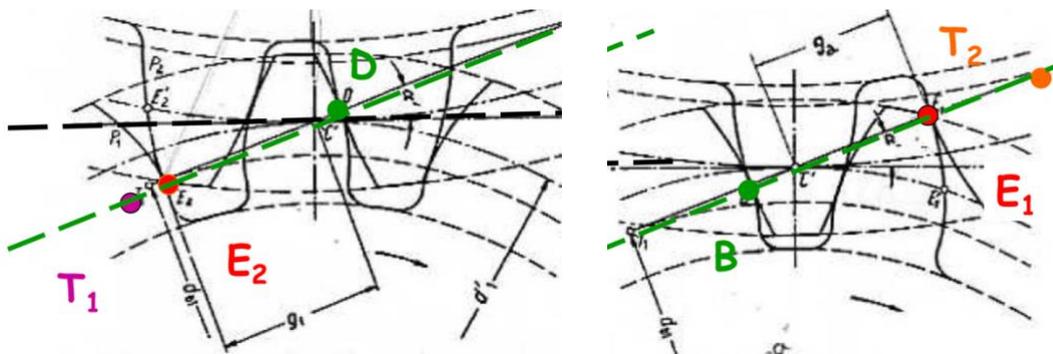


Ilustración 12: Arco de conducción de entrada y de salida. Fuente: (Romano & Herráez).

$$g_{\alpha} = g_f + g_a$$

Ecuación 6: Cálculo del arco de conducción. (Romano & Herráez).

- $g_f$  es el arco de conducción de entrada.
- $g_a$  es el arco de conducción de salida.

Las principales desventajas que presentan este tipo de cajas de cambios es que son más ruidosas y bruscas a la hora de realizar la transición de las velocidades.

La palanca de cambio original se sustituirá por una de tipo secuencial, situada justo a la derecha del volante.

En superficies con alta adherencia como el asfalto, circular a altas velocidades con estos coches se hace realmente complicado. Esto es debido a la similitud de velocidad de giro entre ambos ejes. Esta dificultad se salva cuando se circula sobre terrenos con poca adherencia como tierra o grava, en los que el deslizamiento de las ruedas permite que los ejes giren a diferente velocidad. Al ser tracción delantera, el vehículo solo lleva un diferencial. El diferencial de serie es sustituido por un diferencial deslizante limitado (autoblocante), que lo que permite es diferencias de rotación entre las dos ruedas de un mismo eje, hasta un valor límite en el que se bloquea y hace que ambas ruedas giren con la misma velocidad (Costas, 2015).

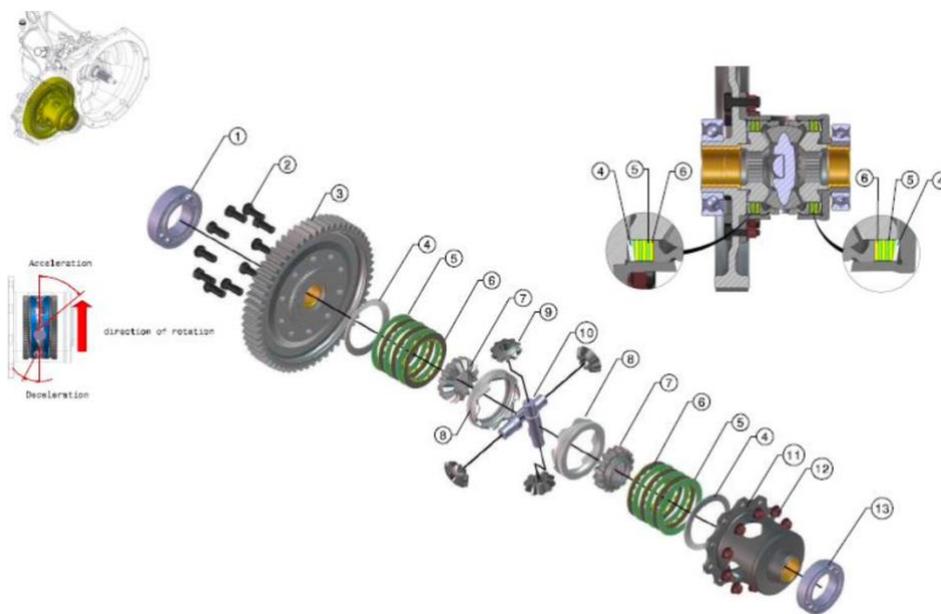


Ilustración 13: Diferencial deslizante limitado Ford Fiesta Rally 4. Fuente: (M-Sport, 2019).

La tara utilizada para el valor límite del diferencial está determinado por el ángulo de hélice de los tres pares de ruedas helicoidales. En este caso se utilizará un tarado de un 40% (muy común en vehículos de competición de estas modalidades).

La diferencia con el diferencial que lleva el vehículo de serie se da en que en el momento que existe una diferencia de adherencia entre las dos ruedas del eje motriz, el par motor se concentra en aquella que menos tiene. Esto lleva a una pérdida de tracción y de estabilidad por parte del vehículo. Con el diferencial autoblocante esto no ocurre, dado que en el momento en que una rueda pierde adherencia, este envía un mayor par a la que mantiene un nivel de adherencia mayor con el terreno.

La instalación del diferencial deslizante limitado junto a separadores de rueda ayuda a reforzar los palieres de la transmisión, evitando el fallo por rotura debido a los mayores esfuerzos a los que van a estar sometidos. Es por esto

por lo que los palieres de serie son sustituidos por otros de mayor resistencia, a parte de las juntas homocinéticas por otras de un mayor tamaño.

## 2.4. Cálculos de las modificaciones del sistema de transmisión

### 2.4.1. Introducción

Para el cálculo de las modificaciones en la transmisión se parte de unos datos teóricos obtenidos de las fichas técnicas de los vehículos. La Tabla 5 muestra los datos del vehículo Rally 4 y del de serie respectivamente.

Datos	valor	
	RALLY 4	SERIE
Cd	0,32	0,32
Área Frontal ( $m^2$ )	2,15	2,14
Peso (N)	10594,8	10594,8
Rc (m)	0,20	0,20
N1	2,83	3,417
N2	1,93	1,96
N3	1,44	1,27
N4	1,15	0,94
N5	0,95	0,75
N6	-	0,63
Nf	2,11	3,94

Tabla 5: Coeficientes para el cálculo de las curvas de transmisión.

- $C_d$  es el coeficiente de penetración aerodinámica.
- $R_c$  es el radio bajo carga del neumático [m].
- $N_t$  son las relaciones de desmultiplicación de las diferentes marchas.
- $N_f$  es la relación de desmultiplicación de grupo fijo.

En base a la velocidad que va alcanzando el vehículo se puede calcular su resistencia a la rodadura con la siguiente expresión:

$$f_r = 0,01 * \left[ 1 + \left( \frac{V * 3600}{160 * 1000} \right) \right]$$

Ecuación 7: Resistencia a la rodadura. (López, Dinámica longitudinal tracción).

- $f_r$  es la resistencia a la rodadura.
- $V$  es la velocidad  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Una vez se ha calculado la resistencia a la rodadura se puede calcular la resistencia al avance, que será representada junto a las curvas de fuerza en los diagramas de tracción. Esta al depender del radio de las ruedas, los diagramas representativos del vehículo de rallyes serán diferentes para asfalto y para tierra, ya que los diámetros de las ruedas cambian dependiendo de la superficie donde tenga lugar el tramo cronometrado de la prueba.

Para el vehículo de serie también serán diferentes por el mismo motivo, aunque en este caso solo existirá una gráfica.

También va a depender de la fuerza que ejerce el motor y que se calcula a continuación.

Para poder representar los diagramas de tracción se necesita trabajar con las revoluciones del motor en  $\frac{rad}{s}$  y calcular la potencia máxima que se entrega en llanta a cada rango de revoluciones. Para ello se utiliza la Ecuación 2 y la Ecuación 3 para calcular las curvas de potencia del motor. Pero a la Ecuación 2 se tiene que realizar una pequeña modificación, ya que esas ecuaciones corresponden a la potencia entregada por el motor. Se necesita incluirle el rendimiento (Tabla 6) de la transmisión, que será diferente para el vehículo de serie y para la versión rally 4.

	RALLY 4	SERIE
$\eta$	0,89	0,86

Tabla 6: Rendimientos de la transmisión

La Ecuación 2 modificada quedaría de la siguiente manera:

$$P = (a * \omega + b * \omega^2 + c * \omega^3) * \eta$$

Ecuación 8: Potencia en llanta. (Jazar, 2017).

Para calcular el par de fuerza se utiliza la Ecuación 4, en la que utilizamos la potencia obtenida en la Ecuación 8.

Una vez se tiene estos datos, se calcula la fuerza de tracción en llanta que ejerce el motor en cada marcha que este engranada para cada rango de revoluciones. Para ello se utiliza la siguiente expresión.

$$F = \frac{T * N_t * N_f * \eta_{tf}}{R_c}$$

Ecuación 9: Fuerza de tracción en rueda. (López, Dinámica longitudinal tracción).

- $T$  es el par de fuerza en [Nm].
- $N_t$  es la relación de desmultiplicación de la marcha correspondiente.
- $N_f$  es la relación de desmultiplicación de grupo fijo.
- $\eta_{tf}$  es el rendimiento de la cadena cinemática.
- $R_c$  es el radio bajo carga del neumático [m].

Ahora que se tiene la fuerza calculada, se calcula la resistencia al avance en llanta. Se utiliza la siguiente expresión:

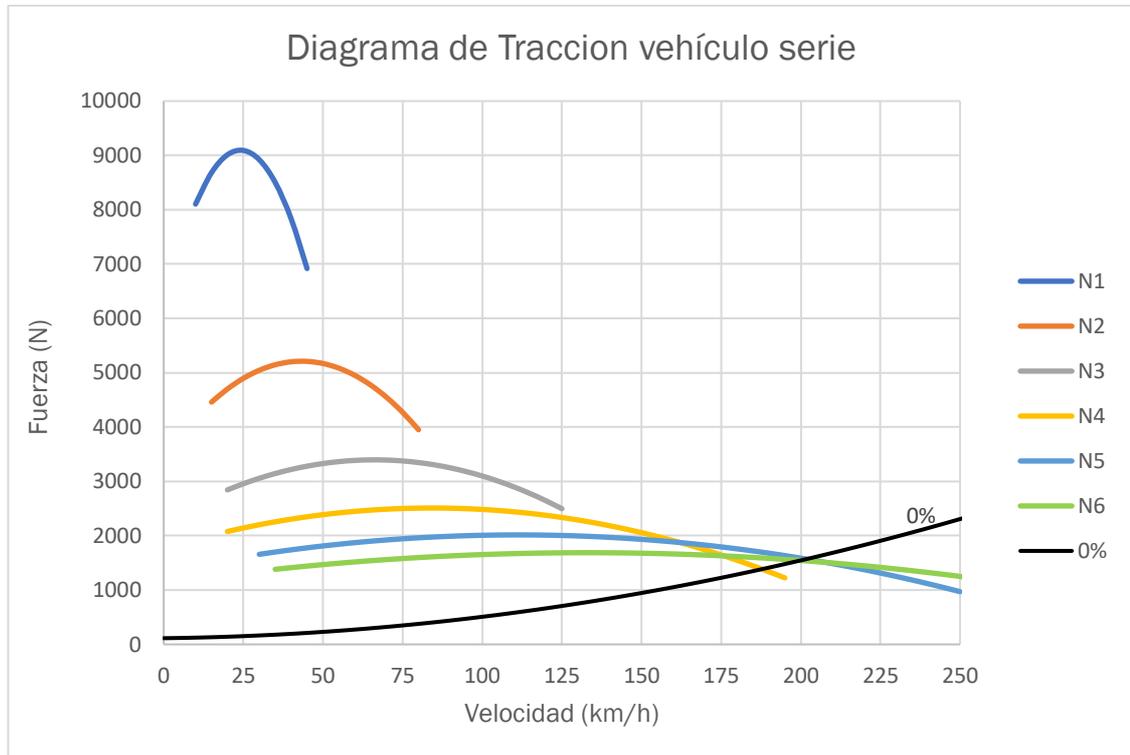
$$\Sigma R = W * f_r * \text{Cos}\theta + \frac{1}{2} * \rho * C_d * A * V^2 + W * \text{Sen}\theta$$

*Ecuación 10: Resistencia al avance en llanta. (López, Dinámica longitudinal tracción).*

- $\Sigma R$  es la resistencia al avance en llanta.
- $f_r$  es el coeficiente de resistencia a la rodadura.
- $W$  es el peso [N].
- $\theta$  es la inclinación de la calzada [grados °].
- $\rho$  es la densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
- $C_d$  es el coeficiente de penetración aerodinámica.
- $A$  es el área frontal del vehículo  $[m^2]$ .
- $V$  es la velocidad del vehículo  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

#### 2.4.2. Diagramas de tracción

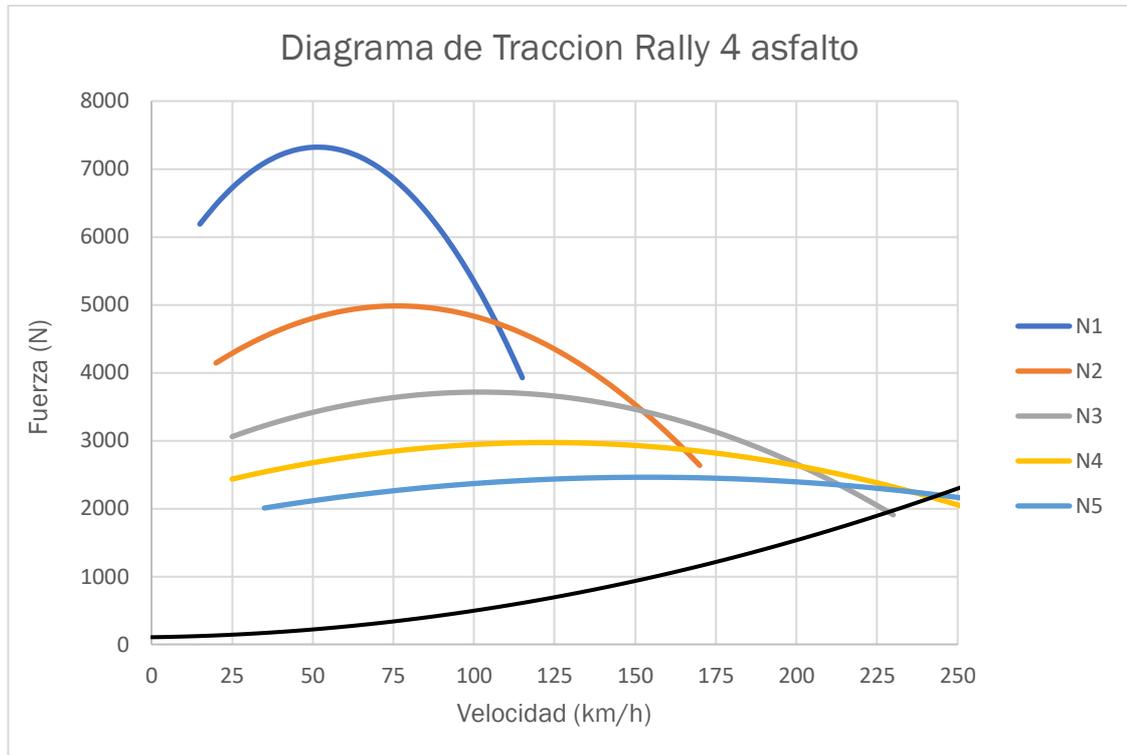
Con todos estos datos se representan los diagramas de tracción (fuerza en llanta - velocidad). La Gráfica 7 corresponde al vehículo de serie, la Gráfica 8 al Rally 4 con configuración de asfalto y la Gráfica 9 al Rally 4 con configuración de tierra.



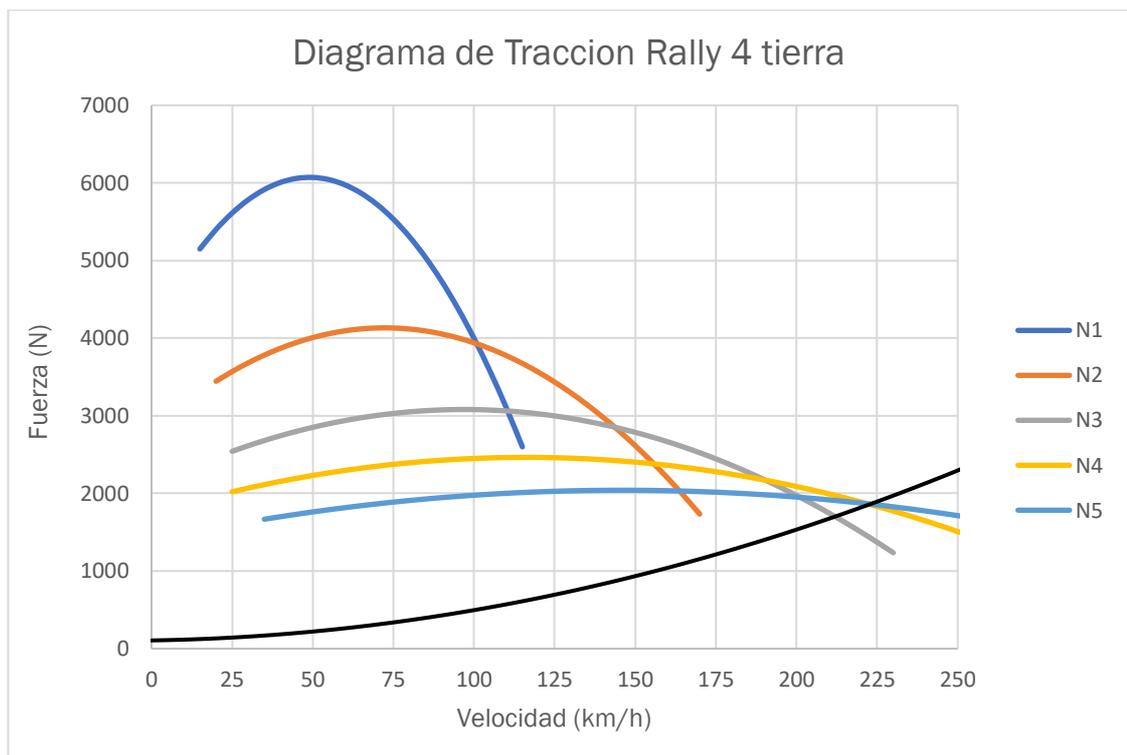
Gráfica 7: Diagrama de tracción correspondiente al vehículo de serie.

Se puede apreciar que en llano (0% de pendiente representado por la línea negra) corta con las líneas de la 5° y 6° marcha aproximadamente a  $202 \frac{km}{h}$ , velocidad que se comprueba que alcanza aplicando la Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4 realizando un cambio óptimo de marcha llegando al máximo de revoluciones permitido por la centralita. Como se indica en la Tabla 4, esta corta a 6.000 R.P.M.

En las siguientes graficas que se mostraran (Gráfica 8 y Gráfica 9) se puede ver la modificación que se le hizo al vehículo para competir.



Gráfica 8: Diagrama de tracción Rally 4 con configuración de asfalto



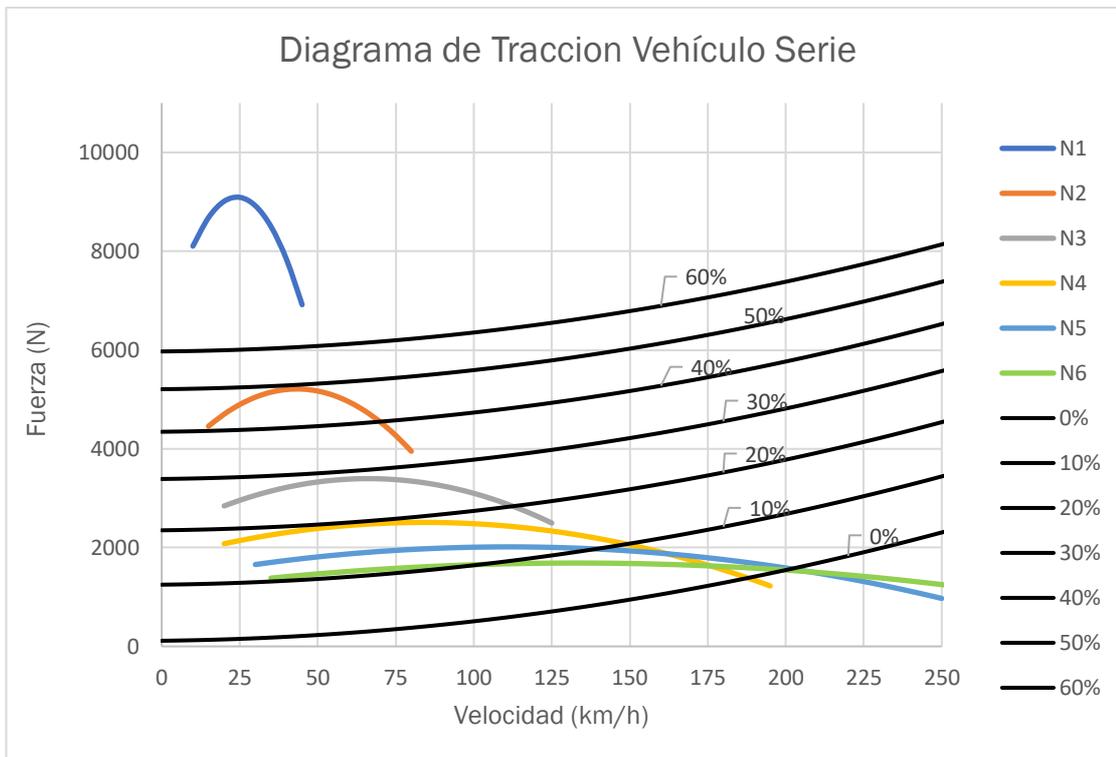
Gráfica 9: Diagrama de tracción Rally 4 con configuración de tierra.

En la comparación entre las dos configuraciones de la versión Rally 4, la más destacable se encuentra en la velocidad máxima que alcanza el vehículo en llano. Mientras que en la configuración de asfalto este alcanza aproximadamente de  $248 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , en la de tierra su velocidad punta es aproximadamente de  $215 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . La centralita no distingue las diferentes configuraciones y corta en ambos casos a 6.500 R.P.M. como se indica en la Tabla 4. Esto es debido en gran medida a la diferencia de diámetros de rueda que se monta en cada configuración. Otra diferencia para destacar está en la fuerza de tracción, en la que la configuración de tierra es quien la tiene ligeramente más grande para cada marcha.

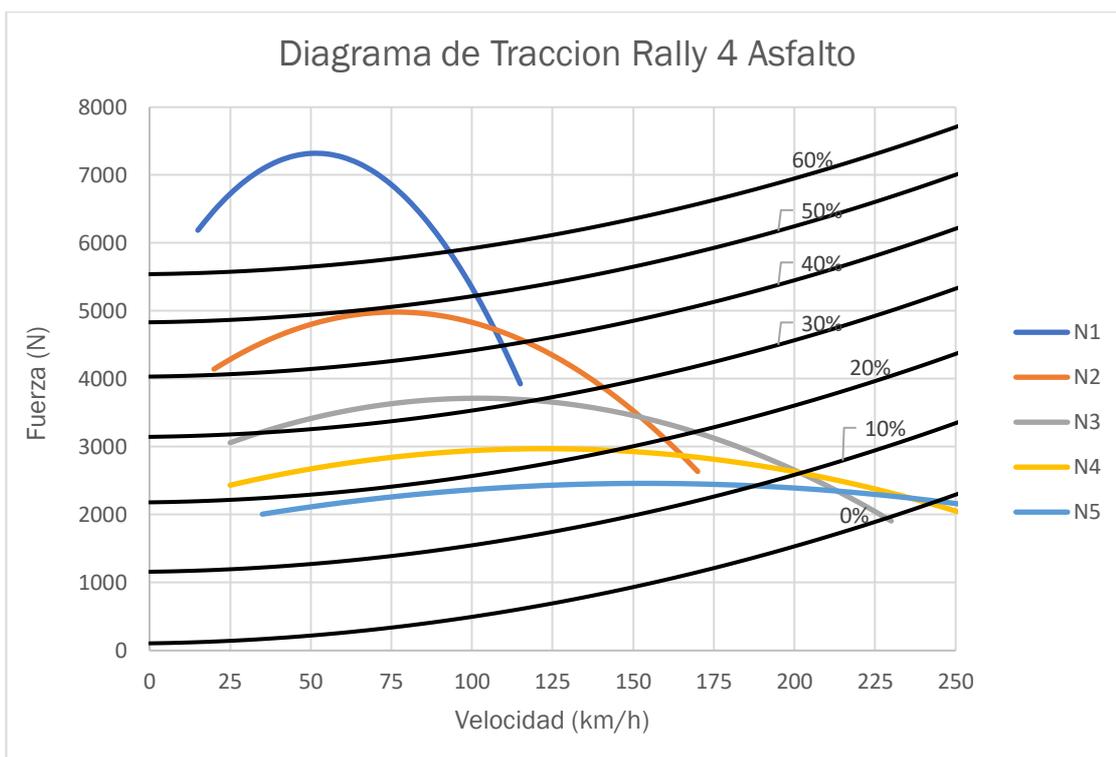
Ahora si se compara con el vehículo de serie, se ve que las fuerzas de tracción en las dos primeras marchas son significativamente superiores, en las marchas intermedias son similares a la versión de rally y para marchas largas es inferior. Esto se debe a que un vehículo de serie tiene que estar preparado para poder afrontar pendientes de mayor porcentaje de inclinación, cosa que un vehículo de rally no. En las marchas largas esto se invierte debido a que en un turismo de serie este tiene que procurar tener un consumo bajo y optimo, siendo esta una característica sacrificada en uno de rally.

A continuación, se mostrarán las gráficas en las que aparecen más curvas de la resistencia al avance en llanta, concretamente desde un 0% de pendiente hasta un 60% en intervalos de 10. La Gráfica 10 corresponde al vehículo de serie, la Gráfica 11 a la versión Rally 4 con configuración de asfalto y la Gráfica 12 a la versión Rally 4 con configuración de tierra.

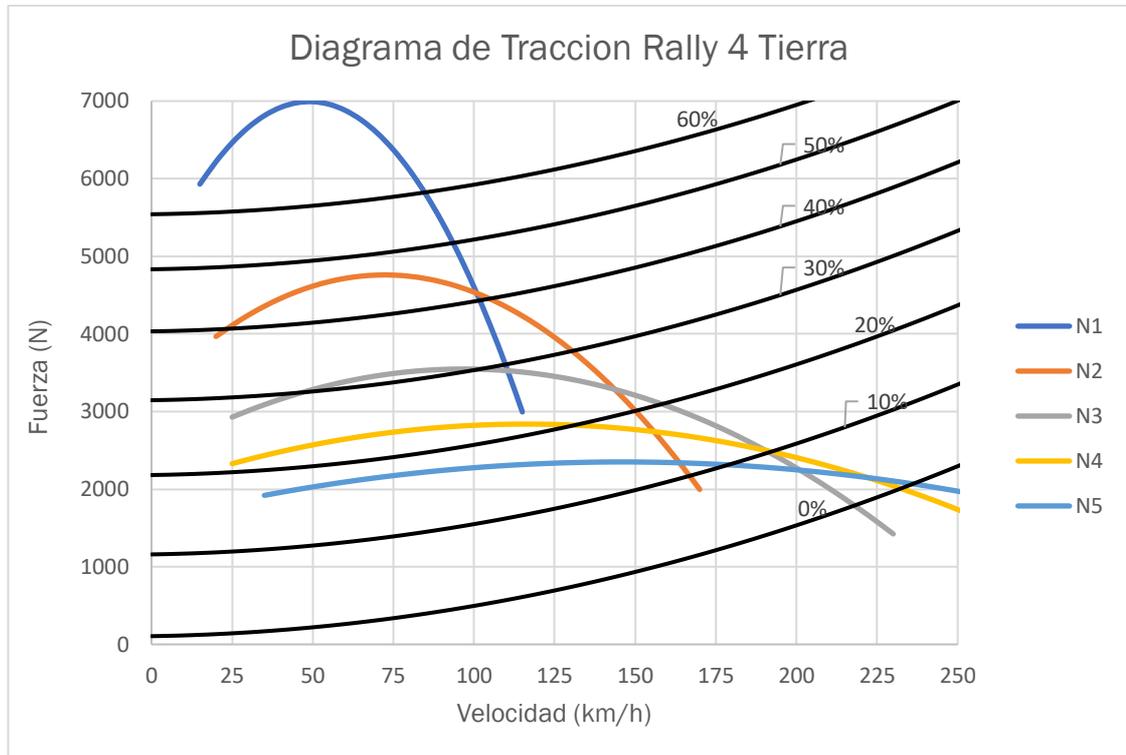
En ellas se puede ver en que marcha podría subir el coche cada cierto porcentaje de pendiente y que fuerza necesitaría para ello. Una conclusión que se puede sacar de las siguientes graficas es que para el vehículo de serie no le supone problemas pendientes pronunciadas, ya que podría subirlas en las marchas más cortas, pero las versiones de rally ya empiezan a tener problemas. Esto es por lo que se explicó en el párrafo anterior.



Gráfica 10: Diagrama de tracción del vehículo de serie con diferentes resistencias al avance en llanta.



Gráfica 11: Diagrama de tracción del Rally 4 en asfalto con diferentes resistencias al avance en llanta.



Gráfica 12: Diagrama de tracción del Rally 4 en tierra con diferentes resistencias al avance en llanta.

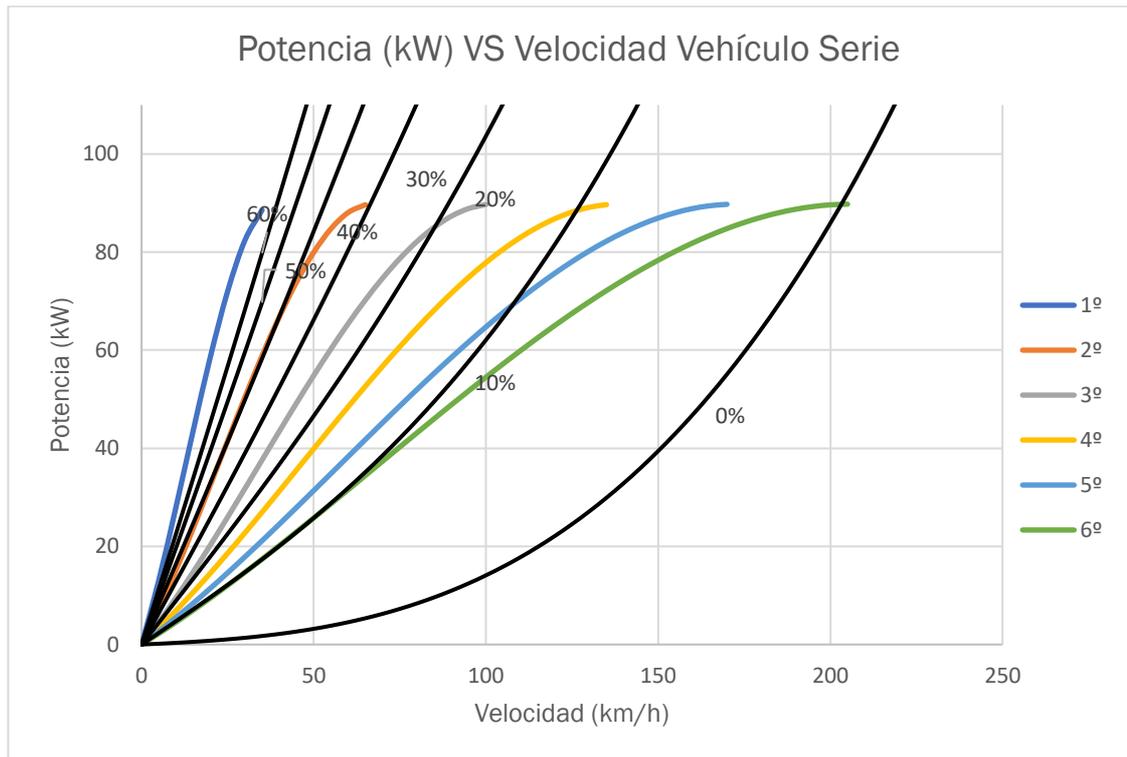
Otra manera de representar el diagrama de tracción es con la potencia en llanta frente a la velocidad. La Gráfica 13 corresponde al vehículo de serie, la Gráfica 14 al Rally 4 con configuración de asfalto y la Gráfica 15 al Rally 4 con configuración de tierra.

En este caso para poder representar las curvas de la pendiente en función de la potencia, se utiliza la siguiente expresión que es una modificación de la Ecuación 9. De esta manera el resultado se proporciona en Watios.

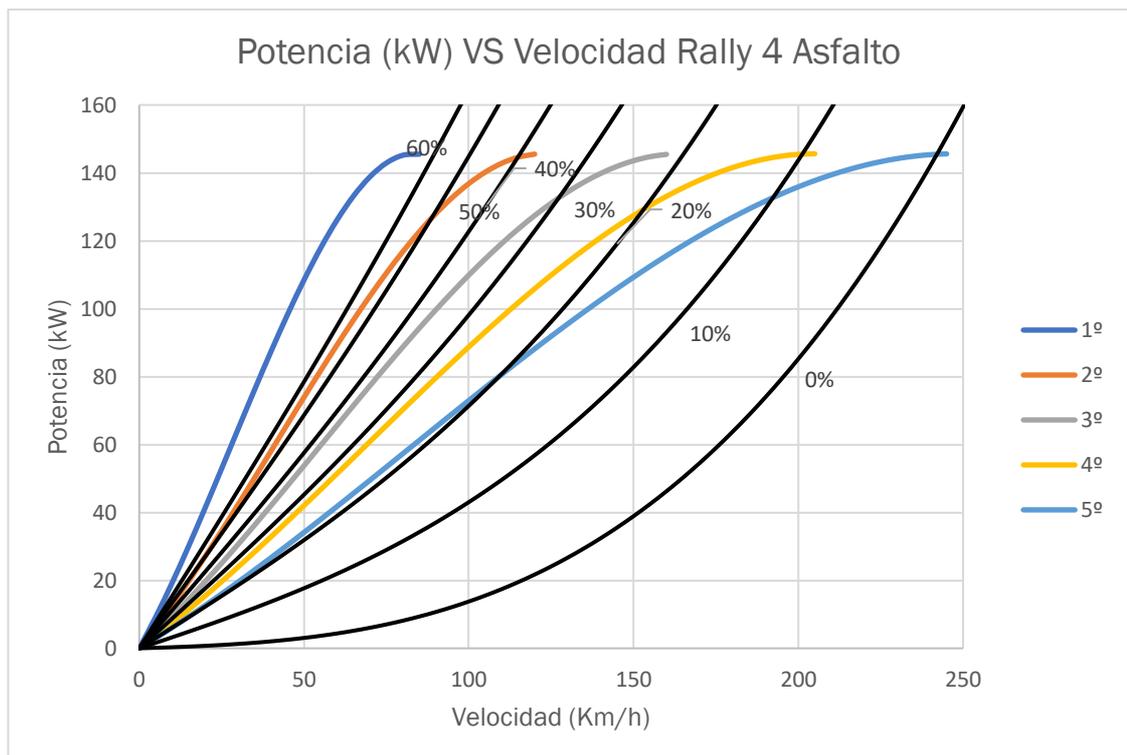
$$P = \left( W * f_r * \text{Cos}\theta + \frac{1}{2} * \rho * C_d * A * V^2 + W * \text{Sen}\theta \right) * \frac{V}{1000}$$

Ecuación 11: Potencia en llanta necesaria para vencer las resistencias al avance. (López, Dinámica longitudinal tracción).

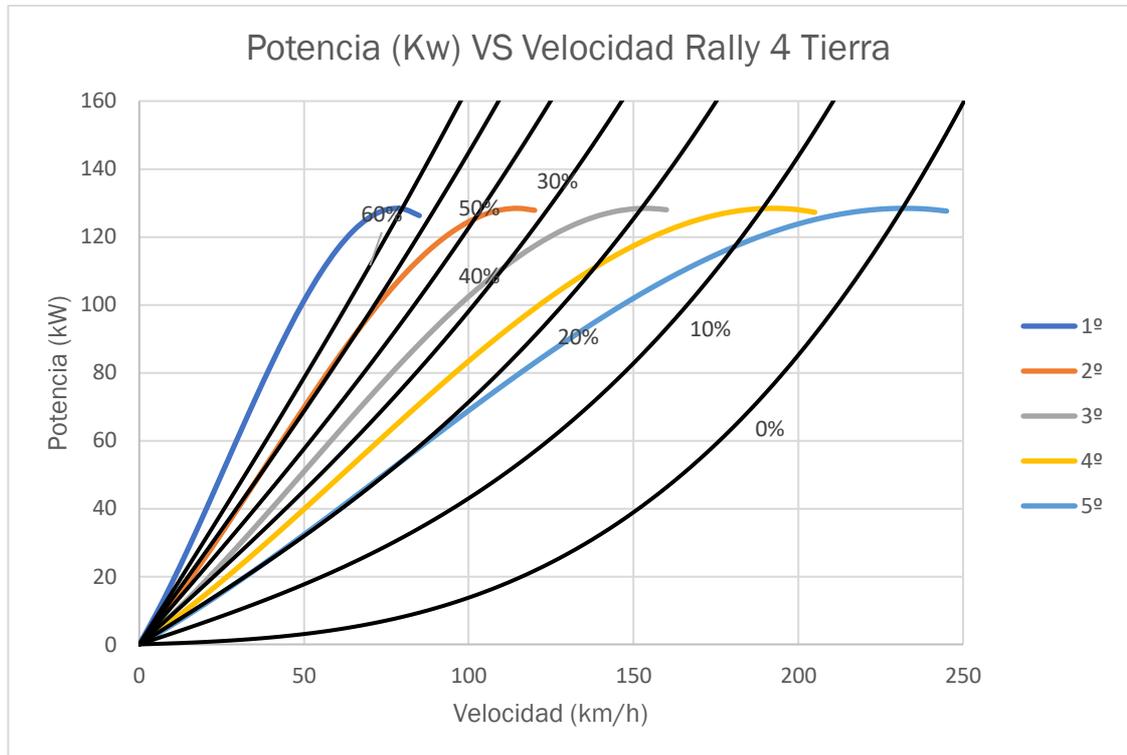
- **P** es la Potencia de avance en llanta.
- **$f_r$**  es el coeficiente de resistencia a la rodadura.
- **W** es el peso [N].
- **$\theta$**  es la inclinación de la calzada [grados °].
- **$\rho$**  es la densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
- **$C_d$**  es el coeficiente de penetración aerodinámica.
- **A** es el área frontal del vehículo  $[m^2]$ .
- **V** es la velocidad del vehículo  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .



Gráfica 13: Diagrama de Potencia en llanta correspondiente al vehículo de serie.



Gráfica 14: Potencia en llanta correspondiente al Rally 4 con configuración de asfalto.



La interpretación de estas gráficas es que se puede observar que potencia necesita para poder subir los diferentes porcentajes de pendiente. Se comprueba en las tres gráficas anteriores que las curvas de pendiente cortan prácticamente en el pico de potencia en llanta que ofrece cada marcha.

Para entender mejor esto último, se observa la Ilustración 14. En ella se tiene tres posibles configuraciones, que van a depender de las características que se persiga como objetivo en la entrega de potencia en llanta de nuestro vehículo. La curva cóncava representaría la pendiente que tiene que superar y las otras dos pendientes representan las curvas de potencia en llanta en función de la velocidad para las marchas del vehículo. El punto “B” corresponde con un diseño óptimo, el punto “A” a un diseño de un vehículo que tiende a ser deportivo y el punto “C” con uno que tiende a tener un criterio más económico en el consumo de combustible.

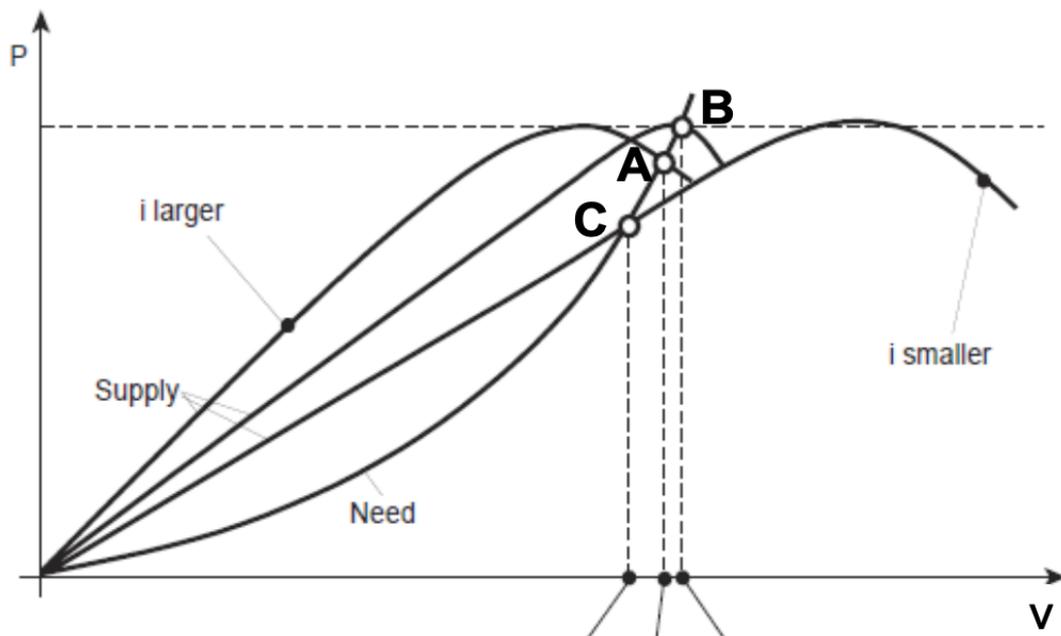


Ilustración 14: Configuraciones de la entrega de potencia en llanta. Fuente: (Gillespie, 2021 revised edition)

### 2.4.3. Aceleración

Otro apartado que se debe tener en cuenta es la aceleración del vehículo. Aquí se encuentra otra modificación en la versión de rally con respecto a la de serie. Las siguientes gráficas muestran el tiempo que tarda cada versión por separado en alcanzar su velocidad máxima, siendo la Gráfica 16 la que corresponde a la versión de serie. La Gráfica 17 ya corresponde a la configuración de asfalto del vehículo de rally y la Gráfica 18 a la configuración de tierra.

La aceleración longitudinal máxima de un vehículo de motor se ve limitada por uno de dos factores: la potencia del motor o los límites de tracción en las ruedas motrices. El factor predominante depende de la velocidad del vehículo, siendo la tracción de los neumáticos el factor limitante a bajas velocidades, mientras que la potencia del motor puede ser el factor limitante a altas velocidades (Gillespie, 2021 revised edition).

En la versión de serie se han introducido el tiempo de los cambios de velocidad, en los que la velocidad no se ve prácticamente modificada, pero sí que afectan al tiempo de aceleración. Un conductor promedio de automóviles con cambio manual requiere de un lapso que oscila en el intervalo entre  $500 \mu s$  y  $1$  segundo. Para realizar la gráfica se ha supuesto la media de ese intervalo que son  $750 \mu s$ .

Las versiones de rally al tratarse de cambio secuencial de doble embrague, este no requiere de lapsos de tiempo en el cambio de marcha. El doble embrague tiene la peculiaridad de que antes de desembragar una marcha, el segundo disco embraga con la siguiente velocidad, entonces no se ve afectada la aceleración del vehículo respecto al tiempo, ya que no existe interrupción en la transmisión de la fuerza del motor. Esto lo hace porque un disco funciona con las marchas pares y el otro con las marchas impares. Existen dos marchas engranadas al mismo tiempo, pero solo una está embragada.

Para calcular el tiempo de aceleración se necesita calcular varios parámetros. Uno de ellos el coeficiente de masas rotativas cuya expresión es la siguiente:

$$M_r = [(I_e + I_t) * N_t^2 * N_f^2 + I_d * N_f^2 + I_w] * \frac{1}{r^2}$$

*Ecuación 12: Coeficiente de masas rotativas. (López, Dinámica longitudinal tracción).*

- $M_r$  es la masa equivalente a los componentes giratorios del automóvil [kg].
- $I_e$  es la inercia de rotación del motor [ $kg * m^2$ ].
- $I_t$  es la inercia de rotación de la transmisión desde el motor [ $kg * m^2$ ].
- $N_t$  es la relación de desmultiplicación de la marcha correspondiente.
- $N_f$  es la relación de desmultiplicación del grupo fijo.
- $I_d$  es la inercia de rotación del árbol de transmisión [ $kg * m^2$ ].
- $I_w$  es la inercia de rotación de las ruedas y del semieje de transmisión [ $kg * m^2$ ].
- $r$  es el radio de rodadura del neumático [m].

Esta expresión daría un resultado muy preciso, pero al no disponer de los datos de las inercias de los componentes giratorios de la cadena cinemática, se utiliza una expresión simplificada.

$$K = 1 + 0,04 + 0,0025 * N_t^2 * N_f^2$$

*Ecuación 13: Expresión simplificada del coeficiente de masas rotativas. (López, Dinámica longitudinal tracción).*

Con esta expresión se obtienen los siguientes resultados para las dos versiones, indicadas en la Tabla 7.

	SERIE	RALLY 4 ASFALTO
K1	1,4485	1,1294
K2	1,1741	1,0814
K3	1,0969	1,0630
K4	1,0711	1,0547
K5	1,0600	1,0501
K6	1,0540	-

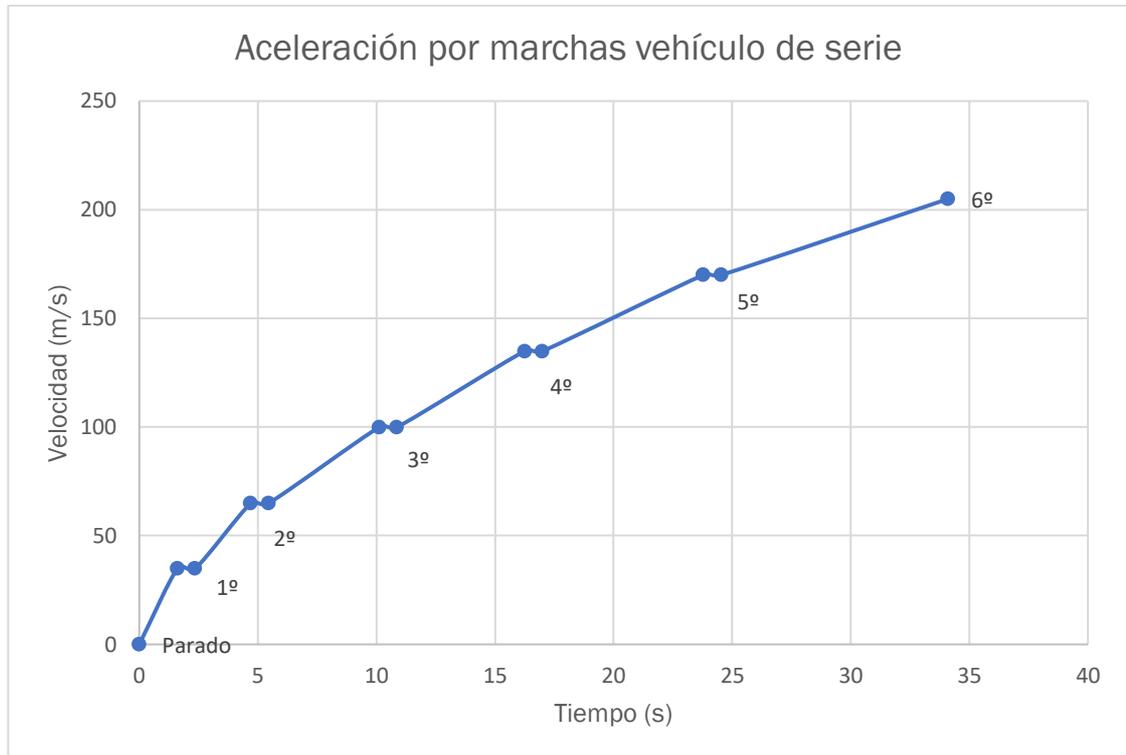
Tabla 7: Coeficientes de masas rotatorias.

Con estos coeficientes se calcula la inversa de la fuerza (Ecuación 9) a la que se va a multiplicar por el coeficiente de masas rotativas y por la masa del vehículo, para calcular el tiempo que tarda en acelerar en cada marcha. Para ello se utiliza la siguiente expresión.

$$t = K_t * M * \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{F_{Neta}} * dv$$

Ecuación 14: Curva velocidad – tiempo. (López, Dinámica longitudinal tracción)

- $K_t$  es el coeficiente de masas rotativas de la marcha correspondiente.
- $M$  es la masa del vehículo [kg].
- $F_{Neta}$  es la fuerza de tracción en llanta

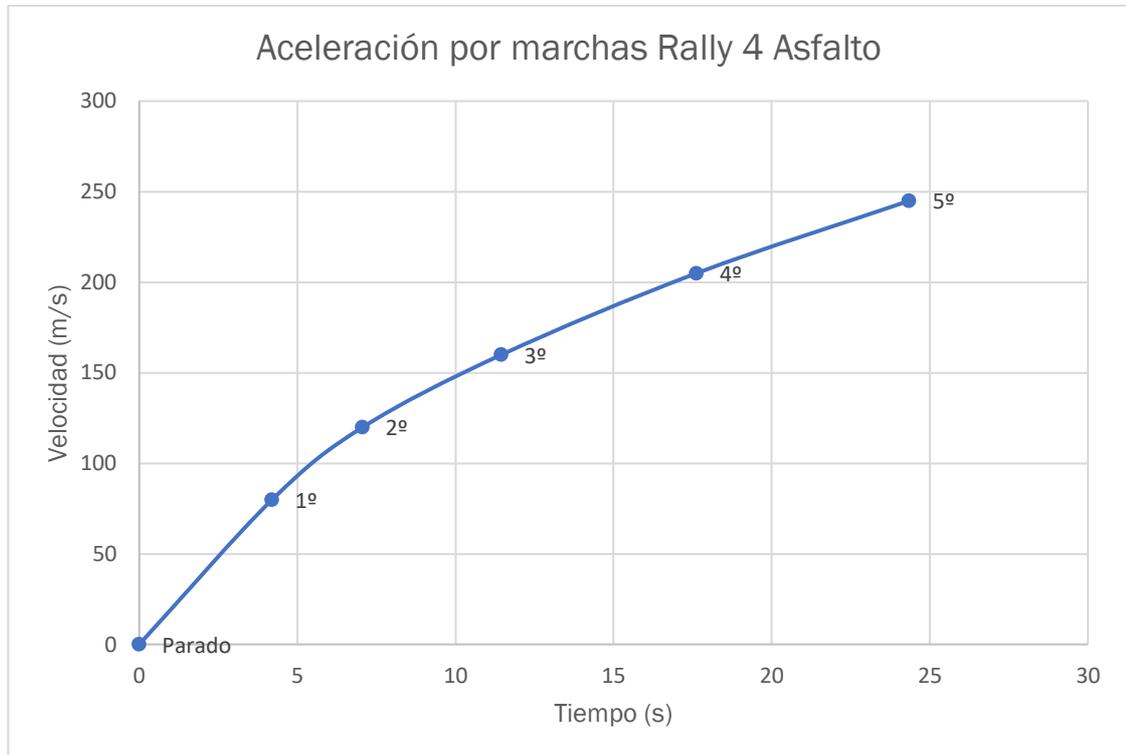


Gráfica 16: Aceleración del vehículo de serie.

Los tiempos exactos y las velocidades a las que se efectúan los cambios de marcha se observan en la Tabla 8.

	1º	1º-2º	2º	2º-3º	3º	3º-4º	4º	4º-5º	5º	5º-6º	6º
Tiempo por Marcha (s)	1,618	0,75	2,343	0,75	4,664	0,75	5,386	0,75	6,783	0,75	9,565
Tiempo Acumulado (s)	1,618	2,368	4,711	5,461	10,125	10,875	16,262	17,012	23,795	24,545	34,111
Velocidad $\left(\frac{km}{h}\right)$	35	35	65	65	100	100	135	135	170	170	202

Tabla 8: Tiempos y velocidades en el cambio de marchas del vehículo de serie.

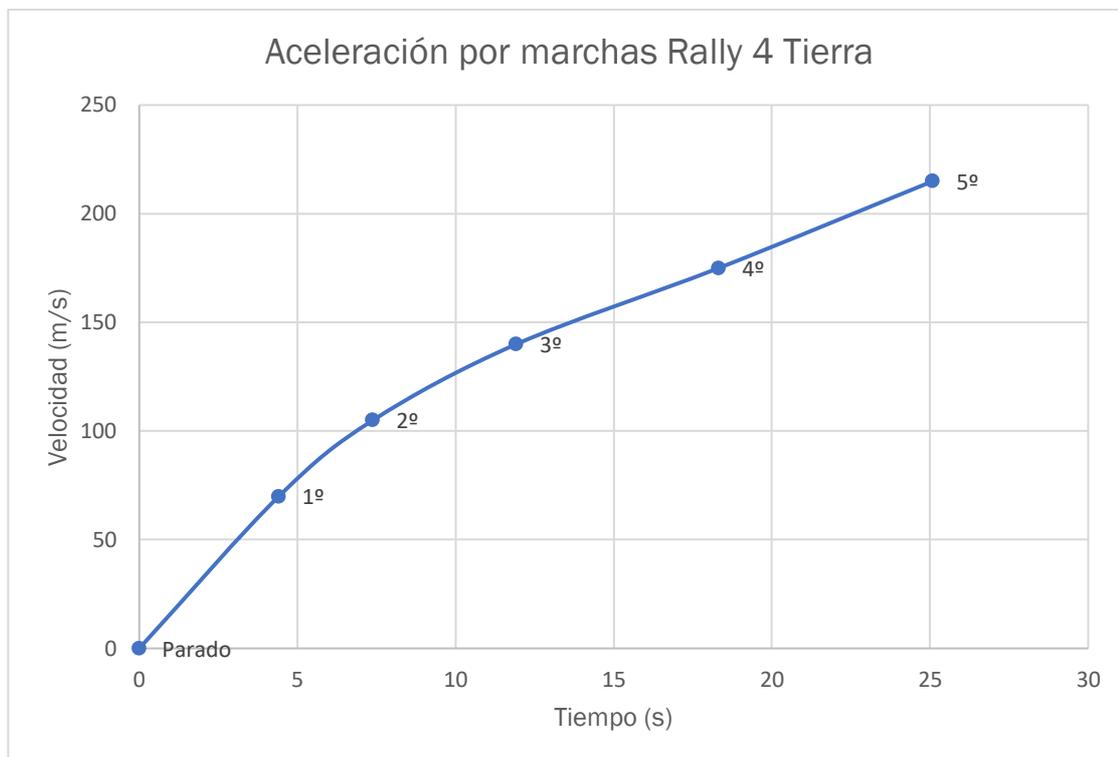


Gráfica 17: Aceleración del Rally 4 con configuración de asfalto.

Los tiempos exactos y las velocidades a las que se efectúan los cambios de marcha se observan en la Tabla 9.

	1º	2º	3º	4º	5º
Tiempo por Marcha (s)	4,208	2,864	4,388	6,172	6,728
Tiempo Acumulado (s)	4,208	7,072	11,461	17,634	24,362
Velocidad ( $\frac{km}{h}$ )	80	120	160	205	245

Tabla 9: Tiempos y velocidades en el cambio de marchas del Rally 4 con configuración de asfalto.



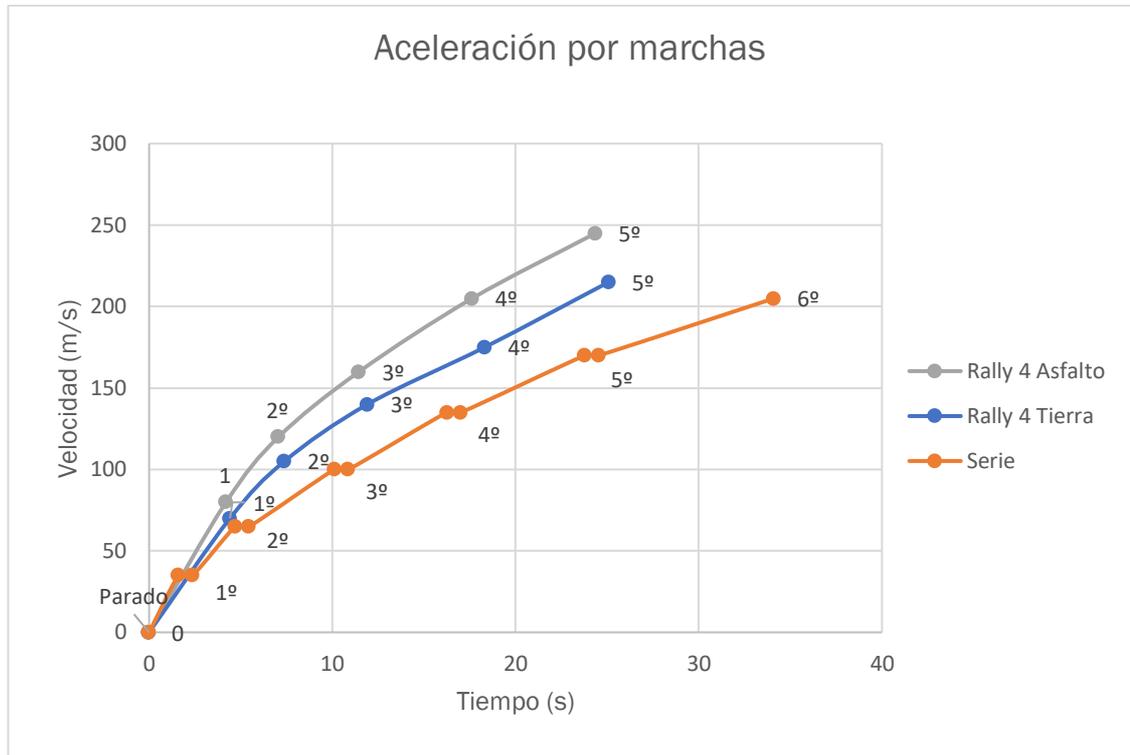
Gráfica 18: Aceleración del Rally 4 con configuración de tierra.

Los tiempos exactos y las velocidades a las que se efectúan los cambios de marcha se observan en la Tabla 10.

	1º	2º	3º	4º	5º
Tiempo por Marcha (s)	4,416	2,971	4,535	6,394	6,772
Tiempo Acumulado (s)	4,416	7,388	11,923	18,317	25,090
Velocidad ( $\frac{km}{h}$ )	70	105	140	175	215

Tabla 10: Tiempos y velocidades en el cambio de marchas del Rally 4 con configuración de tierra.

Se puede comprobar que la aceleración durante las dos primeras marchas, sobre todo en las versiones de rally es muy brusca y a partir de la tercera marcha la aceleración disminuye. Esto es debido a que los tramos a los que acostumbran a competir necesitan una buena respuesta en aceleración a la salida de curvas muy cerradas. En el vehículo de serie se comprueba que su curva no tiene la misma forma y que la aceleración tiene una curva cada vez más plana según se aumentan las marchas. Este tipo de automóviles no necesitan tener una respuesta tan brusca ya que las condiciones de diseño no las requieren.



Gráfica 19: Comparativa de aceleración entre las tres versiones.

En la Gráfica 19 se puede observar la comparación de la aceleración de las tres versiones y comprobar lo explicado en el párrafo anterior. A parte de que un vehículo de serie no tiene, como ya se ha dicho, una aceleración tan brusca como si se busca en uno de rallyes, el lapso que tarda en llegar a su velocidad máxima se ve acrecentado también por el tiempo requerido en el cambio de marchas, mientras que en uno de rallyes eso no le afecta.

## 2.5. Modificación del sistema de suspensión

Se parte de la suspensión que lleva el vehículo de serie, diseñada para tener el mayor confort posible para los ocupantes, con tendencia a ser algo dura, ya que la versión ST del Ford Fiesta es con tendencia deportiva. En los vehículos de calle se busca esta confortabilidad con el objetivo de poder absorber todo lo posible las irregularidades del firme. También son diseñadas con el objetivo de transmitir al máximo las prestaciones del motor hacia la calzada y ayudando a que consumo sea lo más óptimo posible. Por el contrario, una suspensión diseñada para competir en la modalidad de rallyes tiene el objetivo principal de ser capaz de transmitir al máximo las prestaciones del motor, de manera que cada rueda trabaje de la forma más óptima, sin importar durabilidad, dureza o confort.

Según la normativa, los silentblocks de serie pueden sustituirse por otros de tipo articulación, pero los trapecios y puntos de anclaje a la carrocería no pueden modificarse de ninguna manera, debiendo mantener una tolerancia de  $\pm 5$  mm.

El Ford Fiesta Rally 4 monta una suspensión Reigner de amortiguadores regulables con muelles Eibach con tres posibles configuraciones en el eje delantero y dos en el eje trasero. La configuración adoptada para el eje delantero es McPherson con brazo inferior en "L" con doble muelle para asfalto y muelle único para grava.

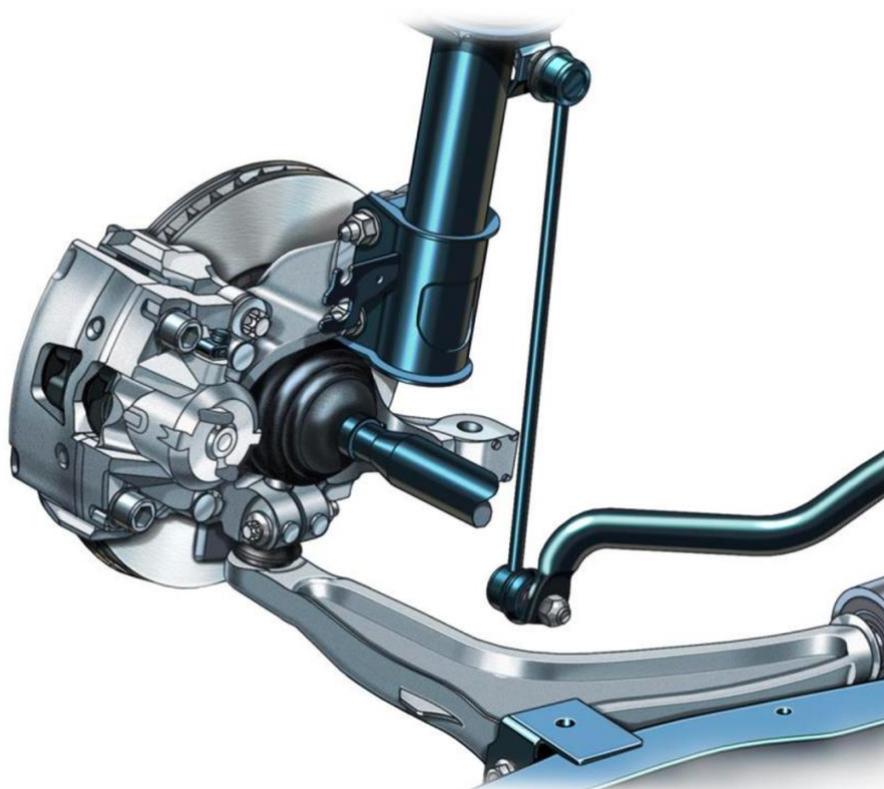
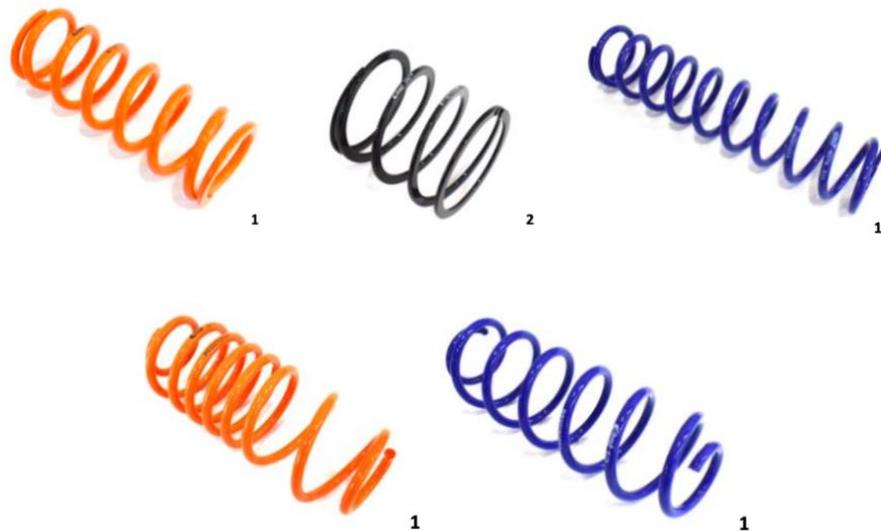


Ilustración 15: Suspensión McPherson con brazo inferior en L. Fuente: (López, Suspensión delantera).

Este tipo de suspensión independiente aparte de cumplir con los objetivos antes mencionados cumple con funciones estructurales y de guiado. Debido a que se trata de un sistema independiente, cada una de las ruedas se encuentra conectada al chasis de manera individual, lo que posibilita que cada una pueda moverse verticalmente sin tener influencia alguna sobre las demás. Sus principales ventajas son la simplicidad del sistema, ligereza, coste y ser compacta (ideal para motores transversales como el que monta este modelo). Por otro lado, las desventajas son los ruidos y vibraciones producidas en comparación a otros sistemas, debidas al rozamiento que sufren los amortiguadores, pero siendo esto algo irrelevante dado la modalidad de uso que se le va a dar al vehículo.

La configuración montada en el eje trasero es “Estándar Twist Beam” con un solo muelle tanto para asfalto como para grava.



*Ilustración 16: Muelles delanteros para asfalto (Arriba izq.), para grava (Arriba Dcha.). Fuente: (M-Sport, 2019).*

Se puede comprobar en la Ilustración 16 que los muelles delanteros son de paso desigual, mientras que los muelles traseros son bicónicos.

Para saber cuál es la mejor configuración posible se realizan cálculos numéricos, en los que se tiene en cuenta el grado de dureza y confort y se determinan los adecuados dependiendo del tipo de tramo que se vaya a disputar.

De poco sirven todas las modificaciones en el motor y la transmisión si luego no se es capaz de transmitir todo el par a las ruedas. Esto depende principalmente de la suspensión, por lo que es necesario tener una buena elección de esta.

Los amortiguadores son unos elementos fundamentales del sistema de suspensión, ya que estos se encargan de controlar las oscilaciones del resorte. Los amortiguadores Reigner que monta el vehículo son de tope hidráulico regulable: Compresión en baja velocidad, compresión en alta velocidad y extensión (la modificación de esta solo está permitido antes de cada etapa y no se puede hacer desde dentro del habitáculo por parte del piloto por reglamento de la FIA).

La compresión a baja velocidad regula la dureza del amortiguador cuando la velocidad de compresión de este es pequeña. La compresión a alta velocidad vuelve a regular la dureza del amortiguador cuando la velocidad de compresión es bastante grande. La extensión proporciona la dureza del amortiguador en todo su recorrido sea cual sea su velocidad de compresión.



Ilustración 17: Amortiguadores delanteros (Arriba) / Amortiguadores traseros (Abajo). Fuente: (M-Sport, 2019).

El muelle (regulable en altura y precarga) se monta sobre el cuerpo del amortiguador. La parte inferior de los muelles se apoya sobre una tuerca que es la encargada de dar la altura de estos. Mediante este método también se ajusta el reparto de pesos sobre cada rueda.

Los trapecios de la suspensión serán sustituidos por otros específicos para este tipo de competición, que sean más resistentes y regulables (sin cambiar el diseño original de los que venían instalados de serie).

La posición de los puntos de anclaje de la suspensión al chasis debe conservarse los que ya venían de serie, en cambio, los materiales como juntas, silentblocks, etc. Pueden ser de materiales diferentes a los originales.

Manguetas y bujes pertenecientes a las ruedas pueden ser sustituidos por otros idénticos a los originales, pero de materiales más ligeros que permitan reducir el peso del vehículo.

Finalmente, la barra estabilizadora de la suspensión cumple la función de unir el movimiento vertical del mismo eje para evitar que la carrocería del vehículo se incline excesivamente en las curvas debido a la fuerza centrífuga. Para lograrlo, transfiere parte de la fuerza de extensión de la suspensión de la rueda interna a la externa, reduciendo la compresión y la inclinación del vehículo. En este caso, se reemplazará la barra estabilizadora delantera por una de mayor rigidez, que se determina por su material y diámetro, aunque esto pueda afectar al confort de conducción. Además, se añadirá una barra estabilizadora trasera que no viene incluida en el vehículo original.

Una vez realizadas las modificaciones debe comprobarse que la altura del vehículo sea suficiente para que en caso de que las ruedas estén desinfladas, ninguna parte del automóvil este en contacto con el suelo. Esta prueba se debe realizar con los pilotos a bordo del vehículo, para simular condiciones de carrera con todo el peso sobre él (FIA, 2019).

## 2.6. Cálculos en las modificaciones del sistema de suspensión

### 2.6.1. Introducción

Para el cálculo de las modificaciones en el sistema de suspensión se va a utilizar el modelo de un cuarto de vehículo (2 grados de libertad). Antes de meterse en los cálculos, se va a explicar en qué consiste este modelo.

El modelo en cuestión incorpora un sistema de doble masa, cuya dinámica está regulada por dos muelles y una fuerza de fricción que actúa sobre el movimiento vertical.

Para poder entender este modelo se debe distinguir entre dos conceptos. Masa suspendida y masa no suspendida. La masa no suspendida comprende los elementos que siguen la orografía del terreno, que son las ruedas, el sistema de frenos y la suspensión del vehículo, que se une por su parte superior al chasis. La masa suspendida es todo lo que queda por encima de los elementos pertenecientes a la masa no suspendida. Luego también puede hablarse de masa intermedia o semi suspendida que son aquellos elementos que garantizan la unión entre la masa suspendida y la masa no suspendida, pero que a efectos de cálculo no nos afectan para nada. La masa suspendida y no suspendida tiene importantes efectos sobre la dinámica del automóvil, tanto en el reparto de pesos como en el diseño de las suspensiones (Tecnología del automovil, 2020).

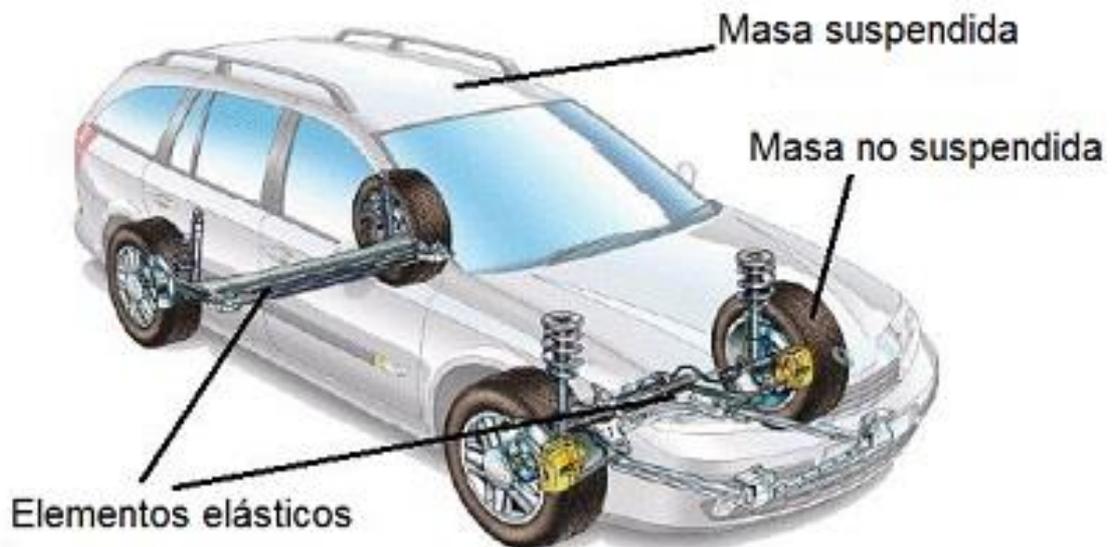


Ilustración 18: Masa suspendida y no suspendida. Fuente: (Ingemeccanica, 2023).

En la Ilustración 18 se puede ver la representación sobre un vehículo (en este caso un Renault Laguna II fase I) lo que sería la masa suspendida y la no suspendida. Visto esquemáticamente sería como la Ilustración 19.

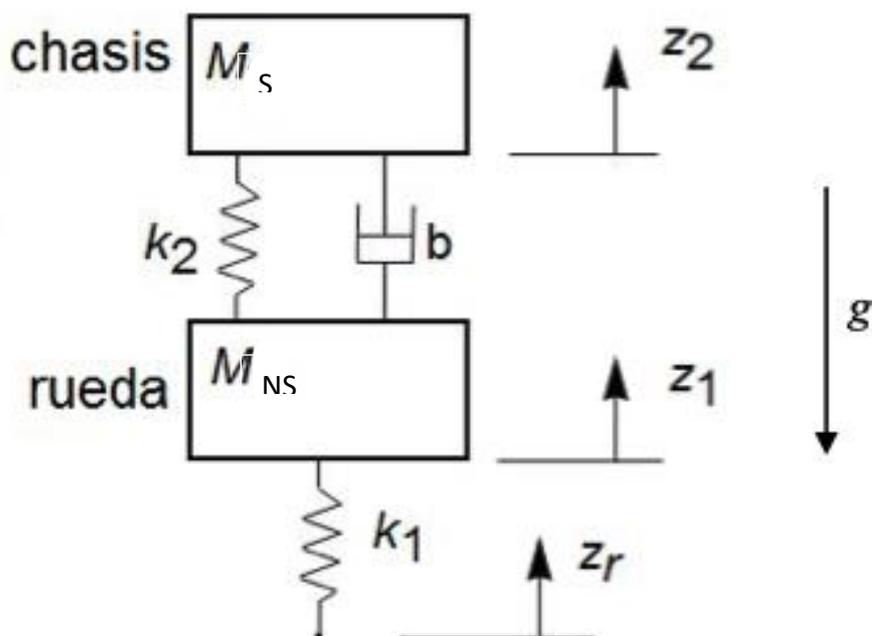


Ilustración 19: Modelo esquemático de un sistema de 2 grados de libertad en un vehículo. Fuente: (Angulo, 2015).

Para realizar los cálculos se parte de unos datos teóricos iniciales característicos del vehículo. Estos se representan en la Tabla 11.

	RALLY 4	SERIE
PESO TOTAL (kg)	1.080	1.164
MASA SUSPENDIDA EJE DELANTERO (kg)	278,2	320,84
MASA NO SUSPENDIDA EJE DELANTERO (kg)	35	40
MASA SUSPENDIDA EJE TRASERO (kg)	191,8	181,6
MASA NO SUSPENDIDA EJE TRASERO (kg)	35	40
RIGIDEZ DEL NEUMATICO ( $\frac{N}{m}$ )	225.000 – 230.000	215.521
REPARTO DE PESOS (DELANTE/DETRÁS)	58% - 42%	62% - 38%

Tabla 11: Características del vehículo según las versiones.

La diferencia entre la rigidez del neumático para el vehículo de serie y las versiones de Rally 4 se debe en primer lugar por la diferencia de diámetros de llanta. La versión de serie lleva neumáticos con un diámetro de 17", la versión Rally 4 de asfalto son 16 y la de tierra son 15".

Esta no es la razón principal, si no que, en general, los neumáticos de un vehículo de rally son más rígidos que los de un automóvil de calle. Esto se debe a que los vehículos de rally necesitan un mayor nivel de estabilidad y agarre en las condiciones extremas a las que se enfrentan, como superficies irregulares, curvas cerradas y cambios bruscos en la dirección.

Los neumáticos de rally suelen tener paredes laterales más rígidas, lo que les permite soportar las fuerzas laterales que se generan en las curvas a altas velocidades sin deformarse demasiado. Además, los neumáticos de rally suelen tener una banda de rodadura más ancha y una superficie de contacto con la carretera más grande, lo que aumenta su capacidad de agarre.

En contraste, los neumáticos de un vehículo de calle suelen ser más flexibles y suaves, lo que proporciona un mayor nivel de comodidad para el conductor y los pasajeros. Sin embargo, esta suavidad también significa que los neumáticos pueden deformarse más fácilmente en condiciones extremas, lo que puede reducir su capacidad de agarre y estabilidad.

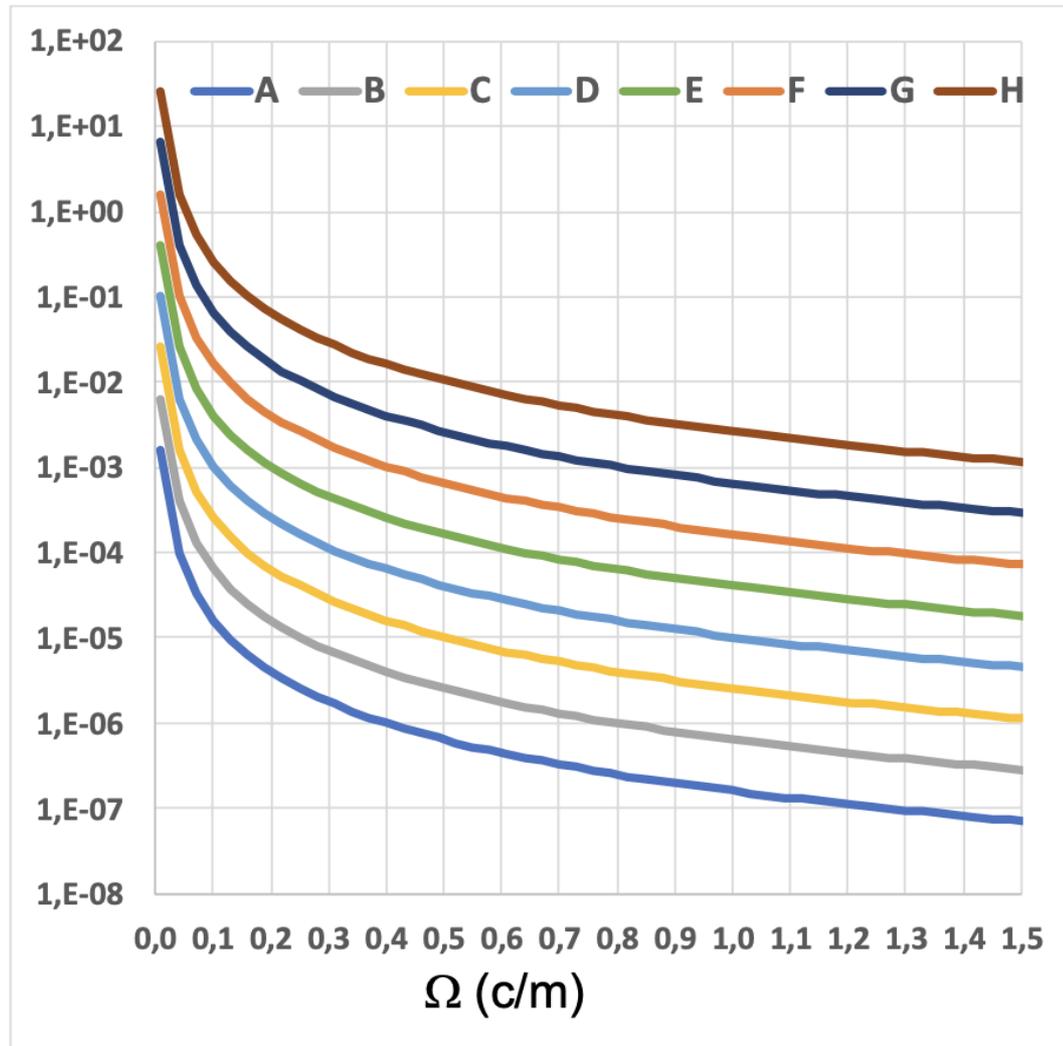
Luego, la diferencia de rigidez de un neumático de asfalto y de uno de tierra está en que los neumáticos de asfalto suelen ser más rígidos que los de tierra para proporcionar una mayor estabilidad a altas velocidades y una mejor respuesta en la dirección. Además, tienen una banda de rodadura con un patrón específico que se adapta a la superficie lisa del asfalto y proporciona un mayor agarre en las curvas y en la frenada.

Por otro lado, los neumáticos de tierra son más flexibles que los de asfalto para adaptarse a las superficies irregulares de los terrenos sin pavimentar. Estos neumáticos tienen una banda de rodadura con un patrón profundo y agresivo que proporciona tracción en terrenos sueltos, como grava, barro o nieve. Además, los neumáticos de tierra suelen tener una pared lateral más flexible para ayudar a absorber los impactos en terrenos irregulares y proporcionar una mayor comodidad de conducción.

A parte de las características del vehículo, se debe tener en cuenta el tipo de calzada sobre la que va a rodar. En este caso se van a tener en cuenta dos tipos diferentes, que serán asfalto y tierra. Los datos se recogen la Tabla 12.

	ASFALTO	TIERRA
$C_{sp}$	$1,024 \times 10^{-5}$	$4.096 \times 10^{-5}$
N	2	2

Tabla 12: Características de la calzada.



Gráfica 20: Densidad Espectral de Potencia en función de la frecuencia espacial. ( ISO/TC 108/SC 2, 2016)

Para evaluar la suspensión se utilizará una velocidad media en cada versión, siendo para el vehículo de calle  $120 \frac{km}{h}$  y para ambas versiones de rally  $150 \frac{km}{h}$ .

Lo que se va a calcular son la frecuencia natural, el coeficiente de amortiguación, la frecuencia natural amortiguada y la aceleración que sufre la suspensión en la masa suspendida. Mientras que para la masa no suspendida se va a calcular su frecuencia natural y la aceleración de la rueda en sus movimientos verticales (aceleración de la masa no suspendida).

Cuando los vehículos se mueven a altas velocidades, experimentan una variedad de vibraciones que pueden afectar el confort de los pasajeros. Estas vibraciones pueden volverse insoportables rápidamente. Las vibraciones se originan por las irregularidades en el terreno, el funcionamiento de los componentes del vehículo, como el motor, la caja de cambios y la transmisión, así como por la aerodinámica del flujo de aire alrededor del vehículo.

Las vibraciones que experimentan los pasajeros pueden resultar molestas si son demasiado altas o bajas (por debajo de 0,8 Hz puede provocar mareos). El cuerpo humano tolera frecuencias entre 1 Hz y 2 Hz, y para diferentes tipos de vehículos, se pueden considerar los siguientes valores como una guía orientativa:

- Turismo: 1,2 [Hz].
- Deportivo: entre 1,3 y 1,5 [Hz].
- Competición: Hasta 5,5 [Hz].

Como la versión de serie es un turismo con cierta tendencia a lo deportivo, se busca una frecuencia natural en torno a los 1,2 Hz en el eje delantero. La versión de Rally 4 tendrá frecuencias naturales más altas, pero diferentes entre las configuraciones para asfalto y para tierra. Mientras que para asfalto estará en torno a los 2,5 Hz, para tierra lo será aproximadamente de 1,8 Hz. Para minimizar el cabeceo del vehículo, la frecuencia natural del eje trasero debe ser de magnitud 1,1 a 1,2 veces mayor que en el eje delantero.

Partiendo de los datos presentados en la Tabla 11 y la Tabla 12 se calcula la frecuencia natural.

$$f_n = \frac{\sqrt{\frac{\text{Ride Rate}}{Ms}}}{2 * \pi}$$

*Ecuación 15: Frecuencia natural. (López, Confort Vibratorio).*

- $f_n$  es la frecuencia natural [Hz].
- **Ride rate** es un término que se refiere a la tasa de absorción de vibraciones y choques por parte del sistema de suspensión.
- **Ms** es la masa suspendida que soporta cada uno de los ejes [kg].

El ride rate es una tasa que indica la capacidad de la suspensión para absorber la energía de las vibraciones y los choques que se producen en la carretera mientras el vehículo se mueve. Un ride rate alto indica una mayor capacidad de absorción de vibraciones y choques, lo que se traduce en un viaje más suave y cómodo para los pasajeros. Por otro lado, un ride rate bajo puede hacer que el viaje sea más incómodo y que las vibraciones y choques sean más perceptibles. Su cálculo es el siguiente:

$$\text{Ride rate} = \frac{K_{ns} * K_s}{K_{ns} + K_s}$$

*Ecuación 16: Ride Rate. (López, Confort Vibratorio).*

- $K_{ns}$  es la rigidez del neumático  $\left[\frac{N}{m}\right]$ .
- $K_s$  es la rigidez de la suspensión  $\left[\frac{N}{m}\right]$ .

Lo siguiente que se va a calcular es el coeficiente de amortiguación. Este mide la capacidad de disipar la energía de las vibraciones y movimientos oscilatorios. Se expresa como un porcentaje y representa la fracción de energía que se disipa en cada ciclo de oscilación.

Un coeficiente de amortiguación alto indica una capacidad de amortiguación efectiva, lo que significa que el sistema puede disipar una gran cantidad de energía y evitar que el movimiento oscilatorio se prolongue demasiado tiempo. Por otro lado, un coeficiente de amortiguación bajo puede resultar en un movimiento oscilatorio prolongado y más perceptible, lo que puede afectar negativamente al confort y la seguridad del vehículo y sus pasajeros. La expresión utilizada es la Ecuación 17:

$$\chi = \frac{M_s}{2 * \sqrt{K_s * C_s}}$$

*Ecuación 17: Coeficiente de amortiguación. (López, Confort Vibratorio)*

- $\chi$  es el coeficiente de amortiguación.
- $M_s$  es el peso de la masa suspendida que recae sobre un eje [kg].
- $K_s$  es la rigidez de la suspensión  $\left[\frac{N}{m}\right]$ .
- $C_s$  es la amortiguación de la suspensión  $\left[\frac{N*s}{m}\right]$ .

Si el resultado obtenido en la Ecuación 17 se multiplica por 100, se puede representar en porcentaje.

Para continuar, lo que se va a calcular es la frecuencia natural amortiguada. Esta es una medida de la rapidez con la que un sistema oscilatorio pierde energía debido al amortiguamiento. Para calcularla se utiliza la Ecuación 18:

$$f_{ds} = f_n * \sqrt{1 - \chi^2}$$

*Ecuación 18: Frecuencia natural amortiguada. (López, Confort Vibratorio)*

- $f_{ds}$  es la frecuencia natural amortiguada [Hz].
- $f_n$  es la frecuencia natural [Hz].
- $\chi$  es el coeficiente de amortiguación.

Una vez se tiene todo esto calculado se puede representar las funciones de transferencia tanto de la masa suspendida como de la masa no suspendida

respecto a la carretera y poder determinar cuál es la mejor configuración de la suspensión dependiendo de la versión.

$$\frac{z_s(w)^2}{z_o(w)^2} = k_{ns}^2 * \frac{k_s^2 + C_s^2 * w^2}{f(w) + C_s^2 * g(w)}$$

$$\frac{z_{ns}(w)^2}{z_o(w)^2} = k_{ns}^2 * \frac{(k_s - m_s * w^2) + C_s^2 * w^2}{f(w) + C_s^2 * g(w)}$$

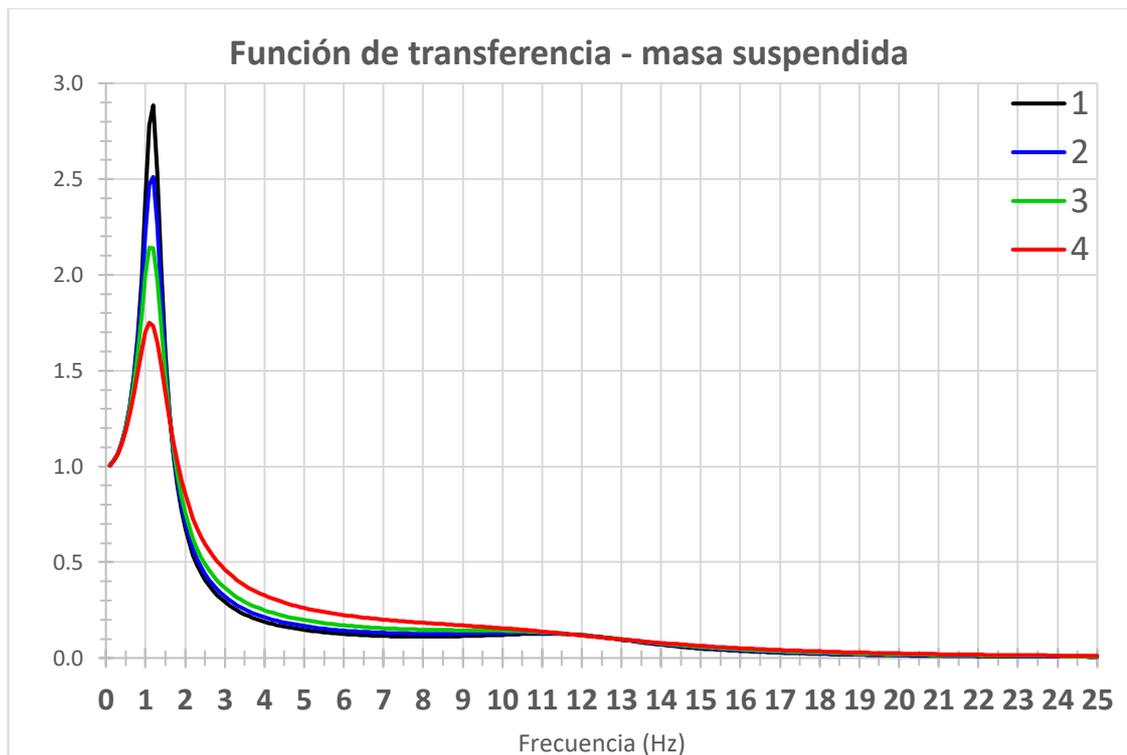
Ecuación 19: Funciones de transferencia. (López, Confort Vibratorio)

### 2.6.2. Automóvil de serie en el eje delantero

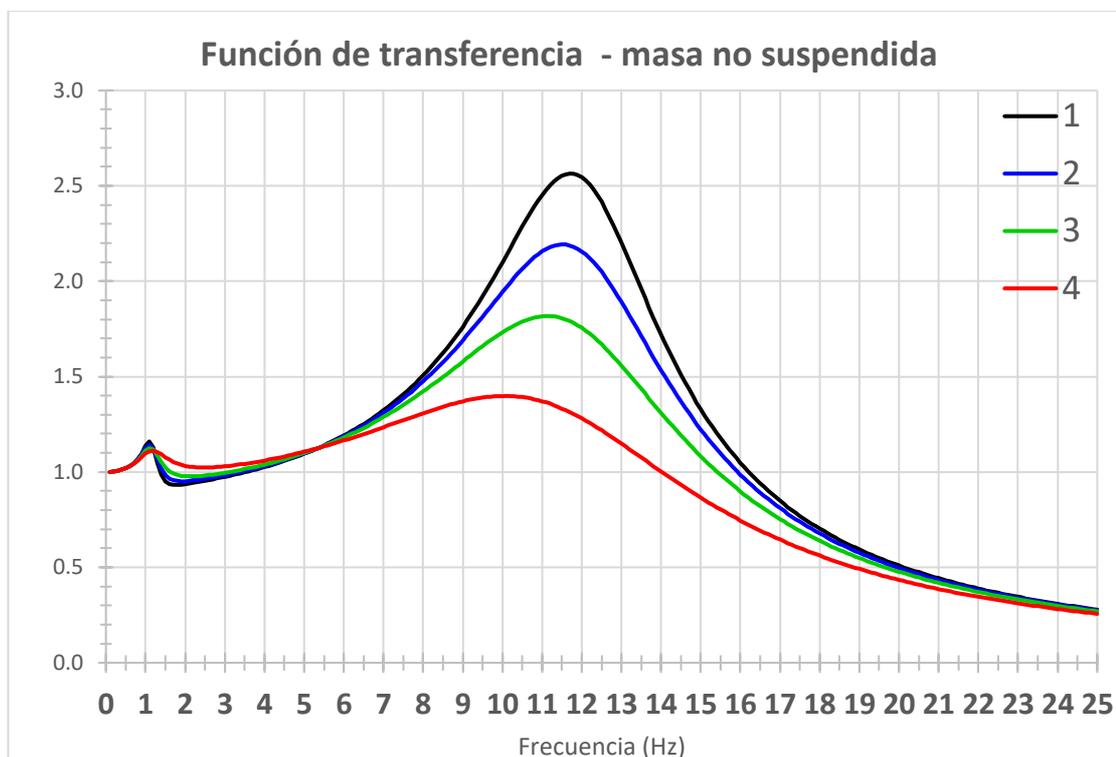
Para la representación se va a comparar cuatro tipos diferentes de suspensión con misma rigidez de suspensión ( $K_s$ ) pero diferente amortiguación de la suspensión ( $C_s$ ). Se pueden ver los valores en la Tabla 13:

	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	20.000	20.000	20.000	20.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	1.100	1.300	1.600	2.200

Tabla 13: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje delantero en el vehículo de serie.



Gráfica 21: Función de transferencia de la masa suspendida vehículo de serie en el eje delantero.



Gráfica 22: Función de transferencia de la masa no suspendida vehículo de serie en el eje delantero.

En este caso se ve que la mejor opción es la suspensión correspondiente a la de color azul y la de color verde, pero se escoge la primera. La razón es que en la zona de trabajo de la suspensión (zona a la derecha del pico) cuanto más abajo vaya la curva, mayor será el confort vibratorio del vehículo, lo que significa que la suspensión absorbe eficazmente las vibraciones y reduce el movimiento no deseado del vehículo para proporcionar un viaje más suave y estable. Pero tampoco puede ser extremadamente bajo por que repercutiría negativamente en la adherencia y la precisión en el manejo.

	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	1,2020	1,2020	1,2020	1,2020
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,2171	0,2566	0,3158	0,4342
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	1,1734	1,1618	1,1405	1,0828
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	2,8851	2,5113	2,1422	1,7504
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	12,2125	12,2125	12,2125	12,2125
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	2,5640	2,1928	1,8175	1,3984

Tabla 14: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje delantero en el vehículo de serie.

Viendo los resultados que se incluyen en la Tabla 14 el que mejor se ajusta a lo buscado es la que corresponde con la opción 2 (línea azul).

A parte de la función de transferencia, también se puede representar la densidad espectral de la aceleración ( $S_z$ ). Esta es una medida de la energía de la vibración en diferentes frecuencias. La densidad espectral de la aceleración en la suspensión puede variar en diferentes condiciones de conducción, como la velocidad, el tipo de superficie de la carretera y la carga del vehículo.

$$S_z(f) = (2 * \pi * f)^4 * |H(f)|^2 * S_f(f)$$

*Ecuación 20: Densidad espectral de la aceleración. (López, Confort Vibratorio)*

- $S_z(f)$  es la densidad espectral de la aceleración  $\left[ \frac{\left(\frac{m}{s^2}\right)^2}{Hz} \right]$ .
- $H(f)$  es el módulo de la función de transferencia.
- $S_f(f)$  es la densidad espectral temporal  $\left[ \frac{m^2}{Hz} \right]$ .

El último término de la Ecuación 20 se refiere a la densidad espectral temporal, que se obtiene de la densidad espectral espacial. Estas son las Ecuación 21 y Ecuación 22 respectivamente.

$$S_f(f) = \frac{S_\Omega(\Omega)}{V}$$

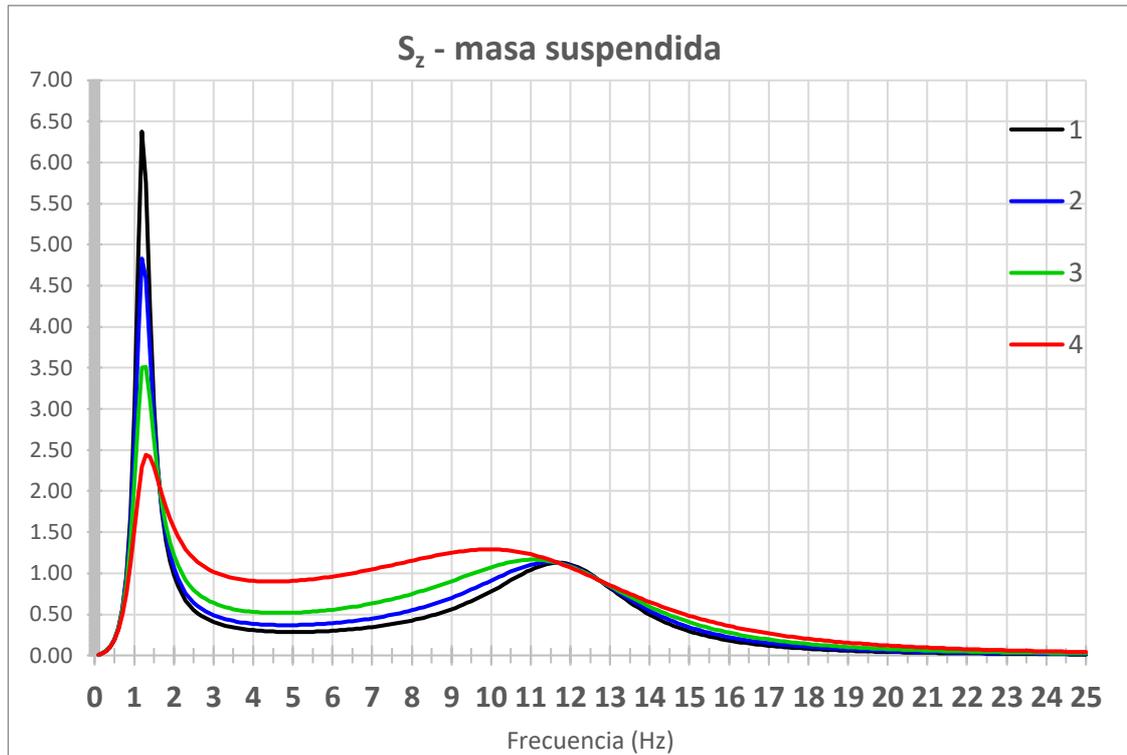
*Ecuación 21: Densidad espectral temporal. (López, Confort Vibratorio)*

- $V$  es la velocidad en  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

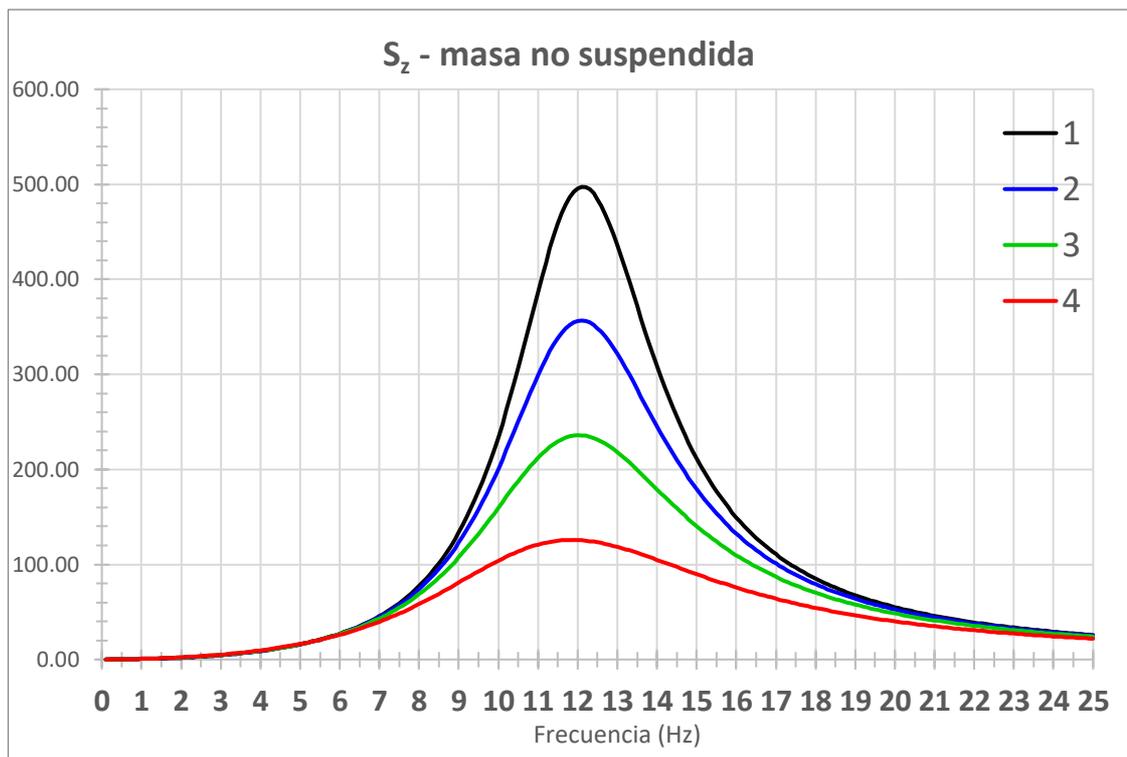
$$S_\Omega(\Omega) = C_{sp} * \Omega^{-N}$$

*Ecuación 22: Densidad espectral espacial. (López, Confort Vibratorio)*

- $C_{sp}$  Característica del tipo de calzada.
- $\Omega \left[ \frac{c}{m} \right]$ .



Gráfica 23: Densidad espectral de la masa suspendida vehículo de serie en el eje delantero.



Gráfica 24: Densidad espectral de la masa no suspendida vehículo de serie en el eje delantero.

Una vez se tienen estas funciones representadas se puede calcular la aceleración que sufren las ruedas en sus movimientos verticales con respecto al chasis del vehículo. Una aceleración de suspensión alta puede tener un impacto negativo en la comodidad del viaje y la estabilidad del vehículo, especialmente a altas velocidades. La Ecuación 23 nos muestra como calcularla.

$$a_{rms} = \sqrt{\int_{f_2}^{f_1} S_z(f) * df}$$

Ecuación 23: Aceleración de la suspensión. (López, Confort Vibratorio)

- $a_{rms}$  es la aceleración eficaz de la suspensión  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ .
- $S_z(f)$  es la densidad espectral de la aceleración  $\left[\frac{\left(\frac{m}{s^2}\right)^2}{Hz}\right]$ .

En la Tabla 15 se observan los resultados de las diferentes aceleraciones en función de las diferentes configuraciones de la amortiguación de la suspensión.

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[\frac{m}{s^2}\right]$	3,4592	3,5615	3,7501	4,1659
$a_{rms} M_{NS} \left[\frac{m}{s^2}\right]$	54,9372	49,8791	44,0948	36,2097

Tabla 15: Aceleraciones de la suspensión en el eje delantero del vehículo de serie.

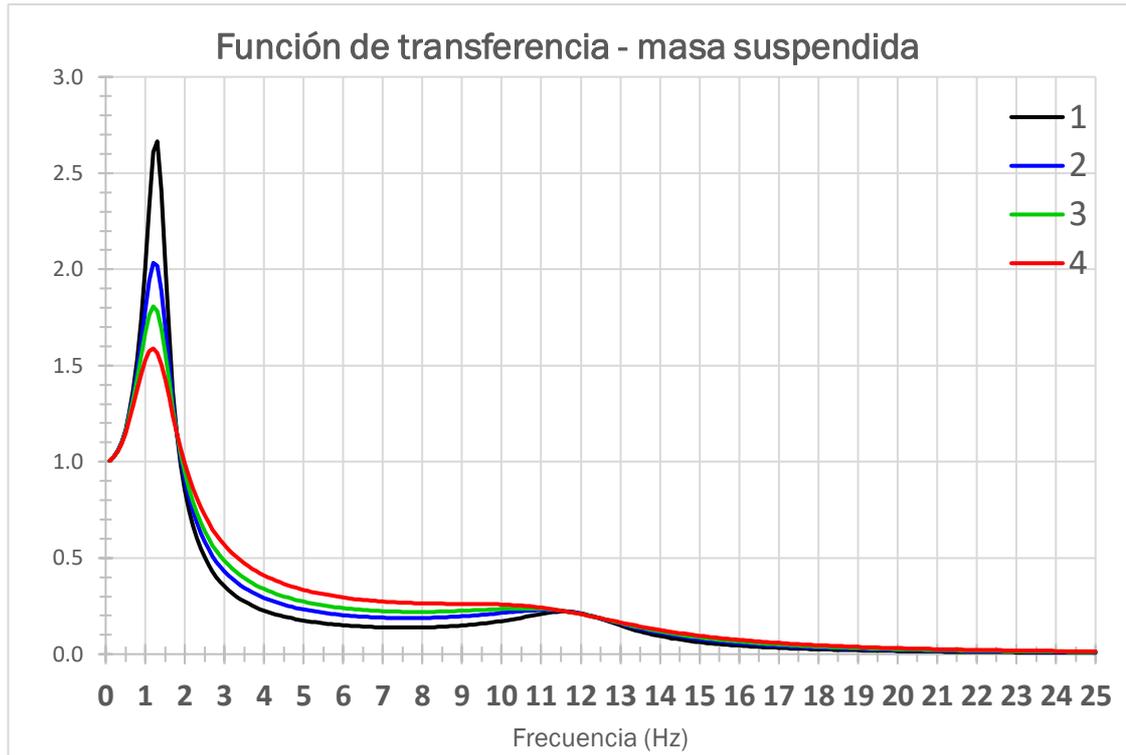
La diferencia en la aceleración experimentada por la masa suspendida y la masa no suspendida puede afectar al rendimiento y la comodidad de la suspensión del vehículo. Una suspensión con una masa suspendida baja y una masa no suspendida alta puede tener un mejor rendimiento en carreteras suaves, mientras que una suspensión con una masa suspendida alta y una masa no suspendida baja puede tener un mejor rendimiento en carreteras irregulares.

### 2.6.3. Automóvil de serie en el eje trasero

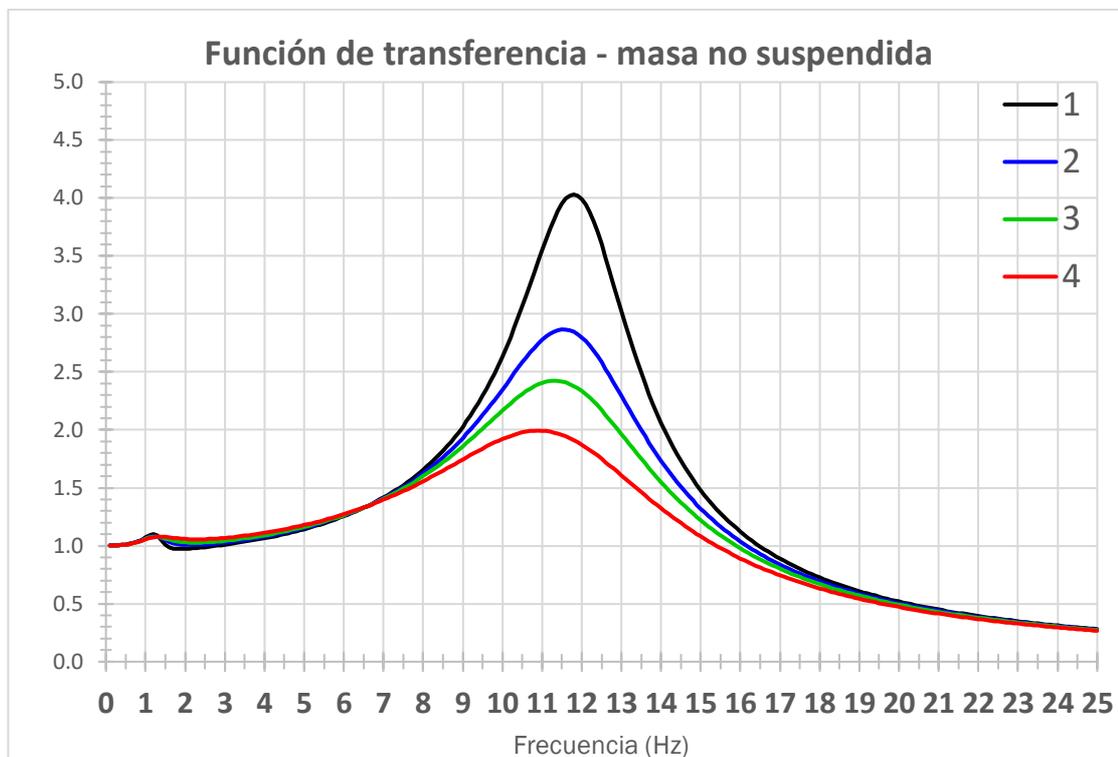
Ahora se repite todo este proceso de cálculo para el eje trasero del vehículo de serie, teniendo en cuenta los datos de la Tabla 11. Las gráficas pertenecientes a las funciones de transferencia del eje trasero son la Gráfica 25 y la Gráfica 26. La Tabla 16 muestra los datos de partida en la rigidez y amortiguación de la suspensión.

	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	13.000	13.000	13.000	13.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	700	1.000	1.200	1.500

Tabla 16: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje trasero del vehículo de serie.



Gráfica 25: Función de transferencia de la masa suspendida vehículo de serie en el eje trasero.



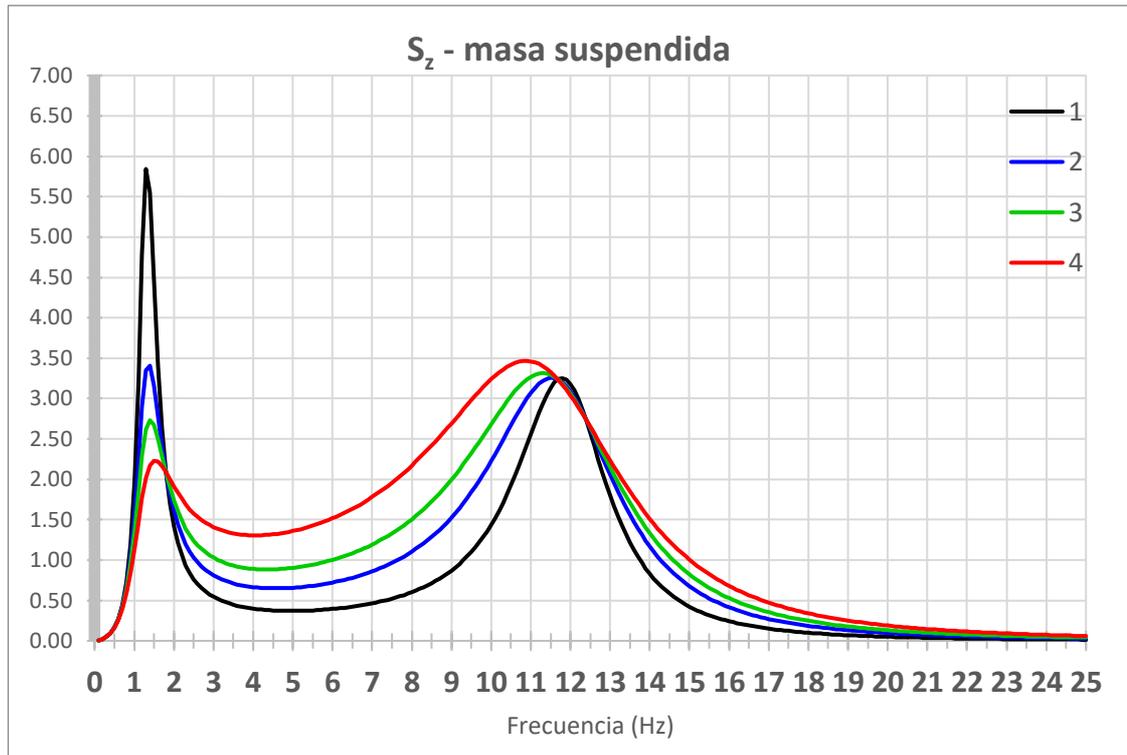
Gráfica 26: Función de transferencia de la masa no suspendida vehículo de serie en el eje trasero.

En este caso la mejor opción vuelve a ser la de color azul. Como se explicó al principio del capítulo, es necesario que, para minimizar el efecto de cabeceo del vehículo, la frecuencia natural en el eje trasero sea de magnitud entre 1,1 y 1,2 veces mayor que en el eje delantero. En la Tabla 17 se observan los resultados referentes a las gráficas de la función de transferencia.

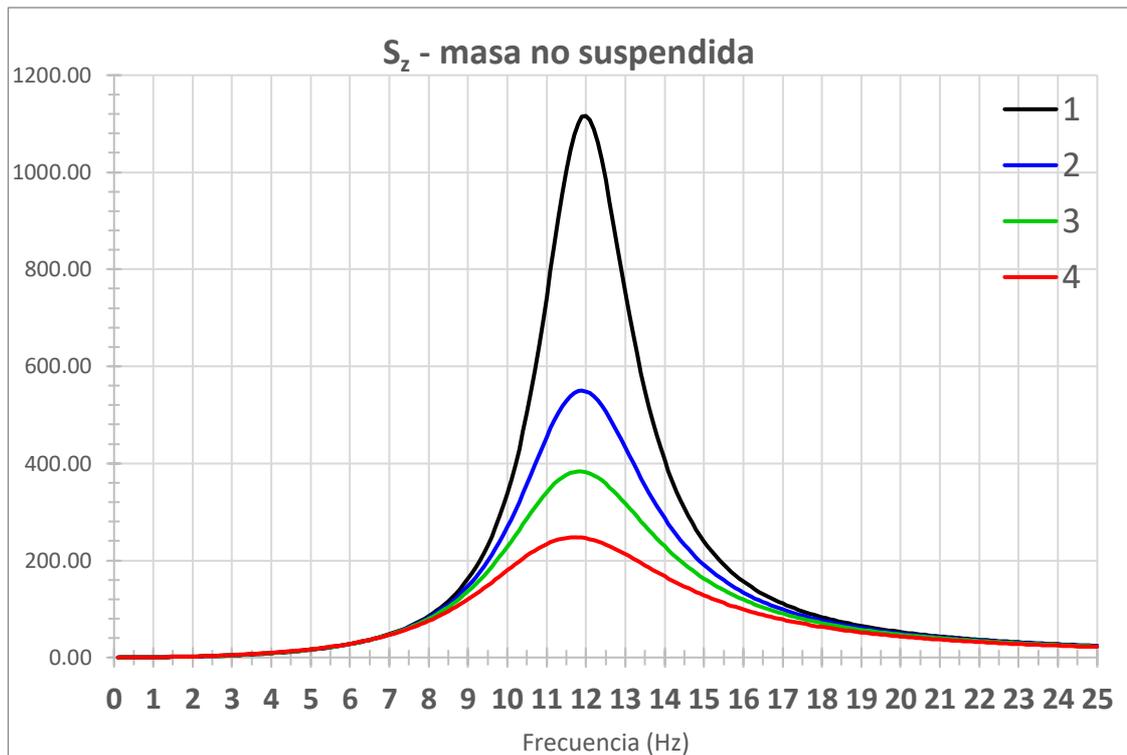
	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	1,3093	1,3093	1,3093	1,3093
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,2281	0,3258	0,3910	0,4887
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	1,2748	1,2379	1,2051	1,1423
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	2,6650	2,0335	1,8073	1,5887
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	12,0297	12,0297	12,0297	12,0297
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	4,0306	2,8666	2,4238	1,9930

Tabla 17: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje trasero del vehículo de serie.

Una vez obtenidas las representaciones gráficas de la función de transferencia, obtenemos las funciones de densidad espectral de las aceleraciones de la masa suspendida y no suspendida.



Gráfica 27: Densidad espectral de la masa suspendida vehículo de serie en el eje trasero.



Gráfica 28: Densidad espectral de la masa no suspendida vehículo de serie en el eje trasero.

Una vez se ha calculado los valores para representar estas graficas se puede calcular la aceleración de la suspensión con la Ecuación 23 y obtenemos los valores de la Tabla 18.

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	4,3686	4,8532	5,1897	5,6810
$a_{rms} M_{NS} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	67,5777	55,5160	50,0807	44,0302

Tabla 18: Aceleraciones de la suspensión en el eje trasero del vehículo de serie.

Se ve, comparando los resultados en ambos ejes que las aceleraciones tanto de la masa suspendida como de la masa no suspendida son mayores en el eje trasero que en el eje delantero esto se debe a dos razones principales:

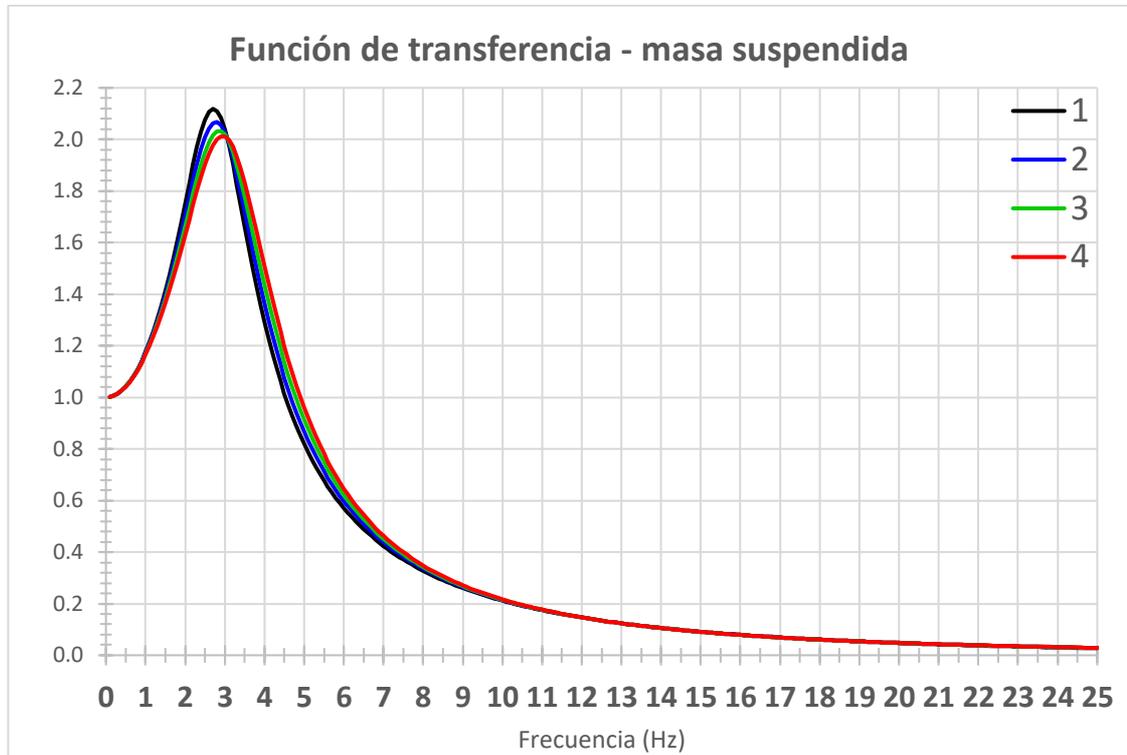
- En la mayoría de los vehículos, el motor está ubicado en la parte delantera, lo que significa que el eje delantero soporta una mayor parte del peso total del vehículo. Como resultado, la suspensión delantera tiene que trabajar más para mantener la estabilidad del vehículo y absorber las fuerzas de las irregularidades de la carretera, lo que reduce la aceleración experimentada por la masa suspendida en el eje delantero.
- La mayoría de los vehículos están diseñados con una suspensión trasera más rígida que la delantera, lo que permite un mejor control de la estabilidad y la tracción en la carretera.

#### 2.6.4. Rally 4 con configuración de asfalto en el eje delantero

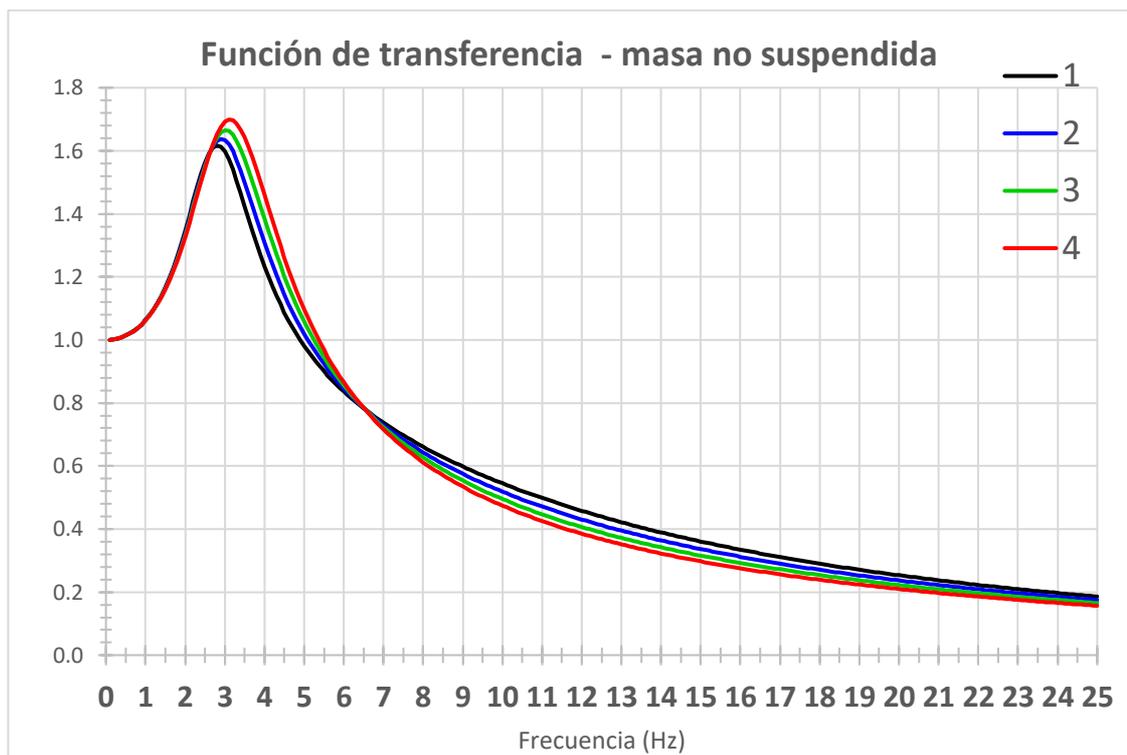
El siguiente paso es evaluar la suspensión en la versión de Rally 4. El vehículo como ya se explicó en el capítulo anterior, dependiendo de la configuración para la que se prepare, si es asfalto o tierra, la suspensión y la amortiguación puede cambiar. Se sabe que existen tres tipos de rigidez para el eje delantero y dos diferentes para el eje trasero. Como el número de combinaciones es de 6 posibles, no se van a estudiar todas en este proyecto, si no que se estudiara solo una de ellas para ambas configuraciones del vehículo. Se sigue partiendo de los datos de la Tabla 11 y se empieza como en el vehículo de serie calculando los valores necesarios para representar la función de transferencia. Se busca una frecuencia natural de aproximadamente 2,5 Hz y un coeficiente de amortiguación alrededor del 75%. Las cuatro posibilidades de rigidez que se van a comparar son las que vemos en la Tabla 19.

	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	97.000	97.000	97.000	97.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	6.500	7.000	7.500	8.000

Tabla 19: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje delantero en el Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 29: Función de transferencia de la masa suspendida en el eje delantero del Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 30: Función de transferencia de la masa no suspendida en el eje delantero del Rally 4 configuración de asfalto.

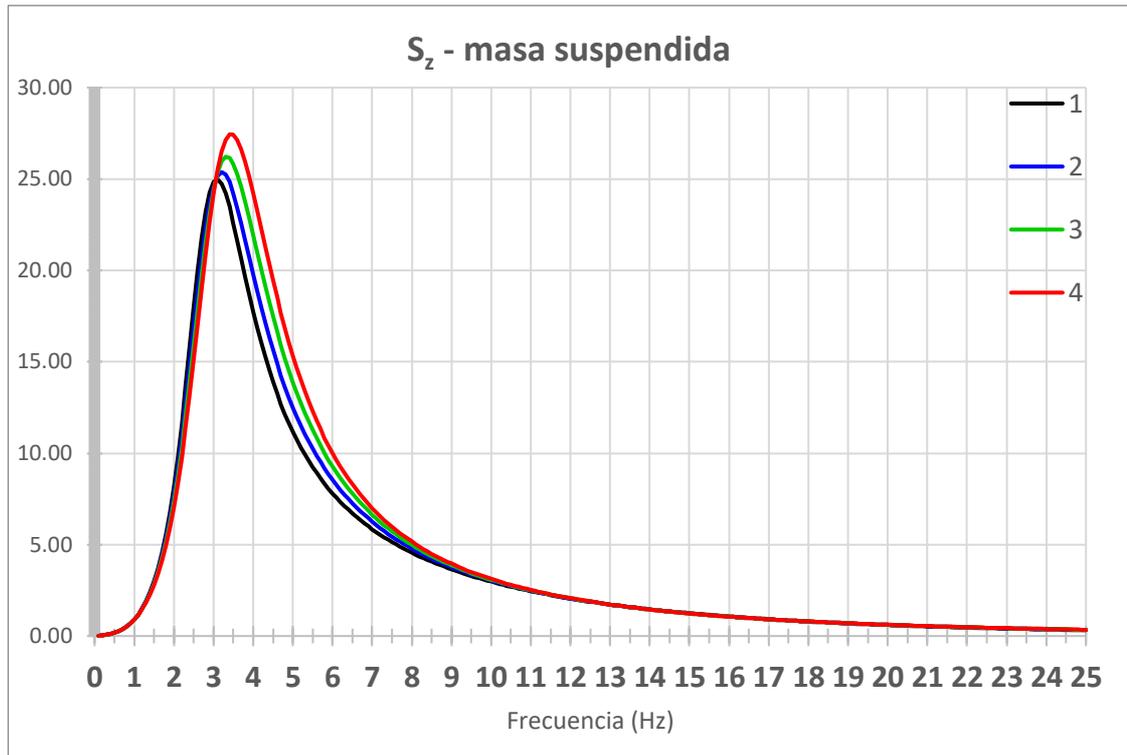
Se está trabajando con valores de rigidez extremadamente grandes en comparación a los que se tenían en el vehículo de serie, es por eso por lo que las gráficas pertenecientes a la versión del Rally 4 se parecen poco a las del vehículo de serie. En este caso, la opción que mejor se ajusta a lo que se busca sería la línea verde o azul. La confortabilidad (zona más baja a la derecha del pico) no se prioriza como en la versión del vehículo de serie, lo que resultará en un mejor manejo y una mayor capacidad de respuesta del vehículo. Una suspensión más rígida reducirá el balanceo y la inclinación del vehículo en las curvas, lo que permitirá una mayor estabilidad y un manejo más preciso. Es importante tener en cuenta que una suspensión más rígida también puede tener un impacto negativo en la durabilidad y la vida útil de las piezas de la suspensión y los neumáticos del vehículo, ya que se someterán a mayores tensiones y esfuerzos.

En la Tabla 20 a parte de ver los resultados obtenidos gráficamente en las funciones de transferencia, también se puede ver el valor que obtiene el coeficiente de amortiguación. Como se buscaban valores próximos al 75% la opción que mejor se ajusta es la 3 (línea verde) y se puede descartar la azul que antes se tenía en cuenta como posible.

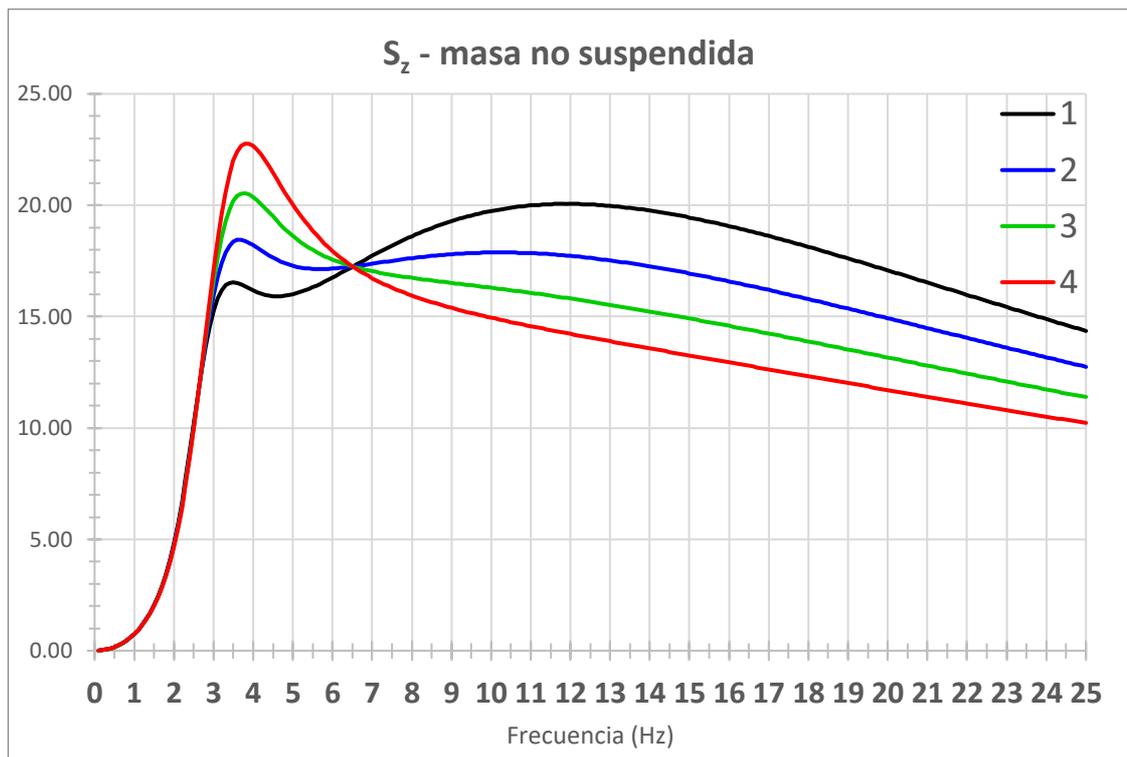
	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	2,4924	2,4924	2,4924	2,4924
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,6256	0,6738	0,7219	0,7700
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	1,9444	1,8418	1,7248	1,5902
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	2,1186	2,0676	2,0323	2,0121
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	15,3837	15,3837	15,3837	15,3837
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	1,6166	1,6372	1,6649	1,6991

Tabla 20: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje delantero en el Rally 4 configuración de asfalto.

Ahora de la misma manera que el vehículo de serie, se representa la densidad espectral de la aceleración ( $S_{\ddot{z}}$ ).



Gráfica 31: Densidad espectral de la masa suspendida en el eje delantero en el Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 32: Densidad espectral de la masa no suspendida en el eje delantero en el Rally 4 configuración de asfalto.

Una vez calculado las funciones de densidad espectral, se pasa a calcular las aceleraciones que sufren la masa suspendida y la masa no suspendida.

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	10,1251	10,3339	10,5504	10,7720
$a_{rms} M_{NS} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	20,1208	19,3027	18,6247	18,0635

Tabla 21: Aceleraciones de la suspensión en el eje delantero en el Rally 4 configuración de asfalto.

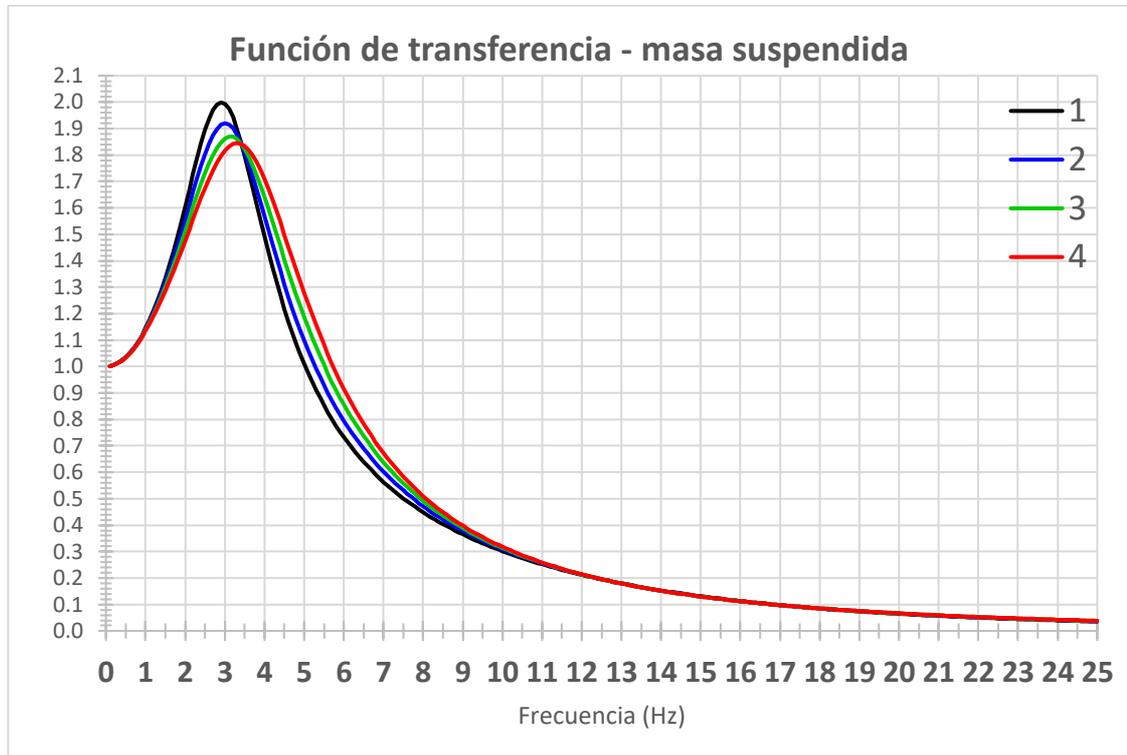
Como se ve, las aceleraciones en el eje delantero son más bruscas que en el vehículo de serie y la diferencia entre la masa suspendida y no suspendida es mucho más pequeña. Esto es porque se busca minimizar la diferencia en la aceleración experimentada por la masa suspendida y la masa no suspendida para lograr un mejor rendimiento en este tipo de vehículos.

#### 2.6.5. Rally 4 con configuración de asfalto en el eje trasero

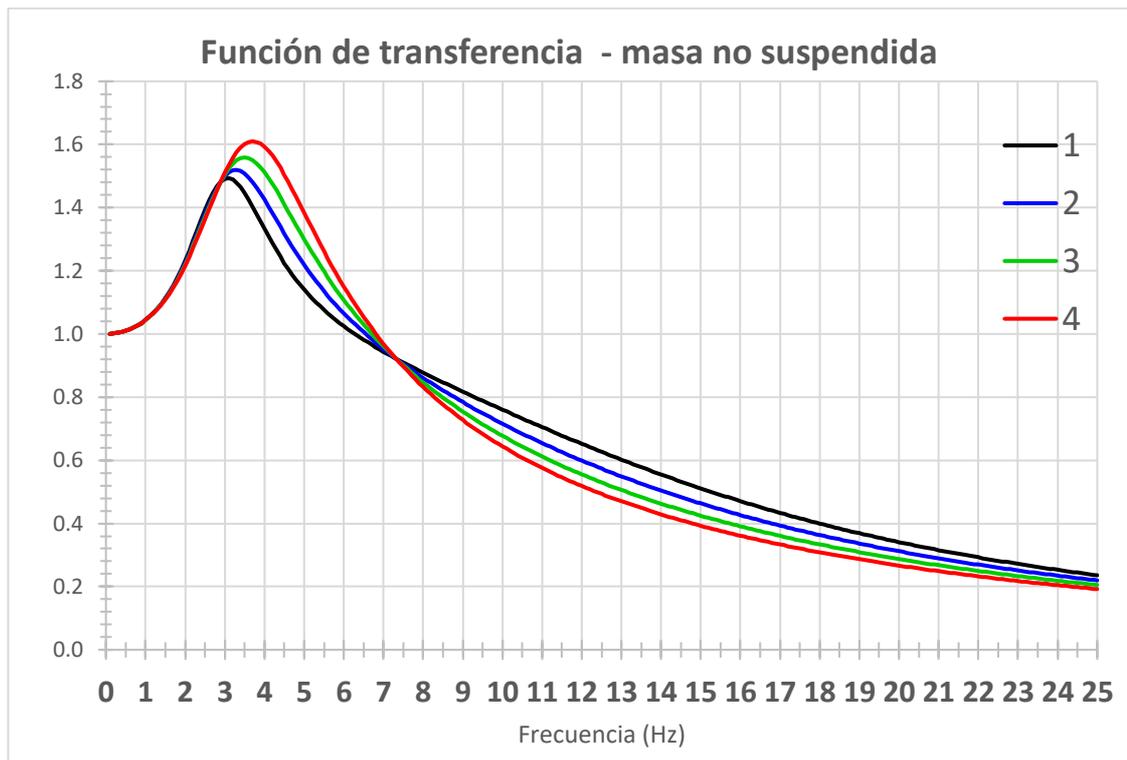
Se pasa a hacer todo este mismo proceso con el eje trasero del Rally 4 con configuración para asfalto. Al igual que con el vehículo de serie, se busca que la frecuencia natural en este eje sea del orden de magnitud entre 1,1 y 1,2 veces superior. En la Tabla 22 podemos ver os valores de la rigidez y amortiguación de la suspensión.

	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	76.000	76.000	76.000	76.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	5.000	5.200	5.500	6.000

Tabla 22: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje trasero en el Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 33: Función de transferencia de la masa suspendida en el eje trasero del Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 34: Función de transferencia de la masa no suspendida en el eje trasero del Rally 4 configuración de asfalto.

Al igual que en el caso anterior de la suspensión delantera, Según se ve en la Gráfica 33 y la Gráfica 34 las mejores opciones de suspensión son las que corresponden con las de color verde y azul. A continuación, en la Tabla 23 se puede ver los resultados de las funciones de transferencia y el valor de los coeficientes de amortiguación.

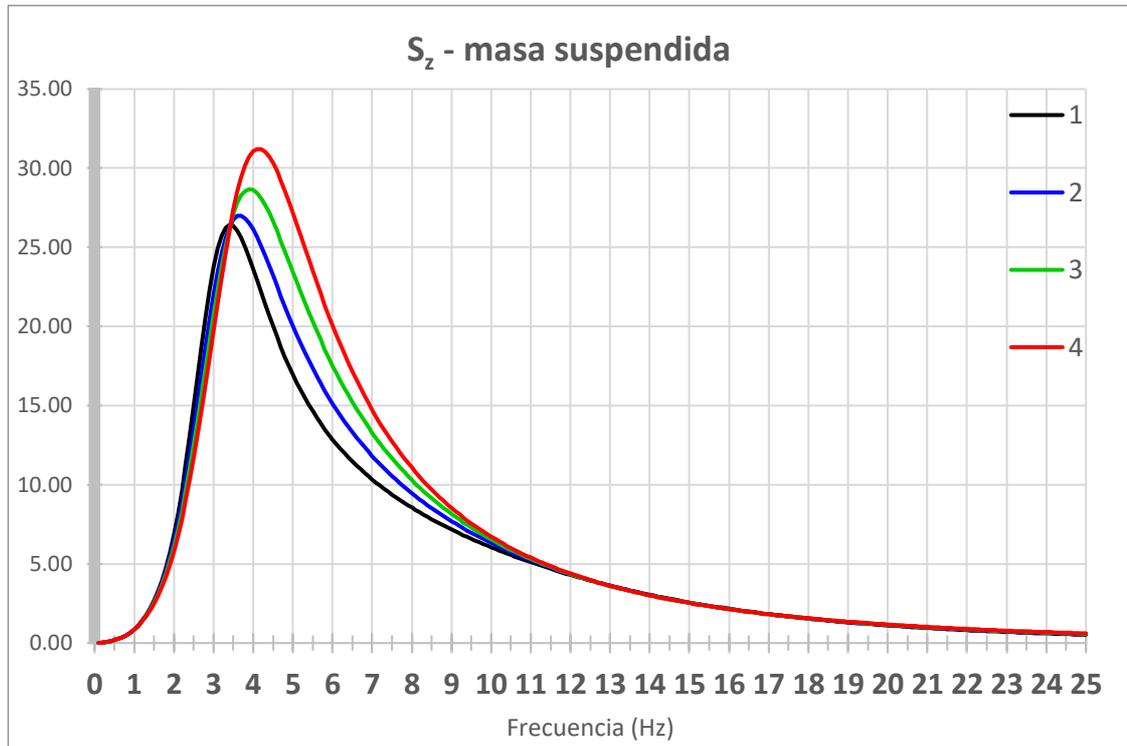
	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	2,7467	2,7467	2,7467	2,7467
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,5893	0,6548	0,7203	0,7858
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	2,2190	2,0759	1,9053	1,6989
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	1,9987	1,9200	1,8694	1,8450
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	14,8815	14,8815	14,8815	14,8815
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	1,4932	1,5193	1,5589	1,6100

Tabla 23: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje trasero en el Rally 4 configuración de asfalto.

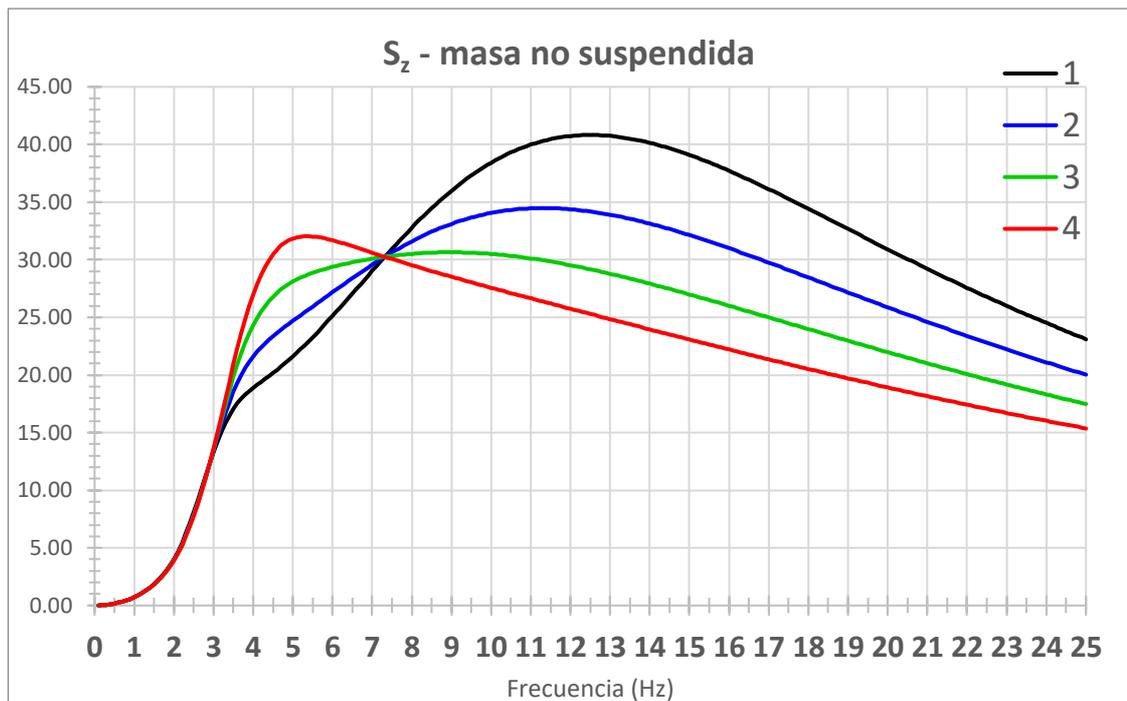
Como se buscan coeficientes de amortiguación próximos al 75%, la mejor opción es la 3 (línea verde) y al igual que en el eje delantero se puede descartar la otra opción que según los gráficos se podría tener en cuenta.

También se comprueba que se cumple el que la frecuencia natural es del orden entre 1,1 y 1,2 veces superior a la del eje delantero.

Ahora se pasa a representar la densidad espectral de la aceleración de la masa suspendida y no suspendida.



Gráfica 35: Densidad espectral de la masa suspendida en el eje trasero en el Rally 4 configuración de asfalto.



Gráfica 36: Densidad espectral de la masa no suspendida en el eje trasero en el Rally 4 configuración de asfalto.

Ahora se calculan las aceleraciones como en los casos anteriores.

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	12,1230	12,4990	12,8889	13,2859
$a_{rms} M_{NS} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	26,6707	25,1329	23,9263	22,9802

Tabla 24: Aceleraciones de la suspensión en el eje trasero en el Rally 4 configuración de asfalto.

Al igual que el vehículo de serie, se ve que las aceleraciones en el eje trasero son mayores que en el eje delantero por los mismos motivos. La diferencia entre las aceleraciones de la masa suspendida y la no suspendida también son más reducidas que en la versión de serie.

Antes de pasar a evaluar la configuración para tierra del Rally 4, Se puede sacar ya algunas conclusiones acerca de la diferencia que presentan las suspensiones diseñadas para un vehículo de serie y para uno de rallyes.

La suspensión de un vehículo de calle está diseñada para proporcionar un manejo suave y cómodo en la carretera. Por lo general, cuentan con amortiguadores y resortes más suaves y flexibles. En contraste, la suspensión de un vehículo de rally, que está diseñada para soportar altas fuerzas laterales y de impacto en terrenos irregulares. Por lo tanto, cuentan con amortiguadores y resortes más rígidos y ajustables.

Las suspensiones de los automóviles de rally suelen ser más ajustables que las suspensiones de los vehículos de calle. Los amortiguadores y resortes de los automóviles de rally se pueden ajustar para adaptarse a diferentes tipos de terrenos y condiciones de conducción.

Por último, las suspensiones de los vehículos de rally están diseñadas para maximizar el rendimiento y la velocidad en superficies irregulares. En contraste, las suspensiones de los vehículos de calle están diseñadas para proporcionar una conducción suave y cómoda en la carretera.

#### 2.6.6. Rally 4 con configuración de tierra en el eje delantero

Ahora se pasa a evaluar la configuración para tierra. En la Tabla 12 ahora se debe tener en cuenta la casilla para tierra en el valor promedio  $C_{sp}$  que corresponde según la norma ISO 8608 con carretera sin pavimentar con superficie compactada, pero con irregularidades significativas (grava) (ISO/TC 108/SC 2, 2016).

Al igual que para las versiones anteriores, se sigue teniendo en cuenta los datos de la Tabla 11 y se realiza el mismo proceso de calculo que esta explicado al principio de este capítulo. La rigidez y amortiguación de la suspensión se pueden ver en la Tabla 25. Para esta configuración de tierra estamos buscando que la frecuencia natural en el eje delantero sea aproximadamente 1,8 Hz como ya se dijo con anterioridad.

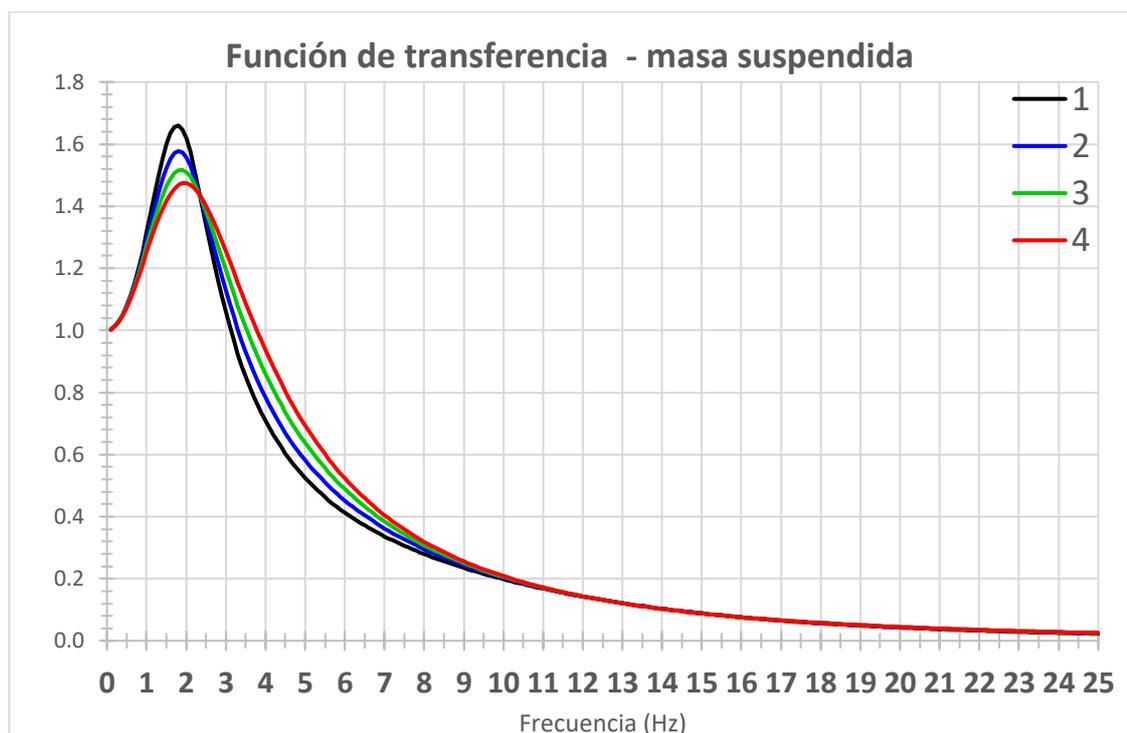
	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	42.000	42.000	42.000	42.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	4.000	4.500	5.000	5.500

Tabla 25: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje delantero en el Rally 4 configuración de tierra.

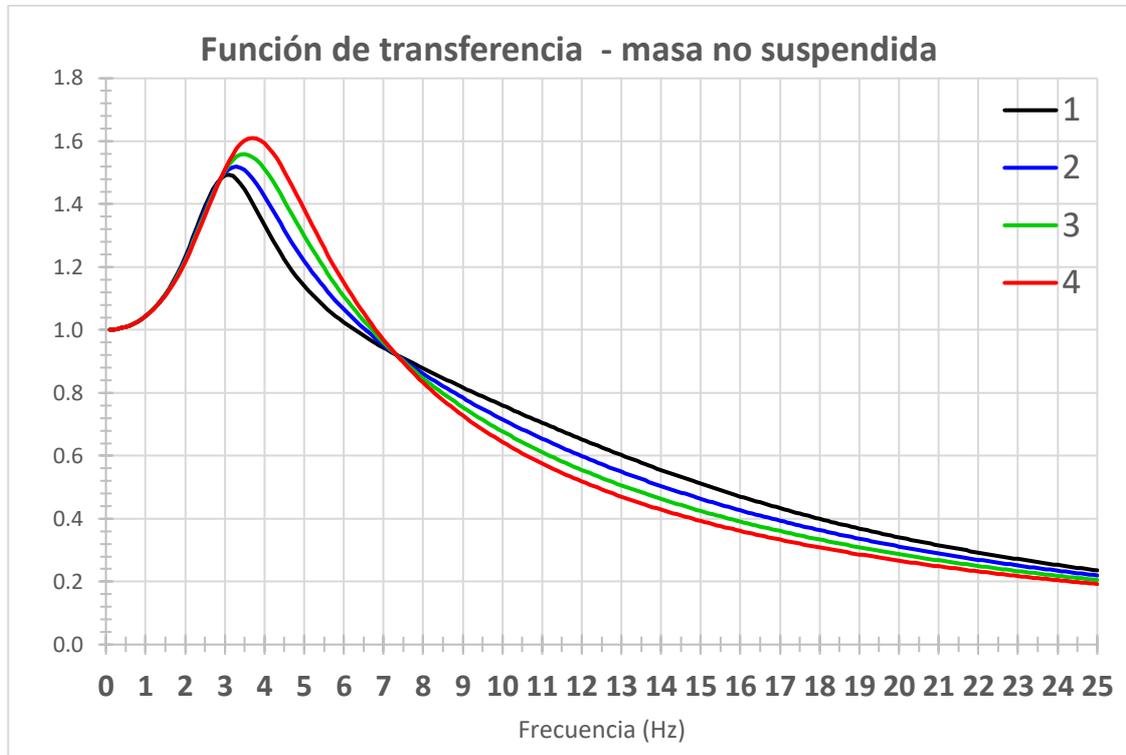
Ya de primeras se comprueba que es más suave que la suspensión que se puede montar en la configuración para asfalto y que la amortiguación de la suspensión es también inferior. La frecuencia natural que se busca en esta configuración para tierra es de aproximadamente 1,8 Hz, pero se sigue buscando el mismo valor del coeficiente de amortiguamiento que para la configuración de asfalto (aproximadamente un 75%).

El porqué de la diferencia en la elección de la frecuencia natural de si la configuración es para tierra o asfalto es que, en superficies más suaves como la tierra, se busca una frecuencia natural más baja para que la suspensión pueda absorber mejor los impactos y mantener las ruedas en contacto con el suelo en todo momento. En cambio, en superficies más duras como el asfalto, se busca una frecuencia natural más alta para que la suspensión pueda reaccionar más rápido a las irregularidades del camino y proporcionar una mayor estabilidad al vehículo.

Como siempre, se empieza con la representación de las funciones de transferencia.



Gráfica 37: Función de transferencia de la masa suspendida en el eje delantero del Rally 4 configuración de tierra.



Gráfica 38: Función de transferencia de la masa no suspendida en el eje delantero del Rally 4 configuración de tierra.

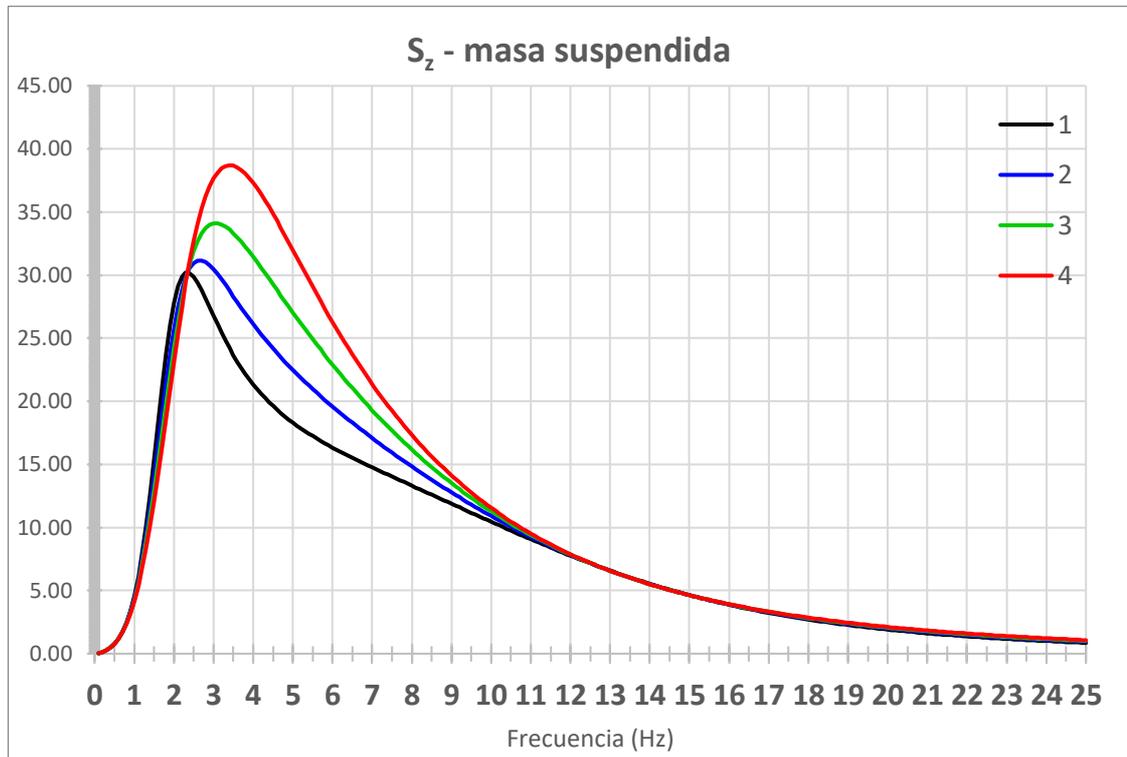
Visualmente se puede apreciar, que para esta configuración las opciones más óptimas serían las que están representadas en verde y azul. En la Tabla 26 se puede ver los resultados obtenidos gráficamente en las funciones de transferencia.

	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	1,7952	1,7952	1,7952	1,7952
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,5851	0,6582	0,7314	0,8045
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	1,4558	1,3514	1,2243	1,0662
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	1,6600	1,5773	1,5168	1,4743
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	13,9009	13,9009	13,9009	13,9009
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	1,2423	1,2603	1,2896	1,3289

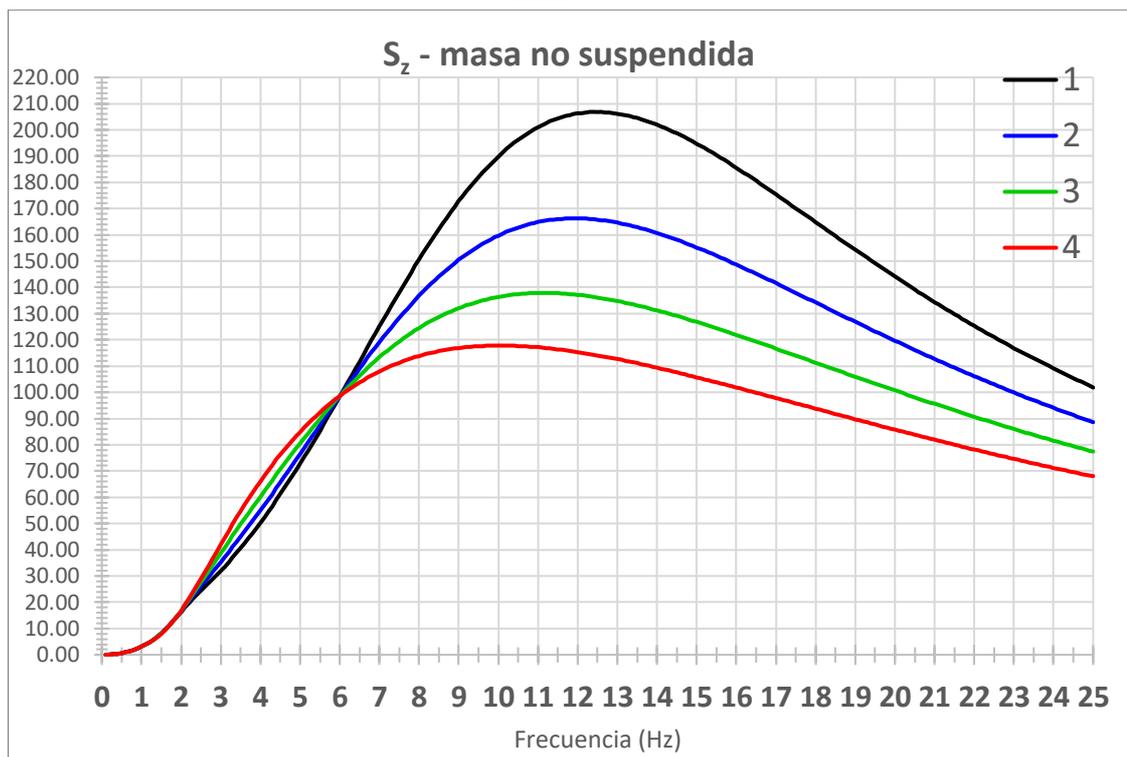
Tabla 26: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje delantero en el Rally 4 configuración de tierra.

Ahora se puede determinar que la que mejor se ajusta a lo buscado es la opción 3 (línea verde). Su coeficiente de amortiguamiento es el que más se aproxima al valor buscado (en este caso un 73,14%)

Se continua con las representaciones de la densidad espectral de la aceleración.



Gráfica 39: Densidad espectral de la masa suspendida en el eje delantero en el Rally 4 configuración de tierra.



Gráfica 40: Densidad espectral de la masa no suspendida en el eje delantero en el Rally 4 configuración de tierra.

El siguiente paso como se ha hecho en el resto, es pasar a calcular las aceleraciones de la masa suspendida y la no suspendida. Los resultados los podemos observar en la

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	14,7788	15,4396	16,0958	16,7426
$a_{rms} M_{NS} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	57,2946	52,8316	49,2078	46,2348

Tabla 27: Aceleraciones de la suspensión en el eje delantero en el Rally 4 configuración de tierra.

Las aceleraciones son mayores que en la configuración de asfalto y la diferencia entre las aceleraciones de la masa suspendida y la no suspendida también lo son. Esto se debe a que cuando una suspensión es menos rígida, tiene una frecuencia natural más baja, lo que significa que la suspensión es capaz de moverse más libremente en respuesta a las irregularidades de la carretera. Esto a su vez significa que la rueda se mantiene en contacto con la superficie de la carretera durante más tiempo y que la suspensión es capaz de absorber más energía cinética.

Debido a esto, la aceleración de la masa suspendida y no suspendida es mayor cuando la suspensión es menos rígida, ya que la suspensión está absorbiendo más energía en lugar de transmitirla directamente al chasis del vehículo.

#### 2.6.7. Rally 4 con configuración de tierra en el eje trasero

Por último, solo queda evaluar el eje trasero en esta configuración para tierra de la versión Rally 4.

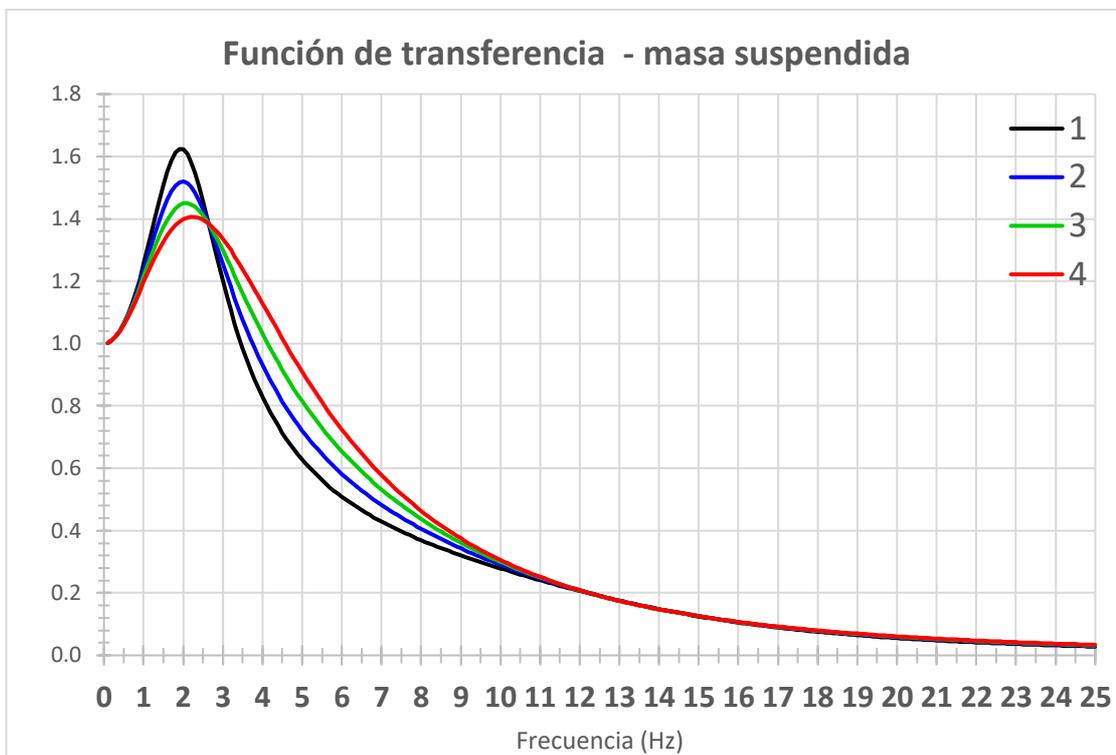
Se repite todo este proceso de cálculo con el eje trasero.

	1	2	3	4
$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	35.000	35.000	35.000	35.000
$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$	3.000	3.500	4.000	4.500

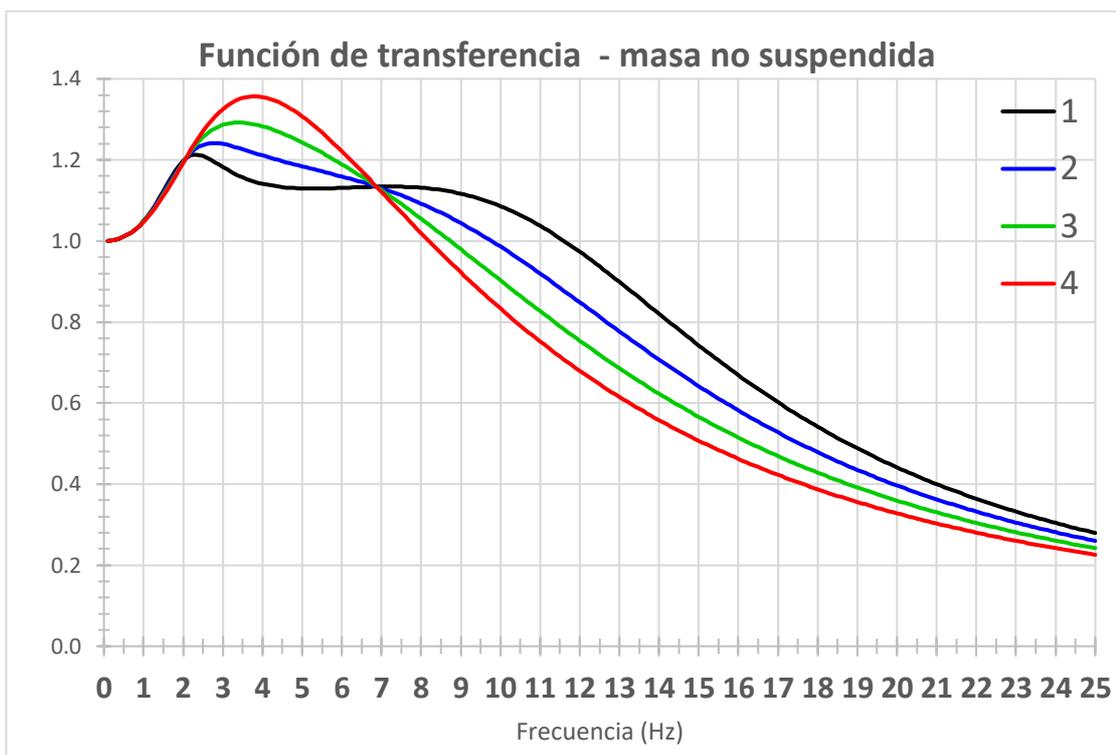
Tabla 28: Rigidez de la suspensión y amortiguación de la suspensión en el eje trasero en el Rally 4 configuración de tierra.

Al igual que en las versiones anteriores, se ve que tanto la rigidez como la amortiguación de la suspensión son inferiores en el eje trasero.

Lo siguiente es representar las funciones de transferencia.



Gráfica 41: Función de transferencia de la masa suspendida en el eje trasero del Rally 4 configuración de tierra.



Gráfica 42: Función de transferencia de la masa no suspendida en el eje trasero del Rally 4 configuración de tierra.

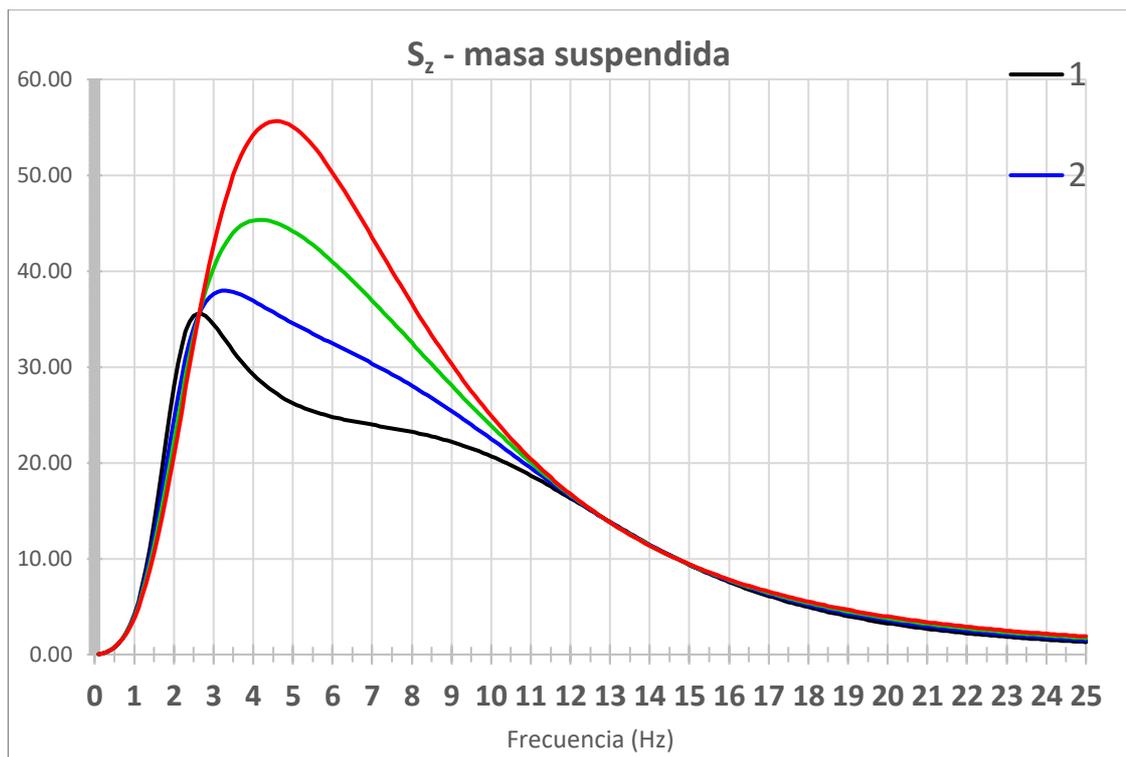
Las opciones más óptimas según los gráficos se puede ver que son las que están representadas por las líneas verde y azul. En la Tabla 29 se puede ver los resultados numéricos que se muestran en las gráficas anteriores.

	1	2	3	4
FRECUENCIA NATURAL DE $M_s$ [Hz]	1,7952	1,7952	1,7952	1,7952
COEFICIENTE AMORTIGUACIÓN	0,5851	0,6582	0,7314	0,8045
FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA DE $M_s$ [Hz]	1,4558	1,3514	1,2243	1,0662
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_s$	1,6600	1,5773	1,5168	1,4743
FRECUENCIA NATURAL DE $M_{NS}$ [Hz]	13,9009	13,9009	13,9009	13,9009
VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE $M_{NS}$	1,2423	1,2603	1,2896	1,3289

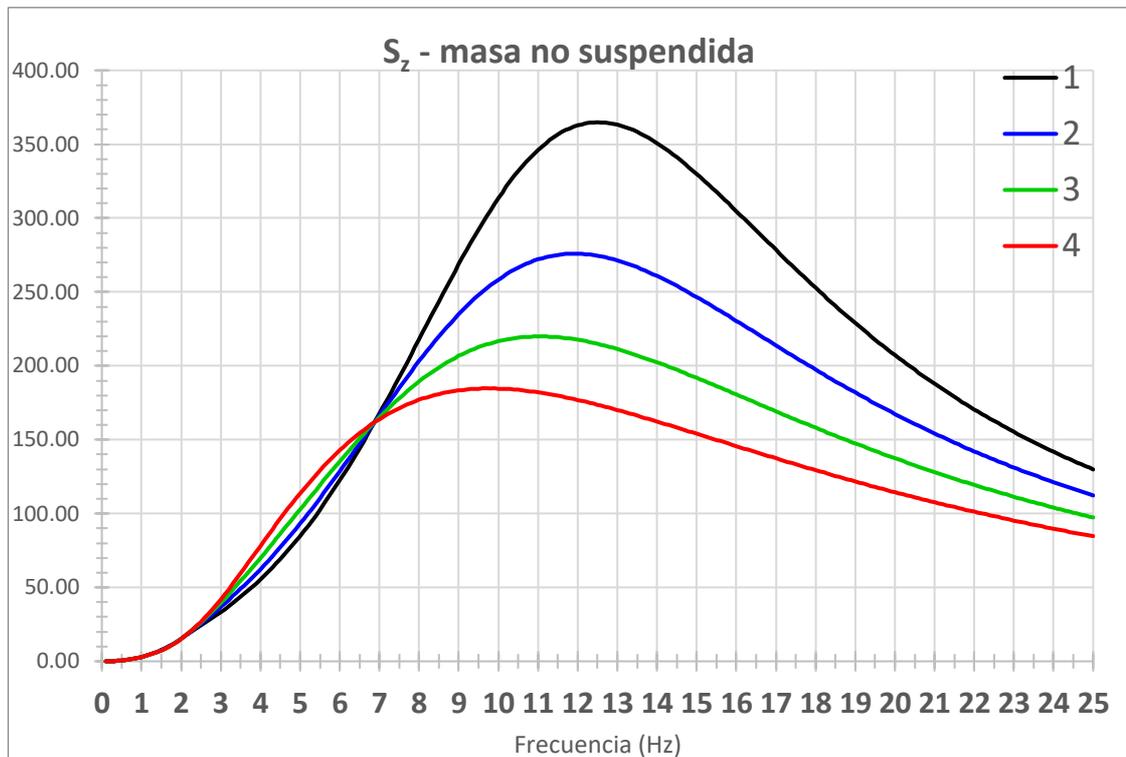
Tabla 29: Resultados de las gráficas de función de transferencia en el eje trasero en el Rally 4 configuración de tierra.

Al igual que en los casos anteriores, la mejor opción vuelve a ser la 3 (línea verde).

El siguiente paso es representar la densidad espectral de la aceleración de la masa suspendida y la no suspendida.



Gráfica 43: Densidad espectral de la masa suspendida en el eje trasero en el Rally 4 configuración de tierra.



Gráfica 44: Densidad espectral de la masa no suspendida en el eje trasero en el Rally 4 configuración de tierra.

Ya para acabar, se calculan las aceleraciones que sufren la masa suspendida y la no suspendida. En la Tabla 30 se puede ver los resultados.

	1	2	3	4
$a_{rms} M_S \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	14,7788	15,4396	16,0958	16,7426
$a_{rms} M_{NS} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	57,2946	52,8316	49,2078	46,2348

Tabla 30: Aceleraciones de la suspensión en el eje trasero en el Rally 4 configuración de tierra.

Al igual que en el eje delantero las aceleraciones son mayores que en la configuración para asfalto. Según la explicación que se dio al final de ese cálculo, los resultados para esta configuración son lógicos. También se comprueba, que al igual que con el eje delantero, las aceleraciones son mayores en esta configuración para tierra que la que lo es para asfalto.

#### 2.6.8. Rigidez y amortiguación seleccionadas

A continuación, se muestra una tabla con la rigidez y la amortiguación seleccionadas para cada versión del vehículo y cada eje de este.

	$K_s \left[ \frac{N}{m} \right]$	$C_s \left[ \frac{N*s}{m} \right]$
<i>Serie – eje delantero</i>	20.000	1.300
<i>Serie – eje trasero</i>	13.000	1.000
<i>Rally 4 asfalto – eje delantero</i>	97.000	7.500
<i>Rally 4 asfalto – eje trasero</i>	76.000	5.500
<i>Rally 4 tierra – eje delantero</i>	42.000	5.000
<i>Rally 4 tierra – eje trasero</i>	35.000	4.000

Tabla 31: Rigidez y amortiguación seleccionadas.

## 2.7. Modificación del sistema de dirección

Lo primero que se debe realizar es cambiar el sistema de piñón cremallera que lleva montado el vehículo de serie por otro con una desmultiplicación menor que ayude al piloto a realizar los giros con mayor rapidez. Esto significa que el movimiento del volante será más sensible y reactivo. Todo esto conlleva también la sustitución de las rotulas de dirección por otras con mayor flexibilidad que ayuden a que no flecte la caja de la dirección. Este tipo de rótulas ayudan a que el chasis se flexione a la hora de tomar las curvas o se encuentren baches sobre el firme. También pueden ayudar a mejorar el ángulo de entrada en las curvas, la maniobrabilidad y la estabilidad del vehículo en situaciones de alta velocidad.

El tipo de asistencia eléctrico que lleva el vehículo de serie se mantiene y no se modifica.

Las desventajas de no cambiar el sistema eléctrico por uno hidráulico es que en temas de fiabilidad está por debajo, pero su ventaja es que la dirección es más suave, evitando un endurecimiento que si provoca la dirección hidráulica. Al estar equipado con la dirección asistida eléctrica, su centralita de control puede estar reprogramada, pero en ningún caso puede tener otro objetivo que el de reducir el esfuerzo físico necesario para dirigir el vehículo.

El sistema antirrobo del vehículo puede y es desactivado. A mayores y por temas de seguridad en caso de accidente y evacuación lo más rápida posible del vehículo por parte del piloto, el volante debe tener un mecanismo de liberación rápida (volante extraíble). Este debe consistir en una brida concéntrica al eje del volante y la columna de dirección, de color amarillo (por reglamento) por anodización o cualquier otro método de recubrimiento metálico duradero de color amarillo. Debe instalarse en la columna de dirección, justo detrás del volante. La liberación debe ser operada tirando de la anilla en dirección al cuerpo del piloto por el eje del volante (FIA, 2019).

Otra modificación bastante común en este tipo de vehículos es que, al eliminar los asientos traseros con el objetivo de aligerar peso, es la de retrasar la posición de los asientos delanteros a una más centrada dentro del habitáculo y con ello modificar la posición del centro de gravedad, como puede verse en la Ilustración 20. La columna de dirección empleada será de mayor longitud y se necesitaran barras auxiliares de sujeción para poder desplazar el volante hacia atrás.

El volante original del vehículo también será sustituido por uno con mecanismo de liberación de este (por reglamento y seguridad) mediante una anilla de color amarillo.

El diseño de este será más simple y ligero, recubierto de piel vuelta para favorecer el agarre por parte del piloto.



*Ilustración 20: Volante Ford Fiesta Rally 4. Fuente (Motorsport Auctions, s.f.).*

## 2.8. Modificación de las ruedas y del sistema de frenado

Las ruedas completas (conjunto neumático y llanta) no pueden superar en ningún momento la anchura de 8" (203,2 mm) ni un diámetro de 650 mm. En proyección vertical la carrocería del vehículo debe cubrir como mínimo 120° de la parte superior de la rueda. Los pernos de sujeción pueden sustituirse por pernos y tuercas.

El reglamento también especifica que las ruedas son libres de elección siempre que estén hechas de aluminio o acero fundidos, siempre que formen una misma pieza. Las ruedas de magnesio como se hacían antes ya no se pueden usar por temas de seguridad, a pesar de proporcionar un ahorro de peso considerable.

Lo que queda totalmente prohibido es el uso de cualquier sistema o dispositivo que permita mantener el rendimiento total del neumático a una presión igual o inferior a la atmosférica. Además, el espacio entre llanta y neumático solo puede llenarse con aire.

Se debe hacer una distinción entre neumáticos para asfalto en la que las medidas autorizadas son de 6,5" x 16" con un peso mínimo de la llanta de 7,5 kg. Y las llantas para grava y tierra deben tener unas medidas de 6,5" x 15" con un peso mínimo de 8 kg (la primera medida correspondería al ancho de la llanta, mientras que la segunda sería su diámetro).

No es obligatorio que el vehículo incorpore una rueda de repuesto, pero si lo hiciera, esta deberá estar dentro del habitáculo y en una zona que no suponga la modificación exterior de la carrocería (FIA, 2019).



Ilustración 21: Neumático de asfalto (Izq.), Neumático de tierra (Dcha.). Fuente: (Race Market, s.f.).

Antes de indicar que permite el reglamento de la categoría en los frenos, es necesario indicar que especificaciones son necesarias en los diferentes tipos de superficies (ya se ha mencionado en el párrafo anterior que en los neumáticos también existen diferencias de configuración y características en función de la superficie sobre la que vaya a disputar la prueba).

Hay que destacar que el agarre aumenta el esfuerzo al que debe someterse el sistema de frenado. En una misma etapa se puede pasar de la grava al asfalto y viceversa (esto es poco común, ya que normalmente una etapa completa se suele realizar sobre una misma superficie). La lluvia también puede modificar el coeficiente de fricción de la superficie y con ello el agarre.

Otra circunstancia que aumenta el esfuerzo sobre el sistema de frenos es la configuración del tramo. No es lo mismo un tramo en el que predominan rectas que en uno en el que predominan curvas. El desnivel del tramo también influye bastante.

Un tema para tener muy en cuenta a la hora de diseñar todo el sistema de frenos es que los pilotos están continuamente pisando el pedal de freno en los rallyes cuya superficie este compuesta por tierra o grava. Esto conlleva que el circuito de frenos no suela completar su ciclo y este continuamente bajo presión y no le deje refrigerar correctamente. Si a todo esto le sumamos que en ciertos tramos los coches deben cruzar cursos de ríos, pisar charcos, etc., el choque térmico al que se ven sometidos los discos y pastillas puede provocar el agrietamiento de los primeros y el desprendimiento de las segundas.

En los rallyes de asfalto la conducción es más liviana y limpia con muchas menos correcciones. El sistema de frenos va mucho más tranquilo, pero en cambio, sí son sometidos a frenadas más secas, bruscas y prolongadas. En consecuencia, los diámetros de los discos suelen ser mayores que los frenos utilizados para tierra y grava. (Brembo, 2019).

En cuanto a la normativa referente a los frenos, si el vehículo de serie está equipado con un sistema de antibloqueo de frenos (ABS), como es el caso, el reglamento permite la sustitución de la unidad de control y de todos los elementos que componen el sistema de frenado antibloqueo por una que sea regulable en función de las necesidades. En este caso la bomba de freno de serie se sustituirá por una en cada eje con un repartidor de frenada de balancín situado junto al freno de mano y que así el piloto pueda regular el reparto de frenada entre ejes en función de sus necesidades. A mayores podrán añadirse dispositivos, encargados de la limpieza de barro u otras sustancias que se acumulan en los discos y pastillas de freno con el objetivo de que no pongan en riesgo a los pilotos y copilotos durante las pruebas. Por normativa, los conductos de refrigeración de los frenos deberán ser de 10 cm de diámetro como máximo en el caso de llevar uno solo. Para el caso de querer llevar dos,

el diámetro máximo permitido es de 7 cm de diámetro (este diámetro deberá ser constante en al menos 2/3 de la longitud total del conducto). La fabricación de estos puede ser a elección del constructor (incluyendo materiales compuestos). Para el montaje y fijación de estos conductos se permiten dos configuraciones:

- En caso de tener aberturas originales en la carrocería frontal (paragolpes) donde deberían ir los faros antiniebla del vehículo, podrán ser utilizados como puntos de anclaje de los conductos de refrigeración hasta los frenos, siempre que estas aberturas originales no sean modificadas de ningún tipo.
- En caso de no tener esas aberturas originales en la carrocería, se permitirá realizar dos de forma circular con un diámetro máximo de 10 cm en la zona del paragolpes delantero.

El pedal de freno, el cilindro maestro y los reguladores de presión delanteros y traseros (posee dos circuitos independientes) deberán ser los originales u homologados. En el cilindro maestro la única modificación permitida será la de la carcasa con la única finalidad de una mejor fijación.

El sistema hidráulico del freno de mano de serie puede ser sustituido por uno que elimine el bloqueo de los frenos traseros instantáneamente. Su posición también puede modificarse (FIA, 2019).

El vehículo modificado tiene dos configuraciones posibles en los frenos, dependiendo de si se disputa una prueba sobre asfalto o sobre grava o tierra. En el primer caso los frenos que se montan en el eje delantero son unos discos ventilados de 330 mm de diámetro de la marca AP Racing y en el eje trasero son unos discos macizos de 280 mm de la marca Alcon. En el segundo caso los discos delanteros son de un diámetro de 285 mm (como ya se explicó anteriormente son de menor tamaño) de la misma marca que para el caso de superficie de asfalto. Para el eje trasero el diámetro y la marca no varían con respecto al primer caso.



Ilustración 22: Discos de freno delanteros (Izq.), discos de freno trasero (Dcha.). Fuente: (M-Sport, 2019).

En cuanto a los caliper (pinzas de freno), las del vehículo de serie de tipo flotantes son sustituidas por dos fijas de cuatro pistones en el eje delantero y por dos fijas de dos pistones en el eje trasero, todas de la marca AP Racing. El objetivo es aumentar la presión de frenada y repartirla más homogéneamente a lo largo de toda la superficie de la pastilla. A mayores y con vistas a mejorar el tiempo de recuperación de la posición de los pistones en el momento de levantar el pie del pedal del freno, estas pinzas incluyen unos muelles de recuperación, tal como permite el reglamento de la categoría (M-Sport, 2019).

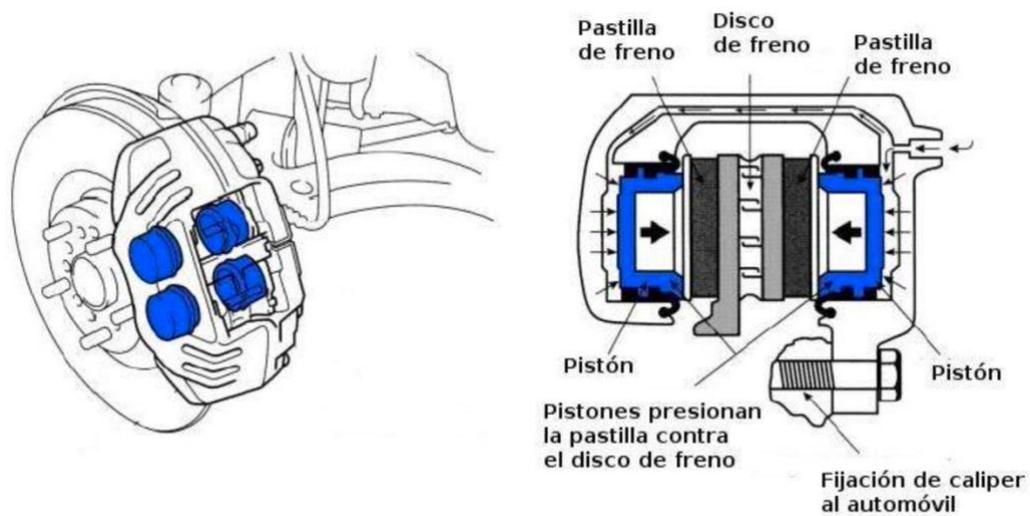


Ilustración 23: Pinza de montante fijo con cuatro pistones. Fuente: (Martinez, 2011).

En cuanto a las pastillas de freno, las originales que llevaba el vehículo de serie son sustituidas por un modelo denominado DS1.11 para superficies de grava y tierra, teniendo un coeficiente de fricción medio de 0,51 en una horquilla de temperaturas de funcionamiento de 200 a 700°C. En el caso de correr sobre superficie de asfalto se utilizan unas pastillas de ferodo con denominación comercial DS UNO, con un coeficiente de fricción medio de 0,62. La horquilla de temperaturas es similar a la anterior. Este último modelo posee un grip inicial bastante elevado (GT2i).

Las características más destacables de este tipo de pastillas es que a pesar de tener que trabajar en un rango de temperaturas como el anteriormente mencionado, es que son capaces de trabajar incluso cuando la temperatura ambiente es baja. El gran par de frenado que son capaces de desarrollar sin apreciarse “fading” (perdida de eficiencia en el sistema de frenado a consecuencia de la fatiga del material) y que tienen una baja resistencia en el momento de soltar el pedal del freno (GT2i).

Los latiguillos y canalizaciones del sistema de frenado originales serán sustituidos por unos de tipo aeronáutico con refuerzo de malla capaces de soportar presiones mínimas de 280 bares. Estas características hacen que se mejore la resistencia al desgaste por fricción y la resistencia a la dilatación por presión y temperatura, haciendo que el tacto sobre el freno se mantenga lo más estable posible ante las variaciones de las características en el sistema.

El líquido de frenos se reemplazará por otro con un punto de ebullición mayor, con el objetivo de que, con el aumento de temperatura por el uso excesivo del mismo, provoque burbujas dentro de los conductos, disminuyendo su eficiencia.



### 3. PROCESO DE HOMOLOGACIÓN

La empresa que diseña las piezas nos da dos opciones de obtener el vehículo. Una de ellas es comprando el vehículo ya modificado al completo y homologado, o comprar únicamente el kit de piezas de modificación y que seamos nosotros mismos los que nos encarguemos de realizar todos los pasos desde su modificación hasta su homologación, para su competición a nivel nacional.

Si nos decantamos por la segunda opción, los pasos que debemos seguir serían los siguientes.

1. En primer lugar, se debería buscar un taller especializado que pudiera encargarse de la modificación de nuestro Ford Fiesta ST 1.0 EcoBoost. Este deberá indicar en la ficha técnica del vehículo todas las modificaciones que se le han realizado.
2. Se debe solicitar la obtención del certificado de conformidad técnica (CCT). Este es un documento que acredita que un vehículo cumple con las normas y requisitos técnicos establecidos por la Real Federación Española de Automovilismo (R.F.E.D.A.) para competir en eventos de rally en España.
3. Cumplir los requisitos técnicos: El vehículo debe cumplir con los requisitos técnicos establecidos en el Real Decreto 750/2010 y en el Real Decreto 866/2010, así como las normas de seguridad, la homologación de los componentes del vehículo, la configuración de las suspensiones y la carrocería, y la homologación de los sistemas de frenado entre otros.
4. Pruebas técnicas: Se deben realizar pruebas técnicas para comprobar que el vehículo cumple con los requisitos establecidos en los Reales Decretos. Estas pruebas son realizadas por laboratorios acreditados por la R.F.E.D.A.
5. Homologación: Una vez que el vehículo cumple con todos los requisitos técnicos y ha pasado las pruebas necesarias, se debe presentar una solicitud de homologación ante la R.F.E.D.A.
6. I.T.V.: Antes de la homologación definitiva, se debe realizar una inspección técnica del vehículo para verificar que todo está en orden.
7. Certificado de homologación: si el vehículo cumple con todos los requisitos y ha superado las pruebas y la inspección técnica, se emitirá el certificado de homologación correspondiente.

El proceso para homologar el vehículo de forma visual es el siguiente:

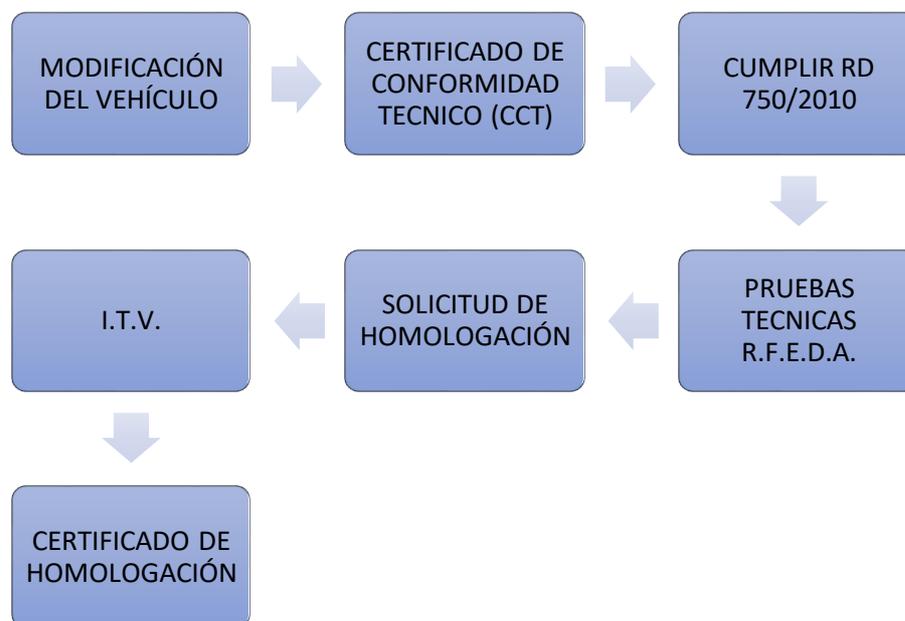


Ilustración 24: Fases del proyecto de homologación.

El certificado de conformidad técnica no le podemos encontrar en la página oficial de la R.F.E.D.A ya que es un documento emitido después de que un vehículo haya pasado satisfactoriamente todas las pruebas técnicas.

La R.F.E.D.A. cuenta con laboratorios acreditados para realizar las pruebas técnicas necesarias para verificar que los vehículos de competición cumplen con los requisitos establecidos en la normativa vigente (RD 750/2010 y RD 866/2010). Además, cuenta con un departamento técnico encargado de asesorar a los equipos y pilotos sobre las normas y requisitos para la homologación de vehículos de competición. Estas pruebas incluyen la medición de emisiones, la comprobación de la seguridad del vehículo y la comprobación de la potencia y rendimiento del motor (*Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010*) (*Ministerio de la Presidencia, 2010*).

Una vez hechas las pruebas deberemos rellenar la solicitud de homologación del vehículo, está la encontraremos fácilmente en la página oficial de la R.F.E.D.A en el apartado de fichas de homologación.

Si todo lo anterior ha sido superado satisfactoriamente por el vehículo (incluida la I.T.V. necesaria), la R.F.E.D.A nos expedirá el certificado de conformidad técnica.

Este tipo de vehículos necesitan de pasar todo este proceso por que deben de ser aptos para la circulación por las vías públicas (deben estar matriculados y tener todos los documentos necesarios) pero solo pueden ser conducidos por personas que tengan la licencia necesaria para poder llevarlos (Real Federacion Española de Automovilismo, s.f.).



Ilustración 25: Ejemplo de ficha de i.t.v. de competición.



## 4. ESTUDIO ECONOMICO

### 4.1. Estudio económico del proyecto

#### 4.1.1. Introducción

El estudio económico de este proyecto se va a dividir en varios apartados. Se llevará a cabo un análisis detallado del proceso del proyecto, en el que se incluirá la estimación de los tiempos necesarios, la asignación de personal requerido y los costos directos e indirectos asociados al proyecto y por último se incluirá un listado de los kits de piezas necesarios para realizar la modificación del vehículo.

Este proyecto ha sido llevado a cabo por una empresa real llamada “M-Sport Poland”, pero el objetivo de este capítulo es desglosar los supuestos gastos que tendría el desarrollo del kit de conversión que se necesita implantar en el vehículo de serie para su conversión a la versión Rally 4 y su posterior homologación.

Se trata de un proyecto que no busca hacer las piezas de manera tangible, si no un desarrollo teórico con los datos que se tienen disponibles acerca de la empresa, el vehículo y las piezas.

#### 4.1.2. Jerarquía y recursos humanos del proyecto

La empresa cuenta con aproximadamente 165 personas en sus instalaciones de Polonia encargadas de desarrollar este proyecto. Los perfiles de los que se necesitan sus servicios son:

- Director del proyecto: Es el responsable de liderar y gestionar todo el proceso de un proyecto desde su inicio hasta su finalización, asegurándose de que se cumplan los objetivos establecidos, se respeten los plazos y presupuestos, y se alcancen los resultados esperados.
- Jefes de departamento: encargados de supervisar todo el proceso de desarrollo del vehículo en cada departamento y asegurarse de que se cumplan los plazos y presupuestos establecidos.
- Ingenieros mecánicos, eléctricos y de puesta a punto: encargados de diseñar y desarrollar la estructura del vehículo, el sistema de transmisión, el sistema de suspensión, la aerodinámica y el sistema de propulsión.
- Mecánicos de automóviles: encargados del mantenimiento y la reparación del vehículo durante las pruebas y las competiciones.

- Pilotos de Pruebas: responsables de probar el coche en diferentes terrenos y condiciones de conducción, y proporcionar comentarios y sugerencias para mejorar el rendimiento.
- Administrativos: desempeñan un papel fundamental en la gestión y organización del trabajo administrativo y en el apoyo a la ejecución del proyecto.

El personal involucrado en el proyecto tiene un organigrama estructural como el siguiente:

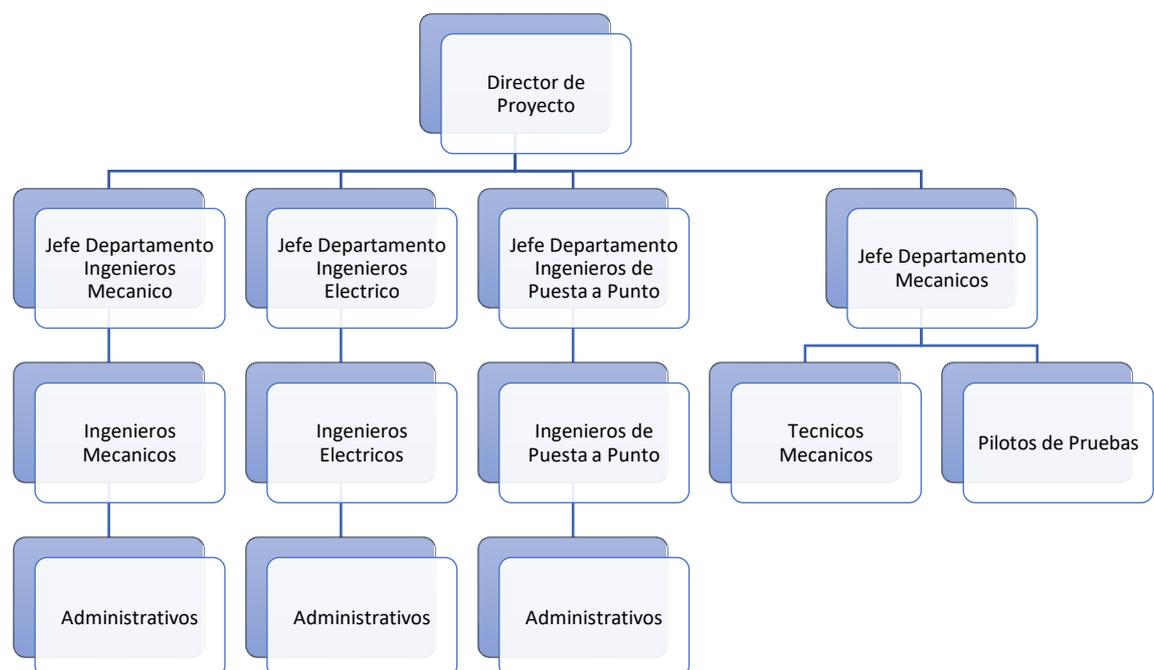


Ilustración 26: Organigrama de jerarquía de la empresa.

#### 4.1.3. Fases del proyecto

El desarrollo de un proyecto de diseño de un coche de rally es un proceso complejo que implica varias fases. A continuación, se detallan las fases de las que constará el proyecto:

- Investigación y análisis: En esta fase se lleva a cabo una investigación exhaustiva para comprender las necesidades y requerimientos de los conductores, equipos y patrocinadores. También se realiza un análisis de las normas y regulaciones de la competición para asegurarse de que el coche cumple con los requisitos exigidos.

- **Diseño conceptual:** En esta fase, se elaboran los primeros bocetos y esquemas del automóvil de rally, (en este caso se parte de un vehículo de serie) que sirven como base para el diseño definitivo. Se realizan simulaciones y pruebas virtuales para evaluar el rendimiento del vehículo.
- **Diseño preliminar:** En esta fase, se elaboran los primeros modelos físicos de las piezas del automóvil de rally y se realizan pruebas para evaluar su rendimiento en condiciones reales. Se hacen ajustes y mejoras en el diseño para mejorar el rendimiento.
- **Producción y fabricación:** En esta fase, se construye el automóvil de rally en sí. Se fabrican y ensamblan los componentes, y se realiza un control de calidad para asegurarse de que el vehículo cumple con las especificaciones y normas de seguridad.
- **Pruebas y ajustes:** En esta fase, se realizan pruebas de rendimiento y ajustes finales en el automóvil de rally. Se asegura que el vehículo cumple con los requisitos de la competición y que tiene el mejor rendimiento posible.

La Ilustración 27 resume de forma visual todas las fases del proyecto.



*Ilustración 27: Fases del proyecto.*

#### 4.1.4. Costes directos

Los costes que impactan directamente en el precio final del producto o servicio se consideran costes directos en este proyecto. Para este proyecto específico, los costes directos estarán conformados por la mano de obra, los costes de amortización de los equipos empleados y los costes directos de materiales.

Se empieza por la mano de obra. En este organigrama tenemos a 43 personas que se dedican a desarrollar el proyecto dividido en el siguiente número de integrantes por puestos:

- 1 director de proyecto.
- 1 jefe de cada departamento. En total 3.
- 6 ingenieros en cada departamento.
- 1 jefe de taller.
- 8 mecánicos.
- 2 pilotos de pruebas.
- 10 administrativos.

Para el cálculo de los costes que suponen los trabajadores a la empresa se van a utilizar los salarios brutos anuales indicados en el convenio colectivo del metal en Valladolid, que es al convenio al que pertenece este tipo de empresas. La empresa en realidad está instalada en el país de Polonia, pero en este estudio económico se supondrá que estará instalada en la ciudad de Valladolid, España. Para los trabajadores que no son jefes de departamento ni el director, se supondrá unas deducciones en el salario de un 23% entre cotizaciones a la seguridad social y en el IRPF. Para determinar ese porcentaje se ha cogido una media de las retenciones que se suelen hacer en España para este tipo de salarios.

Se deben establecer los días laborales y no laborales en un año natural, tiempo en el que se estima que dure el proyecto de desarrollo del vehículo.

<b>Días en un año natural</b>	365
<b>Sábados y domingos</b>	104
<b>Vacaciones</b>	30
<b>Festivos</b>	12
<b>Días personales</b>	5
<b>Días hábiles</b>	214

*Tabla 32: Cálculo de días en un año natural. Fuente (Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid, 2021)*

Una vez determinado que el número de días laborables en un año es de 214, se puede establecer el número total de horas laborales durante el mismo período. Considerando que la jornada laboral diaria es de 8 horas, se alcanzará un total de 1712 horas trabajadas en un año, pero retribuidas deberán ser de 1920 horas ya que vacaciones, festivos y días personales deben ser remunerados.

En la Tabla 33 se puede observar el coste del personal.

Puesto	Salario Bruto (€/año)	Salario Bruto (€/mes)	Salario Bruto (€/hora)	Deducciones (%)	Salario Neto (€/año)	Salario Neto (€/mes)	Salario Neto (€/hora)
Director de proyecto	40.000€	3.333,34€	20,83€	35	26.000€	2.166,67€	13,54€
Jefe de departamento	35.000€	2.916,67€	18,23€	30	24.500€	2.041,67€	12,76€
Ingeniero	29.496,46€	2.458,04€	15,36€	23	22.712,27€	1.892,68€	11,82€
Jefe de taller	24.734,08€	2.061,17€	12,88€	23	19.045,24€	1.587,10€	9,91€
Mecánico	21.999,04€	1.833,25€	11,45€	23	16.939,26€	1.411,60€	8,82€
Piloto de pruebas	18.891,25€	1.574,27€	9,84€	23	14.546,26€	1.212,18€	7,57€
Auxiliar administrativo	17.718,12€	1.476,51€	9,22€	23	13.642,95€	1.136,91€	7,11€

Tabla 33: Cálculo de costes de personal individual. Fuente (Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid , 2021)

Como se tiene más de un trabajador en cada puesto de trabajo salvo en el de director del proyecto, en la Tabla 35 se puede comprobar cuál es el total del coste en personal que tiene el proyecto. Aquí se tiene que realizar el apunte de que los pilotos de pruebas, por razones obvias no estarán presentes los 12 meses de duración del proyecto, si no que estarán únicamente los dos últimos meses, que según planificación serán para pruebas, mejoras y evoluciones. Lo mismo con los mecánicos en el taller. Los únicos que estarán presentes la duración completa del proyecto serán el director de proyecto, los jefes de departamento, ingenieros y los administrativos. En la Tabla 34 se puede ver un desglose de meses y horas por categorías profesionales.

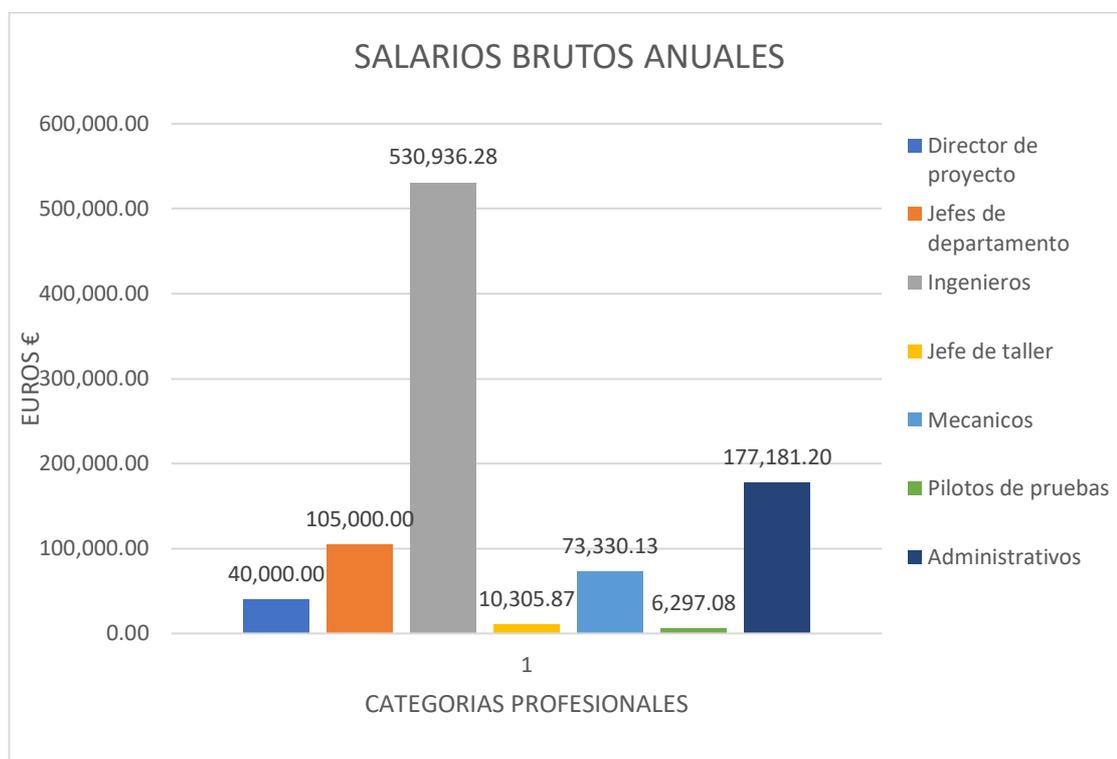
PUESTO	MESES DE TRABAJO	HORAS DE TRABAJO
DIRECTOR DE PROYECTO	12	1920
JEFE DE DEPARTAMENTO	12	1920
INGENIEROS	12	1920
JEFE DE TALLER	5	800
MECÁNICO	5	800
PILOTO DE PRUEBAS	2	320
AUXILIAR ADMINISTRATIVO	12	1920

Tabla 34: Meses y horas de trabajo del personal.

PUESTO	SALARIO BRUTO (€/AÑO)	SALARIO NETO (€/AÑO)
DIRECTOR DE PROYECTO	40.000€	26.000€
JEFE DE DEPARTAMENTO	105.000,00€	73.500,00€
INGENIERO	530.936,28€	408.820,94€
JEFE DE TALLER	10.305,86€	7.935,51€
MECÁNICO	73.330,13€	56.464,20€
PILOTO DE PRUEBAS	6.297,08€	4.848,75€
AUXILIAR ADMINISTRATIVO	177.181,2€	136.429,52€
TOTAL	943.050,56€	713.998,93€

Tabla 35: Cálculo de costes de personal total. Fuente (Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid , 2021)

En el Gráfica 45 se puede ver una comparativa entre las distintas categorías profesionales y los costes brutos anuales totales que le suponen a la empresa.



Gráfica 45: Salarios brutos anuales totales.

Para el cálculo de las amortizaciones se tendrán en cuenta todos los recursos utilizados por los trabajadores en el proyecto. Se dividirá en tres grupos. Por un lado, tendremos los equipos y programas de procesamiento de información, por otro tendremos el mobiliario de oficina y por último todo el material de oficina consumible.

- **Equipos y programas de procesamiento de información:** Aquí tenemos dos tipos de ordenadores diferentes. Los que recibirán los ingenieros y jefes de departamentos, que serán el modelo “Dell XPS 15 Intel Core i7”. En cambio, todo el personal administrativo recibirá un modelo denominado “Dell XPS 15 Intel Core i5”. El resto del equipo será el mismo para todos y se puede ver reflejado en la **Error! Reference source not found.**
- **Las licencias del software** se disponen de una licencia por ordenador del Windows 11 pro y del paquete básico Microsoft 365 (este tiene coste mensual por unidad para empresas). La licencia del software Catia V6 es de alquiler.

	PRECIO UNITARIO	NÚMERO	PRECIO TOTAL	AMORTIZACIÓN	€/MES	€/HORA
Dell XPS 15 Intel Core i7	1.798,98€	30	53.969,4€	1 AÑO	4.497,45€	28,1€
Dell XPS 15 Intel Core i5	1.498,98€	10	14.989,8€	1 AÑO	1.249,15€	7,8€
Logitech G502 Hero	92,99€	40	3.719,6€	1 AÑO	309,97€	1,93€
Windows 11 pro	129€	40	5.160€	1 AÑO	430€	2,68€
Microsoft 365 Empresa Básico	67,2€	40	2.688€	1 AÑO	224€	1,4€
Catia V6	4.700€	9	42.300€	1 AÑO	3.525€	22,03€
<b>TOTAL</b>	-	-	122.826,8€	1 AÑO	10.235,56€	63,97€

Tabla 36: Amortizaciones del equipo de procesamiento de información.

- **Mobiliario de oficina:** En este caso se ha decidido por mesas multipuesto para los departamentos de ingenieros y el departamento administrativo, mientras que para los jefes de departamento y para el director de proyecto son mesas individuales. Las sillas y armarios serán los mismos para todos. Esto puede verse reflejado en la Tabla 37.

## REFORMA MECANICA DE UN VEHÍCULO PARA SU USO EN RALLY

	PRECIO UNITARIO	NÚMERO	PRECIO TOTAL	AMORTIZACIÓN	€/MES	€/HORA
MESA MULTIPUESTO KUBIKA	802€	10	8.020€	1 AÑO	668,33€	4,17€
MESA MEET	379€	6	2.274€	1 AÑO	189,5€	1,18€
SILLA ERGONOMICA KENDO	230€	50	11.500€	1 AÑO	958,33€	5,98€
ARMARIO BASIC	199€	12	2.388€	1 AÑO	199€	1,24€
<b>TOTAL</b>	-	-	24.182€	1 AÑO	2.015,17€	12,59€

*Tabla 37: Amortizaciones del mobiliario de oficina.*

- **Material de oficina y taller:** En este apartado tendremos en cuenta todo el material necesario para que el equipo pueda trabajar correctamente. En la Tabla 38 se puede observar todo esto.

	PRECIO UNITARIO	NÚMERO	PRECIO TOTAL	AMORTIZACIÓN	€/MES	€/HORA
BROTHER MFC-L3750CDW MULTIFUNCTION LASER COLOR WIFI DUPLEX FAX	450,99€	2	901,98€	1 AÑO	75,165€	0,47€
ULTIMATEMAKER S3	4.611€	1	4.611€	1 AÑO	384,25€	2,4€
CARRO DE HERRAMIENTAS M28265 MANNESMANN	689,90	4	2.759,6€	1 AÑO	229,97€	1,44€
<b>TOTAL</b>	-	-	1.239,75€	1 AÑO	103,31€	0,64€

*Tabla 38: Amortizaciones del material de oficina.*

Todos los equipos de procesamiento de información e impresoras tienen los precios que marcan las páginas oficiales de sus respectivas marcas. El mobiliario de oficina ha sido buscado en una tienda situada en Valladolid dedicada a la venta de este tipo de muebles llamada "Ofiprix". Los carros de herramientas tienen el precio de la página de la marca. Se ha supuesto un carro por cada dos mecánicos.

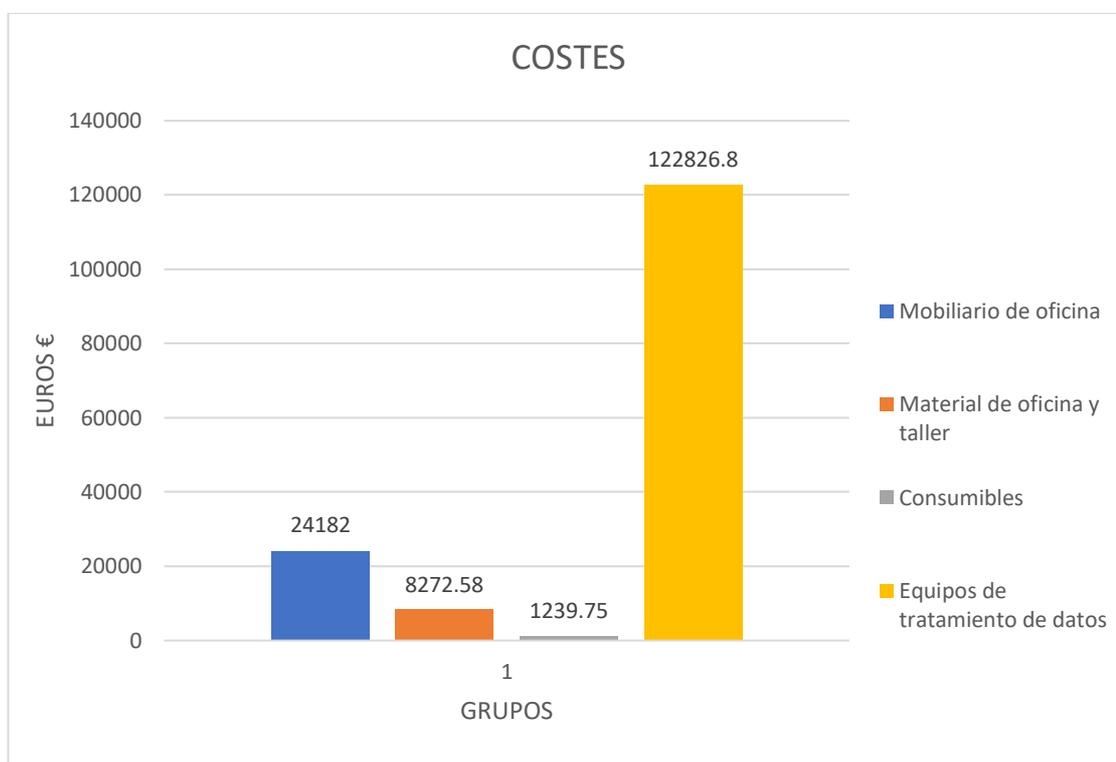
Por último, se va a incluir todos los gastos de los materiales consumibles que se han utilizado.

## REFORMA MECANICA DE UN VEHÍCULO PARA SU USO EN RALLY

	PRECIO UNITARIO	NÚMERO	PRECIO TOTAL	AMORTIZACIÓN	€/MES	€/HORA
PAPEL IMPRESORA	3,95€	200	790€	1 AÑO	65,83€	0,41€
FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D, DIAMETRO 2,85mm, NEGRO	39,95€	20	799€	1 AÑO	68,58€	0,4€
TÓNER	49,95€	5	249,75€	1 AÑO	20,81€	0,13€
PAPELERÍA Y REPROGRAFIA	200€	1	200€	1 AÑO	16,67€	0,1€
TOTAL	-	-	8.272,58€	1 AÑO	689,38€	4,31€

*Tabla 39: Material consumible de oficina.*

En el Gráfica 46 se puede ver una comparativa entre las distintas categorías de costes que le suponen a la empresa.



*Gráfica 46: Comparativa de costes.*

### 4.1.5. Costes indirectos

En este apartado se realizará una aproximación, ya que su cálculo exacto es algo más complejo. Aquí se incluirán los gastos energéticos, línea de teléfono e internet y otros (seguros, seguridad, servicio de limpieza...etc.).

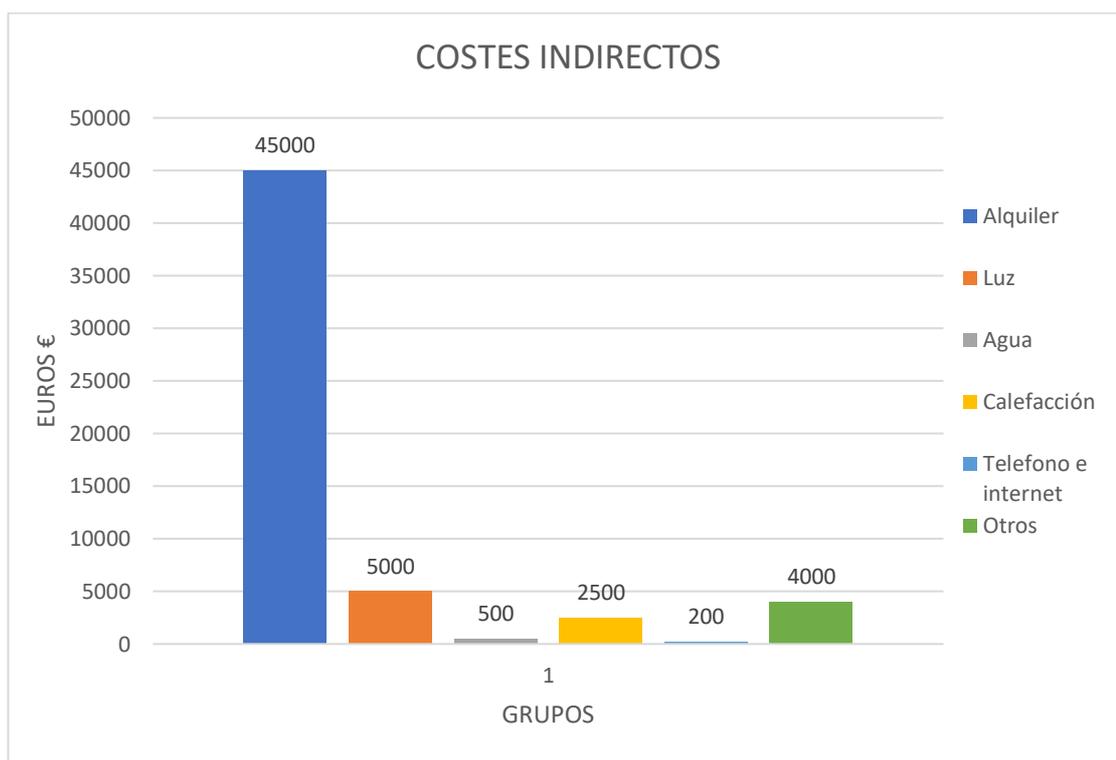
los costos de energía en una empresa pueden variar significativamente según varios factores, como la cantidad de equipos eléctricos y maquinaria, la

eficiencia energética de la nave industrial y el clima en la región. En este caso se supone que la empresa estará ubicada en Valladolid. En el caso de una empresa de fabricación de coches de rally con una nave industrial de 10.000 m<sup>2</sup> (tamaño necesario para una empresa con 43 trabajadores con espacios divididos entre taller y oficinas), es probable que el consumo de energía sea alto debido a la necesidad de utilizar maquinaria y equipos especializados. En la Tabla 40 se puede ver la estimación realizada en base a los criterios anteriores.

	PRECIO UNITARIO	NÚMERO	PRECIO TOTAL	AMORTIZACIÓN	€/MES	€/HORA
ALQUILER	45.000€	1	45.000€	1 AÑO	3.750€	23,43€
ELECTRICIDAD	5.000€	1	5.000€	1 AÑO	416,67€	2,6€
AGUA	500€	1	500€	1 AÑO	41,67€	0,26€
CALEFACCIÓN	2.500€	1	2.500€	1 AÑO	208,33€	1,3€
TELEFONO E INTERNET	200€	1	200€	1 AÑO	16,67€	0,104€
OTROS	4.000€	1	4.000€	1 AÑO	333,33€	2,08€
TOTAL	-	-	57.200€	1 AÑO	4.766,67€	29,79€

Tabla 40: Costes indirectos.

En el Gráfica 47 se puede ver una comparativa entre las distintas categorías de costes indirectos que le suponen a la empresa.



Gráfica 47: Costes indirectos.

## 4.1.6. Kit de piezas

Como se explicó en el capítulo del proceso de homologación, existen dos formas de obtener el vehículo. Una es comprando el vehículo ya modificado y otra es comprando únicamente el kit de piezas para la modificación.

El listado de piezas necesarias para transformar nuestro Ford Fiesta ST 1.0 EcoBoost se divide en varios subapartados, que se detallan en la Tabla 41. Los precios que aparecen en ella son los que tendría que pagar un cliente que quiera hacerse con ellos. No es necesario comprar el kit de modificación completo, si no que se pueden adquirir por separado o incluso piezas sueltas. El número de piezas que aparece representado en la tabla es el de piezas diferentes que existen por cada kit y se sobreentiende que pueden existir piezas repetidas con la misma referencia.

NOMBRE DEL KIT	NUMERO DE PIEZAS	REFERENCIA	PRECIO
<b>Kit de construcción de carrocería</b>	9	PT10000003AZ	3.257,65 €
<b>Kit de jaula antivuelco</b>	4	PT10000004AZ	1.689,50 €
<b>El kit de pasadores de capó y maletero</b>	5	PT10000005AZ	89,00 €
<b>kit de elementos soldados</b>	44	PT10000006AZ	1.302,50 €
<b>kit de montaje de asiento</b>	5	PT10000007AZ	314,96 €
<b>kit de montaje de motor</b>	7	PT10000008AZ	433,85 €
<b>kit de viga de choque</b>	5	PT10000009AZ	62,15 €
<b>kit de construcción de motor</b>	75	PT11000001AZ	8.334,70 €
<b>kit de admisión de aire</b>	17	PT11000002AZ	599,99 €
<b>kit de escape completo</b>	6	PT11000003AZ	1.575,00 €
<b>Kit de la caja de cambios</b>	2	PT12000001AZ	6.000,00 €
<b>kit de cambio de marcha</b>	9	PT12000002AZ	267,46 €
<b>kit de enfriador de caja de cambios</b>	6	PT12000003AZ	308,16 €
<b>kit de eje de transmisión derecho</b>	8	PT16010003AZ	715,77 €
<b>kit de eje de transmisión izquierdo</b>	9	PT16010004AZ	889,00 €
<b>kit de eje transversal</b>	5	PT16000001AZ	599,50 €

REFORMA MECANICA DE UN VEHÍCULO PARA SU USO EN RALLY

<b>kit de embrague</b>	9	PT16000002AZ	850,00 €
<b>kit de dirección</b>	3	BT10000016AZ	329,19 €
<b>kit de freno de asfalto</b>	7	BT10000017AZ	760,00 €
<b>kit de freno de grava</b>	7	BT10000018AZ	697,58 €
<b>kit de freno de mano</b>	10	PT18000001AZ	304,50 €
<b>kit de actualización de frenos</b>	21	PT18000002AZ	2.244,00 €
<b>kit de actualización de suspensión delantera</b>	27	PT19000001AZ	2.278,40 €
<b>kit de amortiguadores para asfalto delanteros</b>	2	PT19000004AZ	3.390,00 €
<b>kit de amortiguadores para grava delanteros</b>	3	PT19000002AZ	3.390,00 €
<b>kit de muelles para asfalto delanteros</b>	2	PT19000005AZ	292,80 €
<b>kit de muelles para grava delanteros</b>	1	PT19000003AZ	199,99 €
<b>kit de actualización de viga trasera</b>	10	PT20000006AZ	699,00 €
<b>kit de amortiguadores para asfalto traseros</b>	2	PT20000009AZ	2.750,00 €
<b>kit de amortiguadores para grava traseros</b>	3	PT20000007AZ	2.750,00 €
<b>kit de muelles para asfalto traseros</b>	3	PT20000010AZ	249,99 €
<b>kit de muelles para grava traseros</b>	3	PT20000008AZ	197,50 €
<b>kit de electrónica</b>	5	PT22000010AZ	2.458,00 €
<b>kit de unidad de control del motor</b>	7	PT22000001AZ	2.458,00 €
<b>kit de cableado de empalme</b>	14	PT22000002AZ	6.650,00 €
<b>kit eléctrico adicional</b>	6	PT22000003AZ	169,00 €
<b>kit de batería</b>	6	PT22000004AZ	260,00 €
<b>kit de accesorios de combustible</b>	5	PT25000001AZ	3.937,72 €
<b>kit de refrigeración de agua</b>	9	PT29000001AZ	880,00 €
<b>kit de refrigeración de aire</b>	11	PT29000002AZ	1.860,00 €
<b>kit de refrigeración de aceite</b>	10	PT29000003AZ	410,00 €
<b>kit de paneles interiores</b>	9	PT30000001AZ	390,00 €
<b>kit de asientos y sistemas de retención</b>	7	PT30000002AZ	1.692,72 €
<b>kit de desempañado</b>	4	PT30000003AZ	160,00 €
<b>kit de correa para rueda de repuesto</b>	4	PT30000005AZ	34,50 €
<b>kit de limpiaparabrisas</b>	1	PT30000006AZ	45,50 €
<b>kit de modificación del panel de instrumentos</b>	16	PT30000007AZ	240,00 €

<b>conjunto de soporte para panel de interruptores</b>	3	PT30000008AZ	17,50 €
<b>kit de pedal de aceleración</b>	3	PT30000009AZ	56,00 €
<b>kit de protector de cárter de 6mm</b>	8	PT31000001AZ	999,00 €
<b>kit de protector de depósito</b>	3	PT31000002AZ	754,18 €
<b>kit de extintor de incendios</b>	3	PT30000004AZ	1.199,99 €

Tabla 41: Kits de modificación. Fuente: (M-Sport, 2019).

Si se quisiera comprar el vehículo con todos los kits ya instalados y preparado para competir en la categoría Rally 4, este precio sería de 68.490€ + IVA. En cambio, si solo se quiere adquirir los kits de conversión, el coste de todos ellos juntos sería de 42.051,99€ + IVA (M-Sport, 2019).

#### 4.1.7. Costes totales

En la siguiente tabla se indicarán los costes totales de los que consta el proyecto.

DESARROLLO	VEHICULO MODIFICADO	KIT DE PIEZAS
1.156.771,69 €	68.490€ + IVA	42.051,99€ + IVA

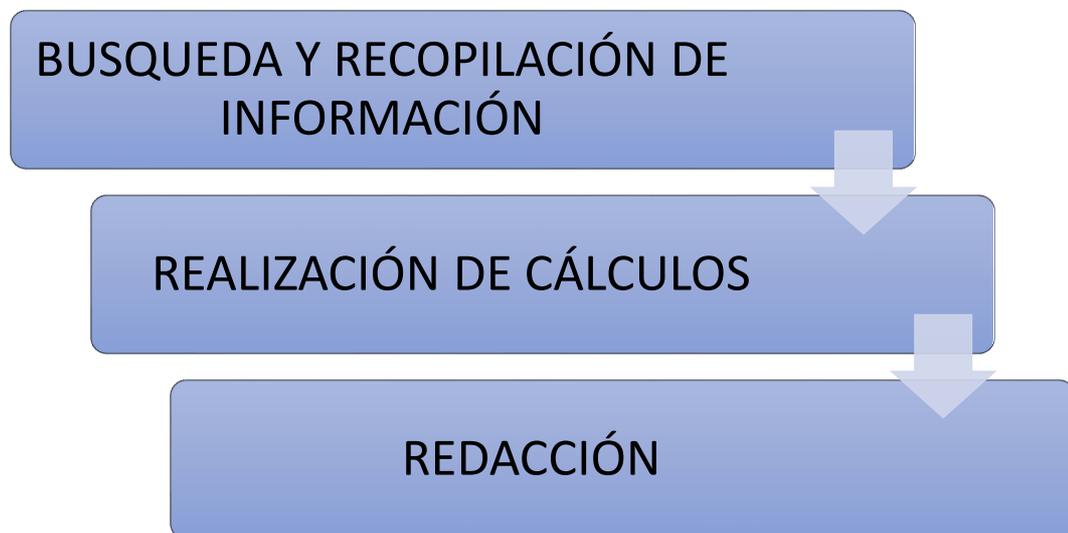
Tabla 42: Costes totales.

## 4.2. ESTUDIO ECONOMICO TFG

### 4.2.1. Introducción

El estudio económico en este capítulo consistirá en un análisis y evaluación de la realización de este estudio. Constará de tres apartados.

- **Búsqueda y recopilación de información:** Este apartado consiste en la valoración económica del tiempo invertido en la recopilación de información de todo el marco teórico del proyecto.
- **Realización de cálculos:** Este es el bloque principal del TFG y que consiste en la realización de todos los cálculos teóricos y su comprobación y comparación con los datos reales del vehículo.
- **Redacción:** Valoración de tiempo invertido en la escritura de este TFG juntando los dos apartados anteriores.



*Ilustración 28: Fases del TFG.*

El tiempo total invertido en este trabajo consta de 11 meses, en los que la distribución del tiempo se indica en cada uno de los apartados siguientes.

### 4.2.2. Búsqueda y recopilación de información

Para la realización de esta parte del proyecto se ha dividido el proceso en varias etapas.

Antes de iniciar la búsqueda de información, es fundamental definir con precisión el tema de investigación a abordar en este proyecto. Para empezar, se focaliza la investigación en la evolución de la tecnología de los automóviles de rally, las características técnicas de los vehículos más utilizados en cada

categoría y por último, se profundiza en la categoría sobre la que se va a desarrollar este trabajo.

Una vez que se definió el tema, es importante identificar las fuentes de información que serán útiles para la investigación. Algunas de las fuentes que se han utilizado son libros especializados, artículos científicos, revistas del sector automovilístico, sitios web de fabricantes de coches de carreras, etc.

Para obtener la información necesaria, es importante realizar una búsqueda sistemática y rigurosa. Se han utilizado diferentes herramientas para buscar información, bases de datos de revistas científicas, bibliotecas digitales, etc.

Una vez que se ha recopilado la información, es importante seleccionar aquella que es relevante para la investigación.

Para finalizar, toda la información obtenida debe ser analizada y contrastada todo lo posible. Gran parte de la información que hay en este trabajo proviene de documentos oficiales facilitados por la propia empresa que desarrolló el vehículo.

Para la realización de esta parte del trabajo se han invertido 3 meses, en las que se buscó toda la información necesaria para redactar el marco teórico y los datos necesarios para la realización de los cálculos.

#### 4.2.3. Realización de cálculos

Este apartado es el corazón del trabajo, es donde más tiempo se ha invertido. La manera de enfocarlo, en base a la existencia real del vehículo, ha sido partir de los datos facilitados por las fichas técnicas, tanto de la versión de serie, como de las versiones de rally y llegar a los resultados teóricos más próximos a los experimentales (estos últimos son los que nos facilitó la empresa que desarrolló el vehículo de rally).

Se han realizado hojas de cálculo diferenciadas (Excel) para el grupo moto propulsor, la transmisión y el grupo de suspensión.

El tiempo invertido en los cálculos se divide en dos. Primeramente, se debían programar las hojas de cálculo con tablas dinámicas y una vez se obtenían los datos, se representaban estos en diferentes gráficas para que toda la información fuese más legible y pudiese ser comparada visualmente con los datos reales. Todo esto ha ocupado un lapso de tiempo de 6 meses.

#### 4.2.4. Redacción

De todas las partes de las que consta el trabajo, esta es la que menos tiempo se ha invertido, ya que solo era necesario presentar de una manera ordenada y lógica toda la información recopilada en la primera etapa y presentar la parte

de los cálculos que es de especial relevancia a mostrar. En estos últimos es necesario que todas las fórmulas, resultados y tablas de datos estén bien referenciados e indicadas las unidades en las que se ha trabajado hasta llegar a los resultados finales.

Esta última etapa del trabajo ha llevado 2 meses de realización, en la que se ordenaba de manera lógica y legible todo el marco teórico y los cálculos.

#### 4.2.5. Coste total del TFG

Si tenemos en cuenta estas etapas, se podría estimar un coste de personal en base al convenio colectivo vigente en castilla y león para los trabajadores que pertenecen al sector del metal (sector en el que se incluye este tipo de proyectos).

Si se tiene en cuenta que este proyecto fue iniciado en el mes de junio y se ha finalizado en el mes de abril, se tiene el siguiente cálculo de días laborales.

<b>Días en un año natural</b>	<b>334</b>
<b>Sábados y domingos</b>	<b>100</b>
<b>Vacaciones</b>	<b>27,5</b>
<b>Festivos</b>	<b>11</b>
<b>Días personales</b>	<b>5</b>
<b>Días hábiles</b>	<b>190</b>

Tabla 43: Cálculo de días laborales. Fuente (Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid , 2021)

La persona encargada de realizar este proyecto tiene la categoría profesional de ingeniero. El coste de su trabajo en función del convenio colectivo actual y teniendo unas retenciones en IRPF y seguridad social del 23% sería el que vemos representado en la Tabla 44.

Puesto	Salario Bruto (€/año)	Salario Bruto (€/mes)	Salario Bruto (€/hora)	Deducciones (%)	Salario Neto (€/año)	Salario Neto (€/mes)	Salario Neto (€/hora)
Ingeniero	29.496,46€	2.458,04€	15,36€	23	22.712,27€	1.892,68€	11,82€

Tabla 44: Coste mano de obra. Fuente (Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid , 2021)

## 5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO

Después de definir, analizar, calcular e implementar las modificaciones y obtener los resultados correspondientes, se puede concluir que se han alcanzado los objetivos establecidos al comienzo del proyecto. Para lograr dichos objetivos, se han seguido las normas establecidas por el reglamento del grupo de competición Rally 4 desarrollado por la FIA.

De igual manera, se ha considerado la normativa correspondiente en relación con las Reformas de Importancia emitida por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, con el propósito de obtener la homologación del vehículo para su uso en las carreteras públicas de nuestro país.

Por último, después de analizar los resultados comparativos de los cálculos, se puede concluir que el vehículo ha mejorado significativamente sus prestaciones en términos de rendimiento dinámico y motriz, como resultado de la reforma realizada para el uso final que se le quiere dar al automóvil.

En el apartado 1.4 se habló de competencias profesionales del título que se han desarrollado de la siguiente forma.

Se llevó a cabo una exhaustiva investigación bibliográfica, cuyo análisis y síntesis resultaron esenciales para incorporar en el Trabajo de Fin de Grado los aspectos más relevantes y pertinentes. Se creó una memoria del trabajo que documenta y examina por escrito toda la información obtenida y recopilada de las fuentes bibliográficas. Ha sido redactado en su totalidad de manera autónoma y en los cálculos se ha sabido resolver los problemas que se iban sucediendo mientras se realizaban, aparte de deber diferenciar y reconocer errores que se alejaban de lo que podría ser un resultado lógico.

En cuanto a las líneas de futuro:

Realizar un estudio con mayor detalle en las áreas en las que se han efectuado los cálculos, además de ampliar los cálculos a otras áreas del vehículo como puede ser el sistema de frenado, el sistema de la dirección e incluir un apartado con todo el sistema eléctrico y electrónico que debe incorporar el vehículo.

Estudiar cómo se debe diseñar cada pieza que debe sustituir a las piezas originales, desde su concepción en los programas de CAD hasta su fabricación tangible con los materiales definitivos.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ISO/TC 108/SC 2. (2016). *ISO 8608*. ISO.
- Administración autonómica Junta de Castilla y León Oficina Territorial de Trabajo de Valladolid . (2021). *Convenio colectivo del metal (Valladolid)*. Valladolid: Boletín oficial de la provincia de Valladolid.
- Angulo, A. J. (2015). *Modelado e identificación del sistema de suspensión pasiva del robot móvil andábita*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Automobile Catalog. (s.f.). [www.automobile-catalog.com](http://www.automobile-catalog.com). Obtenido de <https://bit.ly/41ppBFy>
- Brembo. (19 de Enero de 2019). Obtenido de [www.brembo.com](http://www.brembo.com): <https://bit.ly/41XOGZC>
- Costas, J. (21 de Febrero de 2015). *Motor.es*. Obtenido de <https://bit.ly/3C6ex60>
- CurioSfera. (s.f.). Obtenido de <https://bit.ly/3R24cOE>
- Edwardhergett. (10 de Noviembre de 2015). *Euro Vag Golf*. Obtenido de <https://bit.ly/3lfXctv>
- Fernández, I. (20 de Diciembre de 2020). *Diario Motor*. Obtenido de Las categorías de los rallyes: <https://bit.ly/3ofSQwr>
- FIA. (1969). Appendix J to the international sporting code.
- FIA. (1986). Appendix J to the international sporting code.
- FIA. (2019). Appendix J - Article 260.
- Gillespie, T. D. (2021 revised edition). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*.
- Gómez, J. L. (15 de Julio de 2020). *DiarioMotor*. Obtenido de <https://bit.ly/3aq8e20>
- GT2i. (s.f.). *GT2i*. Obtenido de <https://bit.ly/3YrvArP>
- GT2i. (s.f.). *GT2i*. Obtenido de <https://bit.ly/3Z05m3G>
- HeiBing, B. (2011). Springs and Stabilizers. En B. HeiBing, *Chassis Handbook Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives* (pág. 244). Ewald Schmitt.
- Ingemecanica*. (3 de Abril de 2023). Obtenido de <https://bit.ly/2RrbkYU>
- Jazar, R. N. (2017). *Vehicle Dynamics Theory and Application*. Springer.
- Km77. (2018). Obtenido de <https://bit.ly/3liAUqJ>
- López, J. A. (s.f.). En J. A. López, *Dinámica longitudinal tracción*.
- López, J. A. (s.f.). En J. A. López, *Confort Vibratorio*.
- López, J. A. (s.f.). En J. A. López, *Suspensión delantera*.
- Martinez, C. (8 de Abril de 2011). *Ionizado*. Obtenido de <http://ionizado.blogspot.com>: <https://bit.ly/41VAAaS>
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (4 de Junio de 2010). *Gobierno de España*. Obtenido de <https://bit.ly/3UM0b2T>
- Ministerio de la Presidencia. (14 de Julio de 2010). *Gobierno de España*. Obtenido de <https://bit.ly/3GMpEU8>

- Motor Mania. (2 de Mayo de 2006). Obtenido de Audi Sport Quattro. Historia y ficha técnica: <https://bit.ly/3Jqn8o8>
- MotorMania.info. (s.f.). Obtenido de <https://bit.ly/3I4BHLS>
- Motorsport Auctions. (s.f.). *Motorsport Auctions*. Obtenido de M-Sport Ford Fiesta R2 LHD: <https://bit.ly/3ZOuc3t>
- M-Sport. (2019). *Ford Fiesta R2T19 Parts Manual*.
- M-Sport. (2019). *FORD FIESTA RALLY4 TECHNICAL SPECIFICATION*.
- M-Sport. (2019). *R2T19 SADEV SEQUENTIAL GEARBOX ST7514-LW PARTS MANUAL*.
- M-Sport. (2019). *Rally4 Sales Offer*.
- Pirata Motor. (s.f.). *Pirata Motor*. Obtenido de VÁLVULAS Y CONDUCTOS: <https://bit.ly/4207t6C>
- Race Market. (s.f.). *Race Market*. Obtenido de Neumáticos de rally: <https://bit.ly/3F9dLXt>
- Race Market. (s.f.). *Race Market*. Obtenido de <https://bit.ly/3MFx9jy>
- Rally store. (s.f.). *Rally store*. Obtenido de DISCO EMBRAGUE AP RACING : <https://bit.ly/3SZfsfS>
- Real Federacion Española de Automovilismo. (s.f.). *Real Federacion Española de Automovilismo*. Obtenido de <https://bit.ly/3UfpSZz>
- Romano, F., & Herráez, M. (s.f.). En F. Romano, & M. Herráez, *Cálculo y ensayo de elementos de máquinas: Engranajes* (págs. 9-12).
- Sadev. (s.f.). *Sadev*. Obtenido de ST82-14 TRANSVERSE: <https://bit.ly/2W4NuBS>
- Taller Actual. (28 de Noviembre de 2020). *Taller Actual*. Obtenido de <https://bit.ly/3AlxrAl>
- Tecnología del automovil*. (12 de Agosto de 2020). Obtenido de <https://bit.ly/42Y7Fng>
- Trucaje de Mototres. (s.f.). Obtenido de <https://bit.ly/3F6iCso>
- Villareal, D. (18 de Julio de 2012). *Ford Focus Ecoboost 1.0 125 CV*. Obtenido de Diario Motor: <https://bit.ly/41TOfiP>
- Wikipedia. (s.f.). Obtenido de Benz Patent-Motorwagen: <https://bit.ly/2WeyUXr>