

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Modelado de un monoplaza tipo F4

Autor: Carlos Armand Ranisau

Tutor: Francisco Valderrama Gual

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Modelado de un monoplaza tipo F4**

Autor:

Carlos Armand Ranisau

Tutor:

Francisco Valderrama Gual

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado: Modelado de un monoplaça tipo F4

Autor: Carlos Armand Ranisau

Tutor: Francisco Valderrama Gual

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Sevilla, 2023



# Agradecimientos

---

A mis padres, por apoyarme y entenderme tanto en los buenos momentos como sobre todo en los no tan buenos, y por todo el esfuerzo y el sacrificio que han hecho para poder encontrarme en este punto, acabando una carrera universitaria. También por ser un pilar crucial, en el que puedo confiar al 100 %, y por ser para mí todo un ejemplo a seguir.

A mi hermano, por darme también fuerzas, apoyo y unas risas siempre que lo necesitaba.

A mis abuelas, que nos cuidan y nos miman siempre que nos ven; y a mis abuelos, que nos cuidan desde el otro lado.

A mi tutor de TFG, Francisco Valderrama Gual, por haber aceptado mi idea y haberme ayudado y aconsejado a lo largo de la realización de este proyecto.

A mis amigos.

*Carlos Armand Ranisau*

2023



# Resumen

---

**E**n este proyecto se lleva a cabo el modelado de un monoplaza de especificación Fórmula 4, una de las categorías soporte de la conocida Fórmula 1. En concreto, se llevará a cabo el diseño de un modelo de monoplaza de F4 de 2ª generación, especificación que ha debutado en los campeonatos más importantes la temporada pasada.

En lo que respecta a la memoria, en primer lugar, se realizará una introducción, en la que se incluye una definición de ‘vehículo monoplaza’, así como una evolución de este tipo de automóviles de competición con el paso de los años; seguido de un contexto histórico de las categorías soporte que acompañan a la F1: la Fórmula 2, la Fórmula 3 y la Fórmula 4, siendo esta última el centro de atención de este proyecto.

Tras llevar a cabo esta introducción, se procede con el grueso del proyecto: el modelado del propio monoplaza, realizado en el software CATIA V5 R19. Para ello, en la memoria, se detallarán los pasos que se han realizado, haciendo hincapié en operaciones u módulos empleados más novedosos y que no se han visto en la asignatura de Diseño Asistido por Ordenador del Grado, así como en los problemas y soluciones propuestas para poder modelar las distintas piezas que conforman este monoplaza de F4.

Tras comentar cómo se ha llevado a cabo el modelado de dichas piezas, se ha reservado un apartado en la memoria para comentar cómo se ha llevado a cabo el ensamblado de las distintas piezas, pudiendo así obtener el modelo completo del monoplaza. Por último, se tiene un apartado en el que se comenta cómo se ha llevado a cabo el proceso de renderizado, destacando el uso de software y herramientas externas a CATIA V5, destacando los programas Keyshot 10 y Blender, para poder expandir las posibilidades de renderizado. Por último, se concluye esta memoria con un apartado de conclusiones y posibles mejoras y oportunidades de ampliación de este proyecto.



<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción y estructura de la memoria</b>	<b>1</b>
1.1. Estructura de la memoria	1
1.2. Objetivos	1
<b>2 Contexto Histórico y estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. Monoplaza: definición y características	3
2.2. Monoplaza: historia y evolución	6
2.3. Historia de la Fórmula 2	22
2.3.1. Antes de la Fórmula 2: <i>voiturettes</i> (1896-1946)	23
2.3.2. Fórmula 2: primeros años (1948-1960)	25
2.3.3. Fórmula Junior (1960-1963)	26
2.3.4. Segunda etapa de Fórmula 2 (1964-1984)	27
2.3.5. Fórmula 3000 (1985-2004)	28
2.3.6. GP2 Series (2005-2016)	29
2.3.7. FIA Formula Two Championship (2009-2012)	32
2.4. Historia de la Fórmula 3	33
2.4.1. Antes de Fórmula 3: monoplazas de 500cc (1946-1959)	34
2.4.2. Fórmula 3 (1964-1974)	36
2.4.3. Campeonato de Fórmula 3 Europea (1974-1990)	37
2.4.4. Fórmula 3 Euroseries (2003-2012)	39
2.4.5. Campeonato Europeo de Fórmula 3 (2011-2018)	40
2.4.6. GP3 Series (2010-2018)	41
2.5. Fórmula 1 y sus categorías soporte en la actualidad. Superlicencia de la FIA y FIA Global Pathway from Karting to Formula 1	43
2.5.1. Superlicencia de la FIA	43
2.5.2. FIA Global Pathway from Karting to Formula 1	44
2.6. FIA Formula 4: creación y estado actual	47
<b>3 Diseño de un monoplaza de tipo F4: Pasos previos</b>	<b>52</b>
3.1. Características de un F4	52
3.2. Software empleado	52
3.3. Documentación de referencia	53
<b>4 Diseño de un monoplaza de F4: Modelado</b>	<b>55</b>
4.1. Monocasco	55
4.2. Sistema de suspensión	63
4.2.1. Ruedas	63
4.2.2. Disco de freno	64
4.2.3. Pinzas de freno	65
4.2.4. Buje	66

4.2.5.	Mangueta de dirección	67
4.2.6.	Rótula de dirección	68
4.2.7.	Barras de suspensión	69
4.2.8.	Conjunto muelle más amortiguador	70
4.2.9.	<i>Rocker</i>	71
4.2.10.	<i>Suspension link</i>	72
4.2.11.	Barra antivuelco	72
4.2.12.	Eje de la rueda	73
4.2.13.	Tuerca	73
4.2.14.	<i>Nut bell</i>	74
4.2.15.	Clip de seguridad	74
4.3.	<i>Aerodinámica y carrocería</i>	75
4.3.1.	Morro y alerón delantero	75
4.3.2.	Alerón trasero	78
4.3.3.	Estructura trasera de impacto ( <i>Rear Impact Structure o RIS</i> )	79
4.3.4.	Fondo plano y <i>skid block o plank</i>	81
4.3.5.	Cubierta motor	82
4.3.6.	Pontones	84
4.3.7.	<i>Splitter</i>	85
4.4.	<i>Tren de potencia</i>	86
4.4.1.	Motor y caja de cambios	86
4.4.2.	Sistema de transmisión	88
4.5.	<i>Sistema de dirección</i>	92
4.5.1.	Volante	92
4.5.2.	Columna de dirección	95
4.5.3.	Junta cardan	95
4.5.4.	Cremallera de dirección	95
4.6.	<i>Sistemas auxiliares</i>	96
4.6.1.	<i>Halo</i>	96
4.6.2.	Espejos retrovisores	98
4.6.3.	<i>ES Box</i>	98
4.6.4.	Depósito de combustible	99
4.6.5.	Extintor de incendios	100
4.6.6.	Parabrisas	101
4.6.7.	Reposacabezas	102
4.7.	<i>Pedalera</i>	103
4.7.1.	Pedales	104
4.7.2.	Cilindro actuador	105
4.7.3.	Depósito del cilindro actuador	106
<b>5</b>	<b>Diseño de un monoplaza tipo F4: Ensamblado</b>	<b>108</b>
5.1.	<i>Suspensión</i>	109
5.2.	<i>Aerodinámica</i>	110
5.3.	<i>Planta de potencia</i>	111
5.4.	<i>Sistema de dirección</i>	112
5.5.	<i>Elementos auxiliares</i>	112
5.6.	<i>Pedalera</i>	113
<b>6</b>	<b>Diseño de un monoplaza tipo F4: Renderizado</b>	<b>114</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>120</b>
<b>8</b>	<b>Referencias</b>	<b>124</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Mercedes-AMG F1 W11 EQ Performance	3
Figura 2-2. Ejemplos de coches que no son monoplasas	3
Figura 2-3. Monoplaza Gen 2 de la Fórmula E	4
Figura 2-4. Comparación de fondo plano en un F1	5
Figura 2-5. Mercedes-AMG F1 W07	5
Figura 2-6. <i>Mormon Wasp</i>	6
Figura 2-7. Espejo retrovisor montado en el <i>Mormon Wasp</i>	6
Figura 2-8. Alfa Romeo Tipo B <i>Monoposto</i>	7
Figura 2-9. Auto Union <i>Typ C</i>	7
Figura 2-10. Mercedes-Benz W125	8
Figura 2-11. Mercedes-Benz W125 <i>Rekordwagen</i>	8
Figura 2-12. Mercedes-Benz W165	9
Figura 2-13. Ferrari 375	9
Figura 2-14. Lotus 25	10
Figura 2-15. Dibujo del chasis monocasco del Lotus 25	10
Figura 2-16. Lotus 49	10
Figura 2-17. Monocasco del McLaren MP4/1	11
Figura 2-18. <i>Crash test</i> de la FIA	11
Figura 2-19. Lotus 78	12
Figura 2-20. Boceto del prototipo de monoplaza ideado por René Prévoist	12
Figura 2-21. Chaparral 2J	13
Figura 2-22. Lotus 79	14
Figura 2-23. Esquema de la parte inferior del Lotus 79	14
Figura 2-24. Brabham BT46B	15
Figura 2-25. Renault RS01	15
Figura 2-26. Motor BMW M12 montado en un Brabham BT52	16
Figura 2-27. Williams FW15C	17
Figura 2-28. Volante del Ferrari 640	18
Figura 2-29. Williams FW14B	19
Figura 2-30. Roland Ratzenberger y Ayrton Senna en 1994	19
Figura 2.31. Cambios introducidos en F1 en 1995	20
Figura 2-32. Ferrari 412 T2 y Ferrari F310	20
Figura 2-33. Dispositivo HANS	21
Figura 2-34. <i>Wheel tethers</i>	22
Figura 2-35. Ferrari SF71H	22

Figura 2-36. Ilustración del <i>voiturette</i> de Léon Bollée	23
Figura 2-37. Louis Renault con su Renault <i>Type A</i>	24
Figura 2-38. Cartel de la primera edición de la Copa de Catalunya	24
Figura 2-39. <i>Voiturettes</i> Amilcar y Austin	25
Figura 2-40. Cooper T45 de F2	26
Figura 2-41. Salida de una prueba de la <i>Historic Formula Junior</i>	27
Figura 2-42. Ralt-Honda de F2	28
Figura 2-43. Reynard 90D F3000	29
Figura 2-44. Fernando Alonso durante una prueba de la F3000	29
Figura 2-45. Calendarios de F1 y de GP2 del año 2005	30
Figura 2-46. Monoplazas de GP2 y GP2 Asia Series en 2008	31
Figura 2-47. Monoplazas de GP2 y GP2 Asia Series en 2011	31
Figura 2-48. Gráfica comparativa de los costes de categorías soporte	32
Figura 2-49. Williams JPH1 de Henry Surtees	32
Figura 2-50. Robert Wickens en un Hyundai Elantra N TCR	33
Figura 2-51. Dibujo de un Kieft CK 51 de Fórmula 3	34
Figura 2-52. Portada de la guía de carreras en Hockenheim en 1949	35
Figura 2-53. Salida del Gran Premio de Luxemburgo de F3	35
Figura 2-54. Bernie Ecclestone en un Cooper Mk V de F3	36
Figura 2-55. Jackie Stewart en un Cooper T72 de F3	37
Figura 2-56. Alain Prost en un Martini-Renault de F3	38
Figura 2-57. Ayrton Senna en un Ralt RT3 Toyota de F3	38
Figura 2-58. Póster del GP de Macau de 2019	39
Figura 2-59. Salida del GP de Pau de F3 en 2017	40
Figura 2-60. Lewis Hamilton en el marco de la F3 Euroseries en 2005	40
Figura 2-61. George Russell y Maximilian Günther en el GP de Macau de 2016	41
Figura 2-62. Programa del domingo del GP de Hungría de 2017	42
Figura 2-63. Charles Leclerc en el marco de la GP3 Series en 2016	42
Figura 2-64. Tabla con puntos de Superlicencia	44
Figura 2-65. <i>FIA Global Pathway</i>	45
Figura 2-66. Max Verstappen en el GP de Baréin de 2022	45
Figura 2-67. Felipe Drugovich en el marco de la F2 en 2022	46
Figura 2-68. Victor Martins en el marco de la F3 en 2022	46
Figura 2-69. Dino Beganovic en el marco de la FRECA en 2022	47
Figura 2-70. Fabricantes de chasis de F4 aprobados por la FIA	48
Figura 2-71. Fabricantes de motores de F4 aprobados por la FIA	48
Figura 2-72. Kimi Andrea Antonelli en el marco de la F4 italiana	48
Figura 2-73. Syun Koide en el marco de la F4 japonesa	49
Figura 2-74. Lochie Hughes en el marco de la F4 estadounidense	50

Figura 2-75. Mads Hoe, Juju Noda y Emerson Fittipaldi Jr. en el marco de la F4 danesa	50
Figura 2-76. Alessandro Giusti en el marco de la F4 francesa	51
Figura 4-1. Vista en planta del monocasco	55
Figura 4-2. Vista en perfil del monocasco	56
Figura 4-3. Operarios retirando un monoplaça con ayuda de una grúa	56
Figura 4-4. Modelo 3D del arco antivuelco	57
Figura 4-5. Detalle de la parte delantera del monocasco	58
Figura 4-6. Maniquí de CATIA ajustado en el monocasco	59
Figura 4-8. Detalle del interior del habitáculo	60
Figura 4-9. Volumen mínimo que se debe reservar para alojar rodillas y piernas del piloto	60
Figura 4-9. Superficie interna de la parte delantera del monocasco	61
Figura 4-10. Primera versión de la superficie que aloja el extintor de incendios	62
Figura 4-11. Versión final de la superficie que aloja el extintor de incendios	62
Figura 4-12. Modelo 3D del monocasco	63
Figura 4-13. Plano de las llantas OZ y curva generatriz trazada en CATIA	63
Figura 4-14. Modelo 3D de la rueda delantera	64
Figura 4-15. <i>Drawing 1.8</i> y modelo 3D del disco de freno	65
Figura 4-16. Modelo 3D de la pinza de freno	66
Figura 4-17. <i>Spline</i> ANSI B92.1	66
Figura 4-18. Modelo 3D del buje y detalle de la sección interior dentada	67
Figura 4-19. Operación de Multiple Extract	67
Figura 4-20. Modelo 3D de la mangueta de dirección	68
Figura 4-21. Modelo 3D de la rótula de dirección	69
Figura 4-22. Modelo 3D de las barras de suspensión	69
Figura 4-23. Esquema del amortiguador Koni 2612 Series	70
Figura 4-24. Modelo 3D del conjunto muelle y amortiguador	71
Figura 4-25. Modelo 3D de los <i>rocker</i> delantero y trasero	71
Figura 4-26. Modelo 3D del <i>suspension link</i>	72
Figura 4-27. Modelo 3D de la barra antivuelco delantera	73
Figura 4-28. Modelo 3D del eje de la rueda	73
Figura 4-29. Modelo 3D de la tuerca	74
Figura 4-30. Modelo 3D de la <i>nut bell</i>	74
Figura 4-31. Modelo 3D del clip de seguridad	75
Figura 4-32. Planos D-D y E-E	76
Figura 4-33. Volumen en el que se puede encontrar el alerón delantero	76
Figura 4-34. Detalle de un <i>Gurney flap</i>	77
Figura 4-35. Modelo 3D del conjunto morro más alerón delantero	78
Figura 4-36. Modelo 3D del alerón trasero	79
Figura 4-37. Luz trasera Lifeline 421-100-011	80

Figura 4-38. Modelo 3D del <i>Rear Impact Structure</i> (RIS)	80
Figura 4-39. Modelo 3D del fondo plano y del <i>plank</i>	82
Figura 4-40. Resultado de la operación de Multi-Section Surface	83
Figura 4-41. Aleta de tiburón o <i>shark fin</i>	83
Figura 4-42. Modelo 3D de la cubierta motor	84
Figura 4-43. Modelo 3D de los pontones	85
Figura 4-44. <i>Splitter</i> en un monoplaza	85
Figura 4-45. Modelo 3D del <i>splitter</i>	86
Figura 4-46. Drawing 4	86
Figura 4-47. Drawing 2.2	87
Figura 4-48. Modelos 3D del bloque motor y de la caja de cambios	87
Figura 4-49. Junta GKN GI3300i	88
Figura 4-50. Modelo 3D del <i>tripode</i>	89
Figura 4-51. Modelo 3D del <i>housing</i>	90
Figura 4-52. Modelo 3D del <i>boot</i>	91
Figura 4-53. Modelo 3D del palier	91
Figura 4-54. Volante XAP <i>Single Seater Series</i> STW	92
Figura 4-55. Módulo de Sketch Tracer	93
Figura 4-56. Superficies utilizadas para la caja de la electrónica del volante	93
Figura 4-57. Modelo 3D del volante con el Quick Release instalado	94
Figura 4-58. Modelo 3D de la columna de dirección	95
Figura 4-59. Modelo 3D de la junta cardán	95
Figura 4-60. Modelo 3D de la cremallera de dirección	96
Figura 4-61. Curvas guía necesarias para modelar el pilón central del Halo	97
Figura 4-62. Modelo 3D del Halo	97
Figura 4-63. Modelo 3D del espejo retrovisor izquierdo	98
Figura 4-64. Drawing 12	99
Figura 4-65. Modelo 3D de la <i>ES Box</i>	99
Figura 4-66. Sección transversal del depósito de combustible	100
Figura 4-67. Modelo 3D del depósito de combustible	100
Figura 4-68. Extintor de incendios OMP CEFAL 3	101
Figura 4-69. Modelo 3D del extintor de incendios	101
Figura 4-70. Modelo 3D del parabrisas	102
Figura 4-71. Reposacabezas extraído	102
Figura 4-72. Imagen de la cámara a bordo de Fernando Alonso	103
Figura 4-73. Modelo 3D del reposacabezas	103
Figura 4-74. Modelo 3D del pedal del acelerador	104
Figura 4-75. Modelo 3D de la pedalera	105
Figura 4-76. Modelo 3D del cilindro actuador	106

Figura 4-77. Modelos 3D de los depósitos de tamaño mediano y pequeño	107
Figura 5-1. Cuadro de diálogo de CATIA en el módulo de Assembly Design	108
Figura 5-2. Sistema de suspensión ensamblado	109
Figura 5-3. Detalle de la suspensión delantera del monoplaza	109
Figura 5-4. Detalle de los elementos que se encuentran en la rueda delantera izquierda	110
Figura 5-5. Paquete aerodinámico ensamblado	110
Figura 5-6. Planta de potencia ensamblada	111
Figura 5-7. Detalle del semieje de transmisión	111
Figura 5-8. Sistema de dirección ensamblado	112
Figura 5-9. Conjunto de elementos auxiliares ensamblados	112
Figura 5-10. Pedalera ensamblada	113
Figura 6-1. Vista frontal del monoplaza	114
Figura 6-2. Vista lateral del monoplaza	115
Figura 6-3. Vista en planta del monoplaza	115
Figura 6-4. Detalle de la suspensión delantera	115
Figura 6-5. Render del monoplaza con el piloto incluido	116
Figura 6-6. Prueba de importación del modelo de F4 y del circuito de Mónaco a Keyshot 10	117
Figura 6-7. Render del modelo de F4 en el Red Bull Ring	117
Figura 6-8. Render del modelo de F4 en el circuito de Mónaco	118
Figura 6-9. Render del modelo de F4 en el circuito de Mónaco	118
Figura 6-10. Render del modelo de F4 en el circuito de Spa-Francorchamps	119
Figura 6-11. Render del modelo de F4 en el circuito de Spa-Francorchamps, al atardecer	119
Figura 7-1. Pontón modelado con un Multi-Section Surface	121
Figura 7-2. Porciones del pontón modeladas con operaciones de Fill	121



# 1 INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

---

El proyecto que se ha llevado a cabo, y que se encuentra recogido en esta memoria, consiste en el modelado de un monoplace de F4, siguiendo para ello una serie de directrices y atendiendo a unas restricciones recogidas en la normativa técnica que los monoplaces de esta categoría deben cumplir. Se ha decidido llevar a cabo modelar un vehículo de esta categoría por varios motivos:

- En primer lugar, la F4 está ganando una gran importancia desde que se creó, en el año 2014, presentándose como una alternativa relativamente económica para que los pilotos den el salto del mundo del *karting* y poder obtener sus primeras experiencias y carreras en monoplaces.
- Además, debido a cómo está pensada y organizada la categoría, permitiendo la entrada de varios fabricantes tanto de chasis como de motores, ha sido sencillo encontrar la normativa técnica que sirve de base para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado. También cabe destacar que, debido a que la normativa es bastante más restrictiva que la empleada en otras categorías más famosas, como la propia Fórmula 1, no se han podido tomar tantas libertades a la hora de diseñar las piezas, con lo cual ha hecho que la complejidad de este proyecto se haya mantenido a unos niveles adecuados.

Para llevar a cabo el modelado de dicho monoplace, se ha empleado el software CATIA V5 R19. En concreto, se han empleado algunos de los módulos que este programa ofrece, indicándolos en su apartado correspondiente.

## 1.1. Estructura de la memoria

En los primeros apartados de esta memoria, se proporcionará una definición de lo que es un automóvil de tipo monoplace, destacando las características que hacen que un monoplace sea efectivamente un monoplace y las diferencias con otros tipos de vehículos más convencionales. Además, se entrará en detalle sobre la evolución que han tenido los monoplaces desde que se introdujeron por primera vez en la 1ª Edición de las 500 Millas de Indianápolis en 1911 hasta en la actualidad, ya que muchos de los cambios que se han ido introduciendo han influenciado a cómo se diseñan este tipo de vehículos hoy en día.

Tras ello, se comentará la historia de las principales categorías soporte de la categoría reina del automovilismo, la Fórmula 1, siendo éstas la Fórmula 2 y la Fórmula 3. También se dará un contexto histórico a otras categorías soporte más actuales, como la Fórmula Regional o la propia Fórmula 4, pudiendo completar así, de forma más metafórica, la pirámide que los pilotos deben escalar para acabar llegando a la F1, partiendo del mundo del *karting*.

Tras proporcionar el contexto histórico, se procede a entrar en detalle en el F4 que se busca modelar. En primer lugar, se describen algunas características de este monoplace, después se entra en detalle en el software empleado, destacando como se comentó previamente CATIA V5 R19 para finalmente describir el proceso de modelado de dicho monoplace.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el de llevar a cabo el diseño y modelado de un monoplace de especificación F4, utilizando para ello las herramientas disponibles en el *software* CATIA V5 R19. Para llevar a cabo este modelado, es necesario aprender a interpretar la normativa técnica que rige las prestaciones y las dimensiones de dicho monoplace. En concreto, este trabajo me ha obligado a aprender a interpretar una normativa redactada por la Federación Internacional del Automovilismo, documentos caracterizados por ser bastante complejos ya que deben especificar todas las limitaciones impuestas a los vehículos, evitando lagunas legales o posibles oportunidades para aprovechar estas zonas ‘grises’ del reglamento. Además, es importante poder interpretar dicha normativa técnica para poder diseñar un coche que

se considere legal en el marco de un campeonato de F4.

Cabe destacar también que, para llevar a cabo el modelado de este monoplace, ha sido necesario conocer cómo se encuentran colocadas las distintas piezas y elementos que contiene, debido a que los espacios disponibles para ellas son bastante limitados. El modelar algunas de las piezas que se encuentran en este vehículo ha permitido además el modelado de algunas partes de la carrocería. Por ejemplo, el morro se ha tenido que modelar teniendo en cuenta que los amortiguadores de la suspensión delantera se encuentran en esta zona, teniendo que reservarse un espacio para ello. Para poder aprender cómo es un monoplace en su interior, ha sido de gran ayuda haber obtenido de Internet los manuales de usuario de los monoplaces de F4 de primera generación, así como listados de las piezas que conforman dichos monoplaces.

También, en este Trabajo se han podido afianzar y ampliar los conocimientos que se han obtenido en el Grado en Ingeniería Aeroespacial sobre CATIA V5, pudiendo llevar a cabo el modelado de todo tipo de piezas que conforman este monoplace de F4 mediante diferentes técnicas.

## 2 CONTEXTO HISTÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Para poder poner en contexto la categoría, normativa y características de un Fórmula 4, primero se definirá la característica que más diferencia este coche con el de un coche de calle: el concepto de un monoplaaza. Con ello definido, se procederá a dar un contexto histórico de la categoría más conocida que compite con coches *open-wheel*, la Fórmula 1, así como otras categorías como la Fórmula 2 y la Fórmula 3, que actualmente, junto con la Fórmula 4, están englobadas en un grupo conocido como ‘categorías soporte’ (*feeder series* en inglés).

### 2.1. Monoplaaza: definición y características

Un monoplaaza, conocido en inglés bajo los nombres *open-wheel car* o *single-seater car* es aquel cuyas ruedas se encuentran fuera de la carrocería del coche. Además, en su mayoría, también se caracterizan por tener un único asiento. Este tipo de coches, por tanto, son bastantes diferentes a los coches de calle o los coches de otras competiciones, como los turismos, los *stock cars* y los coches de GT, por destacar algunos, ya que estos tienen las ruedas situados debajo de la carrocería o dentro de guardabarros.



Figura 2-1. Mercedes-AMG F1 W11 EQ Performance de Lewis Hamilton, un ejemplo de un automóvil tipo monoplaaza



Figura 2-2. A la izquierda, un Aston Martin DBR9 de la categoría GT1. A la derecha, un *stock car* de la NASCAR, pilotado por Kyle Larson

Los monoplazas se desarrollan y fabrican principalmente para la competición, pudiendo correr en circuitos, tanto permanentes como callejeros, aunque también existen algunos monoplazas que se pueden usar en la calle, como el Ariel Atom, aunque son más bien la excepción, debido a las pocas ventajas prácticas que presenta para el día a día.

Algunas de las características que comparten la mayoría de monoplazas de competición son las siguientes:

- El *cockpit*, que en la F1 y sus categorías soporte, incluyendo la F4 es equivalente a la célula de supervivencia (*survival cell* en inglés), está diseñado para albergar principalmente al piloto. Además, en la mayoría de los casos, la cabeza está expuesta.
- Tanto las ruedas como los brazos de suspensión se encuentran descubiertos y fuera del cuerpo principal del coche (la célula de supervivencia generalmente), lo que permiten una conducción más precisa, ya que se puede ver dónde están situadas las ruedas, especialmente las delanteras. La gran excepción son los monoplazas de la Fórmula E, categoría de monoplazas eléctricos, diseñados bajo la normativa Gen 2. Estos tienen carenados que cubren las ruedas, por motivos aerodinámicos.



Figura 2-3. Monoplaza Gen2 de la Fórmula E, del equipo Envision Jaguar

- El motor se encuentra detrás del piloto. Además, los monoplazas suelen ser coches con tracción a las ruedas traseras.
- Los monoplazas consiguen grandes prestaciones gracias principalmente al uso de las fuerzas aerodinámicas para su ventaja, ya que, aunque los coches con ruedas cubiertas también buscan el usar esas fuerzas, los monoplazas más sofisticados consiguen fuerzas aerodinámicas con valores superiores a la propia fuerza peso.

Aunque depende de la normativa, la mayoría de monoplazas tienen alerones tanto en la parte delantera como trasera del coche, que sirven para generar sustentación aerodinámica negativa (*downforce* en inglés), permitiendo al coche adherirse más al asfalto. Además, cuentan con un suelo muy bajo y virtualmente plano (conocido también como ‘fondo plano’) que les permite generar más *downforce*. Esto último es debido a normativa que, en el caso de la F1 y sus categorías soporte, tenía como objetivo limitar el *downforce* que se podía generar por efecto suelo, limitación impuesta en 1983, aunque para 2022, la nueva normativa de la F1 reinstauraba los fondos no planos para aumentar el *downforce* generado por efecto suelo.



Figura 2-4. A la izquierda, el Williams FW36 de Felipe Massa durante un accidente en el GP de Alemania de F1 de 2014. Nótese el fondo del monoplaaza virtualmente plano. A la derecha, el fondo del Ferrari F1-75 de la temporada 2022 de F1. Se puede observar como las secciones planas se han sustituido por túneles Venturi.

- Generalmente son coches más frágiles que los coches de competición con ruedas cubiertas. Un contacto entre dos monoplazas suele acabar con daños que pueden provocar hasta el abandono en carrera.

Con ello se puede ver que los monoplazas son coches que pueden llegar a tener unas prestaciones increíbles, destacando sobre todo las velocidades en paso por curva. [1]



Figura 2-5. Mercedes W07 de Nico Rosberg durante el GP de Japón de 2016. Fotografía tomada en la curva 8 (Degner 1), curva tomada a unos 240 km/h.

## 2.2. Monoplaza: historia y evolución

El primer monoplaza de la historia se desarrolló en EE. UU., de la mano del ingeniero Ray Harroun. Mientras trabajaba en la empresa Marmon Motor Car Company, fue encargado de fabricar un coche para competir en la 1ª edición de las 500 Millas de Indianápolis (conocida en inglés como *Indy 500*) en 1911. Ray Harroun construyó el Marmon *Wasp*, coche que acabó ganando las 500 Millas. [2]



Figura 2-6. *Marmon Wasp*

Este coche se diferenció de la competencia de aquel año en que sólo había asiento para una persona en el habitáculo para el piloto. En aquella época, lo más normal es que los coches de carreras llevaran a dos personas: al piloto y a un mecánico, que se encargaba de ayudar en las reparaciones que fueran necesarias durante la carrera, suceso que tenía lugar con bastante frecuencia; así como ver qué coches tienen por detrás, para evitar posibles contactos y accidentes. Sin embargo, no había ninguna norma escrita que obligaba a llevar a dos personas en un coche, laguna que aprovechó Ray Harroun para desarrollar el Marmon *Wasp* antes mencionado.

Sin embargo, el resto de los pilotos protestaron contra Harroun y Marmon durante el fin de semana de la carrera, ya que consideraban que el no tener a un mecánico a bordo era una situación peligrosa, ya que Harroun podría no saber la situación detrás suya. Es por ello por lo que también montó un espejo retrovisor en su coche, siendo esta la primera instancia en la que un coche de carreras iba equipado con un retrovisor. [3]



Figura 2-7. Espejo retrovisor montado en el *Marmon Wasp*

Después de esta carrera, se obligó a que en cada coche vayan dos personas en todas las carreras en suelo norteamericano hasta 1937. En Europa, hogar de los *Grand Prix* no se impuso esa norma. Es más, en 1924 se prohibió que un mecánico fuese a bordo del coche, tras la muerte del mecánico británico Tom Barrett [4].

Varios años más tarde, en 1932, salió a la luz el primer monoplaza desarrollado en suelo europeo para participar en las pruebas de Grand Prix. Creado para contrarrestar el dominio del fabricante francés Bugatti, con el T51 a la cabeza [5], y como evolución del Tipo A, la marca italiana Alfa Romeo, con Vittorio Jano

como diseñador jefe, fabricó el Alfa Romeo Tipo B *Monoposto*, logrando la victoria en su debut, en el Gran Premio de Italia de 1932, celebrado en el circuito de Monza. Al final de la temporada, el piloto italiano Tazio Nuvolari se convirtió en el campeón de Europa de pilotos a bordo de este coche. [6]



Figura 2-8. Alfa Romeo Tipo B *Monoposto*

Tras el éxito del Tipo B, los coches que compitieron en Europa hasta el inicio de la 2ª GM serían de tipo monoplace. En este período destaca Alemania, en concreto las compañías Mercedes-Benz y Auto Union (actual Audi), quienes, con un gran apoyo económico detrás, dominaron el período de entreguerras con sus conocidas “flechas plateadas” [7]. Algunos de los monoplaces que desarrollaron estas dos compañías son:

- Auto Union Typ A/B/C/D. Con cada letra representando una evolución del anterior, los Auto Union eran monoplaces cuya característica más destacada es la disposición del motor, ya que, mientras el resto de grandes fabricantes desarrollaban coches de carreras con motor delantero, los Auto Union eran de motor central, es decir, que el motor se sitúa por detrás del eje delantero, pero por delante del eje trasero. [8][9]



Figura 2-9. Auto Union *Typ C*

- Mercedes-Benz W125. Considerado como el coche de carreras de antes de la 2ªGM definitivo, este monoplace se desarrolló para acabar con el dominio de Auto Union de las temporadas 1935 y 1936. Equipado con un motor muy robusto y con unas suspensiones con muelles más blandos y con mayor recorrido, con el objetivo de maximizar el tiempo en el que las ruedas se encuentran en contacto con el firme, el W125 dominó la temporada 1937, dando a Rudolf Caracciola su segundo título de campeón de Europa de pilotos. [10]



Figura 2-10. Mercedes-Benz W125

Además, en enero de 1938, una versión modificada del W125, conocido bajo el nombre de *Rekordwagen* ('coche de récord' en alemán), el mismo Caracciola logró alcanzar los 432.7 km/h en una carretera que conecta las ciudades de Frankfurt y Darmstadt. Este tramo, que actualmente es la A-5 de la Autobahn alemana, es un tramo que los fabricantes alemanes (en especial los dos mencionados anteriormente) usaban para llevar a cabo pruebas de velocidad. Este récord permaneció vigente hasta 2018. [11]

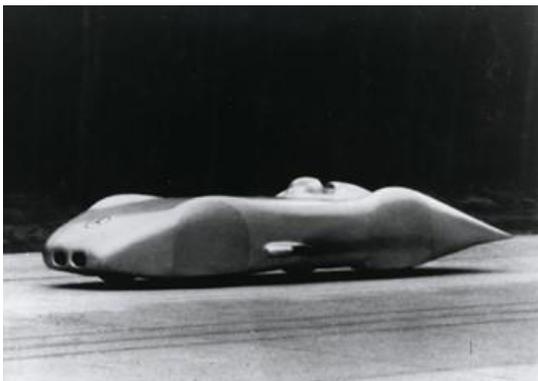


Figura 2-11. Mercedes W125 *Rekordwagen*

- Mercedes-Benz W165. Descrito como un 'coche de Grand Prix a escala', este Mercedes salió a la luz para el Grand Prix de Trípoli (Libia) de 1939 [12]. Debido a cambios en la normativa para esta carrera, que obligaban a los participantes a llevar coches con motor de 1.5L (como referencia, el Mercedes W125 llevaba un motor V8 de 5.66L, y el Auto Union Typ C llevaba un motor V16 de 6L); y a rumores de que esta normativa se impondría para todos los Grand Prix a partir de 1940 o 1941, Mercedes desarrolló y fabricó 2 monoplazas W165 en tan solo 8 meses. Para ello, lo que hicieron fue una versión escalada (de escala 4/5 aproximadamente) del Mercedes-Benz W154, considerado el hermano mayor, que participó en la temporada anterior. Dominó la prueba, con Hermann Lang llevándose la victoria por delante de su compañero de filas Rudolf Caracciola. [10][13]



Figura 2-12. Mercedes-Benz W165 en el Gran Premio de Trípoli de 1939

Sin embargo, la irrupción de la 2ªGM puso un punto y aparte en el automovilismo en Europa, haciendo que este Mercedes-Benz W165 sólo pudiese participar en este Grand Prix.

En 1950, se introdujo un nuevo reglamento conocido como Fórmula A, que posteriormente se pasaría a llamar Fórmula 1 (nombre que se conserva hasta la actualidad) que limitó la capacidad de los motores. Ese mismo año, la Federación Internacional del Automovilismo, conocida bajo sus siglas FIA (en francés *Fédération Internationale de l'Automobile*) organizó el primer campeonato mundial, el Campeonato del Mundo de Fórmula 1 [14].

En los primeros años, los monoplaces eran muy similares a los que existieron en los años previos a la 2ªGM: motores grandes y situados delante del piloto y un chasis tubular de algún material metálico (principalmente aleaciones de acero o aluminio).



Figura 2-13. Ferrari 375 pilotado por Alberto Ascari en el GP de España de 1950

Sin embargo, la primera gran evolución de los monoplaces bajo la normativa de la Fórmula 1 vino en la temporada 1962. Debido a que las inercias que debía soportar un coche iban siendo cada vez mayores, el ingeniero inglés, diseñador del equipo Lotus, Colin Chapman desarrolló un tipo de chasis más ligero, con una mayor rigidez torsional y con una superficie frontal menor que la de sus competidores para el Lotus 25. Este chasis, formado por placas de una aleación de aluminio conocida con el código L72, fue el primer chasis monocasco de la historia de la categoría. Un año más tarde, con este diseño, el piloto Jim Clark logró coronarse como campeón del mundo de F1 [15].



Figura 2-14. Lotus 25

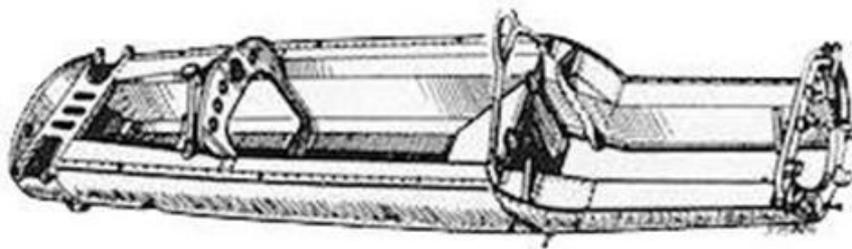


Figura 2-15. Dibujo del chasis monocasco del Lotus 25

Varios años más tarde, fue otra vez Colin Chapman quien introdujo otra de las mayores evoluciones a los monoplazas de la época, que marcarían el futuro de la F1 y prácticamente del automovilismo en su totalidad. En el GP de Mónaco de 1968, el equipo Lotus presentó la variante B del Lotus 49 que habían utilizado hasta este punto. Este coche se caracterizaba del resto por dos peculiaridades: una de ellas es que no presentaba el verde tradicional de los coches de carreras británicos, sino que iba pintado con los colores de Gold Leaf Tobacco, tabacalera que era el principal patrocinador del equipo; y por presentar superficies aerodinámicas en la parte delantera y trasera del monoplaza. Así, este monoplaza fue el primero en llevar alerones en la historia de la F1 [16][17].



Figura 2-16. Lotus 49 pilotado por Graham Hill en el GP de Mónaco de 1968

Con el paso de los años, los coches iban evolucionando, adaptándose a los cambios en la normativa pertinentes, pero la fórmula base no variaba: chasis monocasco de aluminio y la existencia de superficies aerodinámicas (alergones principalmente). No fue hasta 1981 cuando se produjo otro de los grandes cambios en lo que respecta a la estructura de un monoplaza. Para esta temporada, el equipo británico McLaren, quien, como el resto de los equipos de la parrilla de F1, ya estaba dando sus primeros pasos en el uso de materiales compuestos en los monoplazas, introdujo el McLaren MP4/1 [18]. La mayor diferencia con respecto al resto de equipos de esa temporada fue que usaba un chasis monocasco de fibra de carbono, más ligero y rígido (y más seguro para el piloto) que los chasis de aluminio que predominaban en la categoría. A pesar de ser la 1ª vez que se utilizó un chasis de estas características, se demostraron sus ventajas rápidamente, ganando carreras en la temporada de su debut, e incluso salvando al piloto británico John Watson de lesiones graves tras un accidente que tuvo en el GP de Italia de ese mismo año. [19][20]



Figura 2-17. Monocasco del McLaren MP4/1

Este monocasco de fibra de carbono pasaría a conocerse también como ‘célula de supervivencia’ (*surviving cell* en inglés), nombre que se conserva hoy en día. Esta estructura es la que protege al piloto en caso de accidente, por lo que se ve exigido a numerosas pruebas y ensayos cada año y a constantes actualizaciones para aumentar la seguridad y la resistencia de este elemento [21].



Figura 2-18. Imagen de una prueba de impacto (*crash test* en inglés) llevado a cabo por la FIA

Por esta época, también se llevaron a cabo grandes evoluciones desde el punto de vista aerodinámico, destacando el uso del efecto suelo para generar *downforce*. En la primera prueba de la temporada 1977, el GP de Argentina, el equipo Lotus se presentó con su nuevo monoplaza: el Lotus 78. Este coche, con una vez más Colin Chapman a la cabeza del diseño, esta vez contando con la ayuda del británico Peter Wright, una vez más se diferenciaba clamorosamente del resto de los de la parrilla. Esta vez las grandes diferencias se encontrarían en la parte inferior del monoplaza, ya que la parte inferior del monoplaza estaba diseñada como un ala invertida [22]. Los ingenieros de Lotus descubrieron que, si se modelaba así el monoplaza, el aire se aceleraba en esa zona por efecto Bernoulli, dando lugar a una disminución de la presión que permitía al coche adherirse

más al asfalto. Este coche, apodado como el ‘coche ala (*wing car* en inglés)’, fue el primero en introducir de forma exitosa el concepto de ‘efecto suelo’ en un monoplaza [23].



Figura 2-19. Mario Andretti pilotando el Lotus 78 en el GP de Mónaco de 1977

No obstante, esta idea de emplear el efecto suelo para generar carga aerodinámica no surge con el Lotus 78. Por ejemplo, medio siglo antes, el ingeniero argelino René Prévoist desarrolló un prototipo de monoplaza utilizado para batir récords de velocidad en tierra, vehículo en el cual se buscaría generar *downforce* utilizando el efecto suelo. Para ello, Prévoist modeló la parte inferior del monoplaza como un ala invertida, una idea que 50 años más tarde el equipo Lotus consiguieron implementar de forma más sofisticada. Además, descubrió que el efecto suelo es mayor si se logra sellar los laterales de los bajos del coche, dando así la forma tan peculiar en los laterales de este prototipo.

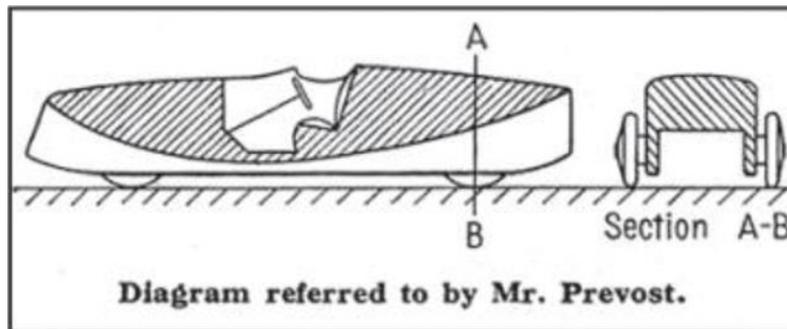


Figura 2-20. Boceto del prototipo ideado por René Prévoist

Sin embargo, debido a que los ingenieros de la época preveían que las piezas que tenía que utilizar este prototipo iban a ser muy complicadas como para fabricarlas, debido a la forma inusual que tenía dicho vehículo, no pasó de la fase de idea, una idea que con el paso de los años pasaría a estar en el olvido. No fue hasta 2011, cuando la revista *Motorsport Guide* realizó un análisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*, una forma de simular y conocer el comportamiento del flujo de aire en presencia de un cuerpo), rescatando para ello los bocetos originales y realizando un modelo 3D y simulando, que esta idea volvió a resurgir en la historia de la F1 y de los monoplazas en general.

Se pudo concluir que Prévoist no iba mal encaminado. La forma que propuso sí presentaba una desventaja, y es que las fuerzas aerodinámicas generadas levantarían la parte delantera del automóvil, haciendo que tienda a un comportamiento subvirador. Además, aunque sí se generaba *downforce*, este no era nada espectacular (a 80 mph, el récord de velocidad de la época generaba cerca de 80 kg de carga, el equivalente a llevar un pasajero en el coche). Sin embargo, este artículo también estima que, si se corrige la forma de la parte delantera del coche, el *downforce* podría aumentar más de un 40% [24].

A principios de la década de los 70, el efecto suelo volvía a estar en la mente de los ingenieros de competición. Fue en EE. UU. donde se volvió a utilizar este efecto en un coche de competición, y donde se vieron por primera vez reflejadas sus ventajas. En la temporada de Can-Am de 1970, un campeonato con carreras que

tenían lugar en EE. UU. Y en Canadá y que se caracterizaba por su libertad en lo que a normativa respecta, lo que daba lugar a que coches muy revolucionarios y distintos entre sí compitiesen entre ellos, la escudería Chaparral introdujo su último modelo: el Chaparral 2J.

Chaparral era muy conocida en el campeonato por introducir coches radicales con novedades destacadas en el campo de la aerodinámica, como alerones móviles y cambio automático. Sin embargo, el coche más conocido es el 2J, el coche que consiguió explotar los beneficios del efecto suelo, llegando a rodar hasta 2 segundos más rápido que sus competidores.

Este coche tenía equipado un par de ventiladores extraídos del tanque M109 Howitzer que funcionaban con ayuda de un pequeño motor. Estos ventiladores se utilizaban para extraer el aire que se encontraba en los bajos del coche, pudiendo disminuir aún más la presión en dicha zona, permitiendo una mayor carga aerodinámica. Además, los laterales del coche tenían unos faldones de un plástico flexible de altas prestaciones, conocido como Lexan, que permitían sellar la zona de depresión, aumentando aún más el efecto suelo, como ya predijo Prévost 50 años antes.



Figura 2-21. Chaparral 2J

El 2J, muy rápido, pero poco fiable, compitió únicamente en la temporada 1970 de la Can-Am Series. No compitió en todas las carreras de la temporada, y en las que compitió, no consiguió grandes resultados debido a la pobre fiabilidad que tenía, como consecuencia de su complejidad. No obstante, su velocidad se veía reflejada sobre todo a una vuelta, obteniendo dos pole position [25]. Al final de la temporada, se prohibió el diseño por motivos de seguridad, debido a que esos ventiladores levantaban todo el polvo, hierba, piedrecitas, etc., que se encontraba a su paso. Además, fueron considerados elementos aerodinámicos móviles, elementos que fueron prohibidos unas temporadas antes [26].

Volviendo al panorama europeo y a la Fórmula 1, 7 años más tarde Lotus introdujo el Lotus 78 comentado anteriormente. Este coche demostró ser bastante exitoso, consiguiendo 5 victorias durante la temporada. Aun así, no era ni muchos menos perfecto, ya que el centro aerodinámico se encontraba algo adelantado, lo que obligaba a llevar un gran alerón trasero [27].

Todos estos problemas de diseño se resolvieron en su evolución, el Lotus 79. Introducido a mediados de la temporada 1978, se demostró la mejoría desde el primer momento, ganando la primera carrera en la que participó. Al final de la temporada, el equipo Lotus se acabó llevando el título de constructores y Mario Andretti consiguió su primer y único título de campeón compitiendo para el equipo británico [28].



Figura 2-22. Mario Andretti a bordo del Lotus 79

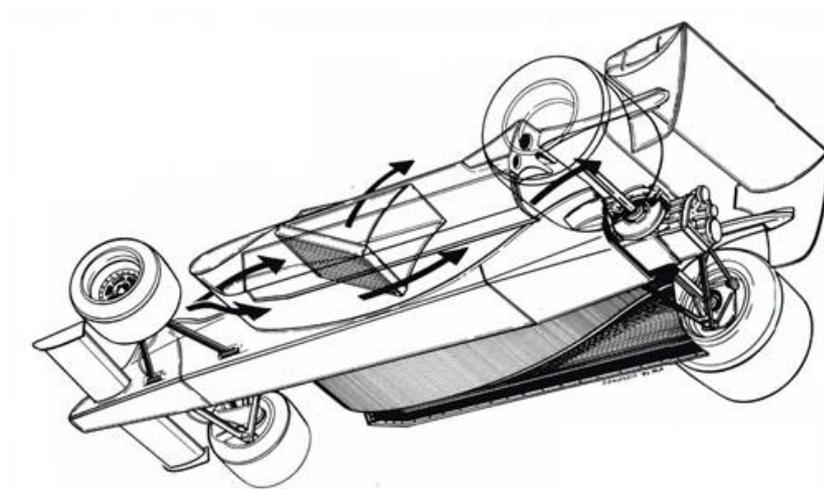


Figura 2-23. Esquema del fondo plano del Lotus 79. Obsérvese los laterales con una forma similar a un ala invertida

Aun así, en la temporada 1978 hubo un coche que sería casi tan recordado en la historia de la categoría como el Lotus 79. En el GP de Suecia, el equipo Brabham se presentó con una especificación B de su monoplace de la temporada, el BT46. Este monoplace tenía en su parte trasera un gran ventilador, con el objetivo de buscar maximizar el efecto suelo, de forma similar a lo que hizo Chaparral a principios de década; aunque el equipo, con Gordon Murray a la cabeza del diseño del apodado ‘fan car (coche ventilador)’ afirmó que objetivo principal del ventilador era el de refrigerar el motor plano de 12 cilindros de Alfa Romeo que llevaba (lo cual así se demostró que era, aunque también servía para extraer el aire de los bajos del coche para aumentar el efecto suelo).

Se clasificó en 3ª posición para la carrera, la cual ganó con más de medio minuto de ventaja sobre el segundo clasificado. Este coche lo llevó a la victoria Niki Lauda. Sin embargo, tras esta carrera y tras presiones del resto de equipos, el coche se declaró ilegal por motivos de seguridad, y no volvió a competir [29].



Figura 2-24. Brabham BT46B

El efecto suelo hizo aumentar la velocidad de los monoplazas, aunque presentaba sus desventajas. Uno de ellos era la aparición de un fenómeno que está de moda en la F1 actual, el fenómeno de *porpoising*, en la cual el coche rebota como consecuencia del funcionamiento del efecto suelo. La carga generada baja el coche hasta el punto de que toca el asfalto, momento en el cual se interrumpe el flujo de aire, lo que hace que no haya carga y que el coche suba, dando lugar así a una oscilación que desestabilizaba en coche, pudiendo acabar en consecuencias graves. Para intentar minimizar este efecto, se endurecen las suspensiones. Sin embargo, si en el circuito había baches o desniveles, estas suspensiones más duras podían provocar cambios en el flujo del aire al pasar por dichos baches o desniveles, lo que daba lugar a un comportamiento impredecible que también podía acabar en accidente. Por ello, en 1983, se prohibió el diseño de bajos con canales Venturi, obligando a los F1 a tener un suelo prácticamente plano, para limitar el efecto del efecto suelo [27].

En 1977, además del Lotus 78, también apareció en la parrilla otro coche que cambiaría el devenir de la F1 durante esta era: el Renault RS01. Este fue el primer monoplaza de F1 de la historia en tener un motor turbo. En el reglamento introducido en 1966, además de la opción de llevar motores de 3L atmosférico estaba la opción de llevar un motor sobrealimentado de 1.5L. Esta segunda opción no la escogió nadie hasta que Renault entró en la categoría con su RS01.



Figura 2-25. Jean-Pierre Jabouille a los mandos del Renault RS01

La escudería francesa tenía como objetivo extraer más potencia que los Cosworth DFV que dominaban la categoría con ayuda de un turbocompresor, lo que permitía montar un motor más pequeño y ligero. Renault decidió montar un motor con configuración V6. Apodado como la 'tetera amarilla', debido a sus problemas de fiabilidad que resultaban muchas veces en grandes humaredas, tuvo un inicio complicado. Tras dos años, con la evolución del RS01, el RS10, consiguió su primera victoria, en el GP de Francia de 1979 con Jean-Pierre Jabouille a bordo de este monoplaza.

Con el paso de las temporadas, los equipos iban adoptando estos motores turbo, permitiendo también la

entrada de nuevos fabricantes, como BMW, Porsche u Honda, que fabricaron motores para equipos como McLaren, Bennetton, Williams o Brabham, por nombrar a unos cuantos; dejando así obsoletos a los motores Cosworth DFV que habían dominado la categoría [30].

Tras los complicados inicios de los motores turbo, con cada temporada que pasaba, los equipos disponían de motores cada vez más potentes, llegándose hasta el punto en el que los coches eran muy complicados de conducir, con una potencia fuera de lo común, especialmente en clasificación. Esto se debe a que los fabricantes traían a los GP motores específicamente para clasificación, en los cuales se aumentaba la presión del turbo hasta el punto de que se rompían tras una vuelta rápida. Estos motores se conocían bajo el apodo de 'granadas'. Fueron con estos motores con los que se alcanzaron valores de más de 1400 CV, obtenidos con un motor BMW M12 en el año 1986, utilizado por los equipos Bennetton, Brabham y Arrows [31][32].



Figura 2-26. Motor BMW M12 montado en un Brabham BT52 en el GP de EE. UU. de 1983

Al año siguiente, la FIA restringió la presión máxima del turbo; y dos años más tarde, los motores turbo pasaron a estar prohibidos, para intentar abaratar costes y reducir la potencia que se podía extraer de los propulsores [30].

Al ver que se imponían límites estrictos en el desarrollo tanto aerodinámico como en la planta de potencia, algunos equipos de F1 comenzaron a explorar otras formas de ganar ventajas con respecto a sus rivales. Es en esta época donde se empieza el desarrollo en los campos de la informática y de la electrónica, dando lugar a una batalla entre los equipos más grandes para el desarrollo de toda clase de ayudas electrónicas que proporcionasen una ventaja en pista. Esta época concluyó en su mayor parte tras la temporada de 1993, después de que el equipo Williams dominase esa campaña con el que es, probablemente, el coche más complejo y sofisticado de la historia de la F1: el Williams FW15C.



Figura 2-27. Williams FW15C

El monoplaaza del equipo británico recoge todos los avances tecnológicos que se han ido desarrollando en esta época, así como introducir más ideas innovadoras. Por tanto, hablar de este monoplaaza significa hacer un resumen más que apropiado de estos frenéticos años. El Williams FW14C disponía de las siguientes ayudas electrónicas:

- Control de tracción
- ABS
- Controles tipo fly-by-wire. Esto implica que el piloto no controla directamente los distintos aspectos del monoplaaza, como el acelerador, freno o dirección, sino que le transmite información a través de los controles a un ordenador de a bordo, que interpreta este flujo de datos para actuar sobre los elementos necesarios.
- Caja de cambios semiautomática, en la que el piloto sube o baja de marcha con unas levas de cambio colocadas en la parte trasera del volante. Además, la caja de cambios también era capaz de subir los cambios de forma automática, realizando cambios de marcha perfectos.
- Suspensión activa. Probablemente el sistema más conocido en este monoplaaza, en el que un ordenador a bordo era capaz de optimizar la geometría de la suspensión para cada curva y cada recta que tiene el circuito, con el objetivo de que el monoplaaza tenga la actitud óptima desde el punto de vista aerodinámico [33].

La caja de cambios semiautomática fue introducida por primera vez por el equipo Ferrari, en el GP de Brasil de 1989, aprovechando que la marca italiana ya había investigado previamente este concepto en la última década para sus coches de calle. John Barnard, director técnico de Ferrari en este período, fue el encargado de revivir las investigaciones acerca de la caja semiautomática, para implementarla en los monoplaazas de F1, ya que en el equipo buscaban que los cambios de marcha fuesen más rápidos y que el piloto no tenga que accionar el embrague para ello.

Durante su desarrollo, se propusieron varias formas en las que el piloto cambiaba de marcha: con una palanca que se movía hacia delante o hacia atrás, un estilo muy común en turismos y en coches de rally, mediante dos botones situados en el volante, etc. Sin embargo, la forma que se acabó adoptando, y la que se ha extendido hasta en la actualidad en toda clase de monoplaazas y automóviles de competición y de altas prestaciones, es la de colocar dos levas en la parte trasera del volante (una para subir de marcha y otra para bajar). Además, Ferrari colocó una tercera leva, que accionaba el embrague para las salidas y las paradas en boxes, eliminando así la necesidad de tres pedales en los monoplaazas [34][35].



Figura 2-28. Volante del Ferrari 640 que participó en la temporada 1989 de F1. Nótese las levas para aumentar y reducir la marcha

Como se comentó previamente, el sistema más conocido del Williams FW15C es la suspensión activa. Los orígenes de este sistema se remontan a 10 años antes, cuando el equipo Lotus comenzó a investigar cómo controlar la geometría de la suspensión para poder explotar por completo las ventajas del efecto suelo, fenómeno que se encontraba limitado por el *porpoising* previamente mencionado. Con ello, Lotus desarrolló un sistema de suspensiones reactivo, no activo en el sentido puro de la palabra, ya que este sistema reaccionaba a las irregularidades del terreno o a los comandos del piloto, en vez de preparar de antemano el pasar por una curva [36].

Tras varios años de desarrollo, Lotus pudo implementar este sistema en el Lotus 99T, monoplaza que participó en la temporada 1987 de F1. A pesar de que el chasis de este monoplaza no era competitivo, de que el sistema de suspensión reactiva aumentaba el peso del coche en más de 10 kg y que consumía potencia del motor para alimentar la bomba hidráulica, Ayrton Senna pudo lograr dos victorias en los GP de Detroit y Mónaco, pruebas llevadas a cabo en circuitos urbanos, con muchos baches, demostrando así las virtudes de este sistema [37].

Sin embargo, el equipo Williams estaba desarrollando en paralelo un sistema similar al de Lotus, aunque ellos estaban enfocados en encontrar una solución más sencilla (también más limitada que la propuesta de Lotus) y, sobre todo, que fuese verdaderamente activa. Tras algunos años de desarrollo a mediados de la década de los 80, los estudios se quedaron estancados. No fue tras pasar unos años más cuando Williams comenzó a coquetear otra vez con la idea de suspensión activa, pensamiento impulsado por el rápido desarrollo de los ordenadores que se estaba viviendo a finales de los años 80 y comienzos de los 90.

En 1991, Williams introdujo para la última carrera de la temporada, el GP de Australia, celebrado en el circuito urbano de Adelaida, una evolución del Williams de dicha campaña que incluía la tecnología de suspensión activa: el Williams FW14B. Desafortunadamente, no se pudo apenas probar este sistema, ya que este GP pasó a ser el GP más corto de la historia de la F1 debido al mal tiempo (hasta que se ‘celebró’ el GP de Bélgica de 2021), con un tiempo de carrera de menos de 25 min y una distancia de carrera de 52.92 km (como referencia, un GP de F1 es de aproximadamente 300 km).



Figura 2-29. Nigel Mansell pilotando el Williams FW14B en el GP de Australia de 1991

Sin embargo, al ver en los *test* previos a la temporada 1992 la gran ventaja que daba el implementar este sistema, decidieron utilizar el mismo FW14B para esta temporada. Y así fue. Williams dominó el año, ganando el campeonato de constructores y su piloto, Nigel Mansell, pudo lograr el título de campeón de pilotos. Y para la temporada siguiente Williams utilizó su ya mencionado FW15C, una evolución que mejoró al coche previo en todos los aspectos, consiguiendo así dominar también la temporada 1993, ganando los títulos de constructores y de pilotos, con Alain Prost.

La FIA, no obstante, consideró que estos sistemas de ayuda al piloto, especialmente la suspensión activa, ya han pasado a ser peligrosos, debido a que la velocidad de los coches aumentó considerablemente en estos últimos años. Por tanto, para 1994, la Federación prohibió toda clase de sistemas electrónicos de ayuda al piloto, una medida que se ha mantenido vigente hasta en la actualidad [38].

No obstante, si hay una temporada que ha servido de punto de inflexión en lo que respecta al desarrollo de los monoplazas, un candidato es la temporada 1994, marcada por trágico GP de San Marino. Este GP, considerado por muchos expertos como el fin de semana más negro de la F1, acabó con la trágica muerte de dos pilotos: Roland Ratzenberger, piloto debutante en la escudería Simtek, quien perdió la vida durante la sesión de clasificación celebrada el sábado tras un accidente en la curva Villeneuve, uno de los puntos más rápidos del circuito; y Ayrton Senna, tricampeón del mundo de F1 y considerado como uno de los mejores pilotos de la categoría de la historia, quien murió tras impactar contra el muro de hormigón en la curva Tamburello, una curva también de alta velocidad [39].



Figura 2-30. Roland Ratzenberger (izquierda) y Ayrton Senna (derecha) en 1994

Tras este trágico fin de semana de Gran Premio, la FIA empezó a trabajar para mejorar la seguridad de los monoplazas. Las primeras medidas fueron enfocadas a reducir la velocidad de los vehículos, reduciendo el tamaño del alerón delantero y trasero. Por ejemplo, una de las normas que se implementaron y que sigue aplicándose hoy en día en los monoplazas tanto de F1 como de categorías inferiores es que el fondo plano deja de ser plano, pasando a ser escalonado. Además, en la parte más baja de este elemento, se incluye un elemento que determina si un coche es legal desde el punto de vista de las alturas o no, elemento conocido como *plank*.

Esta plancha, fabricada en madera y posteriormente en materiales poliméricos, permite a la FIA determinar la legalidad de un monoplaza midiendo el desgaste de este. Si el desgaste supera unos límites establecidos por la Federación, se concluye que el coche iba demasiado bajo de alturas, por lo que se cataloga de ilegal y se penaliza correspondientemente. Este escalón en el fondo plano se ha implementado para limitar aún más el efecto aerodinámico que este elemento tiene [40].

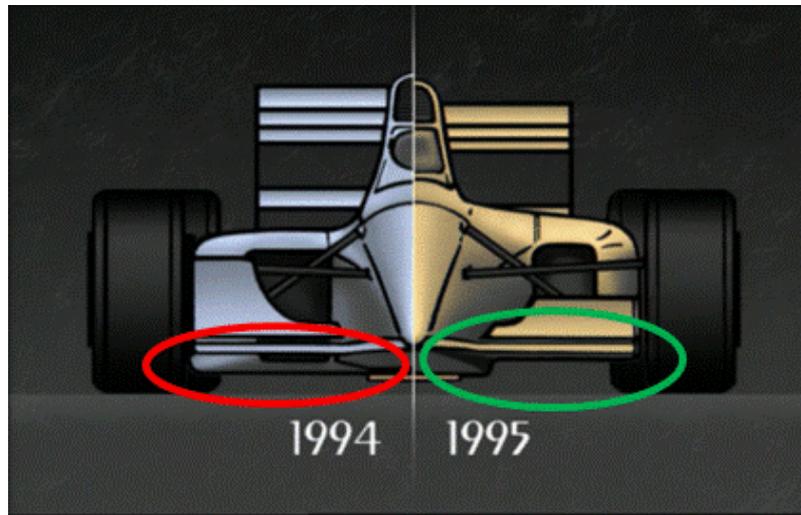


Figura 2-31. Algunos de los cambios introducidos para la temporada 1995. En la imagen se destaca los cambios en el fondo plano, introduciendo el escalón (*step plane* en inglés)

Con el paso de los años, se han ido introduciendo más cambios, con el objetivo por una parte de controlar la velocidad que pueden alcanzar los monoplazas y por otra de mejorar la seguridad del propio vehículo, buscando proteger cada vez más al piloto. Algunas de las medidas a destacar son:

- La introducción del reposacabezas. Uno de los problemas que había en el mundo del motorsport a finales de los años 90 y comienzos de la década de los 2000 es la gran cantidad de lesiones, algunas fatales, que tenían lugar en la zona de la cabeza y el cuello de los pilotos. Es por ello por lo que la F1 fue buscando medidas para intentar proteger esta zona, elevando los laterales del monocasco gradualmente hasta alcanzar las dimensiones que se tienen en la actualidad, que se encuentra a la altura de los ojos. Además, en 1996 se introdujo el reposacabezas, un elemento fabricado con una espuma certificada por la FIA que buscaba disipar la energía a la que se veía sometida la cabeza y el cuello de un piloto en caso de impacto, así como reducir el movimiento de la cabeza. Este reposacabezas es un elemento que se ha ido implementado en distintas categorías de monoplazas, siendo actualmente un elemento imprescindible y para tener en cuenta a la hora de desarrollar un monoplaza de competición [41].



Figura 2-32. Ferrari 412 T2 de la temporada 1995 de F1 (izquierda) y Ferrari F310 de la temporada 1996 (derecha). Nótese como para 1996, la cabeza del piloto se encuentra más protegida por los laterales

- Dispositivo HANS. En la década de los 80, el Dr. Robert Hubbard y Jim Downing se percataron de que los pilotos sufrían lesiones graves en la cabeza y el cuello en los accidentes. Con ello, crearon un elemento que se encargaba de limitar el violento movimiento de la cabeza hacia adelante que podía aparecer durante un accidente, reduciendo así el riesgo de lesiones como las fracturas de la base del cráneo, una de las causas más comunes de muerte en el automovilismo. Se empezó a comercializar en 1990, y, aunque al principio no fue muy popular, con el paso de los años, el mundo del motorsport empezó a concienciarse en las lesiones en la zona de la cabeza y del cuello, con lo que este elemento empezó a ganar adeptos.

No fue hasta la década de los 2000 cuando pasó a ser obligatorio el llevar un sistema de retención del cuello, como el HANS. En 2001, la NASCAR fue la primera categoría en imponer esta obligatoriedad, tras el fatal accidente del 7 veces campeón de la categoría Dale Earnhardt que tuvo lugar en la última vuelta de la 43ª edición de la Daytona 500. Dos años más tarde, en 2003, la FIA obligó a los pilotos de F1 a llevar este dispositivo HANS, medida que se ha extendido a sus categorías soporte [42].



Figura 2-33. Dispositivo HANS

- Cambios en el monocasco y otros elementos. Con el fin de mejorar la protección lateral, se añadieron refuerzos a los costados del monocasco. Además, se desarrollaron ensayos de impacto lateral que los equipos deben superar para poder homologar un chasis. También se han ido reposicionando los elementos de la suspensión delantera, debido al posible riesgo de lesiones en las piernas si estos elementos penetran el monocasco. Actualmente, en los monoplazas, las barras de suspensión se colocan de forma que se encuentren por delante de los pies del piloto, reduciendo así ese riesgo de lesiones comentado. Además, se han ido aumentando las dimensiones del morro deformable del monoplaza, buscando una mayor disipación de la energía en un accidente. También hay que comentar que los *endplates*, los elementos perpendiculares al ala que se encuentran en los extremos de esta se han ensanchado y redondeado, para reducir el riesgo de pinchazos en caso de un toque entre una rueda y el alerón delantero. Además, también se ha ido redondeando la punta del morro del monoplaza, buscando el mismo objetivo que con la modificación de los *endplates* [40].
- *Wheel tethers*. Otro de los riesgos en caso de accidente era que las ruedas se podían desprenderse del monoplaza, provocando una situación peligrosa en la que esa rueda suelta pueda impactar contra un piloto, pudiendo provocar consecuencias catastróficas. Por ello, en 1999, la FIA introdujo unos elementos conocidos en inglés como *wheel tethers*. Este elemento está compuesto por fibras de un material ultrarresistente denominado Zylon, y se encuentra dentro de los brazos de suspensión. Con el paso de los años, estos elementos también se han instaurado en monoplazas de otras especificaciones, incluidos los F4, pasando a ser otro de los elementos clave para intentar reducir los riesgos de los deportes de motor [41].

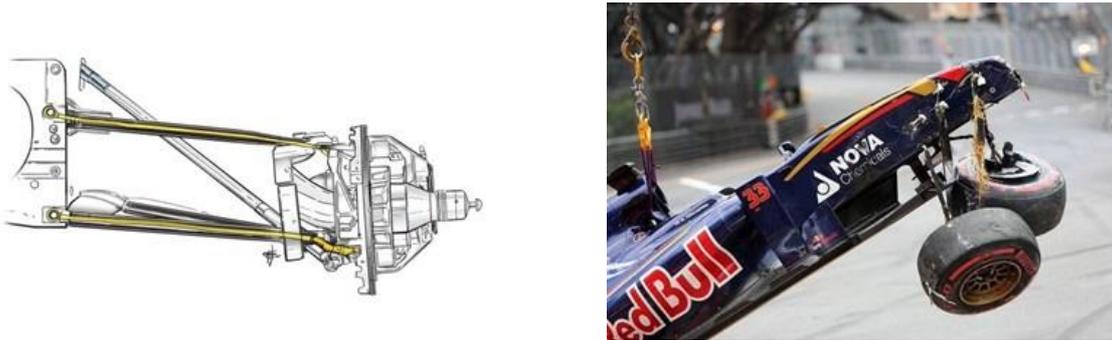


Figura 2-34. Esquema de la localización de los wheel tethers, indicados en amarillo (izquierda) y ejemplo gráfico de la función que cumplen estos elementos (derecha)

Como se ha comentado, estos cambios y nuevos sistemas se han ido implementando también en categorías inferiores a medida que iban demostrando su utilidad en el Gran Circo. Además, la FIA sigue realizando más investigaciones para aumentar la seguridad del piloto, el resto del personal y los espectadores que se encuentren en el circuito, con el fin de minimizar el riesgo que existe en los deportes de motor. Uno de los cambios más visuales en estos últimos años es la introducción de un nuevo elemento de seguridad en 2018, conocido como el Halo. Esta estructura, fabricada en titanio, tiene como objetivo proteger la cabeza del piloto frente a objetos voluminosos que puedan impactar en la zona de la cabeza, intentando reducir aún más la posibilidad de lesión en esta zona que siempre se encontraba más desprotegida. Este elemento se introdujo tras los accidentes fatales de Henry Surtees en una carrera de la Fórmula Dos en 2009, de Jules Bianchi en el GP de Japón de 2014 y de Justin Wilson en una carrera de la Indycar en el óvalo de Pocono, EE. UU., en 2015 [43]. Este elemento, pese a ser introducido hace poco tiempo y tras no ser muy aceptado entre los aficionados, ya se ha probado su efectividad y utilidad, salvando a pilotos de graves lesiones [44].



Figura 2-35. Ferrari SF71H de 2018, pilotado por Kimi Räikkönen. Se puede observar el Halo protegiendo la cabeza del piloto

### 2.3. Historia de la Fórmula 2

A continuación, se proporcionará una breve historia de la categoría soporte más conocida de la Fórmula 1, la Fórmula 2, categoría que ha acompañado a la F1 desde la creación de esta en 1950, y que en la actualidad goza de una gran popularidad, al ser el último escalón que los pilotos deben superar para poder llegar a pilotar un monoplaza de Fórmula 1.

La normativa Fórmula 2 se propuso el mismo año que la de la Fórmula 1, nombrándose originalmente como

Fórmula B, permitiendo así el desarrollo de dos campeonatos al año, uno de Fórmula 1 y otro de Fórmula 2, dando la oportunidad a más pilotos de competir entre ellos, utilizando coches en más baratos y de menores prestaciones que los de Fórmula 1 para ello. Sin embargo, ya desde la aparición de los primeros Grand Prix existe la idea de competir con coches más baratos y de menor potencia que los que competían en estas pruebas.

### 2.3.1. Antes de la Fórmula 2: *voiturettes* (1896-1946)

Actualmente, el término *voiturette* engloba a los coches que no precisan de carné de coche, sino de ciclomotor. Estos coches se caracterizan por tener un precio más bajo que los de un coche en el cual se necesite un carné tipo B. Esta característica se mantiene desde los primeros *voiturettes* que se inventaron a finales del siglo XIX [46].

El término *voiturette* lo acuñó el inventor francés Léon Bollée para darle nombre a su invento, siendo este un triciclo motorizado [47]. Ya desde la aparición de los primeros *voiturettes*, apareció el mismo deseo que naciese con la creación del automóvil: competir con ellos para probar qué vehículo es más rápido.



Figura 2-36. Ilustración del *voiturette* de Léon Bollée

No tardaron en aparecer las primeras pruebas en las que competían estos *voiturettes*, siendo la primera aparición de estos en la prueba Paris-Marseille de 1896 (II Grand Prix de l'A.C.F.), convirtiéndose así en la primera instancia de una prueba multiclase. En ella, se distinguieron a los competidores por las características de sus vehículos, creándose así las clases A1 y A2 para los automóviles y las clases B1 y B2 para motocicletas, triciclos y *voiturettes*.

Tres años más tarde, se organizaron las primeras pruebas sancionadas exclusivas para los *voiturettes*. La primera de ellas fue la Paris-Rambouillet. Este mismo año, se llevó a cabo también la *Coupe des Chaffeurs Amateurs*, entre las ciudades de Paris y Trouville. Esta prueba, que se llevó a cabo el 27 de agosto la ganó Louis Renault tras recorrer 168 km con un *voiturette* de fabricación propia: el Renault Type A. Además de estas pruebas, se siguieron organizando carreras multiclase que contaban con la participación de estos vehículos, siendo generalmente dominadas por los hermanos Louis y Marcel Renault a bordo del ya mencionado Renault Type A [48].



Figura 2-37. Louis Renault a los mandos de su Renault Type A

Visto el éxito que tenía la categoría de los *voiturettes*, no tardaron en organizarse más pruebas exclusivas para estos vehículos, llegándose a organizar incluso en copas disputadas anualmente. Destacan la *Coupe des Voiturettes*, con la primera edición organizada en 1900, y retomando el nombre desde 1906 hasta 1913 (siendo estas ediciones conocidas también como *Coupe de L'Auto*), el *Criterium des Voiturettes* celebrado el 17 de mayo de 1900 y organizado por el periódico francés *Vélo* y la *Course des Ardennes des Voiturettes*, organizada en territorio belga desde 1903 hasta 1905.

Fueron en estos años previos a la 1ª GM cuando las carreras de *voiturettes* tuvieron la mayor popularidad, organizándose pruebas y copas en otros países como Italia, Bélgica con la ya mencionada *Course des Ardennes des Voiturettes* e incluso en España, organizándose 3 ediciones de la Copa de Catalunya desde 1908 hasta 1910, disputándose dos de ellas en el Circuit del Baix Penèdes y la última en el Circuit de Llevant. En 1908 también tuvo lugar la primera prueba con el distintivo de Grand Prix exclusiva para los *voiturettes*, etiqueta anteriormente exclusiva para carreras de automóviles [49].



Figura 2-38. Cartel de la primera edición de la Copa de Catalunya

Tras la 1ª GM, las carreras de *voiturettes* volvieron a organizarse en distintos países, como Francia, Italia e incluso España, dando lugar a pruebas de bastante éxito. Esto llevó a una segunda época dorada de la categoría de *voiturettes* que se extendió durante la década de los 30 hasta que la categoría pasó a estar regida por una

nueva normativa, conocida con el nombre de Fórmula B y posteriormente denominada Fórmula 2. Esta época dorada se debía a que las pruebas de *voiturettes* se empezaron a organizar en conjunto con las pruebas de Grand Prix, coincidiendo en muchos casos ambas categorías e incluso, en numerosas ocasiones, corriendo a la vez, convirtiéndose así las pruebas de Grand Prix en un formato multiclase. La categoría de *voiturettes* presentaba bastante atractivo para el público, ya que, mientras que en la categoría superior de los coches de Fórmula Libre, los Mercedes-Benz y los Auto Union dominaban, los *voiturettes* permitían a marcas de automóviles de otros países, como Francia, Gran Bretaña e incluso Italia hacerse un nombre y una historia en el marco de los Grand Prix [50][51].

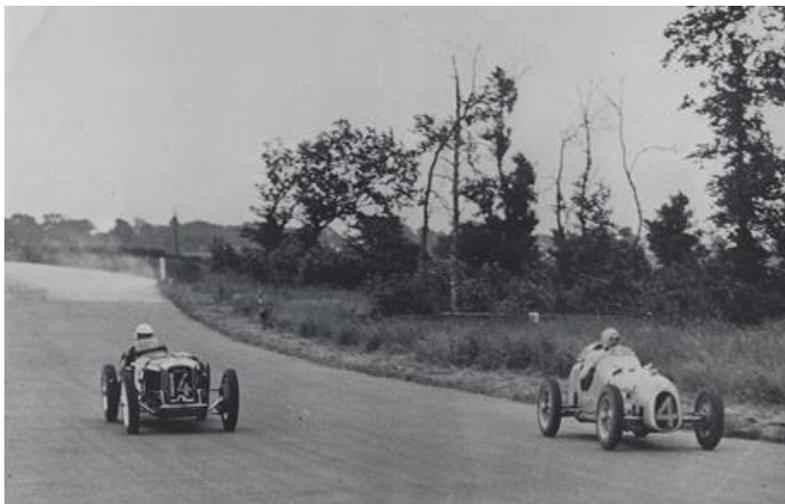


Figura 2-39. Un Amilcar (a la izquierda) y un Austin (a la derecha) compitiendo en una prueba de *voiturettes*

### 2.3.2. Fórmula 2: primeros años (1948-1960)

En 1948, ya con la normativa de Fórmula B que limitaba la capacidad de los motores a 2L atmosféricos o 500 cc sobrealimentados aprobada, tuvieron lugar las primeras carreras organizadas con monoplazas de Fórmula B, posteriormente conocida como Fórmula 2. Esta categoría se propuso como una alternativa para aquellos pilotos que no podían participar en la Fórmula 1, dando lugar a carreras con monoplazas más baratos y ligeros que los de la máxima categoría. La F2 ganó popularidad rápidamente, hasta el punto de que, como se comentó anteriormente, en 1952 y 1953, los Grandes Premios de Fórmula 1 se corrieron bajo la normativa de Fórmula 2.

En 1954, con la nueva normativa de Fórmula 1 aprobada, la participación en la Fórmula 2 cayó drásticamente, hasta el punto de que en los dos siguientes años solo se organizaron un reducido número de pruebas en Europa Central. Esto obligó a la FIA a modificar la normativa, modificando la capacidad máxima de los motores a 1500 cc. Esto hizo que la participación en estas carreras volviese a aumentar, aunque solo durante un breve período de tiempo, ya que estaba planeado unificar la Fórmula 2 y la Fórmula 3, categoría creada unos años antes, bajo un mismo nombre y normativa: Fórmula Junior, creada en 1958 [52].



Figura 2-40. Stuart Lewis-Evans pilotando un Cooper T45 en una prueba de la F2 celebrada en 1958, en el circuito de Goodwood, Gran Bretaña

### 2.3.3. Fórmula Junior (1960-1963)

La Fórmula Junior fue una categoría de monoplazas aprobada en 1958 por el CSI (*Commission Sportive Internationale*), posteriormente conocido como FISA (Federación Internacional de Deportes de Automovilismo, *Fédération Internationale du Sport Automobile* en francés), un organismo creado por la FIA que se encargaba de gestionar las competiciones automovilísticas más importantes, con el objetivo de proporcionar a pilotos con una categoría de monoplazas relativamente asequible, ya que la intención era de poder fabricar y reparar dichos monoplazas con piezas de coches de calle. Los monoplazas que participaban en la Fórmula Junior no podían contar con un motor de cilindrada superior a los 1100 cc para monoplazas de 400 kg de peso (se utilizaron otras variantes, pero esta combinación fue la más exitosa y utilizada) [53].

Aunque la idea sobre el papel parecía convincente, enseguida aparecieron los problemas que acabaron con la desaparición de la Fórmula Junior 4 años más tarde. Como dejaron de existir las otras categorías de promoción con la instauración de este campeonato, la Fórmula Junior tenía que cumplir un rol doble: servir de plataforma de aprendizaje para los pilotos que aspiran a llegar a la Fórmula 1 a la vez que se quedó como la única categoría a nivel internacional que se encontraba por debajo de la F1. Esto propició a que los costes se disparasen, ya que grandes equipos de F1, como Lotus o Cooper fabricaban también coches de Fórmula Junior con un rendimiento muy superior a los de las otras marcas, lo cual también afectaba a la participación, ya que los pilotos solo buscaban conducir coches de las marcas antes mencionadas.

Con ello, para 1964, se reinstauró la normativa de Fórmula 2, y también se organizó un campeonato internacional de Fórmula 3, categoría inferior tanto a la Fórmula 2 como a la Fórmula Junior. La Fórmula 3 pasaría a tomar el rol de instruir a los pilotos, generalmente de nivel amateur, a competir con monoplazas, fabricados con piezas provenientes de coches de calle para abaratar costes; mientras que la Fórmula 2 tomaría un aire más profesional, con monoplazas diseñados y fabricados por los propios equipos, con motores altamente modificados para la competición y con pilotos que se podían considerar ya profesionales y con aspiraciones y oportunidades tangibles de llegar a la categoría reina [54].

Uno de los hechos más curiosos sobre esta categoría es el renacer que ha experimentado estas últimas décadas. Debido a que en la actualidad siguen existiendo muchos componentes para los monoplazas de esta época, una cantidad considerable de pilotos amateur poseen algún Fórmula Junior restaurado. Este hecho ha generado la creación de varios campeonatos de carreras históricas en los que compiten específicamente coches de esta especificación [55].



Figura 2-41. Salida de una prueba de la *Historic Fórmula Junior*, celebrada en el circuito de Silverstone el 28 de agosto de 2022

### 2.3.4. Segunda etapa de Fórmula 2 (1964-1984)

En 1964 se reinstauró la normativa de Fórmula 2, que en esta ocasión limitaba los motores a 1000 cc atmosféricos. Sin embargo, el hecho más importante de esta segunda etapa se dio 3 años más tarde, cuando la FIA introdujo el primer Campeonato Europeo de pilotos de F2, campeonato focalizado en la promoción de pilotos hacia la Fórmula 1 y que utilizaba motores más potentes, con una cilindrada máxima de 1600 cc. Para ello, la FIA también introdujo un sistema de licencia de piloto, sistema que se sigue usando actualmente para clasificar el nivel de un piloto en función de sus capacidades [56]. Este sistema de licencia también está relacionado con la Superlicencia de la FIA, concepto que se explicará más tarde.

En el sistema instaurado en 1967, un nivel determinado se asociaba a una letra, siendo la letra A la indicativa del nivel máximo que puede obtener un piloto. Esto permitía encauzar las trayectorias profesionales de los pilotos, ya que ahora su objetivo es el de ir subiendo niveles hasta alcanzar el grado A. Con ello en mente, el campeonato de F2 se planteó de forma bastante particular, pero exitosa tanto para pilotos que subían la escalera de las licencias, ya que el campeón de la F2 obtenía una licencia de grado A con un año de validez; como para pilotos consagrados en la Fórmula 1, ya que los pilotos que ya cuentan con una licencia de grado A no podían obtener puntos para el campeonato. Gracias a este sistema, durante los primeros años de la F2, en muchos fines de semana se reunían pilotos jóvenes y campeones de la F1, que contaban con un campeonato con grandes períodos de tiempo entre Grandes Premios y utilizaban estas carreras de F2 como entrenamiento.

#### FOTO SUPERLICENCIA FIA

Con el paso de las temporadas, eran menos los pilotos de F1 que disputaban también pruebas de F2, debido a que el calendario de la F1 iba creciendo en número de carreras, reduciendo las grandes pausas con las que contaban los pilotos. Sin embargo, como categoría de promoción funcionaba bien, ya que muchos de los campeones que se coronaron en la F2 acabaron en la F1, llegando incluso a ganar carreras en la máxima categoría. Algunos de los pilotos de F1 que provenían de la F2 fueron: Jacky Ickx, Jean-Pierre Beltoise, Clay Regazzoni, Ronnie Peterson, Patrick Depailler, etc.

En 1976, tras 4 temporadas en las cuales la capacidad del motor se vio aumentada a los 2000 cc, se permitió participar con motores exclusivamente diseñados para la competición, manteniendo la capacidad máxima de 2000 cc (anteriormente, los motores debían de provenir de un motor utilizado en un coche de calle). Esto hizo que empresas como Renault o BMW desarrollasen motores y creasen equipos de fábrica, que contaban con un gran apoyo económico por parte de la compañía fundadora [57]. Esto provocó un aumento de los costes del campeonato, haciendo que sea una opción inviable para cada vez más equipos y pilotos. La gota que colmó el vaso y acabó con la categoría fue la entrada de Honda a principios de los 80, que había desarrollado el potente motor V6 Ralt-Honda que pulverizó a la competencia, haciendo que los costes para competir con la compañía japonesa fuesen prohibitivos, lo que dio lugar a una caída fulgurante del número de participantes y del interés en la categoría [58].

Con ello, en el año 1985, se organizó un nuevo campeonato en sustitución de la Fórmula 2, conocido como la Fórmula 3000.



Figura 2-42. Nigel Mansell a bordo de un Ralt-Honda en una prueba de F2 en 1980

### 2.3.5. Fórmula 3000 (1985-2004)

Esta categoría se creó como una solución frente al problema del crecimiento desorbitado de los costes en la Fórmula 2, permitiendo así crear un producto más barato y abierto a más equipos y pilotos. La normativa de F3000 aumentó la capacidad de los motores a 3000 cc (de ahí el nombre de la categoría), lo que permitió utilizar los motores Cosworth DFV que ya se encontraban en desuso en la Fórmula 1, abaratando así los costes. Al año siguiente, se estipuló una marca de neumáticos estándar, que debía utilizar todos los monoplazas de la parrilla: Avon Tyres (actualmente conocida como Cooper Tire & Rubber Company), siendo este uno de los primeros ejemplos de estandarización en alguna de las categorías de monoplazas, marcando así una tendencia que sigue en la actualidad en numerosas categorías [59].

En la primera década de la categoría, no había ningún componente más salvo los neumáticos que fuese estándar, por lo que se promovió la participación de marcas como Lola, Ralt, March o AGS. Fue en este campeonato también donde se empezó a promover un modelo de mercado de pilotos que existe en la actualidad, en el cual un piloto está asociado a una marca o equipo de F1 desde que se encuentra en las categorías de promoción. Con ello también se crearon algunos equipos junior, para que los equipos de F1 pudiesen estudiar de cerca la evolución de sus futuros pilotos. Una de las ventajas que proporcionaba este campeonato es que no solo preparaba a pilotos para el Gran Circo, sino también a ingenieros, ya que estos debían encargarse del diseño completo del monoplaza. Sin embargo, también fue una época en la que algunos equipos aprovecharon lagunas legales para obtener una ventaja mecánica frente al resto. Uno de los ejemplos de ellos se encuentra en el combustible, ya que varios equipos italianos comenzaron a utilizar un combustible de la marca Agip proveniente de la Fórmula 1, conocido bajo el nombre de 'jungle juice'. Este combustible era capaz de proporcionar hasta 15 CV extra al coche que lo utilizase [60].

A mediados de los años 90, la entrada del equipo Reynard en la categoría provocó un descenso del interés en la categoría, debido al dominio que el equipo basado en Brackley tenía con respecto a las otras marcas previamente mencionadas. Con ello, en 1996, la FIA convirtió la F3000 en una categoría monomarca, utilizando así un chasis Lola y un motor Judd modificado por Zytek, siendo este uno de los primeros campeonatos en aplicar este modelo. Con ello, se buscaba eliminar la dependencia mecánica en la categoría, proporcionando a todos los pilotos un monoplaza 'idéntico' para todos, haciendo así que sean los pilotos más rápidos los que estuviesen a la cabeza, no los que tuviesen el mejor monoplaza [61][62]. Al año siguiente, el calendario de la F3000 se combinó con el de la F1, coincidiendo así en múltiples fines de semana ambas categorías, lo que hizo que la popularidad de esta categoría aumentase durante varios años.



Figura 2-43. Eric van de Poele pilotando el Reynard 90D F3000 durante el *Superprix* de Birmingham

Sin embargo, esta categoría de promoción tenía un gran inconveniente si se compara con la Fórmula 2 que la precedía, y es que no había muchas promociones de pilotos de F3000 a la Fórmula 1. A pesar de que en los años 90, las parrillas de Fórmula 1 solían tener hasta 26 coches, el máximo permitido (aunque había más coches que quedaban eliminados en la preclasificación), poco más de la mitad de los campeones de la F3000 encontraban asiento en la máxima categoría al año siguiente de conseguir el título, y algunos nunca llegaron a disputar un GP de F1. Esto, unido a los costes cada vez más altos y a la existencia de categorías de promoción alternativas más atractivas, como las World Series by Nissan, la Fórmula 3000 europea (posteriormente conocida como Auto GP) o la Fórmula Renault V6 Eurocup, hizo que el número de coches que participaban en la F3000 fuese cayendo a principios de los 2000, hasta que en el año 2004 se disputó la última temporada de esta categoría, temporada que acabó ganando el piloto italiano Vitantonio Liuzzi [63].

Cabe destacar eso sí que esta categoría no ha sido un fracaso, ya que por ella han pasado pilotos que posteriormente han sido campeones del mundo de F1 u otras categorías como el Mundial de Resistencia o la Indycar americana, como Damon Hill, Gil de Ferran, Juan Pablo Montoya o incluso Fernando Alonso [64].



Figura 2-44. Fernando Alonso durante una prueba de la F3000 en la temporada 2000

### 2.3.6. GP2 Series (2005-2016)

La serie que se encargó de sustituir a la F3000 como el último ‘trampolín’ para alcanzar la F1 fue la conocida como GP2 Series. Ideada por el aquel entonces director de la Fórmula 1 Bernie Ecclestone y el director del

equipo Renault F1 Team Flavio Briatore, el objetivo era crear una categoría de promoción hacia la F1 relativamente asequible, debido a que, como se comentó anteriormente, los costes por participar en la F3000 subieron hasta el punto en que los pilotos y equipos no podían mantenerse. Para ello, se obligó a todos los equipos que participen en esta GP2 Series a llevar el mismo chasis, motor y neumáticos, para que sea el talento del piloto el que marque la diferencia, y no la superioridad mecánica de algún equipo. Además, para dotar a la serie de un mayor prestigio en comparación con sus antecesores, la mayoría de sus carreras (solo 3 carreras en su historia no cumplieron con esto) actuarían como serie soporte a la F1, es decir, sus carreras se disputaban en el marco de los Grandes Premios de F1. Con ello también se abarataban costes, ya que aprovechaban toda la estructura montada en el circuito por y para el fin de semana de Gran Premio (comisarios, equipo médico, boxes, etc...). Esta cercanía con la categoría reina también facilitaba a los pilotos de F2 mostrar su talento y aptitudes a los equipos de la F1.

Event	Date	Nation	Circuit	Event (Race)	Date	Nation	Circuit
1	06 Mar 2005		Melbourne (Albert Park) »	1 (Race 1)	23 Apr 2005		Imola »
2	20 Mar 2005		Sepang »	1 (Race 2)	24 Apr 2005		Imola »
3	03 Apr 2005		Manama »	2 (Race 3)	07 May 2005		Barcelona »
4	24 Apr 2005		Imola »	2 (Race 4)	08 May 2005		Barcelona »
5	08 May 2005		Barcelona »	3 (Race 5)	21 May 2005		Monte Carlo »
6	22 May 2005		Monte Carlo »	4 (Race 6)	28 May 2005		Nürburgring »
7	29 May 2005		Nürburgring »	4 (Race 7)	29 May 2005		Nürburgring »
8	12 Jun 2005		Montreal »	5 (Race 8)	02 Jul 2005		Magny-Cours »
9	19 Jun 2005		Indianapolis »	5 (Race 9)	03 Jul 2005		Magny-Cours »
10	03 Jul 2005		Magny-Cours »	6 (Race 10)	09 Jul 2005		Silverstone »
11	10 Jul 2005		Silverstone »	6 (Race 11)	10 Jul 2005		Silverstone »
12	24 Jul 2005		Hockenheim »	7 (Race 12)	23 Jul 2005		Hockenheim »
13	31 Jul 2005		Budapest »	7 (Race 13)	24 Jul 2005		Hockenheim »
14	21 Aug 2005		Istanbul »	8 (Race 14)	30 Jul 2005		Budapest »
15	04 Sep 2005		Monza »	8 (Race 15)	31 Jul 2005		Budapest »
16	11 Sep 2005		Spa-Francorchamps »	9 (Race 16)	20 Aug 2005		Istanbul »
17	25 Sep 2005		Sao Paulo »	9 (Race 17)	21 Aug 2005		Istanbul »
18	09 Oct 2005		Suzuka »	10 (Race 18)	03 Sep 2005		Monza »
19	16 Oct 2005		Shanghai »	10 (Race 19)	04 Sep 2005		Monza »
				11 (Race 20)	10 Sep 2005		Spa-Francorchamps »
				11 (Race 21)	11 Sep 2005		Spa-Francorchamps »
				12 (Race 22)	29 Sep 2005		Manama »
				12 (Race 23)	30 Sep 2005		Manama »

Figura 2-45. Calendario de F1 a la izquierda y de GP2 a la derecha del año 2005. Nótese como uno de los 3 fines de semana en los que no coinciden F1 y GP2 se da este mismo año, en la prueba de Baréin.

Esta fórmula enseguida se demostró ser un éxito, éxito que no decreció con el paso de los años. Como categoría de formación, los monoplazas de GP2 eran idóneos, ya que su normativa se diseñaba para que tuviesen una forma y comportamiento similares. Muy importante era sobre todo la enseñanza que proporcionaba en cuanto a gestión de neumáticos, sobre todo cuando la F1 (y la GP2 también) comenzó a utilizar los neumáticos Pirelli, caracterizados por tener un comportamiento muy particular, que solo se podía aprender antes de entrar a la F1 participando en la GP2.

Tres años más tarde de la creación de la GP2 Series, se creó una variante de esta centrada en el continente asiático, con el objetivo de promover pilotos de esta zona hacia la F1. Las carreras que conformaban esta categoría, conocida bajo el nombre de GP2 Asia Series, tenía lugar en los meses de invierno, meses en los que la F1 y la GP2 no competían. En ella, se le incentivaba a cada equipo a trabajar al menos un piloto asiático, aunque esta norma, al menos en el primer año, no resultó muy exitosa, ya que 4 equipos de 13 decidieron contar con dos pilotos europeos, acordando con los organizadores del campeonato que los puntos que obtuviesen uno de ellos no contarían para el campeonato de constructores. Además, ese piloto no podía coronarse campeón [65].

Este campeonato no resultó ser muy exitoso si se tiene en cuenta el objetivo principal con el que se creó, ya que el piloto asiático más destacado que participó en la GP2 Asia Series es el japonés Kamui Kobayashi, campeón del Mundial de Resistencia en la temporada 2019-2020, ganador de las 24h de Le Mans en la edición de 2021 y autor de un podio de la F1, en el Gran Premio de Japón de 2012. Otros pilotos asiáticos que

participaron en la GP2 Asia Series y que participaron también en la F1 fueron Karun Chandok o Sakon Yamamoto.

En 2011, todos los equipos que participaban en la GP2 Series participaron también en la serie asiática. Además, el chasis, motor y neumáticos pasaron a ser los mismos para ambas categorías. Con ello, para la temporada siguiente, se decidió juntar ambos campeonatos, organizando así una GP2 Series con un calendario más amplio, para incluir también carreras en el continente asiático [66].



Figura 2-46. Monoplaza de GP2 (izquierda) y de GP2 Asia Series (derecha) en 2008. Nótese cómo ambos monoplazas presentan diferencias en la zona del habitáculo o en la sección lateral entre el neumático delantero y los pontones (los *bargeboards*, como se nombran en inglés)



Figura 2-47. Monoplazas de GP2 (izquierda) y de GP2 Asia Series (derecha) en 2011 del equipo francés DAMS. Se puede apreciar como ya no se aprecian diferencias entre monoplazas, más allá de los cambios en los patrocinadores.

Como se comentó anteriormente, esta categoría resultó ser más exitosa que sus predecesoras. Pilotos que pasaron por la GP2 subieron a la F1, consiguiendo podios, victorias e incluso campeonatos en la categoría reina. Es el caso de Nico Rosberg, campeón de la primera edición de GP2 en 2005, que llegó a ser campeón de F1 en 2016. Lewis Hamilton también ganó la GP2 en 2006, y actualmente es el piloto en activo más exitoso de la F1, cosechando 7 títulos mundiales. Otros pilotos destacados que compitieron en la GP2 son: Timo Glock, Nico Hulkenberg, Heikki Kovalainen, Nelson Piquet Jr, Romain Grosjean, Lucas di Grassi, Pastor Maldonado, Sergio Pérez...

El año 2016, que acabó con el piloto francés Pierre Gasly como campeón, fue la última temporada de la GP2 Series, ya que, en 2017, tras una reestructuración de las categorías soporte a la F1 que se explicará más en detalle más adelante, esta categoría paso a llamarse FIA Fórmula 2 Championship, recuperándose así el distintivo de Fórmula 2 que llevaba 5 años sin utilizarse [67].

### 2.3.7. FIA Formula Two Championship (2009-2012)

Efectivamente, entre 1984 y 2017 hubo otro campeonato que acogió brevemente el nombre de Fórmula 2. En 2009 se organizó la primera temporada de la *FIA Formula Two Championship* (para distinguirse de la antigua Fórmula 2, se adoptó escribir el 2 con letra, decisión que se respetará a lo largo de esta memoria), campeonato que contaba con el expiloto Jonathan Palmer a la cabeza de su organización y gestión. Para este campeonato, se utilizaron monoplasas idénticos para todos los equipos desarrollados por 6 miembros del equipo Williams de F1, con el ingeniero Patrick Head como jefe de diseño. La FIA decidió crear este campeonato como una alternativa más barata para los pilotos de poder llegar a la F1, ya que la vía de la GP2, pese a haberse desarrollado con el objetivo de abaratar costes, los pilotos debían de desembolsar cantidades millonarias para poder aspirar a tener una plaza en un equipo competitivo, costes que muchos no podían permitirse. Cabe destacar que lograron dicho objetivo, ya que, como se puede observar en la siguiente gráfica, un asiento en un equipo competitivo de *Formula Two* podía costar una décima parte del precio de un asiento competitivo en GP2 [68].

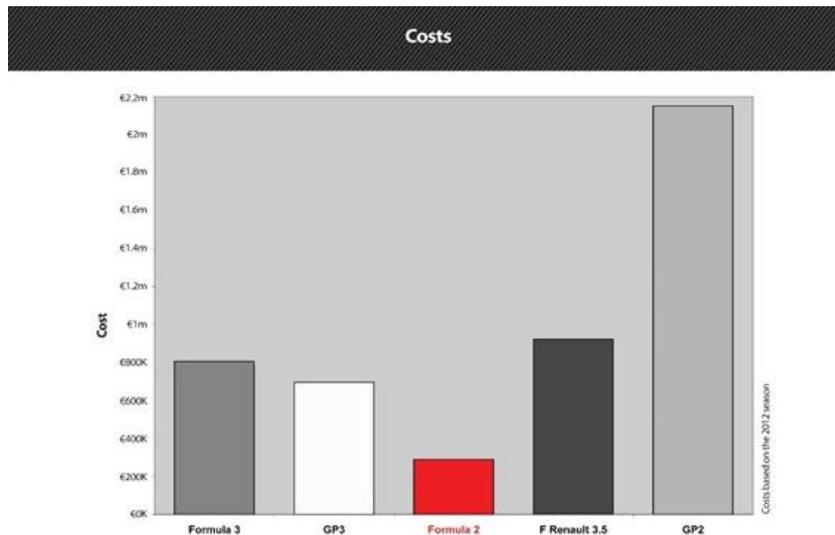


Figura 2-48. Gráfica que compara los costes de la *Formula Two* con respecto a otras categorías por aquel entonces existentes

En 2009 tuvo lugar la primera temporada de este campeonato, con un calendario con 8 pruebas, con dos carreras por prueba. Logró obtener bastante participación, consiguiendo formar una parrilla de 25 coches. Sin embargo, en la cuarta prueba del campeonato, el fatal accidente del piloto inglés Henry Surtees, hijo de John Surtees, el único piloto que logró títulos mundiales de F1 y MotoGP, la categoría máxima de motociclismo, mermó la reputación de esta categoría [69].



Figura 2-49. Henry Surtees a bordo del Williams JPH1 de *Formula Two*

No obstante, la *Formula Two* tenía problemas mayores, y es que se encontraba en competencia directa con series ya consagradas como la GP2 Series o la actualmente extinta Fórmula Renault 3.5. También competía con otras categorías como la A1GP, la F3000 Euroseries o la SuperFórmula japonesa. Con ello, se podía observar ya en la segunda temporada de *Formula Two* que el número de pilotos que participaban iba disminuyendo, ya que éstos preferían competir en las categorías que ya contaban con el suficiente renombre (la GP2 y la Fórmula Renault 3.5), aun siendo alternativas más caras [70].

Es por ello por lo que, en 2012, se disputó lo que acabaría siendo la última temporada de la *Formula Two*. Acabó con el piloto inglés Luciano Bacheta (piloto que se retiró de la competición a finales de 2016) y con la noticia de la cancelación de la siguiente temporada de Fórmula Dos [71].

Repasando los distintos pilotos que han competido en esta categoría, solo uno de ellos logró competir en la Fórmula 1: Jolyon Palmer, hijo precisamente de Jonathan Palmer, y fue tras pasar posteriormente por múltiples temporadas de GP2. A pesar de que como categoría de promoción a la F1 no fue la más exitosa, hay pilotos que han participado en la *Formula Two* que han podido hacerse un palmarés en otras categorías, destacando pilotos como Mirko Bortolotti (actual piloto en GT3 y campeón del campeonato mundial de GT3 en 2017), Alex Brundle (actual piloto en la categoría LMP2 en el Mundial de Resistencia) o Robert Wickens, actual piloto en la Michelin Pilot Challenge en EEUU y expiloto de la Indycar, cosechando 4 podios y una pole en dicha categoría, aunque su carrera deportiva se vio afectada tras un accidente en la Indycar en 2018, en la ABC Supply 500 disputada en Pocono, tras sufrir un accidente que le dejó parapléjico [72][73].



Figura 2-50. Robert Wickens a bordo de un Hyundai Elantra N TCR del campeonato Michelin Pilot Challenge

Sin embargo, la Fórmula 2 no es la única categoría de promoción hacia la F1 que ha existido o existe actualmente. La siguiente categoría más antigua y conocida se encuentra un escalón por debajo de la Fórmula 2. Es la llamada Fórmula 3.

## 2.4. Historia de la Fórmula 3

Hablar de la historia de la Fórmula 3 resulta un poco más complicado que hablar de la historia de la F1 o incluso de la F2. Esto se debe principalmente a la propia naturaleza de la Fórmula 3, ya que es una categoría que se ideó a nivel nacional o regional y nunca ha dejado de hacerlo. Es por ello que se complica la tarea de hablar de ello, ya que muchos países tienen su propia historia utilizando monoplazas que se clasificarían como F3. Esto también hace que la búsqueda de información sea más complicada, ya que las noticias de esta categoría no son especialmente abundantes y se trataban muchas veces a nivel nacional. Por ello, para poder focalizar la investigación sobre esta categoría y poder hilar con la F3 que se conoce actualmente, los esfuerzos se centraron en la zona europea, y, en caso necesario, se concretizará para Gran Bretaña, ya que es en el país anglosajón donde se originó y popularizó esta categoría.

### 2.4.1. Antes de Fórmula 3: monoplazas de 500cc (1946-1959)

Durante la 2ª GM, en Gran Bretaña sobre todo existían muchas fábricas dedicadas a la construcción de motores compactos de 500 cc para motocicletas. Estos vehículos resultaron ser muy populares durante la guerra, siendo rápidos, robustos y ligeros, perfectos para los mensajeros, que tenían que llevar información importante en el menor tiempo posible. Al acabar la guerra, el interés por la motocicleta decreció, y muchos motores quedaron en desuso. Por ello, algunas personas aficionadas a la mecánica empezaron a construir coches de carreras en sus propios cobertizos, una cultura muy popular en el país anglosajón que se sigue conservando hoy en día, utilizando dichos propulsores. El interés por esta actividad creció exponencialmente cuando en 1946 se empezaron a organizar las primeras pruebas cronometradas utilizando coches equipados con estos motores de 500 cc. También se establecieron algunas reglas generales de cómo tenían que estar contruidos estos automóviles, destacando que los automóviles tenían que ser monoplazas. Tal fue el interés que, a finales de los años 40 y principios de los 50, existieron más de 200 marcas de automóviles con especificación de Fórmula 3 (con los propulsores previamente comentados).

Cabe destacar que fueron con estos monoplazas donde se construyeron las primeras configuraciones de motor central. Esto se realizaba sobre todo por razones prácticas, ya que estos motores, provenientes de motocicletas, transmitían el movimiento a las ruedas con ayuda de una cadena, lo cual hacia casi necesario montar el motor entre la espalda del piloto y el eje trasero. Sin embargo, marcas como Cooper, que estaba desde 1946 construyendo monoplazas para las pruebas de Fórmula 3, se percataron enseguida de las ventajas que presentaba tener el motor en configuración central. Esto les permitió años más tarde diseñar y construir monoplazas ganadores para la Fórmula 2 y para la Fórmula 1 a finales de los 50, instaurando la moda de configuración central en ambas categorías, como ya se ha comentado.

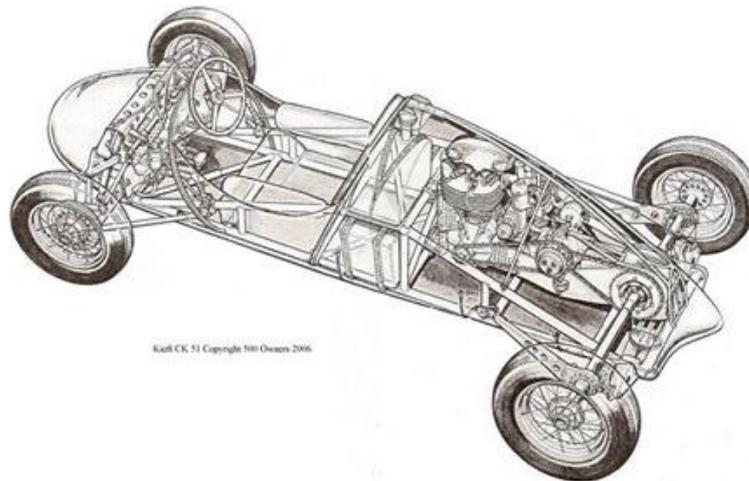


Figura 2-51. Dibujo que muestra la distribución de los componentes de un Kieft CK 51 de Fórmula 3. Nótese la configuración de motor central

En 1946 y 1947, las pruebas más comunes que se organizaban con estos monoplazas eran pruebas de ‘hill climb’, en las cuales los pilotos tratan de marcar el tiempo más rápido posible en un tramo corto y en ascenso. A partir de 1948, comenzaron a organizarse también las primeras carreras de Fórmula 3, también dentro del territorio británico, destacando las pruebas disputadas en los circuitos de Brands Hatch, Silverstone y Goodwood.

Visto el éxito de estas pruebas, que podían contar fácilmente con más de 20 pilotos en la parrilla de salida, otros países empezaron a organizar carreras a nivel internacional con estos monoplazas de 500cc. Por ejemplo, la primera carrera en el por aquel entonces nuevo circuito de Zandvoort, ubicado en los Países Bajos, fue una carrera de Fórmula 3 a nivel internacional. Esta prueba fue un dominio absoluto de los pilotos y monoplazas ingleses. También se empezaron a disputar pruebas en Alemania, Francia, Italia y especialmente en los países escandinavos, donde las pruebas de F3, en las cuales participaban pilotos con monoplazas de fabricación propia (un estilo muy similar al formato británico, como ya se comentó), gozaron rápidamente de una gran popularidad. En esta época también se comenzaron a organizar carreras de F3 en España, siendo la primera de

ellas en San Sebastián en 1950. Lo que no cambió fue el dominio británico en estas pruebas, tanto de sus pilotos como, sobre todo, de sus monoplazas.



Figura 2-52. Portada de la guía de carreras celebradas en el circuito de Hockenheim el 8 de mayo de 1949

En 1950, el rápido crecimiento de la popularidad de estas pruebas propició a que se organizase la primera 'Copa del Mundo' para la Fórmula 3, que se llevó a cabo en Ostende, Bélgica; así como la primera carrera en el prestigioso circuito del principado de Mónaco. Un año más tarde, en Luxemburgo, se celebró la primera carrera de Fórmula 3 con denominación de Grand Prix. Este Grand Prix fue ganado por Alan Brown a los mandos de un Cooper Mk IV.



Figura 2-53. Salida del Gran Premio de Luxemburgo de F3. El ganador de la carrera, Alan Brown, salía de la segunda fila a bordo de su Cooper Mk IV con el número 18

Tras unos cuantos años más en los que la Fórmula 3 siguió teniendo una gran popularidad, esta comenzó a bajar, especialmente en el marco internacional. Con el paso de los años, las carreras de Fórmula 3 volvieron a ser relegadas a pruebas de nivel nacional, teniendo aún bastante interés en Gran Bretaña, su lugar de origen, y también al otro lado del Atlántico, en EE. UU., donde las competiciones con monoplazas de 500cc seguían presentando un gran interés. Al final de la década, la creación de la Fórmula Junior hizo que la Fórmula 3 desapareciera a nivel internacional.

Cabe destacar de esta época que, a pesar de que muchos pilotos de los que competían en estas pruebas tenían

un perfil más de aficionados, que también se encargaban de la fabricación, puesta a punto y reparación de sus propios monoplazas, algunos nombres que compitieron en estos primeros años de Fórmula 3 llegaron incluso a la Fórmula 1, ya sea como piloto o fabricante. Es el caso por ejemplo de Stirling Moss o Graham Hill, pilotos que fueron claros protagonistas en los primeros años de la máxima categoría. El primero se considera uno de los mejores pilotos que nunca logró coronarse como campeón de la F1, mientras que el segundo sí que logró 2 títulos de F1. También otro piloto importante de esta categoría fue John Cooper, creador de los monoplazas Cooper que posteriormente dominarían la F1 a finales de los años 50 y principios de los 60. Otro piloto que también merece una mención es Bernie Ecclestone, que posteriormente pasó a ser propietario del equipo Brabham y de la propia Fórmula 1 [74].



Figura 2-54. Bernie Ecclestone al volante de su Cooper Mk V

#### 2.4.2. Fórmula 3 (1964-1974)

Tras la disolución de la Fórmula Junior en 1963, se crearon dos categorías de promoción para llegar a la F1: la Fórmula 2 y la Fórmula 3. La nueva Fórmula 3 fue la que conservó más similitudes con la extinta Fórmula Junior, habiendo pequeñas diferencias por ejemplo en el motor, que paso a tener una cilindrada máxima de 1100 cc a 1000 cc. Es más, gracias a esta similitud entre normativas, para los primeros años de F3, muchos equipos utilizaban los chasis que habían desarrollado durante la Fórmula Junior. Esta normativa de los motores de 1000 cc dio lugar a una segunda época dorada de la categoría de Fórmula 3, disputándose más de 1000 carreras en un período que duró desde 1964 a 1970, habiendo otro cambio en la reglamentación de los motores en 1971. Gracias a su coste, accesible para una gran cantidad de equipos, organizadores de eventos y patrocinadores; y al hecho de que un piloto podía dar el salto directo desde la Fórmula 3 a la F1, se convirtió en una categoría que gozó de una gran popularidad. Además, ayudaba el hecho de que las carreras, de corta duración, que propiciaban los grandes grupos y los adelantamientos, resultaron atractivas para también para el público. Esto permitía a los organizadores crear eventos con aires de Grand Prix, pero por una fracción de su precio.

De forma similar a la primera etapa de Fórmula 3, los campeonatos que se organizaban eran a nivel nacional, habiendo en esta época campeonatos en Gran Bretaña, en Francia, en Italia y en otros países. Esto hacía que muchos pilotos estuviesen inscritos a varios campeonatos a la vez, lo que daba lugar a que participaban en muchas carreras al año, bastantes más que si estuviesen participando en el Campeonato Europeo de Fórmula 2, por ejemplo. Algunos de los pilotos que destacaron en esta Fórmula 3 y subieron a la Fórmula 1 sin pasar por la F2 fueron: Jackie Stewart (triple campeón de F1), Emerson Fittipaldi (doble campeón de F1) o Ronnie Peterson (autor de 10 victorias en F1), entre otros.



Figura 2-55. Jackie Stewart pilotando su Cooper T72 durante la prueba de F3 de Mónaco, en 1964

También esta Fórmula 3 conservó, al menos durante los primeros años, en parte la esencia que hizo tan popular a esta categoría en los años 50, y es la gran cantidad de marcas que podían fabricar un monoplace de F3 y competir con él. Bien es cierto que, aunque en esta nueva Fórmula 3 ya había empresas consagradas en la fabricación de monoplaces, como Brabham, Cooper, Lotus o Matra, se tiene registro de que unas 150 marcas han inscrito algún monoplace en al menos una carrera. Eso sí, algunas de ellas solo realizaban pequeñas modificaciones a chasis que compraban de otras compañías, pero la cifra sigue siendo una a destacar si se compara sobre todo con la F1 o incluso con la F2 [75].

En 1971, como se comentó anteriormente, hubo un cambio en la normativa de los F3, aumentando la cilindrada de los motores a 1600 cc. Esta normativa no terminó de convencer a los fabricantes, debido a que se impuso una entrada de aire muy pequeña en cuanto a dimensiones, dando lugar a motores con prestaciones inferiores a sus predecesores de 1000 cc y coches entre 2 y 4 segundos más lento.

Eso sí, este cambio en el reglamento no produjo una caída significativa de la popularidad, ya que dos años más tarde tuvieron lugar otra serie de cambios que llevarían a la Fórmula 3 a un nivel internacional [76].

### 2.4.3. Campeonato de Fórmula 3 Europea (1974-1990)

En 1974, la FIA organiza la primera temporada del Campeonato de Fórmula 3 Europea, el primer campeonato de Fórmula 3 a nivel internacional. Para ello, también se aumentó la capacidad de los motores a 2L, una fórmula que se conservó hasta 2018, con la creación del Campeonato FIA F3 que existe actualmente. Este campeonato se ideó como una categoría de promoción, al igual que se hizo con la F2 en la época. Por ello, para evitar una afluencia de pilotos que participen a la vez en F1 o en F2, la entrada al campeonato se limitó a pilotos que posean una licencia internacional (pero no una licencia de grado A) y que no haya participado en la Fórmula 2 en las dos temporadas anteriores [77].

Como categoría de promoción, tuvo relativo éxito, ya que algunos de los pilotos que competirían en la F1 se descubrieron en esta categoría, siendo los más destacados Alain Prost, campeón europeo de F3 en el año 1979, que posteriormente se proclamaría campeón del mundo de F1 hasta en 4 ocasiones y Nelson Piquet, triple campeón de la F1. Otros pilotos que también llegaron a la F1 fueron Riccardo Patrese, Marc Surer, Derek Daly, Elio de Angelis, Derek Warwick, Michele Alboreto, etc.



Figura 2-56. Alain Prost pilotando su Martini-Renault por las calles de Mónaco, en el marco del GP de F3 del mismo país, en 1979

Sin embargo, uno de los problemas a los que se tuvo que enfrentar esta Fórmula 3 europea es que dejó de haber representación inglesa. Los pilotos y monoplazas ingleses siguieron participando en el campeonato británico de Fórmula 3, subiendo a la Fórmula 2 sin pasar por la F3 europea. De esta Fórmula 3 británica salieron pilotos del calibre de Nigel Mansell, campeón del mundo de F1 en 1992, Ayrton Senna, triple campeón del mundo y considerado uno de los mejores pilotos de F1 de la historia y Mika Häkkinen, doble campeón del mundo de F1; entre otros. Además, Francia, otro gran exponente en la antigua F3 con sus monoplazas Matra, no participó en la F3 europea.



Figura 2-57. Ayrton Senna durante una prueba del campeonato británico de F3 celebrada en el circuito de Thruxton a bordo de un Ralt RT3 Toyota

A pesar de ser una serie popular entre pilotos, contando con parrillas de salida con más de 20 monoplazas, en 1984 se celebró la última temporada del Campeonato de F3 europea, ya que en 1985 se dio paso a la nueva F3000, pasando ésta a ser la categoría a nivel europeo de referencia [78]. En cambio, en el plano internacional, la F3 pasó a tener algunos eventos de alto prestigio. Entre ellos destaca el Gran Premio de Macao, celebrado en las calles de la ciudad con el mismo nombre, en China, prueba que se sigue disputando en la actualidad y que a lo largo de su historia han ganado pilotos como Michael Schumacher, Ayrton Senna, Takuma Sato, Riccardo Patrese o Roberto Moreno, entre otros. Otras pruebas internacionales que también se disputaban eran el Gran Premio de Mónaco de F3 o el Masters de Zandvoort. Además, a nivel europeo, cada año se disputaba una prueba en un circuito del continente. El conjunto de estas pruebas conforma la conocida como Copa Europea de F3. Esta Copa tuvo dos períodos de actividad: de 1985 a 1990, disputándose cada año en un circuito europeo diferente, hasta que fue sustituida por el Masters de Zandvoort; y de 1999 a 2004, disputándose en el circuito urbano de Pau (salvo en la edición de 2004, que se celebró en el circuito belga de Spa-Francorchamps) [79]. En lo que respecta a campeonatos de F3, estos volvieron a celebrarse a nivel

nacional, siendo el campeonato británico el más popular, como se comentó anteriormente.



Figura 2-58. Póster promocional de la 66ª edición del GP de Macau, disputado en 2019. A causa del COVID 19, esta es la última edición en la que estuvo un campeonato internacional de F3

#### 2.4.4. Fórmula 3 Euroseries (2003-2012)

Para la temporada 2003, las federaciones de automovilismo alemana (DMSB) y francesa (FFSA) decidieron unir sus respectivos campeonatos de Fórmula 3 para crear y organizar un nuevo certamen a nivel europeo [80]. Este nuevo Campeonato, conocido como Fórmula 3 Euroseries, supuso la desaparición del campeonato francés de F3, mientras que en Alemania crearon la Recaro Formel 3, campeonato de F3 a nivel nacional, a pesar de que la DMSB intentó impedirlo, ya que se buscaba unir fuerzas para crear un certamen con monoplazas de Fórmula 3 a mayor escala [81].

Este campeonato, al contrario que por ejemplo la F3000 Internacional que estaba viviendo sus últimos años, o incluso el actual campeonato de F3, permitía a los equipos utilizar chasis de diferentes fabricantes aprobados antes por la FIA. También existían dos motoristas a elegir: Mercedes y Volkswagen, aunque las especificaciones de los motores sí estaban reguladas, pudiéndose utilizar propulsores con una capacidad máxima de 2L. Sin embargo, con respecto a los chasis, esta categoría se podría considerar como una monomarca, ya que la gran mayoría de chasis provenían del fabricante italiano Dallara [82].

En esta categoría, cada temporada constaba de 10 pruebas, disputándose la mitad de ellas aproximadamente en circuitos situados en Alemania, sirviendo así como categoría soporte para la DTM (Deutsche Tourenwagen Meisterschaft), la categoría de turismos más popular en Alemania; mientras que el resto de pruebas se disputaban en circuitos situados en Francia, Gran Bretaña, Italia o España. Dentro de este campeonato se incluyeron pruebas muy ligadas a la historia de la F3, como el GP de Pau, escenario de la Copa Europea de F3 durante su segundo período de actividad, como ya se comentó; el GP de Mónaco (haciendo de categoría soporte a la F1) o el Masters de Zandvoort [83].



Figura 2-59. Salida del GP de Pau de F3 celebrada en 2017

Que el campeonato contara con pruebas de este calibre hizo que muchos pilotos se interesaran y buscaran participar en él. Algunos de los pilotos que participaron en la F3 Euroseries a destacar son: Lewis Hamilton (campeón del certamen en 2005), Nico Rosberg (campeón del mundo de F1 en 2016, Sebastian Vettel (tetracampeón de F1), Romain Grosjean (campeón de la F3 Euroseries en 2007 y autor de 10 podios en F1), Nico Hülkenberg (campeón del certamen en 2008), Jules Bianchi, Kamui Kobayashi, etc., además de otros pilotos que también llegaron a la F1 o tuvieron trayectorias de éxito en otras categorías. Por tanto, se puede observar que, como escalón de promoción hacia la F1, el campeonato tuvo bastante éxito, siendo el primer escalón que superar para todos estos pilotos.



Figura 2-60. Lewis Hamilton pilotando su F3 durante una prueba de la temporada 2005 de la F3 Euroseries

Este campeonato se disputó durante 10 temporadas, siendo 2012 la última temporada. Esto es debido a que este mismo año, la FIA creó el Campeonato Europeo de Fórmula 3, en un intento de unificar la F3 Euroseries y la F3 británica, buscando tener así un único campeonato organizado y apoyado por la FIA. Es más, 7 de las 8 pruebas que conformaban la F3 Euroseries también formaban parte del nuevo campeonato europeo de la FIA. Para el año siguiente, los organizadores de la F3 Euroseries disolvieron el campeonato.

#### 2.4.5. Campeonato Europeo de Fórmula 3 (2011-2018)

Como se ha comentado, la FIA buscaba organizar y apoyar un campeonato de F3, para así dejar más definida para los pilotos la escalera de ascenso hacia la F1. Además, otro motivo de la creación de este campeonato era reavivar el interés por los campeonatos de Fórmula 3, ya que había competiciones a nivel nacional que empezaban a tener problemas de falta de participantes, como era el caso por ejemplo de la F3 británica. Con ello, para 2011, crearon el primer campeonato oficialmente declarado como uno de nivel internacional desde

que en 1984 dejara de existir la antigua Fórmula 3 Europea. Este campeonato, conocido como Trofeo Internacional de Fórmula 3, constó de 5 pruebas: una celebrada en Hockenheim, una celebrada en el mítico Spa-Francorchamps, el GP de Pau, el Masters de Zandvoort y el GP de Macau, que haría de broche final al campeonato [84].

Sin embargo, la idea de crear un campeonato que junte las pruebas más importantes para los monoplaces de tipo Fórmula 3 se desechó tras solo una temporada, a favor de buscar un campeonato que, como se comentó anteriormente, reavive el interés por la categoría, interés que iba languideciendo sobre todo en el país anglosajón. Para ello, en 2012, se sustituyó el Trofeo Internacional de Fórmula 3 por el Campeonato Europeo de Fórmula 3. Este campeonato sirvió de sustituto tanto para la F3 Euroseries como para el Campeonato Británico de F3, que se disolvió en 2014 al no tener los suficientes pilotos para poder desarrollarse con normalidad [85].

Este campeonato adoptó muchas de las ideas que salieron de la ya extinta F3 Euroseries: servía de categoría soporte principalmente para la DTM, tenían varios fabricantes de chasis aceptados (aunque todos usaban los de Dallara) y el motor tenía unas prestaciones muy similares a los de la Euroseries (de hecho, Mercedes y Volkswagen siguieron siendo los dos fabricantes de motores que participaban).

Esta categoría también resultó exitosa en lo que a promoción de pilotos respecta, ya que 11 de los 20 pilotos que actualmente se encuentran en la parrilla de F1 (Max Verstappen, Carlos Sainz Jr., Charles Leclerc, Esteban Ocon, George Russell, Lando Norris, Alexander Albon, Lance Stroll, Nicholas Latifi, Mick Schumacher y Guanyu Zhou) han pasado por esta categoría, además de otros que actualmente no se encuentran en la parrilla de F1 pero sí han estado en estos últimos años, como es el caso de Antonio Giovinazzi, Nikita Mazepin, Daniil Kvyat, Felipe Nasr, etc. También otros pilotos que han pasado por esta categoría se han labrado una trayectoria en otras categorías.



Figura 2-61. George Russell (dorsal 8) y Maximilian Günther (dorsal 3) durante el GP de Macao de 2016

Cabe destacar eso sí, que por esta época, este campeonato de F3 suponía el primer paso para muchos pilotos que salían de los campeonatos de karting; teniendo muchas veces que pasar posteriormente por otras dos categorías antes de llegar a la F1: la GP2 Series que ya se explicó y la GP3 Series, campeonato creado en 2010. En la reestructuración que llevó a cabo la FIA a mediados de la década pasada, se decidió unificar este Campeonato Europeo de Fórmula 3 con la GP3 Series, para crear un nuevo campeonato estrechamente relacionado con la F2 y la F1, la actual FIA F3, cuya primera temporada se disputó en 2019. Por ello, la temporada 2018 supuso la última del Campeonato Europeo de F3. Este último campeonato lo ganó el piloto alemán Mick Schumacher, hijo del 7 veces campeón del mundo de F1 Michael Schumacher [86][87].

#### 2.4.6. GP3 Series (2010-2018)

Mientras que a nivel europeo se estaban disputando las últimas temporadas de la F3 Euroseries, la organización de la GP2 Series, con el francés Bruno Michel a la cabeza, y con el apoyo de la FIA, decidieron

organizar un campeonato que sirviera como categoría de promoción a la GP2 existente, siguiendo una filosofía similar a la GP2 creada en 2005, es decir, aprovechar las instalaciones que ya estaban montadas para alojar la F1 y su categoría soporte, y acostumbrar a los pilotos al ambiente de Gran Premio. Con ello, en 2010 se llevó a cabo la primera temporada de esta nueva categoría inferior, conocida como GP3 Series.

Para ello, de forma similar a la GP2 Series, el campeonato tendría un único proveedor de chasis (de la marca italiana Dallara), de neumáticos (de la marca italiana Pirelli, misma marca que distribuye los neumáticos de F1) y de motores. Además, el calendario de este campeonato está formado por las pruebas que se realizan en territorio europeo, limitándose a esta zona para abaratar costes. Con ello, en las pruebas europeas, en un fin de semana de Gran Premio compiten monoplazas de F1, de GP2 y también de GP3 [88].

SUNDAY 30th JULY		
GP3 Series	Second Race (17 Laps or 30 Mins)	09:10 - 09:45
FIA Formula 2	Second Race (28 Laps or 45 Mins)	10:20 - 11:10
Porsche Mobil 1 Supercup	Race (14 Laps Or 30 Mins)	11:30 - 12:05
Formula One	F1 2 Seater (x2)	12:15 - 12:20
Paddock Club	Paddock Club Pit Lane Walk	12:20 - 13:05
Paddock Club	Paddock Club Truck tour	12:20 - 12:45
Formula One	Drivers' Track Parade	12:30
Promoter Activity	Starting Grid Presentation	13:00 - 13:15
Formula One	National Anthem	13:46
Formula One	Grand Prix (70 Laps or 120 Mins)	14:00 - 16:00

Figura 2-62. Programa del domingo del Gran Premio de Hungría del 2017. Nótese cómo dentro del fin de semana, hay carreras de la GP3 Series (indicada en verde), de GP2, además de por supuesto de F1. También hay fines de semana donde participan otros campeonatos, como la Porsche Supercup en este caso, un campeonato monomarca de Porsche

Al realizarse las pruebas en el marco de los Grandes Premios de F1 dotó a la categoría de un crecimiento meteórico de su popularidad, haciendo que muchos pilotos (de los cuales algunos venían del Campeonato Europeo de F3) buscaran estar en la parrilla de esta categoría. De hecho, 6 de los pilotos que se encuentran actualmente en la parrilla de F1 han pasado por esta GP3 Series: Alexander Albon, Valtteri Bottas, Charles Leclerc, Esteban Ocon, Carlos Sainz Jr. y George Russell. Eso sí, como categoría soporte de la GP2 Series, este campeonato resultó ser muy exitosa, ya que casi 50 pilotos pasaron a la GP2 Series o a la posterior Fórmula 2 tras competir en esta GP3.



Figura 2-63. Charles Leclerc en el marco del campeonato de GP3 Series en 2016. Ese mismo año se acabaría llevando el título de este campeonato

Sin embargo, la FIA, buscando definir una escalera de promoción para pasar del karting a la F1, creando en el camino la Superlicencia de la FIA, optó por darle una mayor importancia a la GP3 Series que a las otras competiciones de F3 que existían en la segunda mitad de la década pasada, con el Campeonato Europeo de F3 a la cabeza, hasta que varios años más tarde, con una parrilla del Campeonato Europeo que iba contando con menos pilotos por cada temporada que pasa, se decidieron unir ambos campeonatos a nivel europeo para crear, en 2019, el Campeonato de Fórmula 3 de la FIA, adoptando un formato de fin de semana similar al de la GP3 Series [86][87].

## 2.5. Fórmula 1 y sus categorías soporte en la actualidad. Superlicencia de la FIA y FIA Global Pathway from Karting to Formula 1

Actualmente, la FIA ha marcado un camino para que los jóvenes pilotos que provienen de los campeonatos de karting puedan llegar a competir a la F1, limitando así el número de categorías existentes como pasos intermedios entre el karting y la categoría reina. Para ello, se ha creado una estructura que podría asemejarse con una pirámide, la base de este representando las categorías que se encuentran inmediatamente por encima de los campeonatos de karting, campeonatos que se alojan en numerosos países o regiones y que, en conjunto, pueden permitir que muchos pilotos hagan sus primeros pasos compitiendo en monoplazas; y a medida que se va subiendo hacia la cúspide (estando ésta ocupada por la F1), el número de campeonatos se va reduciendo, ya que un campeonato abarca cada vez más regiones. Este camino que los pilotos tienen que seguir se conoce como la FIA Global Pathway from Karting to Fórmula 1.

Además, para avanzar en este camino formado por diversas copas de promoción, la FIA controla que los pilotos van progresando gracias a sus resultados (además de que cuenten con el suficiente apoyo financiero para ello). Para evitar casos en los que pilotos de talento cuestionable, pero con un gran poder adquisitivo ocupen plazas en la máxima categoría, pudiendo así poner en riesgo a sí mismo como al resto de la parrilla, la FIA ha desarrollado un sistema de licencia puramente resultadista, que acompaña a las licencias de grado A, B, C o D que se introdujeron en los años 60, conocido como la Superlicencia de la FIA [89].

### 2.5.1. Superlicencia de la FIA

En los años 90, dentro de las diferentes licencias que puede otorgar la FIA a un piloto, en función del tipo de coche que puede pilotar según su relación peso/potencia (el ya conocido sistema de clasificación por letras de la A a la D, siendo actualmente la A para coches con una relación peso/potencia menor o igual a 1 y la D para coches con una relación peso/potencia superior a 3), la Federación implementó una nueva licencia, que determina exclusivamente si un piloto puede competir en la F1 o no. Esta nueva categoría, conocida como la Superlicencia de la FIA, se podía obtener al cumplir una serie de requisitos, siendo la mayoría de ellos puramente resultadistas. Para poder obtener una Superlicencia, se le permitía al piloto un abanico de opciones. Este formato no sufrió grandes variaciones hasta mediados de la década pasada, más allá de llevarse a cabo los cambios necesarios para adaptar los requisitos a los nuevos campeonatos soporte que aparecían. Por ejemplo, para la temporada 2012 [90], para que un piloto pudiese obtener dicha Superlicencia, debe cumplir que:

- a) Tenga en posesión una licencia FIA de Grado A.
- b) Además, debe cumplir uno de los siguientes requisitos:
  - a. Haber participado como mínimo en 5 Grandes Premios de F1 el año anterior, o en 15 durante los últimos 3 años
  - b. Haber tenido ya una Superlicencia y haber sido el piloto de tests de un equipo de F1 la temporada anterior.
  - c. Haber finalizado entre los 3 primeros clasificados en mínimo uno de los dos últimos años en alguno de los siguientes campeonatos:
    - i. FIA Fórmula Dos
    - ii. Trofeo Internacional de Fórmula 3
    - iii. GP2 Series
    - iv. GP2 Asia Series

- v. Campeonato japonés Fórmula Nippon (actualmente conocida como Súper Fórmula japonesa, es la máxima categoría de monoplazas del país nipón que cuenta con coches de prestaciones similares a los de GP2)
- d. Haber finalizado entre los 4 primeros en mínimo uno de los dos años anteriores en la Indycar IRL Series.
- e. Haber ganado alguno de estos campeonatos la temporada anterior:
  - i. F3 Euroseries
  - ii. Campeonato británico, italiano, español o japonés de F3
  - iii. World Series Fórmula Renault

Sin embargo, para evitar que pilotos menores de 18 años puedan participar en un GP de F1, para el año 2016 se impuso la mayoría de edad como condición para poseer una Superlicencia. Además, ese mismo año se instauró un sistema de puntos que sustituye a la forma de obtener esta licencia que se comentó anteriormente. Con este nuevo sistema, la FIA puede encauzar a los futuros pilotos a pasar por determinados campeonatos en función que los puntos de Superlicencia que se reparten [91]. Con ello, y sabiendo que la FIA creó la Global Pathway, que se explicará más adelante, en 2014, la Federación afianzó este camino con el sistema de Superlicencia. Actualmente, la FIA F2, la categoría soporte de la F1, es el campeonato que más puntos de dicha licencia otorga, ya que, si un piloto acaba la temporada de F2 entre los tres primeros, consigue los 40 puntos necesarios para poder obtener la Superlicencia y participar así en la F1. La F3 también es uno de los campeonatos que más puntos de la licencia otorga, mientras que la F3 Regional y la F4 son de los campeonatos que más puntos otorgan a nivel regional y a nivel nacional, respectivamente [92].

Posición en la clasificación general de puntos	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª
FIA Fórmula 2	40	40	40	30	20	10	8	6	4	3
Indy Car	40	30	20	10	8	6	4	3	2	1
FIA Fórmula 3	30	25	20	10	8	6	4	3	2	1
FIA Fórmula E	30	25	20	10	8	6	4	3	2	1
FIA WEC (categoría LMP1)	30	24	20	16	12	10	8	6	4	2
Fórmula Regional Europa certificado por la FIA (FRECA)	25	20	15	10	7	5	3	2	1	0
Super Fórmula Japonesa	25	20	15	10	7	5	3	2	1	0
FIA WEC (categoría LMP2)	20	16	12	10	8	6	4	2	0	0
F3 Regional Asia certificado por la FIA	18	14	12	10	6	4	3	2	1	0
F3 Regional Américas certificado por la FIA	18	14	12	10	6	4	3	2	1	0
NASCAR	15	12	10	7	5	3	2	1	0	0
Campeonatos nacionales de Fórmula 4 certificados por la FIA	12	10	7	5	3	2	1	0	0	0
Campeonatos nacionales de Fórmula 3	10	7	5	3	1	0	0	0	0	0
Campeonato del mundo FIA Karting en Categoría Senior	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0

Figura 2-64. Tabla que muestra los puntos de Superlicencia que se pueden obtener en distintos campeonatos. Las filas marcadas en azul representan las categorías que forman parte de la *FIA Global Pathway*. Las casillas en amarillo indican las posibilidades de obtener directamente los 40 puntos requeridos para participar en F1.

### 2.5.2. FIA Global Pathway from Karting to Formula 1

Este programa, creado por la FIA, proporciona, como ya se ha comentado con anterioridad, una asistencia o guía a los pilotos de los campeonatos en los que puede ir participando cuando finaliza su etapa en el karting hasta llegar a la Fórmula 1. Este programa, creado en 2014 a la vez que se aprobó la primera normativa de monoplazas de Fórmula 4, sigue una estructura escalonada que se puede representar con una pirámide, estando la base formada por campeonatos con el, por aquel entonces, nuevo Fórmula 4, con una potencia limitada a 160 CV. A medida que se va subiendo hacia la cúspide, aumenta la potencia de los monoplazas que un piloto tiene que pilotar, hasta llegar a la F1, donde se compiten con monoplazas equipados con motores de más de 1000 CV.

La creación de este programa supuso el paso definitivo de la FIA hacia la definición de un camino de

promoción concreto y lineal, limitando así el número de categorías soporte existentes. Otro de los motivos por los que la FIA buscaba este camino concreto es que para el aficionado resulta más fácil seguir la progresión de los jóvenes pilotos si se conoce de antemano por qué campeonatos pasará [93].



Figura 2-65. FIA Global Pathway

En la figura se muestra la estructura escalonada previamente mencionada. Se puede observar que la *FIA Global Pathway* está formada por los distintos campeonatos:

- **Fórmula 1.**

La denominada ‘categoría reina del automovilismo’ no necesita mucha más presentación. Estar en la parrilla de la F1 es el objetivo de los pilotos que se embarcan en este camino. Actualmente, los monoplazas de F1 cuentan con motores fabricados por 4 grandes fabricantes (Mercedes, Ferrari, Honda y Renault) de 1.6L e híbridos capaces de desarrollar una potencia superior a los 1000 CV. Además, en la temporada 2022 ha tenido lugar una de las mayores revoluciones en cuando a filosofía de monoplaza de las últimas décadas, ya que se ha vuelto a desarrollar un monoplaza en el que la mayor parte de la fuerza aerodinámica generada proviene del ya explicado efecto suelo, levantando así la prohibición (o más bien limitación) que se impuso hace cuatro décadas. Actualmente 20 pilotos provenientes de 10 escuderías compiten por ganar el título de Campeón del Mundo de F1, título que en 2022 ostenta el piloto holandés del equipo Red Bull Racing Max Verstappen [94].



Figura 2-66. Max Verstappen en el GP de Baréin de 2022

- **Fórmula 2.**

En 2017, la FIA y los organizadores decidieron cambiar el nombre de la GP2 Series, pasando así a llamarse la FIA Fórmula 2. Este es el último paso que los pilotos han de dar para alcanzar el sueño de participar en F1. 22 pilotos (11 equipos) se enfrentan en un calendario formado por 14 pruebas con dos carreras en cada prueba disputadas durante los fines de semana de Gran Premio en los circuitos europeos y de Oriente Medio que visita la F1. Es una competición monomarca, con chasis desarrollados por Dallara y motores fabricados por la empresa francesa Mecachrome, capaces de desarrollar 620 CV. Además, cuentan con ruedas de 18” como en la F1 (de hecho, este tamaño se comenzó a probar en la F2 antes de implementarse en la F1) y neumáticos Pirelli. En 2022, el brasileño Felipe Drugovich se proclamó campeón del certamen [95].



Figura 2-67. Felipe Drugovich en el circuito de Barcelona-Catalunya

- **Fórmula 3.**

En 2019, la FIA decidió unificar la GP3 Series con el Campeonato Europeo de Fórmula 3 para crear una única competición con chasis de especificación F3 que compita también a un nivel global. Así, en 2019, nació la FIA Fórmula 3, siendo este el primer campeonato global al que se enfrentan los pilotos. Este campeonato está formado por 9 pruebas con dos carreras en cada prueba que se disputan también en el marco de los fines de semana de Gran Premio. Los monoplazas que se utilizan se rigen por la nueva normativa de monoplazas de F3 en lo que a chasis respecta, creada también en 2019, siendo fabricados por Dallara; mientras que utilizan un motor de la marca Mecachrome de 380 CV. 30 pilotos (10 equipos) compiten por ser campeón del certamen, título que en 2022 se llevó el piloto francés Victor Martins [96].



Figura 2-68. Victor Martins en el circuito de Barcelona-Catalunya

- **Fórmula Regional**

Para la temporada 2018, en un intento de reducir el salto entre los monoplaazas de Fórmula 4 y los de Fórmula 3 (un salto en cuanto a potencia de casi 200 CV, por ejemplo), la FIA aprobó la creación de un nuevo campeonato en el que se utilizarían monoplaazas con chasis diseñados bajo la normativa de F3 vigente, pero equipados con motores menos potentes que los de la por aquel entonces futura F3 [97]. Con ello nació la categoría F3 Regional, que engloba varios campeonatos disputados en distintas regiones del mundo. Para esta categoría, se sigue un modelo similar al de la Fórmula 4, en la que existen varios fabricantes de chasis y motores aprobados por la FIA, para que los organizadores puedan elegir el que más les convenga. Actualmente, el campeonato más conocido e importante es el de Fórmula Regional Europe Championship by Alpine (FRECA), disputado en circuitos situados en la zona europea. Utilizan chasis de la marca italiana Tatuus y motores Renault capaces de producir 270 CV. Otros campeonatos dentro de esta categoría son la Fórmula Regional Asia, la Fórmula Regional Américas y la Fórmula Regional Japón. Además, existen otros campeonatos que, aunque no forman parte como tal de esta categoría Fórmula Regional, utilizan monoplaazas diseñados bajo esta normativa. Es el caso de las ya extintas W Series, un campeonato femenino; y la Toyota Racing Series, disputada en Nueva Zelanda [98].



Figura 2-69. Dino Beganovic a los mandos del Tatuus F-318 en el marco del FRECA, campeonato que acabaría ganando en 2022 [99]

## 2.6. FIA Formula 4: creación y estado actual

Para la temporada 2014, en un intento de reducir el salto económico entre los campeonatos internacionales de karting y los campeonatos nacionales de F3, además del cada vez más reducido interés en dichos campeonatos nacionales de F3 (los pilotos saltaban directamente al Campeonato Europeo de F3), la FIA decidió crear una nueva categoría, con un nuevo tipo de monoplaaza desarrollado desde cero con la idea de ser una opción más económica para que los pilotos comiencen su trayectoria en monoplaazas, buscando que el disputar una temporada en algún campeonato de esta nueva F4 le cueste al piloto 100.000€. El primer campeonato disputado bajo esta nueva normativa fue el Campeonato Italiano de F4.

En lo que respecta a los monoplaazas, la FIA dio luz verde a varios fabricantes a desarrollar estos nuevos bólidos, dando así la opción a los organizadores de los distintos campeonatos a elegir entre uno de ellos para que formen la parrilla de su campeonato (es decir, la categoría es multimarca, pero cada campeonato es monomarca). Por ejemplo, el Campeonato Italiano de F4, en su temporada de debut, decidió contar con los monoplaazas fabricados por la marca transalpina Tatuus. En lo que a motoristas respecta, el modelo es el mismo que para los chasis, pudiendo cada campeonato elegir entre motores fabricados por una serie de compañías aprobadas por la FIA, siendo la única imposición que los motores deben tener 4 cilindros, además de no poder superar un precio establecido [100].



Figura 2-70. Fabricantes de chasis aprobados por la FIA



Figura 2-71. Fabricantes de motores de F4 aprobados por la FIA

Esta fórmula resultó ser un éxito, a pesar incluso de no haber llegado al máximo de 100.000€ por temporada en todos los campeonatos. Tras la temporada inaugural del Campeonato Italiano de F4, en la que se consiguió obtener una parrilla que superó la treintena de monoplazas, múltiples países o regiones decidieron organizar sus respectivos campeonatos de Fórmula 4, convirtiendo a esta F4 en la categoría de referencia en lo que respecta a la organización de campeonatos a nivel nacional. Actualmente, los campeonatos de F4 que se disputan o se disputarán en un futuro reciente son:

- **Campeonato de Italia de F4.** Es el certamen de F4 de referencia en la actualidad, pudiendo albergar parrillas de hasta 40 coches. Utilizan monoplazas con chasis Tatuus regidos por la nueva normativa de monoplazas de F4 de 2ª generación, y motores de la empresa italiana Abarth, que desarrollan 160 CV. Esta temporada el piloto italiano Kimi Andrea Antonelli se coronó como campeón [101].



Figura 2-72. Kimi Andrea Antonelli en el marco del Campeonato de Italia de F4

- Campeonato ADAC de Fórmula 4. Inaugurado en 2015, el campeonato alemán de F4 también es un campeonato con bastante renombre. Es más, existen varios pilotos que han alternado este campeonato con el campeonato italiano, debido a la proximidad entre ambos países. Esta alternancia también se ve fomentada por el hecho de que la ADAC F4 usa monoplaazas idénticos a los de la F4 italiana: chasis Tatuus de 2ª generación y motores Abarth. Esta temporada 2022, Andrea Kimi Antonelli conquistó también este campeonato [102]. Sin embargo, los costes de mantener este campeonato se hicieron insostenibles para los promotores, dando lugar a la cancelación de la temporada 2023.
- Campeonato de F4 Británica. También inaugurado en 2015, aunque no sin dificultades, ya que la normativa que rige todo el motorsport en el país anglosajón no permitía organizarse campeonatos de monoplaazas para pilotos de 15 años, que es precisamente la demografía que buscaba abarcar la FIA al crear la F4. Sin embargo, para 2015, la BRDC cambió la normativa, lo que permitió la creación de este campeonato. Actualmente, la Fórmula 4 británica utiliza chasis Tatuus de 2ª generación y motores Abarth, idénticos a los que se utilizan en los campeonatos alemán e italiano. En 2022, Alex Dunne se proclamó campeón del certamen (además, acabó subcampeón de la F4 italiana esta misma temporada, por detrás del ya mencionado Antonelli) [103].
- Campeonato de Japón de F4. Inaugurada también en 2015, este campeonato utiliza chasis de la marca nipona Dome, diseñados bajo la normativa de monoplaazas de F4 de 1ª generación, y motores de la escudería Tom's, especializada en la modificación de motores y otros componentes de las marcas Toyota y Lexus para la competición. El campeón de la edición 2022 del certamen fue el japonés Syun Koide [104].



Figura 2-73. Syun Koide en el circuito de Autopolis, en el marco del campeonato japonés de F4

- Campeonato de China de F4. Su primera temporada se disputó en 2015. Actualmente este campeonato utiliza monoplaazas con chasis de la empresa francesa Mygale de 1ª generación equipados con motores de la marca china Geely. A la fecha de escritura de este proyecto, la temporada 2022 se encuentra todavía en desarrollo, siendo el piloto chino Gerrard Xie el líder del certamen habiéndose disputado la mitad de las pruebas [105].
- Campeonato NACAM de F4. En 2015, tuvo lugar la primera edición de este campeonato, centrada en Méjico. Para la temporada 2022 se utilizan chasis Mygale de 1ª generación y motores del gigante americano Ford. Esta temporada 2022 sigue disputándose a la fecha de escritura de este TFG. A falta de 2 pruebas, el líder del certamen es el piloto colombiano Juan Felipe Pedraza [106].
- Campeonato de España de F4. Creado en 2016, el Campeonato de España de F4 se disputa en circuito de la Península Ibérica. Para la temporada 2022 debutó el chasis de Tatuus de 2ª generación, propulsado por motores Abarth. Aun quedando todavía una ronda a la fecha de escritura de este trabajo, el piloto búlgaro Nikola Tsolov ya es matemáticamente campeón del certamen [107].
- Campeonato de EE. UU. de F4. Inaugurado también en 2016, es el campeonato de F4 albergado en Norteamérica. En este campeonato utilizan chasis de 1ª generación fabricados por la empresa francesa

Ligier, aunque renombrados como Crawford, y motores Honda. A falta de disputarse tres pruebas de la temporada 2022, el líder del campeonato es el piloto australiano Lochie Hughes [108].



Figura 2-74. Lochie Hughes durante una prueba del campeonato de EE. UU. de F4

- Campeonato de EAU de F4. Siendo su primera temporada en 2016, este campeonato destaca por su rápido aumento en popularidad debido a su peculiar calendario que transcurre en los meses de invierno, meses en los cuales las competiciones en Europa se encuentran en su mayoría paradas. Este hecho hace que la F4 UAE sea una opción interesante para muchos pilotos, que utilizan este campeonato para no perder entrenamiento en esos meses invernales. Utilizan chasis de 2ª generación de la marca Tatuus con motores Abarth, al igual que en los campeonatos italiano, alemán, británico y español. La edición de 2022 la ganó el piloto austriaco Charlie Wurz, hijo del expiloto de f1 Alexander Wurz (quien también obtuvo un 4º puesto en la F4 italiana y un 7º en la alemana, además de estar participando también en la F4 española) [109].
- Campeonato de F4 Danesa. Inaugurada en 2017, actualmente es la única competición de monoplazas que se disputa en el país nórdico. Este campeonato se distingue de los otros campeonatos de F4 en el hecho de que, para que haya más participantes en cada prueba, permite a los pilotos que se encuentran en posesión de un Fórmula Ford, conocido en este campeonato bajo el nombre de Fórmula 5, monoplaza con prestaciones inferiores al F4, participar en el campeonato de F4, estableciendo dos campeonatos para los dos tipos de monoplazas.

En lo que respecta a la F4, actualmente se utilizan monoplazas de la 1ª generación con chasis Mygale y motores Renault. En 2022, Julius Dinesen fue proclamado campeón del certamen [110].



Figura 2-75. Mads Hoe (Fórmula 5 con el dorsal 47), Juju Noda (Fórmula 4 con el dorsal 10) y Emerson Fittipaldi Jr. (Fórmula 4 con el dorsal 77) durante una prueba del Campeonato de F4 Danesa de la temporada 2021

- Campeonato Francés de F4. El origen de este campeonato data de los años 90, cuando se comenzó a organizar en el país galo un campeonato conocido como Fórmula Renault Campus, en la cual se utilizaban monoplaazas equipados con motores Renault de 1400cc. Con el paso de los años, este campeonato fue cambiando de nombre y formato, llegándose a llamar F4 Eurocup 1.6 a principios de la década pasada. Cabe destacar eso sí que esta nomenclatura F4 indicaba que se utilizaban monoplaazas con prestaciones inferiores (motores de 1600cc) a los Fórmula 3 que se utilizaban sobre todo en la ya comentada F3 Euroseries, ya que no fue hasta 2014 cuando la FIA presentó la categoría F4 como tal.

Ya en 2018, este campeonato se renombró como el Campeonato Francés de F4, siendo así regido por la normativa correspondiente a esta categoría. Actualmente, en el campeonato se utiliza el nuevo chasis Mygale de 2ª generación y motores Renault de 1.3L con turbo. En la temporada 2022, el campeón fue el francés Alessandro Giusti [111].



Figura 2-76. Alessandro Giusti durante una prueba del Campeonato Francés de F4, disputada en el circuito Ricardo Tormo en Cheste, Valencia

- Campeonato Brasileño de F4. Este es el campeonato de la categoría F4 más reciente, habiéndose disputado este año 2022 la primera temporada. Utilizan monoplaazas de 2ª generación con chasis Tatuus y motores Abarth, idénticos a los utilizados en varios campeonatos disputados en el continente europeo. A falta de dos pruebas por disputarse en el momento de escribir este TFG, el líder del campeonato es el piloto brasileño Pedro Clerot [112].

Como se puede observar, esta F4 es una fórmula que ha ganado una gran popularidad en el poco tiempo que lleva existiendo, permitiendo que multitud de pilotos pudiesen realizar sus primeras carreras en monoplaazas, dando así comienzo a un arduo camino con el objetivo de ser uno de los 20 pilotos que formen parte de la parrilla de la máxima categoría del automovilismo. Los pilotos más destacados que han participado en algún campeonato de F4 son: Lance Stroll (actual piloto de F1 y campeón del primer certamen de F4 italiana), Lando Norris (piloto de F1 y campeón de la F4 británica en su primera edición). Además, 18 de los 29 pilotos que están compitiendo esta temporada en la FIA F2 (22 pilotos más 7 pilotos que han realizado sustituciones) han participado en algún campeonato de F4. Este porcentaje aumenta si se estudian los pilotos que han competido en la temporada 2022 de la FIA F3.

## 3 DISEÑO DE UN MONOPLAZA DE TIPO F4: PASOS PREVIOS

---

Tras proporcionar un contexto histórico de las categorías soporte de la Fórmula 1, a continuación la memoria pasa a centrarse en el grueso del proyecto, que es el modelado de este monoplaça de especificación F4. Para ello, en primer lugar, se enumerarán algunas características que poseen este tipo de monoplaças, con el fin de poder explicar la toma de decisiones que se han llevado a cabo a lo largo de este proceso de diseño. A continuación, se explicará brevemente qué software se ha utilizado para realizar este Trabajo de Fin de Grado, ya que, además de CATIA V5, se han empleado otras herramientas y programas auxiliares que han facilitado el proceso de diseño o han permitido llevar a cabo operaciones o acciones que estaban al alcance de CATIA. Tras ello, se procede a comentar la documentación de referencia empleada para llevar a cabo este modelado.

### 3.1. Características de un F4

Como se ha comentado previamente, los monoplaças de F4 suponen el primer escalón en la pirámide de ascenso que los pilotos toman para llegar a la F1. Por ello, estos monoplaças se caracterizan por tener una fórmula con una menor potencia e influencia aerodinámica, permitiendo carreras más apretadas y competidas entre los pilotos. En concreto, los monoplaças de F4 equipan motores limitados a 160 CV, conectados a cajas de cambio de 6 velocidades y de tipo secuencial, que permiten cambiar marchas sin emplear el embrague, con ayuda de unas levas situadas en la parte trasera del volante.

En lo que respecta a los elementos que protegen al piloto en caso de impacto, destaca el monocasco, que hace también las veces del chasis del propio coche. Este elemento se fabrica con un material compuesto por fibra de carbono con una matriz de Nomex, un material utilizado por sus propiedades ignífugas. Además, al igual que con monoplaças de otras categorías, este monocasco debe ser homologado, debiendo para ello pasar una serie de exhaustivas pruebas de impacto para garantizar que este elemento se comporta de manera adecuada a distintas situaciones y cumple el objetivo de proteger al piloto. Además, esta segunda generación de monoplaças de F4 tiene implementado el Halo, elemento de seguridad ya discutido en esta memoria.

Como se ha comentado previamente, estos monoplaças presentan un efecto aerodinámico limitado si se compara con otros vehículos de categorías superiores. Con ello, se permite tener un estilo de carreras en la que los pilotos se pueden seguir más de cerca, debido a que el efecto de la estela que genera un monoplaça es menor, es decir, un coche de F4 pierde menos tiempo si se encuentra a rebufo de otro monoplaça que si se trata con coches de categorías superiores. Además, presentan alas delantera y trasera sencillos, con perfiles delimitados por la propia normativa. Para limitar aún más los efectos aerodinámicos, el fondo 'plano' tiene incluido un *step plane*, como se introdujo en la F1 a mediados de los años 90.

Sin embargo, estos coches no son ni mucho menos rudimentarios. Por ejemplo, permiten el ajuste de numerosos parámetros de la geometría para poder permitir que el monoplaça se comporte como prefiere el piloto. Algunas modificaciones de ciertos parámetros del coche, como el reparto de frenada entre el eje delantero y trasero se pueden realizar desde el propio habitáculo. Además, los ángulos de incidencia de las alas sí se pueden modificar dentro de un rango.

### 3.2. Software empleado

A continuación, se detalla qué programas se han empleado para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado. Como programa principal, aquel que ha permitido llevar a cabo el propio modelado del monoplaça, se ha empleado, como se ha comentado previamente, CATIA V5 R19. Este programa se utiliza para diseñar y modelar toda clase de productos y elementos. Sin embargo, este programa presenta una cantidad de módulos y opciones casi abrumadora, muchos de los cuáles no se han empleado a la hora de llevar a cabo este proyecto.

En concreto, los módulos de CATIA que se han utilizado son:

- **Part Design.** Es probablemente el módulo más conocido y empleado de CATIA. Permite el modelado de piezas sólidas a través de diferentes operaciones. Para este proyecto, es uno de los módulos más empleados.
- **Generative Shape Design.** Este módulo es similar al de Part Design. La gran diferencia es que los elementos modelados son superficies, no sólidos. Además, presenta algunas operaciones adicionales que no se encuentran en el módulo de Part Design, centradas sobre todo a la manipulación de dichas superficies.
- **Assembly Design.** Este módulo permite principalmente crear ensamblados a partir de piezas previamente modeladas, pudiendo imponer restricciones en la posición espacial de dichos elementos.
- **Sketch Tracer.** Este módulo permite importar imágenes (por ejemplo, dibujos o planos), colocarlos y escalarlos de forma adecuada para poder llevar a cabo un modelado utilizando estas imágenes como referencia. Con ello, se podrían realizar piezas 'calcándolas'.
- **Human Builder.** Este módulo permite implementar un maniquí, con el objetivo de realizar un diseño del elemento o elementos adecuado desde el punto de vista de la ergonomía. Para este proyecto, se ha empleado para poder modelar la parte interior del habitáculo, como se verá más adelante.

Además de CATIA, se han empleado otros programas que han ayudado al modelado del monoplaza de F4. Estos son:

- **AutoCAD.** Este *software* CAD perteneciente a la familia de productos de Autodesk se ha utilizado en este proyecto para poder obtener algunas medidas que no estaban indicadas en los esquemas que se han usado como referencia. Esto es posible gracias a que AutoCAD permite escalar imágenes empleando una cota como referencia.
- **Microsoft Excel.** El archiconocido programa de hojas de cálculo se ha empleado para importar los perfiles que caracterizan las alas delantera y trasera. Para ello, se ha obtenido a partir de un tutorial de Internet un archivo Excel que tiene incluido una macro que permite llevar a cabo la operación deseada. Como en la normativa, el perfil viene determinado por las coordenadas de una ristra de puntos que conforman dicha curva, esta se introduce al archivo Excel descargado, Con ello, ejecutando la macro, se obtiene en CATIA tanto los puntos mencionados como una curva que pasa por todos estos puntos, que hace las veces del contorno exterior del perfil, curva adecuada para poder modelar los alerones delantero y trasero.
- **Keyshot 10.** Para la parte de renderizado final, se ha empleado principalmente este *software*, especializado en composición de imágenes y renderizado 3D. Permite asociar a las piezas un material determinado y realizar instantáneas utilizando dichos modelos. La razón por la que se ha empleado este programa es por la ligera experiencia previa que ya contaba con él, para realizar otros trabajos y proyectos en la Universidad. Además, otra gran ventaja de este programa frente a otros similares, como Blender, es que trabaja muy bien con modelos de CATIA. En Blender por ejemplo, se emplean modelos 3D que tienen formatos más universales (archivos STEP, FBX, OBJ, etc.). En este caso, el ensamblado creado en CATIA se podría utilizar en Blender cambiando el formato de CATProduct a uno permitido (existe la opción de *Generate CATPart ffrom Product* que permitiría esto), a expensas de perder información sobre el modelo, ya que se pasaría a obtener un único sólido, sin distinguir entre piezas. Sin embargo, Keyshot no sufre de este problema, ya que se puede importar directamente el CATProduct, sin perder información sobre las piezas que lo conforman, facilitando así la asignación de materiales y en general el trabajo en este proceso de renderizado.
- **Blender.** Además de Keyshot, en este trabajo se ha utilizado Blender para llevar a cabo algunas acciones auxiliares a la hora de realizar los renders, como importar un modelo 3D de un piloto o texturizar los distintos escenarios empleados.

### 3.3. Documentación de referencia

Como se ha comentado anteriormente, la documentación empleada como base para llevar a cabo este Trabajo

de Fin de Grado es la normativa técnica de la categoría. Este documento se puede encontrar en Internet, siendo de libre acceso desde la página web de la Federación Internacional del Automovilismo. Para este proyecto, se ha trabajado con la normativa para los monoplaças de F4 de segunda generación, siendo el modelo que se ha desarrollado; así como con la normativa para los monoplaças de primera generación, debido a que en este segundo documento se encontraba información adicional de utilidad para el modelado del vehículo en cuestión, datos que no han cambiado con el salto generacional.

Esta normativa FIA se caracteriza por tener distintas normas que delimitan las características, geometría y prestaciones de las distintas piezas que conforman un monoplaça. Además, para facilitar la interpretación de algunos artículos, este reglamento viene acompañado por esquemas y dibujos.

Sin embargo, estos reglamentos no proporcionan toda la información necesaria para llevar a cabo este proyecto, siendo así necesario recurrir a otros documentos adicionales. Afortunadamente, se han obtenido de internet los manuales del usuario del monoplaça de la marca Mygale de F4 de primera generación, así como un listado de piezas utilizadas en los monoplaças de Tatuus y Mygale de F4 de primera generación también. Estos últimos documentos han permitido comprender cómo y dónde se encuentran situadas determinadas piezas, especialmente las que forman parte de la suspensión y la dirección del monoplaça.

Además, el haber contado con estos documentos ha ayudado a confirmar que bastantes piezas se pueden encontrar directamente en el mercado. Con ello, se han podido consultar catálogos de diversas empresas para poder realizar el modelado de dichas piezas. Esto se ha llevado a cabo para, por ejemplo, el volante, algunos componentes de la suspensión (muelles y amortiguadores principalmente), las llantas, etc.

## 4 DISEÑO DE UN MONOPLAZA DE F4: MODELADO

A continuación, se comentará el proceso de modelado de las distintas piezas que conforman este ensamblado. Para ello, se seguirá una estructura similar a la organización que se tiene en el árbol de CATIA del CATProduct completo. Con ello, se explicarán las piezas pertenecientes a las siguientes categorías:

- Monocasco
- Suspensión
- Aerodinámica y carrocería
- Tren de potencia
- Sistema de dirección
- Sistemas auxiliares
- Pedales

### 4.1. Monocasco

En primer lugar, se comentará el modelado del componente central del monoplaza: el monoplaza, elemento encargado de alojar y proteger al piloto en caso de accidente. Las medidas y propiedades de este elemento se encuentran altamente reglamentadas en diferentes puntos de la normativa de F4, y es el componente que se somete a más ensayos antes de ser homologado. En lo que respecta al modelado, se ha empleado el módulo de Generative Shape Design, permitiendo trabajar así con superficies en vez de con volúmenes.

En primer lugar, dicha normativa rige que, visto en planta, debe haber un hueco mínimo que permita al piloto acceder y salir del habitáculo, representado con un elemento que la FIA introduce, para comprobar que efectivamente este hueco está conforme a la norma. Tanto la posición como las dimensiones de este espacio se encuentran reglamentados. Además, visto desde el perfil, no se puede ver dicho elemento que emplea la FIA. Esto hace que la zona del habitáculo tenga esta forma característica, para proteger la cabeza del piloto en caso de impacto lateral.

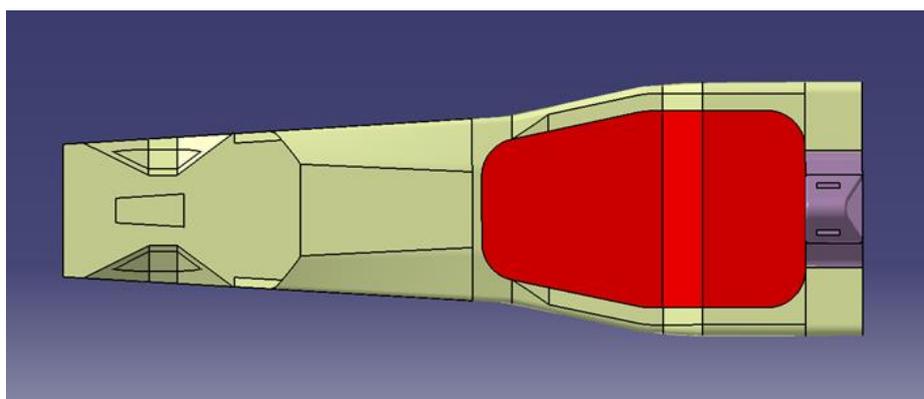


Figura 4-1. Vista en planta del monocasco. En rojo se indica el elemento que delimita las dimensiones del espacio habilitado para el piloto.

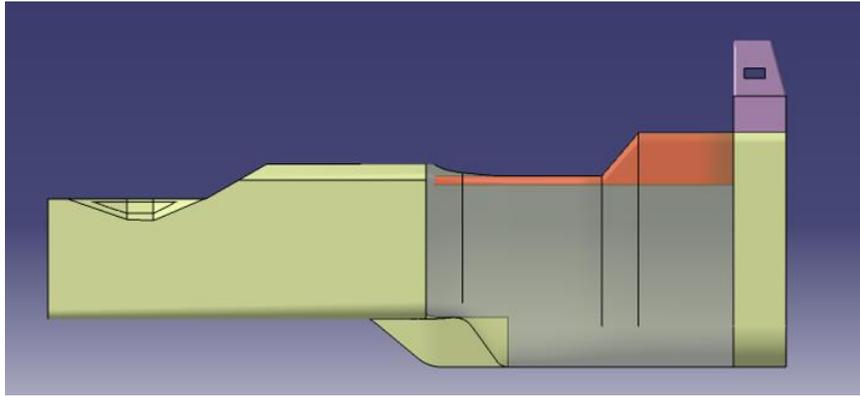


Figura 4-2. Vista en perfil del monocasco. En rojo se indica el elemento que delimita las dimensiones del espacio habilitado para el piloto. Se puede apreciar la forma que debe adoptar el monocasco en los laterales del casco del piloto

Con ello, lo primero que se ha modelado es la pieza de prueba en cuestión, para así modelar el monocasco a su alrededor. Para ello, se ha realizado una operación de Multi-Section Surface, empleando el contorno situado en el plano de simetría del monoplaza y el contorno de la superficie más externa de la pieza como secciones, y empleando las uniones entre estas dos secciones como curvas guía.

Tras ello, se ha modelado el arco antivuelco, la estructura que se encuentra a una mayor altura del monoplaza, encargada de proteger la cabeza del piloto en caso de vuelco del monoplaza. Para el modelado de este elemento, la normativa estipula el área que deben tener varias secciones del arco vista en planta. Por ello, en primer lugar, se han trazado los rectángulos que dan lugar a dichas áreas, para tomarlos como referencia a la hora de modelar el propio arco.

Con ello, y utilizando como material de referencia arcos de seguridad que ya están implementados en otros monoplazas, se procede con el modelado de este elemento. Para ello, en primer lugar, se trazan los contornos exterior e interior de la parte delantera y trasera de esta pieza, para poder someterla a dos operaciones de Multi-section Surface. Tras ello, se completa mediante operaciones de Fill y Join el volumen de la pieza, para poder pasarla después a un elemento sólido.

Tras ello, debido a especificaciones de la normativa, se han tenido que realizar dos agujeros en los laterales del arco, ya que, en caso de que el monoplaza tenga que ser retirado por una grúa, es por estos agujeros por los que se pasa la cinta que permite el enganche entre monoplaza y grúa. Para ello, se ha trazado un rectángulo cuya área cumpla con las especificaciones de la normativa. Con este rectángulo trazado, se ha llevado a cabo una operación de Extrude, para después poder cortar esta superficie generada con el arco antivuelco, resultando en los agujeros requeridos. Por último, para suavizar algunas esquinas del arco, se han llevado a cabo operaciones de Edge Fillet.



Figura 4-3. Operarios retirando un monoplaza averiado con ayuda de una grúa. Se puede observar cómo se pasa una cinta por la zona del arco antivuelco para poder retirarlo

Para obtener un volumen sólido del arco antivuelco, se ha empleado la operación de Close Surface que se encuentra dentro del módulo de Generative Shape Design. La mayor diferencia entre ésta y la operación con el mismo nombre que se encuentra en el módulo de Part Design es dónde se halla el volumen resultante. El segundo sólo se puede ubicar en el Part Body principal, mientras que el primero presenta una mayor libertad a la hora de colocarlo en el árbol. En este caso, se encuentra en el Geometrical Set llamado 'Sólidos'. Por tanto, se puede observar que el utilizar una operación de Close Surface u otra se reduce al gusto de cada uno y a cómo tiene ordenado su árbol. En este caso, como la única pieza que iba a ser sólida es este arco antivuelco, se ha decidido dejar el resultado de la operación elegida en el Geometrical Set previamente mencionado.



Figura 4-4. Modelo 3D del arco antivuelco

Posteriormente, se procede con el modelado de la parte delantera del monocasco, encargada de alojar y proteger las piernas del piloto en caso de accidente. En primer lugar, y con el fin de reducir el riesgo en un impacto de coche contra coche porque el morro vaya demasiado elevado, la altura máxima que tiene esta parte del monocasco se encuentra muy acotada por la normativa. Con ello, lo primero que se modela es esta cota máxima que no se puede superar.

Tras modelar este volumen límite, se procede con el modelado de esta parte del monocasco como tal. Para ello, en primer lugar, se trazan los contornos de las secciones transversales inicial y final, así como las curvas guía que unen ambas secciones, mediante operaciones de Sketch y Line para las líneas rectas. Con ello, se ha podido realizar una operación de Multi-Section Surface para modelar la superficie exterior de esta parte del monocasco.

Tras ello, se ha decidido extraer de esta pieza la parte correspondiente a la cubierta de los elementos de la suspensión delantera. Para ello, se han modelado e 'instalado' previamente los componentes de la suspensión que se alojarán en esta zona: los muelles y amortiguadores delanteros, así como los *rocker*, elementos que permiten transmitir el movimiento de la barra de suspensión al amortiguador y viceversa.

Sabiendo la posición aproximada de estos elementos de la suspensión, se han realizado operaciones de Split para ir modelando la cubierta y la superficie del monocasco en esta zona. Las operaciones de Split mencionadas se han realizado con ayuda de superficies de corte auxiliares, generadas previamente mediante operaciones de Extrude a partir de Sketches trazados. Además, en caso de que quedasen huecos en la superficie del monocasco, se han rellenado con operaciones de Fill.

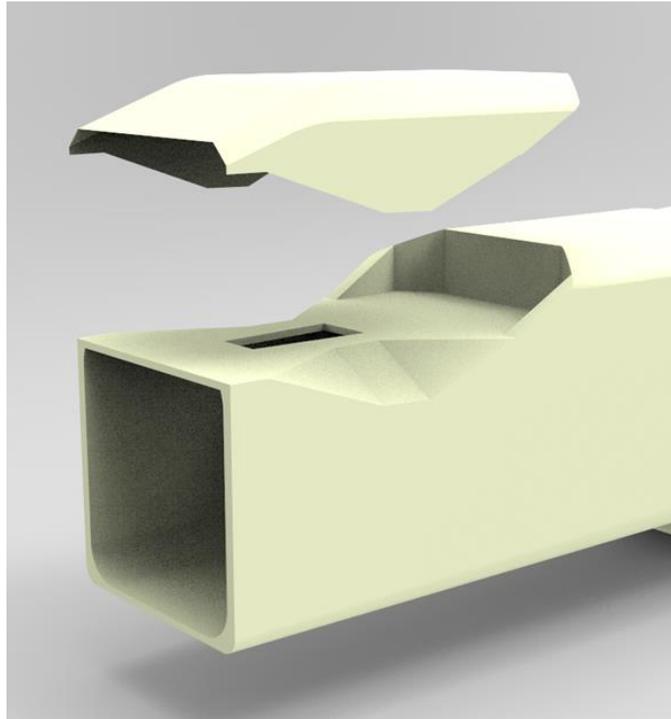


Figura 4-5. Detalle de la parte delantera del monocasco. En la parte superior se encuentra la cubierta delantera.

Tras esto, se procede con el modelado de la parte central del monocasco, parte que aloja y protege el resto del cuerpo del piloto. Para ello, como se comentó previamente, se parte con el elemento que se modeló en primer lugar, que asegura las dimensiones de la apertura para que el piloto entre en el monoplaza. Con ello, para realizar la superficie exterior de esta parte del monocasco, se ha llevado a cabo una operación de Multi-section Surface. Para realizar esta operación, se han empleado como sección una de las utilizadas para modelar la parte delantera del monoplaza (así se asegura una unión correcta entre ambas partes), mientras que, para la parte trasera del monocasco, que se encuentra tras la espalda del piloto, se ha empleado como sección la estipulada por la normativa. Esta sección se encuentra normalizada en sus dimensiones debido a que el motor se encontrará sujeto a esta superficie, evitando así que se mueva. En lo que respecta a las curvas guía, se han empleado operaciones de Combine para obtener curvas que respetan un pequeño margen ( $\sim 7$  cm) con respecto a la apertura mínima estipulada.

Tras llevar a cabo esta operación, se ha realizado una operación de Split para ajustar un poco las medidas del monocasco, ya que la parte superior se encontraba un poco más elevada de lo que le gustaría al autor. Además, cabe comentar que la parte trasera del monocasco se ha extendido 15 cm, para así poder conectar el arco antivuelco con el monocasco.

Con esto, se procede al modelado del propio habitáculo. Para realizar dicho proceso, ha sido necesario tomar como referencia las proporciones y medidas de una persona, para evitar que el habitáculo este muy estrecho o demasiado espacioso. Para ello, como se ha comentado previamente, CATIA tiene implementado un módulo conocido como 'Ergonomics Design and Analysis', que, como su nombre indica, permite el diseño y el análisis de piezas o estructuras desde el punto de vista de la ergonomía. En concreto, la pestaña de *Human Builder* permite implementar un maniquí y ajustar su posición.

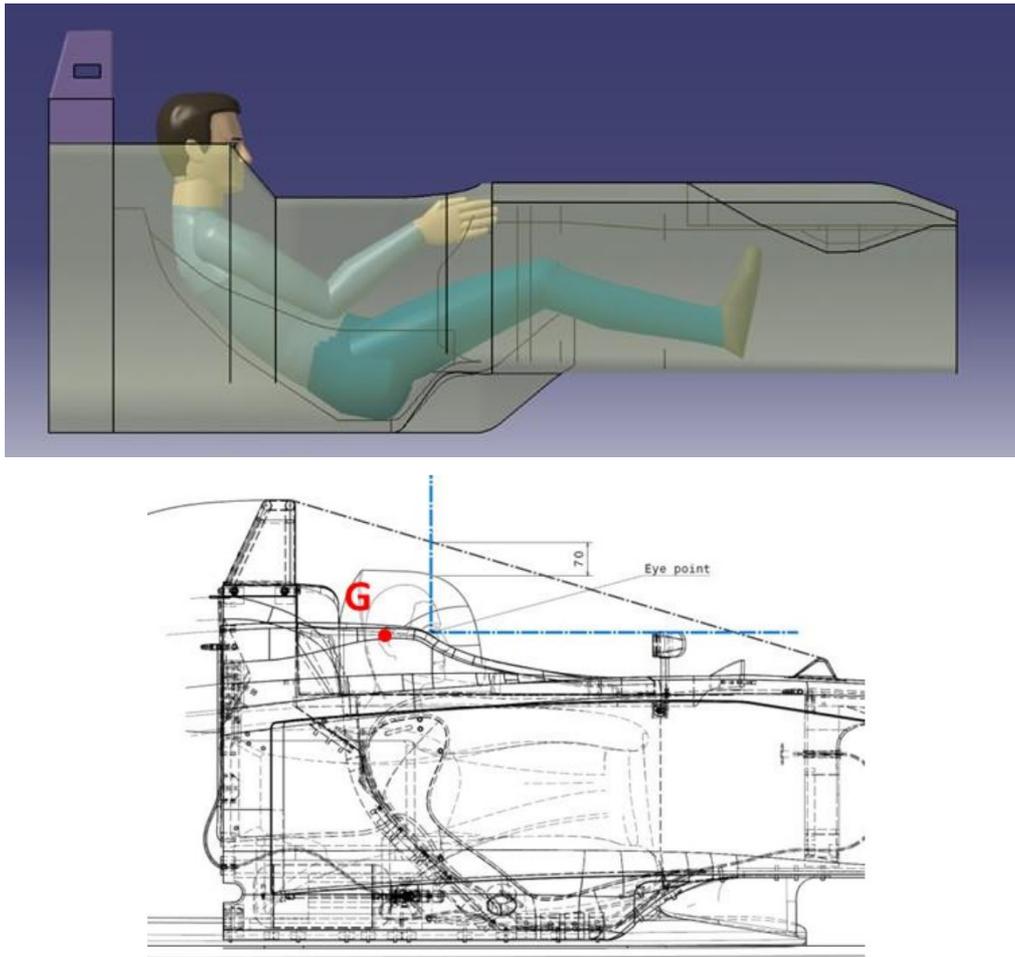


Figura 4-6. Maniquí disponible en CATIA ajustado en el monocasco. Para ello, se ha empleado como referencia los manuales del usuario de otros monoplazas de F4. Estos manuales recomiendan que, visto desde el perfil, el ojo sea visible. En la imagen de abajo se muestra un esquema de la posición del piloto, disponible en el manual de usuario del monoplaza de F4 de Mygale

Con el maniquí ya ajustado en su posición aproximada se procede con modelado del habitáculo. En primer lugar, la superficie lateral de la pieza que se ha modelado primero a la hora de realizar el monocasco se ha extendido hacia abajo mediante operaciones de Sweep, para que se puedan utilizar como las paredes laterales del interior del habitáculo. Con ello, se han llevado a cabo varias operaciones de Split para ir recortando esta superficie lateral hasta que haga las veces de paredes laterales.

Posteriormente, observando fotografías de otros monocascos, se ha concluido que es necesario añadir algo de material en los laterales, para que el piloto no se mueva lateralmente al tomar curvas, y en la espalda del piloto, para que este se encuentre un poco más adelantado y que pueda alcanzar el volante, además de que así el reposacabezas se encuentra sobre una superficie plana. Para modelar estas superficies auxiliares, se han ido generando superficies con operaciones de Extrude, para poder ir recortándolas mediante operaciones de Split y así darle forma al habitáculo.

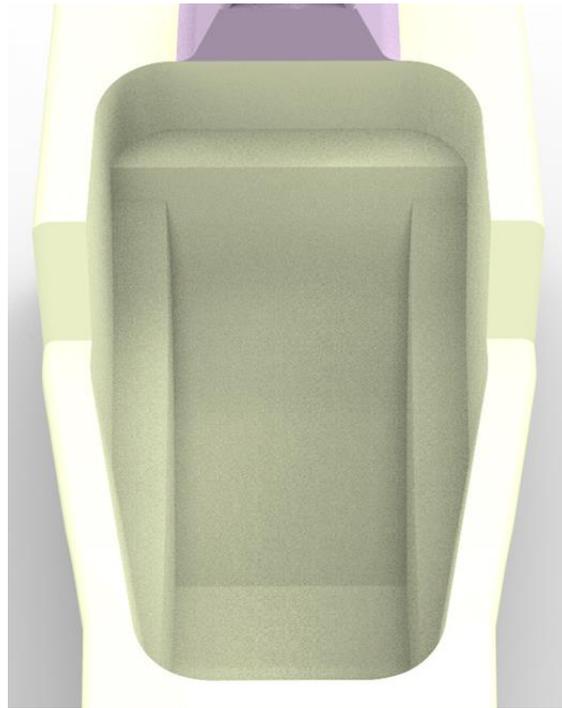


Figura 4-7. Detalle del interior del habitáculo

Tras ello, se ha modelado la superficie interior de la parte delantera del monocasco, permitiendo así a nuestro 'piloto' que pueda poner sus piernas y utilizar los pedales. Para ello, la normativa establece unas dimensiones mínimas que ha de tener dicho espacio a la altura de las piernas y las rodillas. Con esto en mente, se ha modelado dicho volumen mínimo, para poder desarrollar una superficie a partir de éste. En primer lugar, este volumen se ha modelado como una pieza sólida, empleando dos operaciones de Pad y una operación de Multi-Section Solid para unir las dos partes que conforman dicho sólido. Esta operación de Multi-Section Solid es el equivalente para elementos sólidos del Multi-Section Surface que se ha empleado en el módulo de Generative Shape Design.

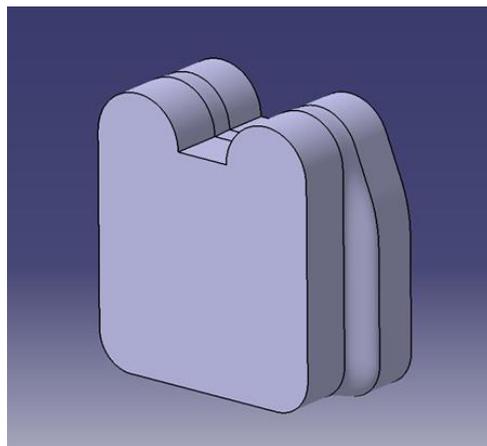


Figura 4-8. Volumen mínimo que se debe reservar para alojar las rodillas y las piernas del piloto

Sin embargo, como este monocasco se ha modelado con superficies, ha sido necesario rehacer la superficie externa de este sólido previamente mencionado. Para ello, se ha llevado a cabo el proceso análogo: dos operaciones de Extrude en este caso más una de Multi-Section Surface, para unir ambas partes.

A partir de ahí, como la FIA no especifica más medidas, el resto del modelado consiste en intentar adaptarse lo

mejor posible a las medidas de la parte externa del monocasco. Además, esta tarea se ha complicado bastante debido a la ausencia de material de referencia, como fotografías, además de que los modelos 3D que se han empleado para otras piezas no reflejan bien la realidad en esta parte, ya que es una parte que muy rara vez se ve en los simuladores. Con ello, se ha generado una superficie a partir de la sección final del sólido previamente modelado, mediante una operación de Extrude, hasta alcanzar la altura en la que comienza la sección en la que se alojan los componentes de la suspensión delantera. A partir de ahí, y hasta terminar el monocasco se ha empleado una sección con la misma forma que la sección externa del monocasco, pero con un tamaño algo menor para ganar margen y ‘simular’ que se está trabajando con un material que tiene un grosor no despreciable.

Tras importar esta superficie interna generada en el modelado del monocasco, se ha realizado una operación de Trim adicional, para poder realizar la apertura para que el piloto pueda poner las piernas en esta sección modelada. Hay que comentar también que, debido a que esta sección interna ha cortado un poco la parte en la que se alojan los *rocker* de la suspensión, se han vuelto a cubrir estas zonas con operaciones de Fill. Con ello, ya se ha modelado la sección interna de la parte delantera del monocasco.

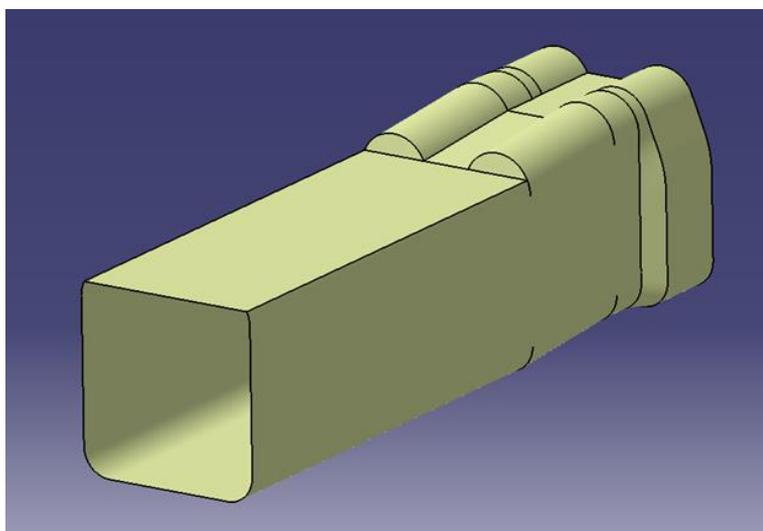


Figura 4-9. Superficie interna de la parte delantera del monocasco

Después, se ha modelado la sección del monocasco que alojará al extintor de incendios. Este extintor se encuentra situado debajo de las piernas del piloto, lo que permite minimizar la longitud de los conductos a utilizar para llevar el agente extintor al habitáculo.

Para modelar esta sección, se ha llevado a cabo una operación de Sweep. Esta operación permite crear una superficie a partir de una curva con mayor libertad que con un Extrude, por ejemplo, ya que las curvas guía no tienen que ser rectas, y las secciones transversales no tienen que ser constantes. Como curva de referencia se ha tomado una sección del contorno externo de la parte central del monocasco. Se ha tomado esta decisión para intentar hacer esta parte lo más aerodinámicamente eficiente posible. Tras esto, se ha realizado una operación de Symmetry, para tener modelado el otro lateral. A continuación, se modela la sección central. Para ello, se ha realizado una operación de Multi-Section Surface, aprovechando como curvas guía los lados libres de las superficies previamente modeladas.

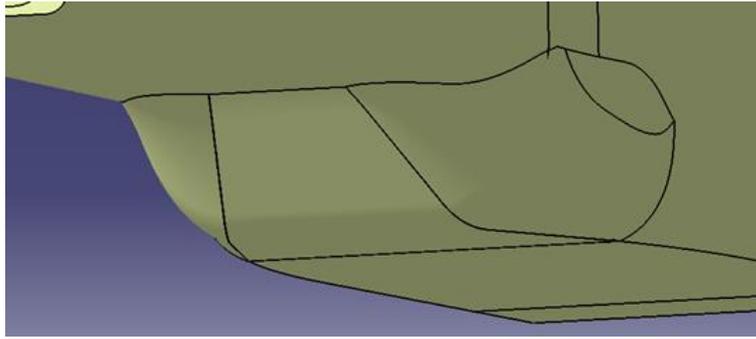


Figura 4-10. Primera versión de la superficie que aloja el extintor de incendios

Sin embargo, ya con el proyecto más avanzado, modelando los componentes que forman parte del sistema aerodinámico, se le ha dado otra vuelta de tuerca a esta sección, ya que el resultado no había sido del todo satisfactorio, debido a que dificultaba mucho el modelado del *splitter*, elemento que permite reconducir el aire que se encuentra por debajo del monoplaza. Con ello, pensando que un buen y sencillo modelado del *splitter* ya podría garantizar un diseño correcto desde el punto de vista de la eficiencia aerodinámica, se ha decidido modelar esta parte del monocasco de forma que se encuentre dentro de dicho componente aerodinámico. Para ello, se han remodelado los laterales, con operaciones más sencillas (Extrude y Split), obteniéndose así la forma que se muestra en la siguiente imagen.

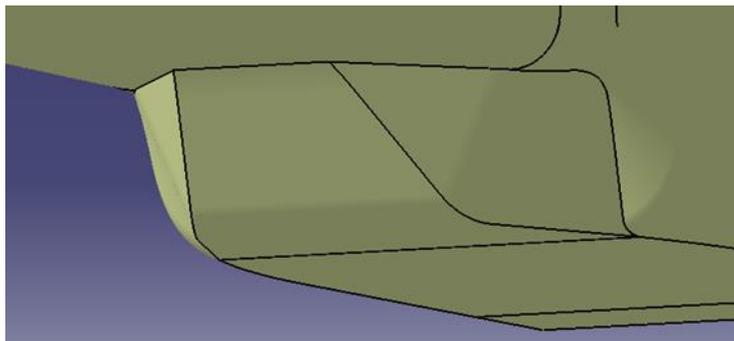


Figura 4-11. Versión final de la superficie que aloja el extintor de incendios

Por último, se han realizado un par de ajustes al monocasco. En primer lugar, se ha cerrado la parte delantera del monocasco mediante una operación de Fill. El realizar esta operación es equivalente a modelar el panel que protege las piernas del piloto frente a objetos que puedan penetrar en el monocasco por esta sección (en inglés, esta placa se conoce como Frontal Anti Intrusion Panel). Este panel, sin embargo, permite el modelado de agujeros, siempre que no se supere un área máxima de superficie cortada. Con esto en mente, se realiza un taladro por el cual puede pasar uno de los componentes que conforman la cremallera de dirección, la pieza que conecta dicha cremallera a la junta cardán.

Además, en la parte superior, es necesario llevar a cabo otro corte, para que la junta cardán se pueda mover libremente. Para ello, se realiza una operación de Extrude a una sección previamente trazada. Con esta superficie creada, se lleva a cabo una operación de Trim entre el monocasco y dicha superficie, para generar así el agujero necesario. Es preciso comentar que esta pieza no supone un riesgo para el piloto en caso de accidente, ya que se encuentra por detrás de los pedales. Además, la barra de dirección está equipada por un sistema de absorción de impactos, de forma que sea este elemento el que colapse antes en caso de impacto, evitando que el resto de los elementos se desplacen y puedan poner en riesgo la integridad física del piloto.

Con todo ello, se tiene modelado el monocasco, elemento que se muestra a continuación.

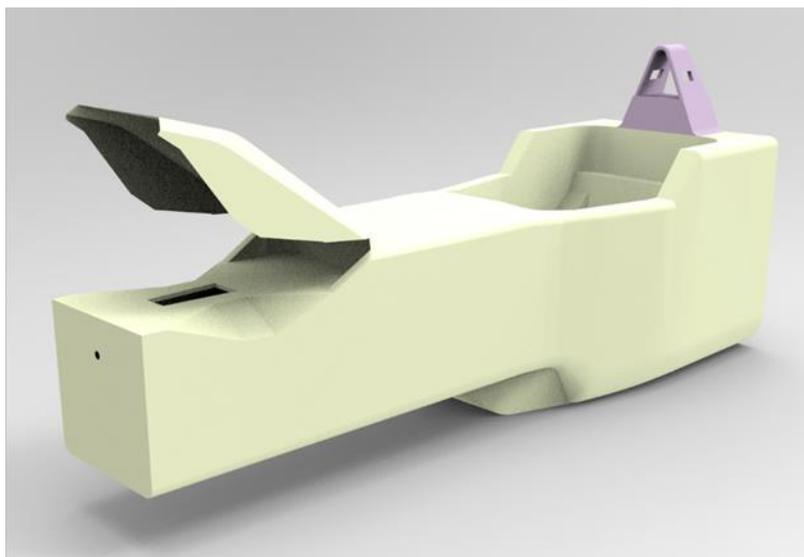


Figura 4-12. Modelo 3D del monocasco

## 4.2. Sistema de suspensión

En este apartado se detallará el proceso de modelado de los distintos elementos que conforman principalmente los sistemas de suspensión y frenado que tiene el monoplaza.

### 4.2.1. Ruedas

Para modelar el conjunto neumático y llanta delanteros, primero se ha comenzado modelando la llanta. Para ello, se ha modelado la sección transversal de la llanta, realizando el modelo mediante una operación de Shaft. La sección transversal que se ha utilizado ha sido una ligera modificación de una llanta de aluminio de la marca OZ que se utiliza en Formula Student, una competición ingenieril a nivel universitario. El hecho de escoger esta llanta es porque coincidía el diámetro de la llanta (13”), siendo necesario eso sí variar la profundidad de la llanta para adaptarlo al monoplaza de Formula 4 (aumentándola de 6” a 8”). Además, OZ proporciona un dibujo de esta sección transversal requerida con las medidas necesarias, pudiendo así realizar el sketch. Se ha comprobado también con llantas de otras marcas utilizadas por los campeonatos de F4, como EVO Corse, que la sección transversal tiene una forma muy similar entre distintas marcas de llantas.

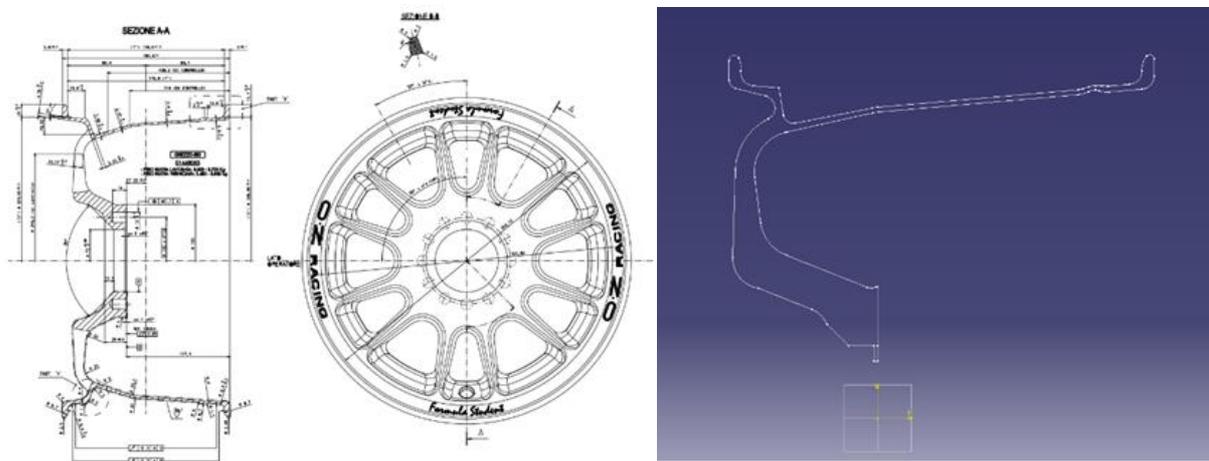


Figura 4-13. Plano de las llantas OZ utilizadas como referencia (izquierda) y curva generatriz de la llanta representada en CATIA V5 (derecha)

Una vez realizado el Shaft para modelar la llanta, se procede con el modelado del neumático. Para ello, se ha tenido que buscar información sobre el diámetro y el ancho del propio neumático. El ancho se tiene que encontrar dentro de un rango definido en el punto 12.3 de la normativa técnica de los F4. Para el diámetro, se han buscado medidas de los monoplazas utilizados en distintos campeonatos, siendo la página web del campeonato de Fórmula 4 de los Emiratos Árabes Unidos el que proporcionaba la información más detallada para ello. Con ello, se ha realizado otro Sketch y posteriormente se ha llevado a cabo otra operación de Shaft. De este Sketch cabe destacar que se han dejado un par de milímetros de distancia entre llanta y neumático para que se pueda apreciar que hay dos elementos separados, ya que, sin esta distancia, los dos Shaft aparecen fusionados.

Con esto hecho, se han procedido a realizar los radios de las llantas. La normativa estipula en el artículo 12.3.4 que la llanta debe tener 12 radios. Afortunadamente, las llantas de OZ que se han utilizado como referencia tienen el número de radios adecuado. Con ello, se han realizado dos secciones transversales: una en la parte frontal y otra en la parte trasera de la llanta; y se realizó un Removed Multi-Section Solid. Con ello, se obtiene la forma definitiva de la llanta que se observa a continuación.

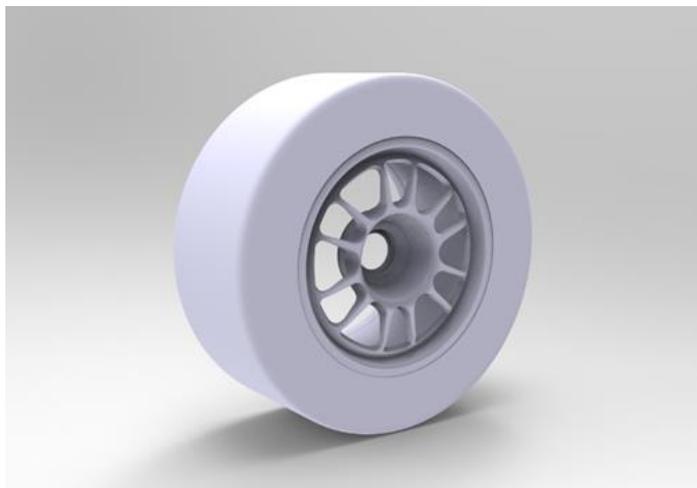


Figura 4-14. Modelo 3D de la rueda delantera

Para las ruedas traseras, el procedimiento a seguir ha sido el mismo. La mayor diferencia está en que las ruedas traseras tienen un mayor ancho que las delanteras, como se indica en el punto 12.3 de la normativa técnica antes mencionado. Por ello, ha sido necesario aumentar el ancho tanto de la llanta como de la rueda en 2", teniendo así llantas de 10x13". Esto también coincide con las llantas que usan los coches de F4 más comunes, como el Tatuus F4-T021 y el Mygale Formula 4 2nd Gen.

#### 4.2.2. Disco de freno

En cuanto al disco de freno, se ha partido del Drawing 1.8 de la normativa técnica del monoplaza de F4 de 1ª generación, para posteriormente realizar las modificaciones necesarias. En este caso, lo único que varía entre el monoplaza de 1ª y 2ª generación es el espesor del disco, ya que hay una reducción de 2 mm con el cambio de generación para un disco de freno nuevo, pasando de 20 mm a 18 mm de espesor. Con ello, para realizar el modelo 3D, se ha dibujado la sección transversal representada en el dibujo antes mencionado, y se ha realizado un Shaft. Una vez realizado esto, se han realizado los distintos agujeros por los que pasa la tornillería necesaria. Se ha realizado una operación de Hole a uno de los agujeros, y el resto se han realizado con varios Circular Pattern. El agujero que queda, que tiene un chaflán, se ha realizado con otra operación de Hole.

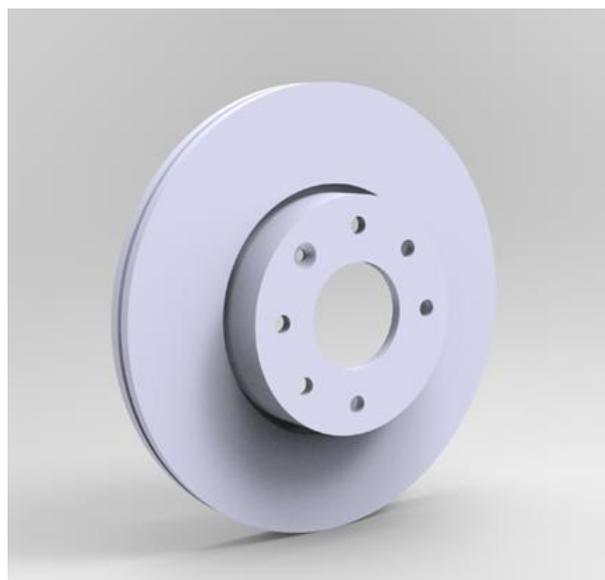
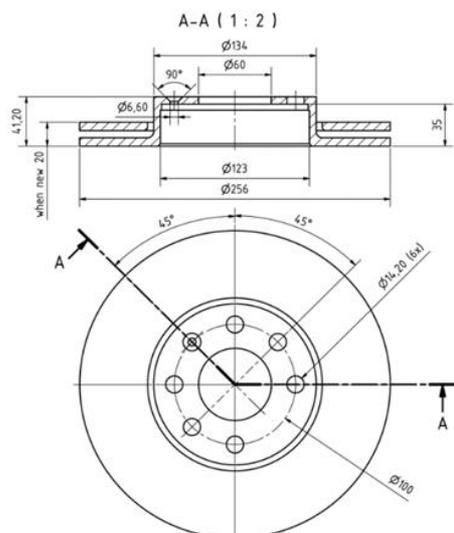


Figura 4-15. Drawing 1.8, referente a las dimensiones del disco de freno (izquierda) y modelo 3D del disco de freno (derecha)

### 4.2.3. Pinzas de freno

En cuanto al modelado de las pinzas de freno, se ha decidido tomar como referencia un modelo ya existente en el mercado. Para elegir dicho modelo, es importante tener en cuenta que la normativa impone una limitación acerca del número de pistones actuadores que pueden tener las pinzas de freno: para las ruedas delanteras, debe haber 4 pistones en total; mientras que, para las ruedas traseras, debe haber entre 2 y 4 pistones en total. Con ello, se ha escogido utilizar como referencia las pinzas Brembo XA6L611, pinzas que cuentan con dos pistones, cumpliendo así con los requisitos impuestos. Además, este mismo modelo ya se emplea en varios tipos de monoplaza, incluyendo ya algunos modelos de F4 de a generación anterior.

Para realizar el modelado en CATIA, se ha comenzado trazando la sección transversal del cuerpo principal de la pinza, para posteriormente someterla a una operación de Pad. Tras esto, se han modelado los pistones, empleando para ello una operación de Shaft, operación realizada después de trazar su generatriz; así como una operación de Mirror para tener el pistón necesario al otro lado de la pinza.

Posteriormente, se ha modelado la sección hueca central donde van alojadas las pastillas de freno. Para ello, se ha empleado una operación de Pocket. Tras realizar este Pocket, se ha llevado a cabo una operación de Slot, con el fin de generar el espacio necesario para alojar el disco de freno. Para realizar esta operación, ha sido necesario crear una generatriz, trazada como un rectángulo, así como una curva guía, siendo esta una circunferencia.

Tras realizar esto, solo quedan por modelar las pastillas de freno. Se han tomado como referencia unas pastillas de freno de la misma marca Brembo compatibles con este modelo de pinza de referencia. Para modelar estos elementos, se ha trazado el contorno de su superficie transversal, para someterla posteriormente a una operación de Pad. Con este elemento modelado, se ha realizado otra operación de Mirror, para tener la otra pastilla de freno necesaria. Por último, se han realizado varios Edge Fillet para suavizar algunos bordes.

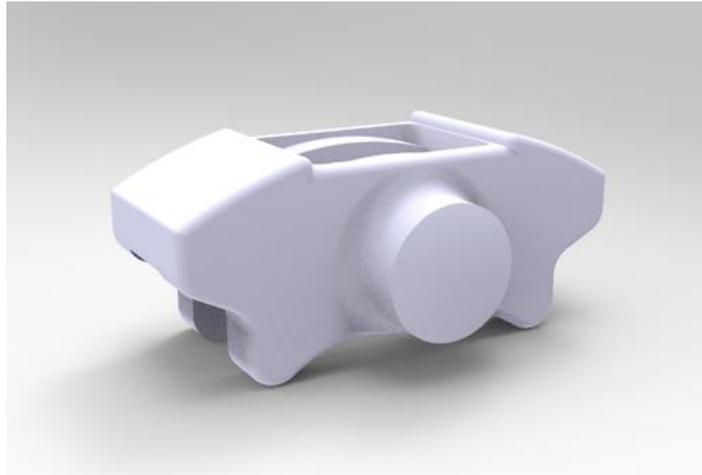


Figura 4-16. Modelo de pinza de freno creada en CATIA V5

#### 4.2.4. Buje

Para modelar el buje, elemento que permite a la rueda girar sobre un eje, se ha utilizado el Drawing 1.7 de la normativa del F4 de 1ª generación, el cual proporciona una vista frontal y una vista de una sección transversal de esta pieza. Primero se ha dibujado con un sketch la sección transversal que aparece en el Drawing 1.7b, para someterlo a una operación de Shaft. Una vez realizado esto, primero se ha realizado un Pocket a la parte intermedia para darle la forma triangular final. Posteriormente, se han realizado varios Pocket para rebajar material en las zonas indicadas en las imágenes. Una vez hecho esto, se han realizado los agujeros necesarios para que pase la tornillería adecuada, como se indica en los Drawing previamente mencionados.

Del buje cabe destacar también el modelado de la sección dentada interior. En la normativa de F4 de la generación pasada, estipula que esta parte dentada se corresponde con un Involute Spline ANSI B92.1, de la edición de 1970. Por tanto, para realizar esta parte dentada, ha sido necesario encontrar esta sección de la norma, y seguirla lo más a rajatabla posible.

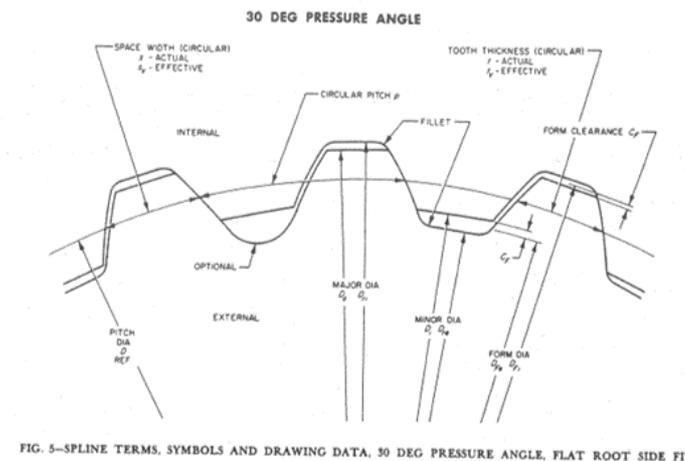


FIG. 5—SPINE TERMS, SYMBOLS AND DRAWING DATA, 30 DEG PRESSURE ANGLE, FLAT ROOT SIDE FIT

Figura 4-17. Spline ANSI B92.1. Los distintos valores que determinan la forma de este spline se encuentran tabulados en la misma norma

Una vez encontrado el punto adecuado, se procede con dicho modelado. En primer lugar, se ha empezado con los dientes que ‘entran’ en la pieza. Para ello, se ha trazado el contorno de un diente, con el fin de utilizar una operación de Pocket. Con esta operación realizada, se lleva a cabo un Circular Pattern, para poder tener modelados todos los dientes necesarios.

En el caso de los dientes que ‘salen’ de la pieza, el procedimiento es muy similar. En este caso eso sí, tras trazar el contorno de uno de los dientes, se ha realizado una operación de Pad. Finalmente, también se ha empleado un Circular Pattern para así poder finalizar el modelado de esta sección dentada, acorde al *spline* normalizado.

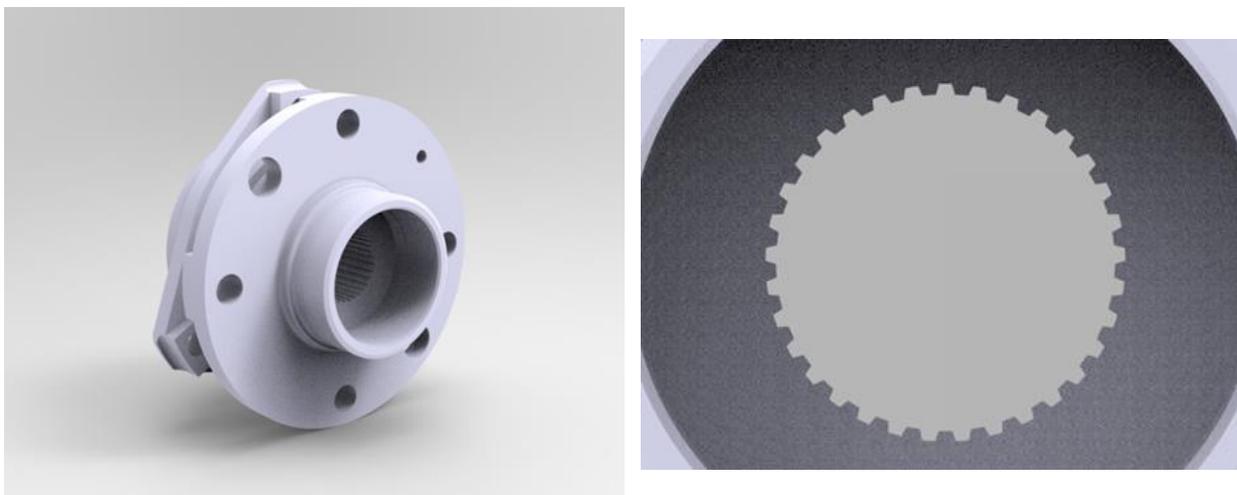


Figura 4-18. Modelo 3D del buje utilizado en este monoplaza (izquierda) y detalle de la sección interior dentada (derecha)

#### 4.2.5. Mangueta de dirección

Posteriormente se modeló la mangueta de dirección. Este elemento se encarga de contener el buje y conectarlo a los componentes de la dirección y de la suspensión. Este elemento, al contrario que los elementos que forman parte de la suspensión del monoplaza que se han detallado anteriormente, no tiene ningún punto de la normativa que rijan sus dimensiones u otras características. Se puede apreciar esta libertad de diseño si se observan las manguetas de dirección de monoplazas ya existentes. Por ello, como no se entra en más detalle (principalmente, el estudio de cargas que debe soportar este elemento) ni se ha logrado obtener material necesario para el modelado, se ha optado por realizar un modelo más sencillo, pero funcional, partiendo de un rectángulo.

Antes, se ha realizado una operación de Multiple Extract para obtener el contorno de la pieza triangular intermedia del buje. Esto se debe a que, tras ver varios modelos de mangueta, se ha llegado a la conclusión de que este elemento es el que atornilla a dicha mangueta. Con el contorno ya obtenido, se ha realizado un Pad de 20 mm. Posteriormente se ha dibujado la forma principal de la mangueta, que es la que se puede observar en la imagen. Una vez hecho esto, se ha realizado otro Pad de 30 mm.

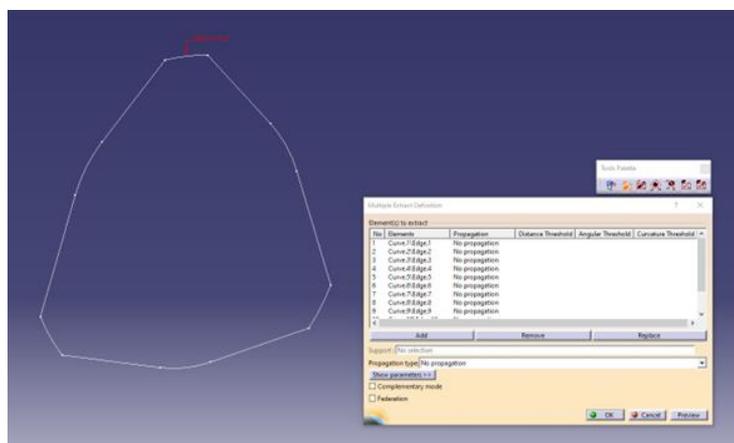


Figura 4-19. Operación de Multiple Extract

Tras realizar esto, se han modelado los agujeros por los cuales pasa la tornillería que mantiene sujetos el conjunto buje y mangueta, así como el agujero por el cual pasa parte del buje. Para ello, se han realizado varias operaciones de Hole.

Con esto hecho, se han modelado también las extensiones que permiten atornillar las pinzas de freno y la rótula de dirección a la mangueta. Finalmente, se han realizado varios Edge Fillet para embellecer la pieza.



Figura 4-20. Modelo 3D de la mangueta de dirección

#### 4.2.6. Rótula de dirección

Para modelar la rótula de dirección, elemento que se encarga de conectar la mangueta de dirección con la cremallera de dirección. Al igual que con la mangueta, si se observan modelos ya existentes en diversos monoplazas, no hay un único diseño de este elemento. Por tanto, para este modelo 3D, se ha decidido realizar una rótula similar al del monoplaza de F4 de la marca Mygale. El motivo de haber seleccionado esta referencia viene ligado a cómo se han modelado las propias barras de suspensión, por lo que se entrará más en detalle al hablar de estos componentes.

Con la decisión hecha, se ha partido de una forma triangular imitando a la pieza del monoplaza Mygale. Tras hacer el sketch, se ha realizado una operación de Pad de forma que la pieza tenga 25 mm de alto.

Una vez hecho esto, se han realizado varias operaciones de Pocket, para generar el espacio en el cual se encontrarán las cabezas de articulación de las barras de suspensión y de la cremallera de dirección. Tras realizar dichos Pocket, se han realizado dos agujeros pasantes mediante operaciones de Hole por los cuales pasarán los topes de las cabezas de articulación. Por último, se ha rebajado un poco más de material mediante otra operación de Pocket, y se han realizado varios Edge Fillet para eliminar las esquinas y hacer más estética la pieza.

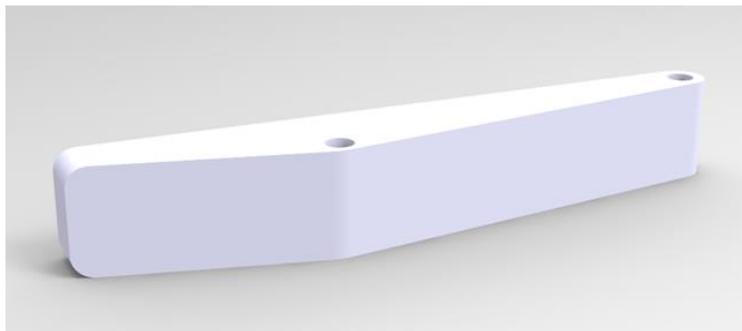


Figura 4-21. Modelo 3D de la rótula de dirección

#### 4.2.7. Barras de suspensión

En lo que respecta a las barras de suspensión, se ha comenzado dibujando unas líneas mediante la función Line, a partir de los puntos inicial y final, definidos mediante sus coordenadas X, Y y Z, para así tener la curva guía que se utilizará posteriormente. Después, se han generado planos auxiliares cuya normal coincide con cada línea generada en la operación previa, para poder trazar la sección transversal de las barras de suspensión. Para trazar las secciones transversales, se ha tenido en cuenta que en su interior deben contener los wheel tethers. En la normativa viene estipulado que este wheel tether debe tener un área transversal superior a 110 mm<sup>2</sup>, lo cual, si se supone que este elemento tiene una sección circular, implica que el radio mínimo que debe tener el brazo de suspensión es de 5'917 mm.

Con esto en mente, se modela la sección transversal. Para ello, observando fotografías de monoplazas de F4 ya existentes, se escoge una sección transversal de los brazos de suspensión con forma elíptica. Además, previendo que se llevarían a cabo bastantes cambios en las dimensiones de los ejes mayor y menor de la elipse, se ha decidido crear dos parámetros: uno para indicar la longitud del eje mayor y otro para indicar la relación de aspecto de la elipse, es decir, el cociente entre la longitud de los ejes mayor y menor.

Una vez realizada la sección transversal, para obtener la propia barra de suspensión, se realiza una operación de Extrude, utilizando también las líneas guía.

Después, se realiza una pequeña extensión de la barra de dirección para conectarlo con la cremallera de dirección. Para ello, se traza en un plano auxiliar cuya normal coincide con la dirección de la curva guía asociada a esta barra de dirección un círculo. Con ello, se lleva a cabo un Multi-Section Surface entre la sección transversal elíptica que se encuentra al final de la barra de dirección y la sección circular, teniendo para ello especial cuidado con la selección de los puntos de cierre (Closing Points) para evitar posibles torsiones en el modelo.

Por último, se unen estas dos superficies y se les realiza una operación de Thick Surface para pasar de superficies a sólidos.

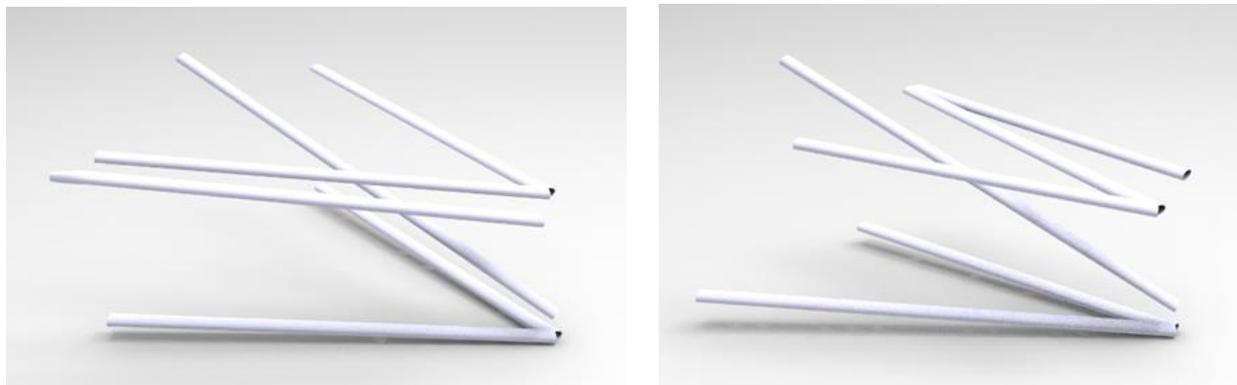


Figura 4-22. Modelo 3D de las barras de suspensión correspondientes a la rueda delantera izquierda (izquierda) y a la rueda trasera izquierda (derecha)

Antes de pasar a la siguiente pieza, es necesario explicar por qué las barras de suspensión atraviesan los elementos en los cuales se tendría que unir. Esto se debe a que se ha decidido no realizar estas uniones para no entrar en un nivel de detalle que no se tiene en otras piezas.

#### 4.2.8. Conjunto muelle más amortiguador

Para modelar estas piezas, se ha utilizado un set muelle + amortiguador existente en el mercado. Para este proyecto, se han empleado:

- Amortiguadores Koni 2612 Series
- Muelles Eibach F3 Short 40499

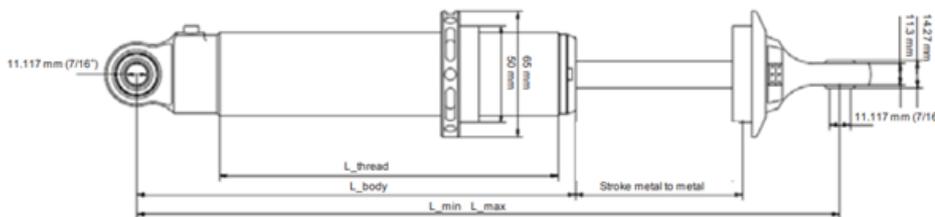


Figura 4-23. Esquema del amortiguador Koni 2612 Series. Algunos valores se encuentran tabulados en el catálogo de Koni

Para la parte del modelado del amortiguador, se ha decidido realizar un CATProduct compuesto por las distintas partes que conforman este (el cilindro, la barra y los topes), debido a que ha sido una pieza que ha sufrido bastantes modificaciones a la hora de montarlo en el monoplaza, además de que facilitó la tarea de modelar la suspensión trasera, al solo ser necesario crear un CATProduct nuevo con otro nombre.

Para el modelado del cilindro, una vez obtenidas las medidas necesarias gracias a la información ofrecida por el catálogo de Koni y al software AutoCAD para realizar el escalado de la imagen en planta de referencia para así obtener las medidas necesarias restantes, se ha realizado con ayuda de operaciones Pad, siendo necesario para ello realizar los sketches de las secciones transversales que lo requieran. Con esto realizado, se ha modelado también un agujero a través del cual irá la barra del amortiguador; y por último se ha realizado un Pocket para poder eliminar unos salientes existentes entre la rótula y el propio cilindro. Además, se han realizado dos Edge Fillet, para suavizar la unión entre la rótula y el cilindro.

Para el modelado de la barra, se ha realizado un Sketch con su sección transversal, sabiendo de antemano gracias a los datos proporcionados por Koni su longitud y diámetro, para después realizar una operación de Pad.

En cuanto al modelado de los topes, se han empleado operaciones de Shaft, ya que se tratan de piezas con paredes laterales inclinadas y con escalones, por tanto, se ha considerado que esta operación es la más adecuada. Para ello, se ha trazado el contorno de la mitad de la pieza vista como en la imagen proporcionada en el catálogo de Koni, para así generar el sólido rotando con respecto al eje X. Además, uno de los topes tiene una rótula, pieza que se ha modelado de forma análoga a la rótula que se tiene en el otro extremo del amortiguador.

Con todo esto, se procede al modelado del muelle. En primer lugar, se ha definido la curva guía que debe seguir la sección transversal del muelle. Para ello, se ha utilizado la función Helix del módulo de Generative Shape Design, ya que facilita este proceso. Con la curva guía ya definida, se traza la sección transversal del muelle, siendo este un círculo de 8 mm de diámetro.

Después, se ha realizado una operación de Sweep para modelar el propio muelle. Una vez hecho esto, para evitar que el muelle atravesase los topes, se han realizado cortes, mediante la operación de Split, entre el muelle y las superficies que delimitan los topes, consiguiendo así además una forma más similar a lo que se pueden encontrar en este tipo de muelles.

Con todo esto, se ha procedido a realizar algunas operaciones de Fill para cerrar superficies abiertas, y después, se ha realizado una operación de Close Surface para convertir el muelle en un sólido.

Así, se obtiene el conjunto muelle y amortiguador que se empleará para el monoplaza. Al tratarse de un Product, se ha podido poder una restricción de ángulo para controlar la orientación de las rótulas, punto importante a la hora de realizar el montaje del monoplaza completo, ya que no cualquier orientación permite montar el *rocker*, elemento que une y transmite el movimiento entre la barra de suspensión y el amortiguador.

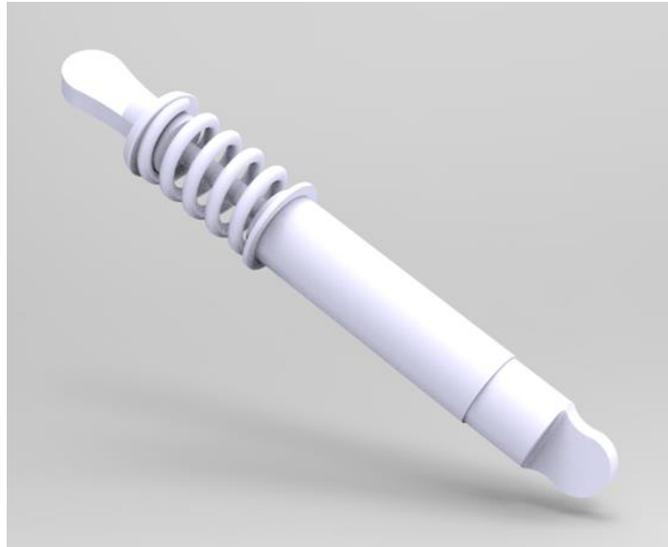


Figura 4-24. Modelo 3D del conjunto muelle y amortiguador

#### 4.2.9. *Rocker*

Para el modelado de esta pieza, se ha tomado como referencia visual *rockers* ya existentes en monoplazas de F4 y de categorías similares. Con ello, se han trazado dos sketches, uno con la sección transversal del propio elemento y otro con la sección transversal del pivote, y después se han realizado sendas operaciones de Pad, para obtener la pieza resultante.

Cabe destacar que al final ha sido necesario idear dos modelos de *rocker*, uno para la suspensión delantera y otro para la suspensión trasera, ya que para la parte trasera ha sido necesario un *rocker* más largo y estrecho. Para ello, se han modificado algunas restricciones del sketch, sin recurrir a la creación de parámetros para ello, ya que ha sido una modificación algo inesperada, y cuyo resultado se obtuvo tras realizar pocas variaciones.

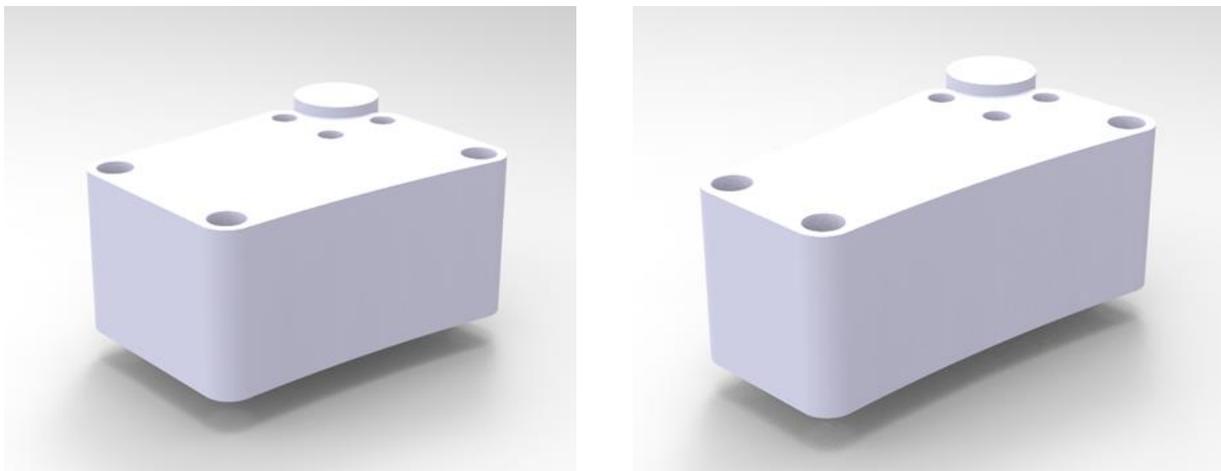


Figura 4-25. Rocker delantero (izquierda) y trasero (derecha)

#### 4.2.10. *Suspension link*

A continuación, se describe el modelado de la pieza que une la barra antivuelco con el *rocker*, y, por tanto, con el amortiguador y con la barra de suspensión. Para el caso de esta pieza, ya que se barajaba la posibilidad de que se iba a entrar en más detalle en la parte de uniones entre piezas, se han utilizado rótulas esféricas estándar que la distribuidora sueca SKF tenía en su catálogo, para no entrar también en el modelado de este tipo de piezas estandarizadas. Finalmente, no se ha entrado en ese nivel detalle, pero, debido a que esta pieza ya estaba modelada, se ha decidido no modificarla.

Con estas rótulas obtenidas, se ha creado un CATProduct para poder incluirlas. Además, la creación del CATProduct también permite un control más sencillo de la distancia entre rótulas, distancia que varía según se utilice para la suspensión delantera o trasera. Posteriormente, se ha creado otro CATPart, la barra que une estas dos rótulas. Esta pieza se ha creado con una operación de Pad, partiendo de su sección transversal, supuesta circular.



Figura 4-26. Modelo 3D del *suspension link*

#### 4.2.11. Barra antivuelco

La barra antivuelco es el elemento que permite reducir el balanceo del vehículo en curva rápida o en presencia de firme irregular. Para ello, conecta las dos ruedas (delanteras o traseras) a un muelle que trabaja a torsión, aumentando la rigidez de todo el conjunto. Además, esta pieza permite controlar en parte la rigidez de la suspensión, cambiando el comportamiento del monoplaza en las condiciones antes expuestas.

Para el modelado de esta pieza, se ha tomado como referencia visual modelos ya existentes en otros monoplazas de F4, destacando el monoplaza existente en el simulador de conducción iRacing. Esta pieza está compuesta por la barra que trabaja a torsión y por enganches, tanto al monoplaza, como al link previamente comentado. Se ha comenzado modelando estos enganches, mediante operaciones de Pad y partiendo de los sketches de sus secciones transversales.

Después, se ha realizado una operación de Mirror con respecto al plano de simetría del monoplaza para obtener el segundo set de enganches. Una vez realizado esto, se ha modelado la barra que los une mediante una operación de Pad. Finalmente, se han llevado a cabo varios Edge Fillet para suavizar los bordes.

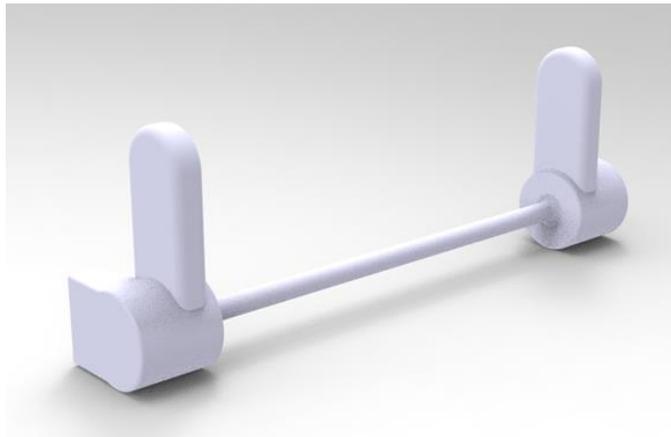


Figura 4-27. Modelo 3D de la barra antivuelco delantera

#### 4.2.12. Eje de la rueda

Es sobre este elemento sobre el cual se monta la rueda. Además, también sirve para mantener fija la tuerca, evitando que la rueda se desprenda. Para el modelado de este elemento, se ha usado como referencia modelos ya existentes en otros monoplazas. Además, para determinar las dimensiones de esta pieza, es de vital importancia tener en mente la tuerca que se empleará, para asegurar que los tamaños de estos dos elementos sean compatibles.

Con ello, en primer lugar, se ha modelado la sección plana de esta pieza mediante una operación de Shaft. Después, y aprovechando que ya está modelada la sección interior dentada del buje, se ha extraído este spline para someterlo a un Pad.

Posteriormente, se ha realizado un Pad a una sección circular para conectar los dos elementos previamente modelados. Por último, se ha trazado la generatriz del resto del eje, zona en la que irá posteriormente la tuerca. Con ello, se ha podido llevar a cabo una operación de Shaft para así tener completa esta pieza.

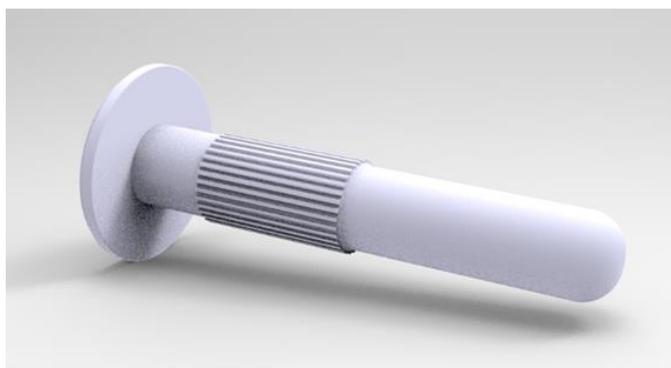


Figura 4-28. Modelo 3D del eje de la rueda

#### 4.2.13. Tuerca

Para la tuerca, se ha empleado un modelo ya existente en el mercado. En concreto, se ha utilizado una tuerca M24 de la empresa estadounidense McMaster-Carr. Para esta pieza cabe destacar que se ha escogido este tamaño para que sea concorde con las medidas del eje de la rueda.

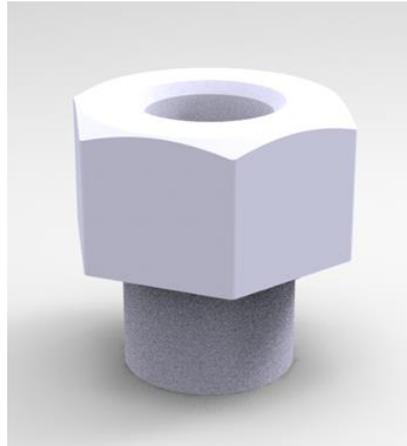


Figura 4-29. Modelo 3D de la tuerca

#### 4.2.14. *Nut bell*

Esta pieza, colocada entre la llanta y la tuerca, se utiliza con el objetivo de evitar el contacto directo entre tuerca y llanta, para evitar dañar esta última. Además, se emplea esta pieza para proporcionar una superficie plana sobre la cual se apoya la tuerca.

Para el modelado de esta pieza, primero se traza el contorno de la generatriz de la superficie plana, para someterlo a una operación de Shaft. Tras hacer eso, se repite el mismo proceso para la otra parte de la pieza.

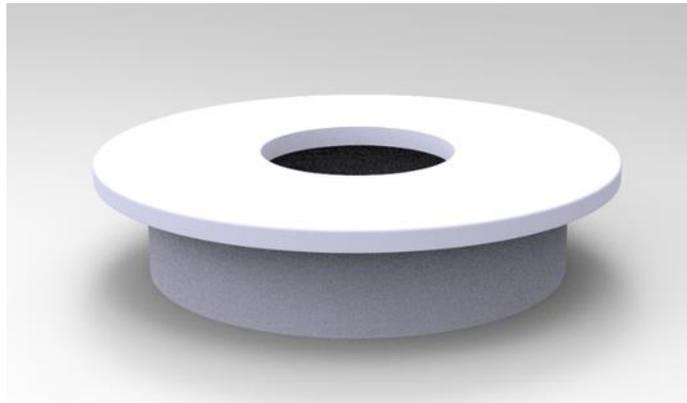


Figura 4-30. Modelo 3D de la *nut bell*

#### 4.2.15. Clip de seguridad

La normativa establece también que cada tuerca debe también tener un clip de seguridad, para evitar que se desprenda y provocar así la pérdida de una rueda. Para el modelado de esta pieza, se ha tomado como referencia clips que ya se utilizan en esta misma categoría.

En primer lugar, se traza la curva guía que debe seguir una sección transversal de esta pieza. Posteriormente, en un plano perpendicular a esta curva guía, se dibuja la sección transversal, supuesta circular. Tras esto, se lleva a cabo una operación de Sweep para tener la superficie del clip de seguridad. Por último, tras unir esta superficie con otras dos al comienzo y al final de la pieza, creadas mediante la operación de Fill, con la operación de Join, se lleva a cabo un Close Surface para obtener una pieza sólida.



Figura 4-31. Modelo 3D del clip de seguridad

### 4.3. Aerodinámica y carrocería

A continuación, se detallará el proceso de modelado de los distintos componentes que forman parte de la carrocería y del paquete aerodinámico del monoplaza.

#### 4.3.1. Morro y alerón delantero

En cuanto al diseño de la parte frontal del monoplaza, se tiene la parte correspondiente al morro y la parte correspondiente al alerón delantero.

En la normativa FIA utilizada, el morro del monoplaza se clasifica como una ‘impact absorbing structure’ (estructura de absorción de impactos en español). En concreto para el morro, los artículos 3.4.1 y 15.5.5 define las características y dimensiones a cumplir por este componente.

- De perfil, ningún punto puede superar las siguientes líneas:
  - Una línea horizontal que va desde el plano D-D (plano paralelo a C-C situado 50 mm por detrás del punto más adelantado del morro) a un punto 1200 mm por delante del eje delantero, y que se encuentra a 200 mm de altura.
  - Una línea que une la intersección de la línea antes descrita con el plano D-D y un punto situado en A-A a 580 mm de altura sobre el RP.
- No puede haber parte de esta estructura situada a una altura superior a los 580 mm del plano de referencia.
- El punto más adelantado tiene que estar como mínimo a 1150 mm del eje delantero.
- La sección vertical en el plano D-D debe tener un área superior a los 9000 mm<sup>2</sup>. Además, ningún punto de dicha sección debe estar por debajo de los 130 mm de altura con respecto al RP, y su anchura no puede ser superior a los 155 mm.
- La sección vertical en el plano E-E (plano situado a C-C situado 150 mm por detrás del punto más adelantado del morro) debe tener un área superior a los 20000 mm<sup>2</sup>. La anchura de esta sección debe ser inferior a 330 mm.
- Además, las secciones de los planos E-E y A-A deben estar unidas por líneas rectas.

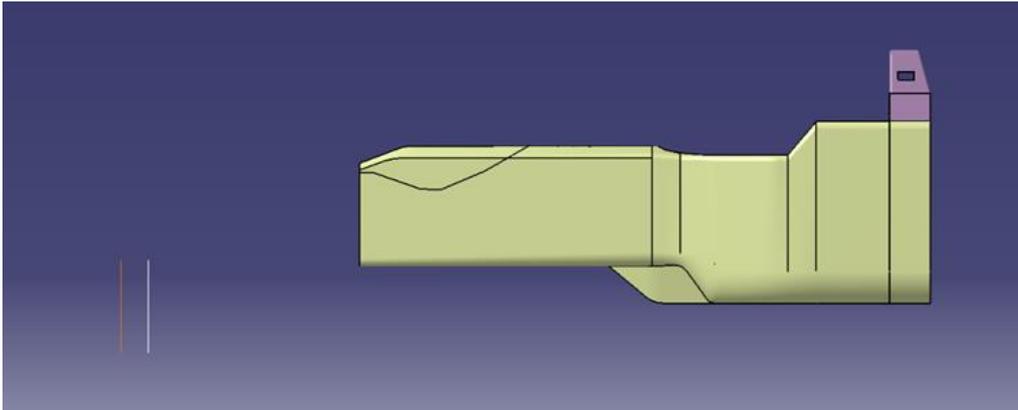


Figura 4-32. Planos D-D (indicado en naranja) y E-E indicado en blanco

Para modelar el morro, se han dibujado las secciones transversales en los planos D-D y E-E, además de trazar curvas guía mediante el comando Line, uniendo un punto de cada sección transversal. Luego, para crear la superficie, se ha elaborado un Multi-Section Surface.

Posteriormente se modela la punta del morro. Para ello, se ha aprovechado la sección final de la superficie previamente generada y, además, se han trazado dos sketches que servirán como curvas guía. Tras ello, se ha realizado una operación de Sweep para obtener dicha punta del morro. Por último, al haber quedado una pequeña zona abierta al final de este elemento, se ha cerrado mediante una operación de Fill.

En cuanto al modelado del alerón delantero, se han seguido los artículos de la normativa recogidos en el punto 3.3. En el apartado 3.3.1, se estipulan unas dimensiones que el alerón delantero no puede superar. Esta 'caja permitida' resultante se ha modelado también en CATIA, en el CADPart correspondiente a la célula de supervivencia (Extrude.1). Para ello, se ha dibujado el rectángulo que determina los límites de altura largo y se ha extruido hasta llegar a los límites laterales.

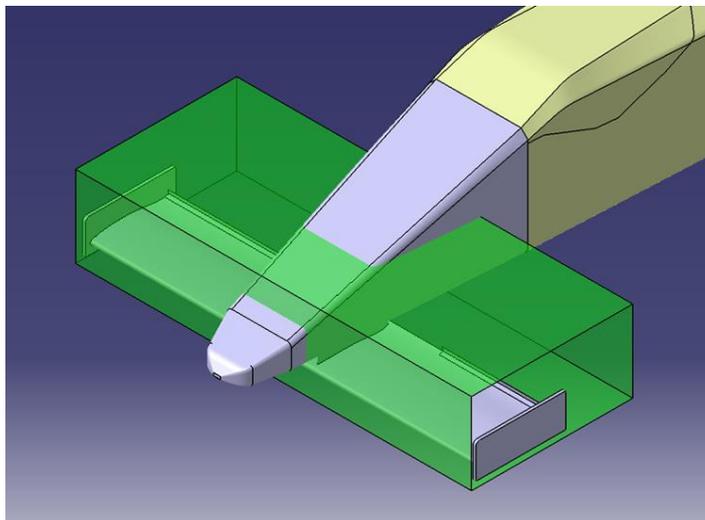


Figura 4-33. Volumen en el que se puede encontrar el alerón delantero

El alerón delantero está compuesto por un plano principal y unos endplates, situados a los laterales de este plano. Además, el alerón delantero puede también llevar unos apéndices conocidos como flaps Gurney. Estos apéndices, cuyas dimensiones también están limitadas en la normativa, en el punto 3.3.5, permiten obtener más carga aerodinámica y retrasar el desprendimiento de la capa límite.



Figura 4-34. Detalle de un alerón con un Gurney Flap equipado. Este elemento, cuya sección transversal típica tiene forma de L, se coloca en el borde de salida del ala

Para modelar la parte principal del alerón, como se ha comentado previamente, se ha tenido que importar la ristra de puntos que determina las dimensiones del perfil en 2D. Para ello, se ha utilizado la herramienta Microsoft Excel y una macro que permite importar un perfil aerodinámico determinado por las coordenadas en 2D de sus puntos en CATIA. Habiendo importado el perfil en CATIA, la curva generada se ha cerrado con una línea que une los dos puntos que han permanecido abiertos.

Una vez obtenido el perfil, con un Extrude que genere un ala de 1370 mm de ancho (685 mm desde el plano de simetría del monoplaza hasta el final del ala) se obtiene el plano principal. En los extremos del ala se ha modelado el endplate del alerón. El punto 3.3.4 recoge las dimensiones y forma que debe tener dicho elemento:

- El endplate se tiene que encontrar entre 685 mm y 700 mm de distancia del plano de simetría del monoplaza.
- Tiene que estar entre 430 mm y 1000 mm por delante del eje delantero.
- Tiene que estar entre 500 mm y 340 mm sobre el plano de referencia.
- El endplate tiene que ser una superficie plana y paralela al plano de simetría. Además, tiene que incluir una superficie plana y rectangular de mínimo 300 mm de longitud y 100 mm de altura. Esta superficie rectangular es la que va sujeta al extremo del ala principal.
- Además, para evitar posibles pinchazos en caso de contacto, cualquier superficie que se encuentre por delante del eje delantero debe tener un grosor mínimo de 10 mm, y tener puntas redondeadas con un radio mínimo de 5 mm.

Siguiendo estas normas, se ha dibujado la sección transversal del endplate. Para darle espesor, se ha realizado un Extrude de 10 mm y posteriormente un Fill para cerrar el endplate.

En cuanto a los Gurney flaps, como se comentó anteriormente, existen limitaciones en cuanto a sus dimensiones, recogidas en el punto 3.3.5. En este apartado, se estipula que este apéndice se coloca en los 15 primeros mm del borde de salida del ala y la altura máxima es de también 15 mm. Con ello, se ha modelado una tira de 400 mm de longitud, trazando su sección transversal y realizando una operación de Extrude.

Por último, se han modelado los elementos encargados de unir el alerón delantero con el morro. Para ello, se ha trazado su sección transversal, planteada como una sección fuselada en forma elíptica. Después, se ha llevado a cabo una operación de Extrude, buscando sobrepasar tanto la superficie del morro como la del alerón. Además, para obtener el otro elemento, se ha realizado una operación de Symmetry.

Una vez obtenida esta superficie lateral, se llevan a cabo dos operaciones de Split, para que este elemento no penetre en la superficie del morro ni en la del alerón delantero. Finalmente, para convertir el conjunto de morro

y alerón delantero a un objeto sólido, se han llevado a cabo operaciones de Thick Surface a las distintas superficies generadas en los pasos previos.

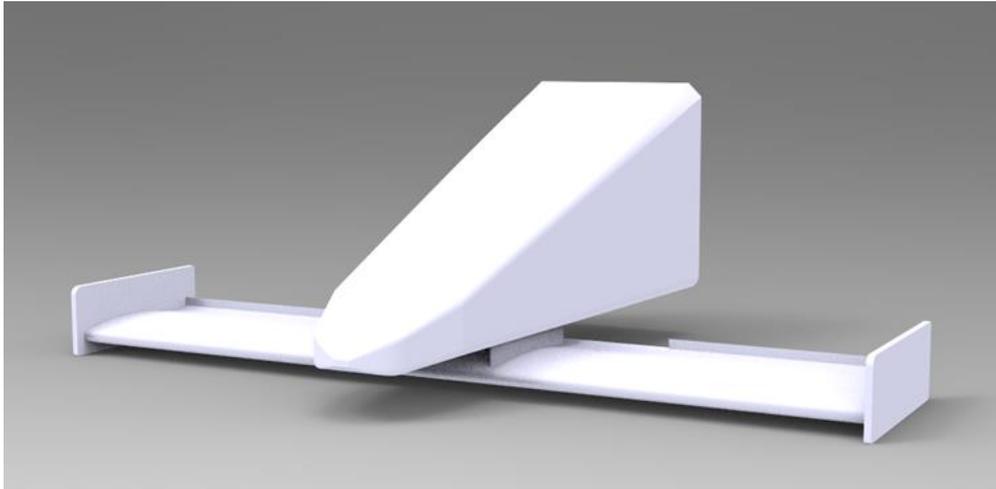


Figura 4-35. Modelo 3D del conjunto formado por el morro y el alerón delantero

#### 4.3.2. Alerón trasero

Para el modelado del alerón trasero, se ha llevado a cabo un proceso similar al modelado del alerón delantero. El apartado 3.6 de la normativa técnica es la que rige la posición y dimensiones de los flaps y endplates del alerón trasero. En lo que a los flaps respecta, el apartado antes mencionado estipula que cualquier parte de la carrocería situada por detrás de un punto situado a 150 mm detrás del eje trasero no puede incorporar más de dos secciones aerodinámicas. También concreta que el flap que se sitúa en un punto de altura superior a los 525 mm sobre el plano de referencia debe tener el perfil aerodinámico especificado en el Drawing 5; mientras que para el flap situado a una altura inferior a esos 525 mm, el perfil a utilizar es el del Drawing 6.

Para poder terminar de ubicar estos flaps, se ha modelado antes los endplates que delimitan el alerón trasero, ya que sus dimensiones y posición se encuentran más restringidas por el artículo 3.6.3. En concreto, el subapartado a delimita un área proyectada mínima que este endplate debe tener, siendo este de 196000 mm<sup>2</sup>. Los subapartados b y c delimitan las líneas diagonales que el endplate no puede superar; mientras que el subapartado d delimita el ancho del endplate, ya que no puede haber ninguna parte de dicho elemento que se sitúe a menos de 440 mm del plano de simetría del monoplaza.

Con ello, y también siguiendo la tendencia de los F4 actuales desarrollados, el endplate se ha modelado partiendo del siguiente sketch y realizando una operación de Extrude del módulo de GSD, llenando los extremos vacíos con operaciones de Fill. Con esto modelado, se han podido modelar los flaps. Para ello, se ha importado el perfil aerodinámico a CATIA con ayuda de las macros de Excel utilizadas también para el flap del alerón delantero, y posteriormente se ha ubicado en una posición adecuada con operaciones de Symmetry y Translate. Una vez ubicado el perfil, se ha realizado una operación de Extrude hasta llegar al extremo del endplate previamente modelado, obteniendo así el modelo final del alerón.

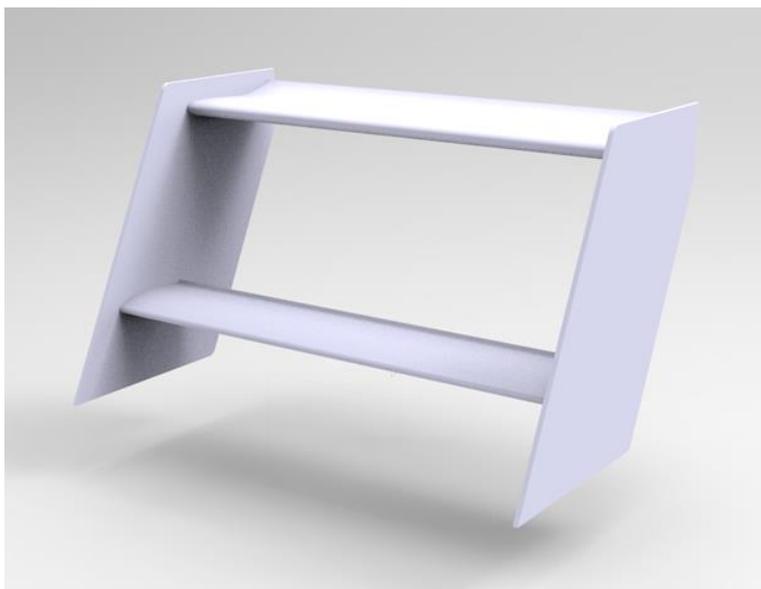


Figura 4-36. Modelo 3D del alerón trasero

#### 4.3.3. Estructura trasera de impacto (*Rear Impact Structure o RIS*)

La FIA obliga a los monoplaças a incluir una estructura de absorción de impactos situada detrás de la caja de cambios del monoplaça, de forma similar a la que exige otra estructura con la misma fusión en la parte delantera. Esta RIS también está sometida a limitaciones de geometría y dimensiones, recogidas bajo el punto 15.5.2 de la normativa técnica. El artículo estipula que la parte más atrasada de esta estructura se tiene que encontrar entre los puntos situados a 680 mm y 830 mm por detrás del eje trasero. Para el modelo presentado se ha elegido que esta parte se encuentre a 830 mm del eje. Además, el mismo artículo define la forma que debe tener esta cara posterior, teniendo que formar un rectángulo de mínimo 100x130 mm con vértices redondeados con una curva de radio máximo de 100 mm. Además, este rectángulo se tiene que situar a una altura entre 170 mm y 360 mm sobre el plano de referencia. Con ello, el rectángulo tiene las siguientes dimensiones.

Cabe destacar que esta cara rectangular se suele aprovechar para colocar una de las luces traseras que debe tener el monoplaça (las otras colocándose en el borde del endplate. El artículo 14.5 es el que estipula las dimensiones de las luces traseras. Teniendo esto en cuenta, el sketch anteriormente presentado no cumple la normativa, ya que el punto en el que se realizan las distintas mediciones de la luz trasera (el punto central del área que delimita esta luz) se encontraría 30 mm por debajo de lo requerido. Con ello, se ha tenido que realizar una modificación posterior a esta estructura, subiendo el sketch del rectángulo posterior esos 30 mm requeridos. Con ello se siguen cumpliendo el resto de los puntos de la normativa antes comentados. Como información, se ha modelado en la cara rectangular la luz trasera, utilizando como referencia el modelo 421-100-011 de luz trasera de la compañía americana Lifeline.



Figura 4-37. Luz trasera Lifeline 421-100-011

El hecho de que esta modificación se haya llevado a cabo en una fase bastante avanzada del diseño explica también las distintas formas de crear las curvas guía necesarias para poder modelar esta estructura, ya que las guías inferiores se han realizado con los comandos Line y Circle, complicando innecesariamente el proceso de creación de estas guías; mientras que para las guías superiores se ha usado el comando Combine, que permite crear una curva tridimensional a partir de dos curvas bidimensionales. Para terminar el modelado del RIS, se ha realizado un Multi Section Surface, tomando como curvas el rectángulo previamente mostrado y el rectángulo posterior del volumen disponible para la caja de cambios. Este rectángulo se ha obtenido realizando un Multiple Extract a sus lados. Las curvas guía utilizadas son las antes comentadas, dando lugar a la siguiente superficie.

Tras ello, se pasa al modelado de la luz trasera. Para realizar este elemento, se han realizado operaciones de Extrude al contorno exterior y al contorno de cada una de las 12 luces que conforman este elemento. Posteriormente, se han llevado a cabo operaciones de Fill y Join para obtener un volumen cerrado, pasando posteriormente cada uno de los componentes a elementos sólidos mediante operaciones de Close Surface.

Por último, se ha realizado el modelado de la unión entre el alerón trasero y esta estructura de absorción de impactos. El proceso para su realización es análogo al que se llevó a cabo para las uniones entre alerón delantero y morro.

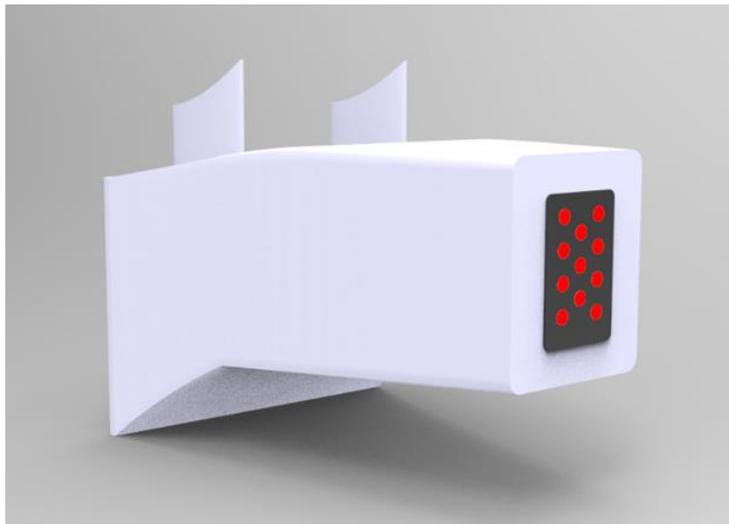


Figura 4-38. Modelo 3D del RIS, con su correspondiente luz trasera

#### 4.3.4. Fondo plano y *skid block* o *plank*

En cuanto al fondo plano del monoplaza, el artículo 3.7 de la normativa técnica es el que rige las dimensiones tanto de este elemento como de la plancha de madera, conocida como 'skid block' o 'plank' que se sitúa en la parte inferior. Cabe destacar que la superficie más visible y extensa del fondo plano, se nombra en la normativa como el 'step plane'. Esta superficie se tiene que encontrar a 50 mm por encima del plano de referencia, como dicta el punto 3.7.2 de la normativa. Esto provoca que en la parte central del step plane, donde se sitúa el monocasco y la unidad de potencia con su caja de cambios sea necesario modelar un espacio para poder alojar dichos elementos, dado que se encuentran por debajo de esos 50 mm de altura con respecto al plano de referencia. Para modelarlo, se ha trazado una línea que siga la forma del monocasco y del motor con una ligera tolerancia. Posteriormente, se ha realizado un Extrude a estas curvas hasta que se alcance el 'skid block' ya modelado y situado en el Product.

También se ha modelado una unión más progresiva entre estos perfiles laterales con la parte inferior del step plane', para evitar que haya un salto brusco que pueda provocar una pérdida de prestaciones del fondo plano, así como una fabricación más complicada con este elemento. Para ello, se ha utilizado el comando Combine para generar una curva a partir de dos curvas planas. Con la curva dibujada, se ha realizado un Extrude hasta que se alcance la longitud del perfil antes comentado. Posteriormente, se han unido estos dos elementos con un Join, y se ha realizado un Shape Fillet entre esta superficie transversal y el 'step plane', con un radio de 10 mm. Finalmente se ha llenado la superficie inferior, que queda hueca, mediante varias operaciones de Fill.

En lo que respecta al ancho del fondo plano, se ve regido por dos puntos de la normativa: el punto 3.3.2, que dicta que cualquier elemento de la carrocería del monoplaza que se encuentre entre el eje delantero y un punto 150 mm por detrás del eje trasero no debe tener un ancho superior a los 1450 mm; y el punto 3.7.1, que delimita una línea diagonal que el fondo plano no puede sobrepasar. Para este modelo, se ha escogido un ancho de fondo plano de 1400 mm.

Además, siguiendo la tendencia que se puede observar en los distintos modelos diseñados de monoplazas de tipo F4, se ha modelado un difusor situado en la parte trasera del fondo plano. Este elemento hace que se pueda generar más carga aerodinámica en el fondo plano, haciendo más grande la diferencia de presiones entre el aire del exterior y el aire situado debajo del monoplaza, aire que generalmente tiene una menor presión, generando así un efecto de succión. El difusor diseñado es similar al de otros monoplazas de F4: un perfil curvo situado en la parte posterior del fondo plano.

Como se comentó, el punto 3.7 también determina las dimensiones que debe de tener el 'skid block'. Este elemento, como se comentó anteriormente, es un elemento de seguridad que permite a la FIA determinar si un monoplaza va con una altura inferior a la supuesta, midiendo su desgaste. En concreto, el punto 3.7.5 es el que determina sus dimensiones:

- El 'skid block' debe ser rectangular y se extiende desde un punto situado a 450 mm por detrás del eje delantero hasta un punto situado a 280 mm por delante del eje trasero. Además, el ancho de esta plancha es de 300 mm.
- Debe tener un grosor uniforme de 5 mm cuando la pieza es nueva. Sin embargo, en los extremos se permite un chaflán de 50 mm de longitud y 3 mm de profundidad.
- Debe tener 4 agujeros de 80 mm situados en los puntos detallados en el Drawing 7. Estos agujeros permiten el anclaje del 'skid block' al fondo plano.

Para ello, se ha realizado un Pad de 5 mm al rectángulo de largo y ancho especificado en la normativa. Posteriormente se realizaron los 4 agujeros con operaciones de Hole y se realizaron los chaflanes indicados con la operación de Chamfer.



Figura 4-39. Modelo 3D del fondo plano y del *plank*

#### 4.3.5. Cubierta motor

Posteriormente se pasó a modelar la cubierta motor del monoplaza. El artículo de la normativa técnica que rige las dimensiones de la cubierta motor es el 3.5.3. En este artículo se detalla un área vista desde el perfil en la cual debe haber algún componente de la carrocería. Esta área viene delimitada por:

- Una línea vertical 30 mm por detrás del plano C-C.
- Dos líneas horizontales situadas a 400 mm y 940 mm sobre el plano de referencia.
- Una línea vertical 100 mm por detrás del eje trasero.
- Una línea diagonal que interseca la línea horizontal a 940 mm de altura en un punto 150 mm por detrás del plano C-C y la línea vertical 100 mm por detrás del eje trasero a un punto a 630 mm de altura sobre el plano de referencia.

Además, se estipulan unos anchos mínimos al comienzo y al final de la cubierta motor en puntos situados a 200 mm por debajo del punto más alto de la pieza de 150 mm y 50 mm, respectivamente. Además, la cubierta motor debe ser simétrica con respecto al plano de simetría del monoplaza.

Con ello, se ha comenzado realizando un Multiple Extract al contorno de la estructura antivuelco principal y parte de la sección posterior del monocasco, para que la cubierta motor sea una continuación de esta parte, sin saltos ni bordes salientes. Posteriormente, se ha modelado también la sección transversal del final de esta pieza. Para ello hay que tener en cuenta que ningún elemento de la carrocería situada entre el eje trasero y un punto a 150 mm por detrás de dicho eje debe situarse a más de 200 mm de distancia con respecto al plano de simetría del monoplaza. Con ello, se ha dibujado dicha sección imitando el estilo de coches de F4 ya fabricados o diseñados para simuladores de conducción, sabiendo que el punto más alejado se encuentra a 195 mm del plano de simetría antes mencionado.

Con las dos secciones ya determinadas, se procedió a realizar algunas curvas guía para poder posteriormente realizar un Multi Section Surface. Es en este período cuando se investigó más sobre la herramienta Combine

del módulo de GSD de CATIA, ya que las curvas guía requeridas para realizar este elemento son bastante complejas para dibujarlas con otros métodos. Con ello, se han dibujado dos proyecciones de cada curva guía requerida (proyección de perfil y de planta) y se utilizó el módulo Combine. Con ello, se han realizado las curvas guía a un lado del plano de simetría del monoplaza; por lo que se han realizado operaciones de Symmetry para realizar las curvas guía al otro lado de este plano. Una vez realizadas, se ha llevado a cabo la operación de Multi Section Surface, siendo el resultado el mostrado en la imagen.

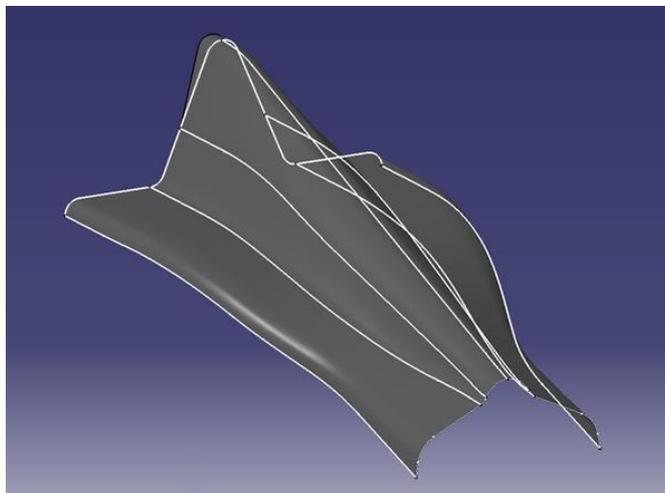


Figura 4-40. Resultado de la operación de Multi Section Surface. En la imagen también aparecen las curvas guía empleadas en la operación

Sin embargo, también es necesario instalar un elemento aerodinámico conocido como ‘aleta de tiburón’ (*shark fin* en inglés). Una de las funciones de este elemento es que ayuda a la estabilidad del monoplaza frente a momentos de guiñada. También permite obtener una mayor carga aerodinámica lateral, sobre todo en el paso por curva y hace que el flujo que llega al alerón trasero tenga menos turbulencias, actuando como una barrera para que el flujo no pueda pasar de una parte situada a un lado del plano de simetría del monoplaza al otro.



Figura 4-41. Aleta de tiburón o *shark fin*

Para modelar esta aleta de tiburón, se ha dibujado una sección triangular, similar al F4 de la marca francesa Mygale, y se ha realizado una operación de Sweep con dos curvas guía: una de ellas es la línea diagonal que conforma el área formada en el artículo 3.5.3, mientras que la otra es una de las curvas guía utilizadas para modelar la cubierta motor. Con ello, la aleta de tiburón más la cubierta motor queda de la siguiente forma.

Una vez hecho esto, y tras haber modelado también los pontones (proceso que se explicará en el siguiente apartado), se ha realizado la unión entre la cubierta motor y los pontones. Para ello, se ha realizado un Extrude al extremo inferior con la dirección del eje Z y se ha cortado con una operación de Trim con otro Extrude del extremo del pontón siguiendo la dirección Y. Una vez realizado esto, se ha llevado a cabo un Variable Fillet

para suavizar la zona de corte. Se ha llevado a cabo este Variable Fillet ya que hay zonas que no se podía poner un radio de Fillet grande en determinadas zonas, mientras que en otras sí. Con ello, esta zona de unión queda como se muestra en la figura.

Por último, con el fin de proteger los componentes de la suspensión trasera y la propia caja de cambios, se ha decidido extender la parte trasera de esta pieza, asemejándose así más a modelos montados en monoplazas de F4 ya existentes. Para ello, se ha tomado la sección final de la cubierta motor y se ha extendido en dirección del eje X mediante una operación de Extrude.

Por último, para evitar que dos barras de la suspensión trasera atraviesen la cubierta motor, se han realizado un par de recortes en los laterales, para permitir el movimiento de dicho elemento de la suspensión. Para ello, se ha trazado el contorno de una sección transversal rectangular con las dimensiones adecuadas para que no exista contacto con la barra de suspensión con el fin de someterla a una operación de Extrude. Tras obtener esta superficie, se han realizado dos operaciones de Split para obtener el resultado final deseado. Tras finalizar todo este proceso, se ha realizado una operación de Thick Surface para tener una pieza sólida.

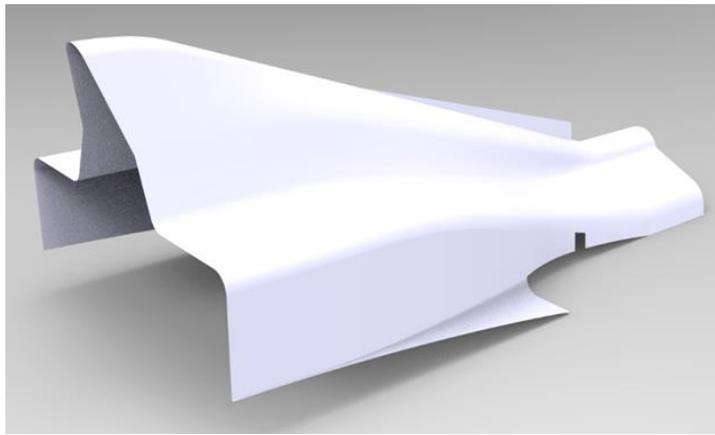


Figura 4-42. Modelo 3D de la cubierta motor

#### 4.3.6. Pontones

Los artículos de la normativa que rigen las dimensiones y características de los pontones son el 3.5.4, 3.5.5 y 3.5.6. El punto 3.5.4 determina la altura y anchura que puede tener este elemento, el 3.5.5. determina las características del borde de ataque del pontón, mientras que el 3.5.6 rige un área mínima a la entrada del pontón, siendo esta igual o superior a los 75000 mm<sup>2</sup>. Para medir esta área de paso, se toma la proyección de la entrada de aire del pontón sobre un plano vertical.

El punto 3.5.4. impone que cualquier componente de la carrocería, a excepción de los espejos retrovisores, que se encuentre entre los ejes delantero y trasero a una altura superior de 550 mm sobre el plano de referencia, se encuentre a una distancia superior a los 370 mm con respecto al plano de simetría del monoplaza. Además, ningún elemento de la carrocería puede encontrarse en el exterior de las líneas diagonales límite ya impuestas al diseñar el fondo plano. Por ello, se ha buscado que los pontones no superen los 550 mm de altura, para poder extenderlos, aunque estando siempre sobre el fondo plano.

El punto 3.5.5. impone que el plano delimitado por varias líneas y situado a 450 mm de altura sobre el plano de referencia no puede verse si se está viendo el monoplaza desde su planta. Con ello, se ha tomado como plano sobre el que se dibujará la entrada del pontón el plano paralelo a la línea diagonal más adelantada, cumpliendo así con esta condición. En cuanto a la forma de la entrada, salida o cuerpo del pontón, se ha decidido hacer un modelo similar al del monoplaza de F4 de la marca Mygale, ya que parece más sencillo de realizar si se compara con los pontones de monoplazas de otras marcas.

Posteriormente, se dibujaron algunas curvas guía. Para ello, se ha partido de dos 'sketches' vistos en perfil y en planta, para posteriormente someterlos a una operación de Combine, haciendo el proceso similar al que se llevó a cabo para modelar la cubierta motor. Una vez realizadas las curvas guía que se han supuesto necesarias, se ha completado el modelado con ayuda de un Multi Section Surface.

Se ha modelado también el borde de ataque de los pontones, para darles un aspecto más realista. Para ello, se ha dibujado el perfil mostrado en la imagen, sometiendo luego dicho perfil a una operación de Sweep. Para cortar el sobrante que queda por la parte inferior, se ha realizado un Split de este borde de ataque con el plano auxiliar Plane.14 utilizado para dibujar la sección transversal del borde de ataque.

Por último, para convertir los pontones a elementos sólidos, se ha realizado una operación de Thick Surface.

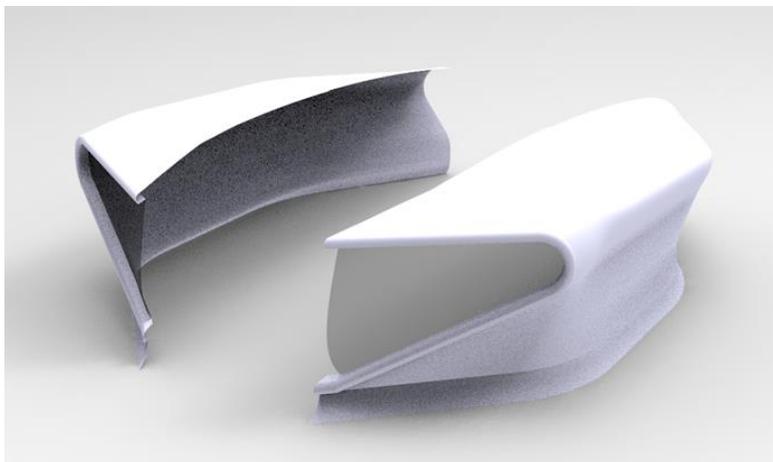


Figura 4-43. Modelo 3D de los pontones

#### 4.3.7. Splitter

El *splitter* es una pieza que se encarga de reconducir el flujo del aire en la zona inferior del monoplaza, al comienzo del fondo plano. Con esta pieza se evita que el flujo se encuentre con una sección perpendicular al flujo, sección que formaría parte del monocasco, evitando así un excesivo aumento de la resistencia aerodinámica en dicha zona y un peor funcionamiento de los elementos aerodinámicos que se encuentran aguas abajo de esta pieza.



Figura 4-44. Splitter en un monoplaza

Para su modelado, se ha tomado como referencia modelos ya existentes en otros monoplazas. En primer lugar, se han modelado las paredes laterales mediante una operación de Extrude. Cabe destacar que, para modelar estas paredes, es importante conocer las dimensiones del monocasco en su parte inferior.

Después, se procede con el modelado de la parte delante, parte que se encontrará en contacto directo con el flujo incidente. Para su modelado, se ha trazado la sección superior e inferior de esta zona, así como una curva guía en el plano de simetría del monoplaza, que servirá de ayuda para acotar la forma de la parte más adelantada de esta pieza. Con ello, se ha realizado un Multi-Section Surface, utilizando como secciones los dos

sketches realizados y empleando también la curva guía previamente mencionada.

Con ello, tras haber realizado una operación de Fillet, para suavizar la unión entre entras dos partes modeladas, se ha realizado una operación de Split, para cortar el material sobrante que atravesaba el monocasco. Por último, se ha llevado a cabo una operación de Thick Surface para tener un elemento sólido.

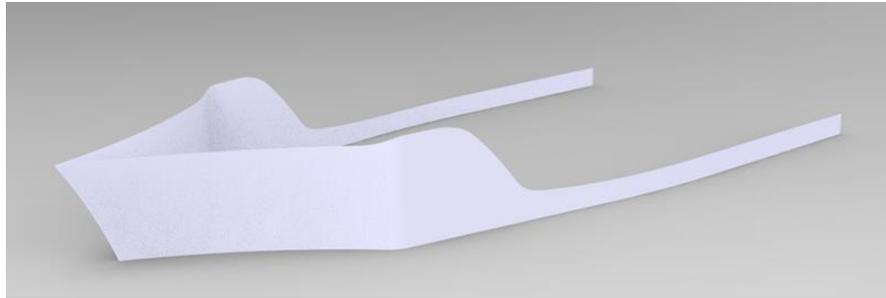


Figura 4-45. Modelo 3D del *splitter*

## 4.4. Tren de potencia

A continuación, se detalla el proceso de modelado de las piezas y elementos que conforman el tren de potencia del monoplaza: motor, caja de cambios y los distintos elementos que conforman el diferencial.

### 4.4.1. Motor y caja de cambios

En cuanto al motor, se han utilizado las normativas de los monoplazas de Formula 4 de segunda generación, modelo que se está modelando en este proyecto; así como la normativa de monoplazas de primera generación. Esto se debe a que las especificaciones del motor no se han visto muy alteradas en el salto de generación. En la normativa de la 2ª generación, el dibujo que muestra las dimensiones máximas que pueden tener tanto el motor como la caja de cambios se muestran en el Drawing 4. Los elementos que interactúan con el motor y la caja de cambios (por ejemplo, la cubierta motor) se tienen que modelar para que pueda albergar el espacio representado. Es por ello por lo que, tanto para el motor como para la caja de cambios se haya representado este volumen permitido, siguiendo así el concepto de ‘caja negra’; además de que la dificultad que representa modelar un motor o una caja de cambios puede dar para un TFG en sí.

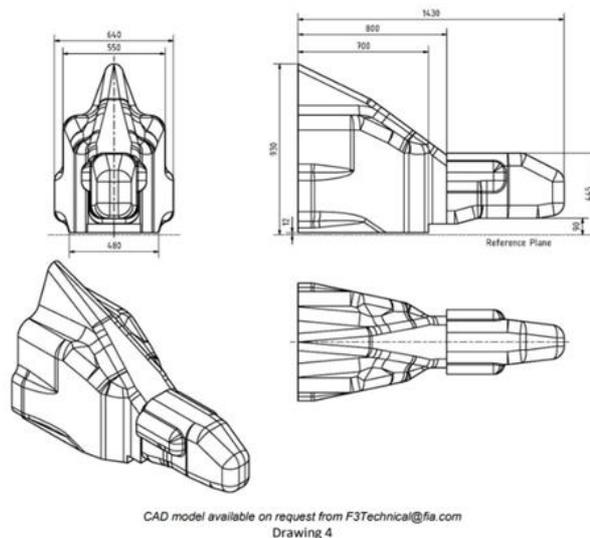


Figura 4-46. Drawing 4 disponible en la normativa de F4 de segunda generación, en las que se indican algunas medidas para el bloque motor más caja de cambios

Para el motor se utilizó principalmente las dimensiones proporcionadas en el Drawing 2.2 de la normativa de Formula 4 de 1ª generación, ya que proporciona datos suficientes para modelar dicho elemento. Con el módulo de Part Design, se realizó el bloque más grande, y posteriormente se realizaron varios Pocket para alcanzar la forma final. Sin embargo, la mayor y única diferencia que hay entre el volumen disponible para el motor de F4 de 1ª y 2ª generación es el tamaño de la toma de aire que se encuentra en la parte superior. Para modificar esta parte a partir del modelo creado, se han realizado mediciones de distancias y ángulos en el programa AutoCAD, permitiendo realizar un Pocket que resulta en la forma de la toma de aire deseada.

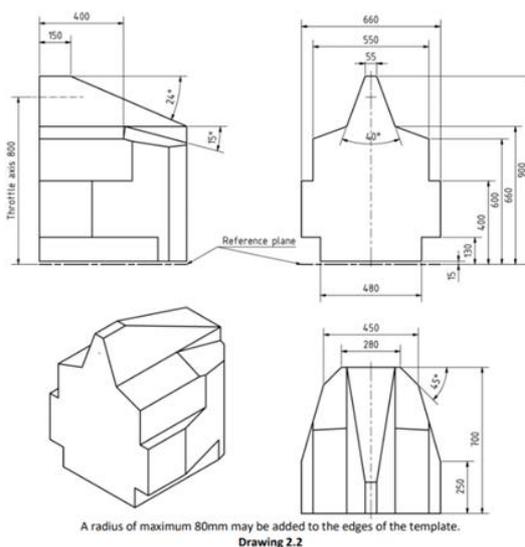


Figura 4-47. Drawing 2.2 disponible en la normativa de F4 de primera generación, en la cual se detallan las dimensiones máximas del motor a utilizar

Para la caja de cambios, se ha utilizado el Drawing 4 de la normativa de 2ª generación antes mencionado. Con las medidas disponibles y con el programa AutoCAD, que permitió obtener el resto de las medidas necesarias, se ha podido modelar este elemento de forma similar al motor: se partió de un bloque grande con una operación de Pad, y posteriormente se realizaron varios Pocket para darle la forma final.

El bloque motor y la caja de cambios vienen conectados por un elemento, conocido en inglés como ‘bellhouse’ que protege el eje y el embrague. Este elemento se ha modelado en CATIA con una operación de Pad, también con ayuda del software AutoCAD para obtener las medidas necesarias para ello.

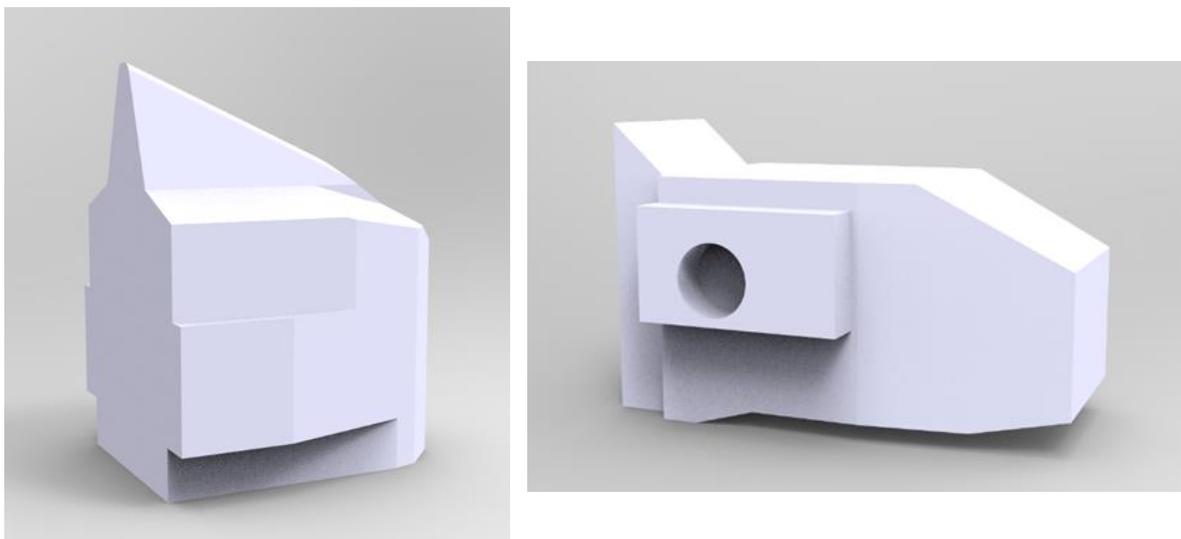


Figura 4-48. Modelos 3D del bloque motor (izquierda) y de la caja de cambios (derecha)

#### 4.4.2. Sistema de transmisión

A continuación, se explicará el proceso de modelado del resto de componentes del sistema de transmisión. Este sistema es el encargado de transmitir la potencia generada por la planta de potencia a las ruedas motrices. Dentro de este sistema se encuentra, a grandes rasgos, la caja de cambios, previamente comentada, y el resto de los elementos que permiten dicha transmisión: diferencial (el cual no se ha modelado en este trabajo debido a su complejidad y a que se encontraría en el interior del volumen de la caja de cambios), juntas homocinéticas encargadas de conectar ejes discontinuos longitudinales y el palier que conecta la rueda con la caja de cambios.

##### 4.4.2.1. Junta homocinética

Como se ha comentado previamente, este elemento es el encargado de acoplar rotaciones de dos ejes discontinuos. En este caso, la junta se encargará de transmitir el movimiento de rotación generado en el conjunto motor más caja de cambios al palier. Además, el monoplaza tiene otra junta que se encarga de conectar el palier con el buje de la rueda, permitiendo así la transmisión de la potencia generada por el motor a dichas ruedas traseras.

Para realizar el modelado, se ha tomado como modelo de referencia la junta GI3300i fabricado por la empresa alemana GKN. Se ha decidido tomar este modelo debido a que es uno de los más utilizados en competiciones de monoplazas. Esto se debe a que las cajas de cambios más empleadas no solo en F4, sino también en monoplazas de F3 y F2, la caja SLR75-14 y su evolución, la SL75LW, ambas fabricadas por la empresa francesa Sadev; trabajan con este modelo de junta. Además, GKN también proporciona planos de esta junta, haciendo el proceso de modelado más sencillo.



Figura 4-49. Junta GKN GI3300i

En primer lugar, se modela la propia junta, conocida en inglés como *tripode*. Para ello, en primer lugar, se ha modelado el cuerpo principal del elemento mediante una operación de Shaft, habiendo trazado antes el contorno de su generatriz. Después, se llevó a cabo una operación de Pocket para realizar el agujero central, a partir de una circunferencia previamente dibujada. Tras este paso, se han modelado los dientes que permiten que este elemento se encuentre fijo con respecto al palier. Para ello, con la ayuda del software Autocad, se han obtenido las medidas necesarias para el modelado de uno de estos dientes (longitud de un lado y altura), medidas que se utilizan para trazar el contorno exterior de dicho diente. Con el contorno dibujado, se realiza una operación de Pocket para obtener uno de los dientes. Para obtener el resto de los dientes necesarios, se realiza un Circular Pattern, sabiendo de antemano el número de dientes que tiene la pieza, dato obtenido también del propio catálogo de GKN.

Posteriormente, se modelan las tres rótulas auxiliares que permiten el acople del movimiento entre dos elementos con ejes de rotación distintos. Para ello, en primer lugar, se modelan los ejes que permiten el montaje de las rótulas, realizándose una operación de Pad para obtener uno de ellos, habiendo trazado previamente el contorno de su sección transversal. Para modelar los otros dos ejes, se ha utilizado una operación de Circular Pattern. Para el modelado de la propia rótula, el proceso es similar: en primer lugar, se

ha trazado el contorno de la generatriz exterior, para poder realizar una operación de Shaft, obteniéndose así una de las rótulas. Para modelar las otras dos, se ha realizado nuevamente un Circular Pattern. Con ello, ya se tiene modelada la junta.

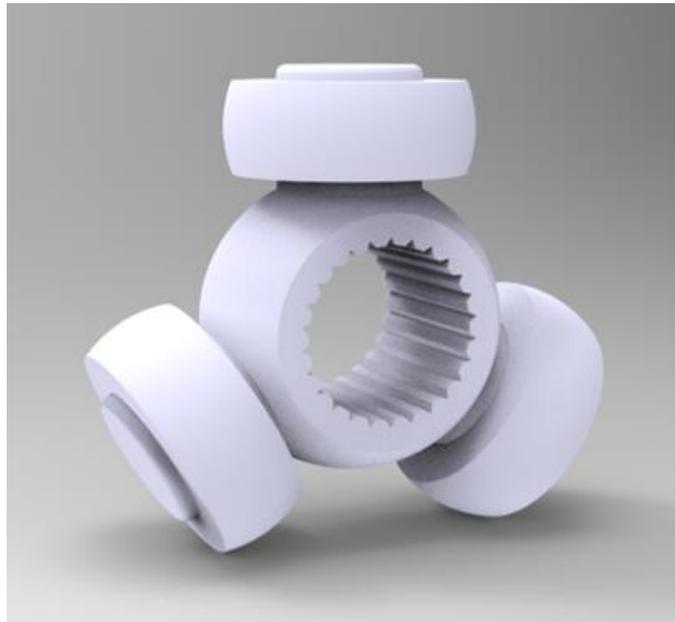


Figura 4-50. Modelo 3D del *tripode*

Esta pieza, para poder funcionar y cumplir su función adecuadamente, debe encontrarse dentro de otro elemento, conocido en inglés como *housing*, que alberga esta pieza previamente modelada. Para modelar el *housing*, se ha utilizado como referencia el mismo catálogo de GKN, ya que al fin y al cabo es un elemento que forma parte del conjunto que es la junta homocinética. En primer lugar, se ha trazado una circunferencia que hará las veces de contorno de la sección lateral de este elemento. Con ello, se ha llevado a cabo una operación de Pad, obteniéndose así la forma principal de la pieza, sobre la cuál se modelarán el resto de los detalles que se tienen en la pieza.

Posteriormente, se realiza una operación de Groove para eliminar material en la parte lateral del cilindro obtenido en el paso anterior. Una vez realizado este paso, se modelan los taladros que tiene la pieza y que permite fijar la tapa (conocido en inglés como *boot*) que completa el conjunto de piezas que conforman la junta homocinética. Para ello, se realiza una operación de Pocket para obtener uno de los taladros. Para modelar el resto, se lleva a cabo un Circular Pattern. Por último, se modela el espacio en el cuál se encontrará alojada la junta previamente modelada. Para ello, se ha realizado un Sketch, tomando como referencia el elemento ya modelado que se encontrará en dicho espacio; para después llevar a cabo una operación de Pocket, obteniendo así el modelado completo del *housing*.

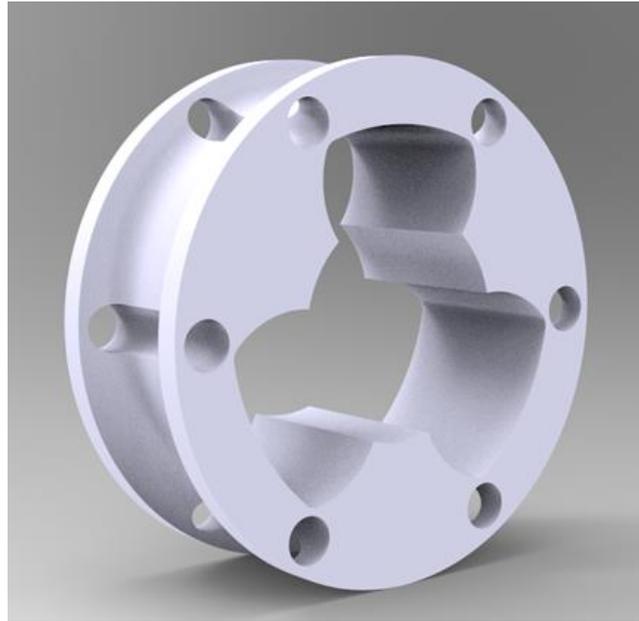


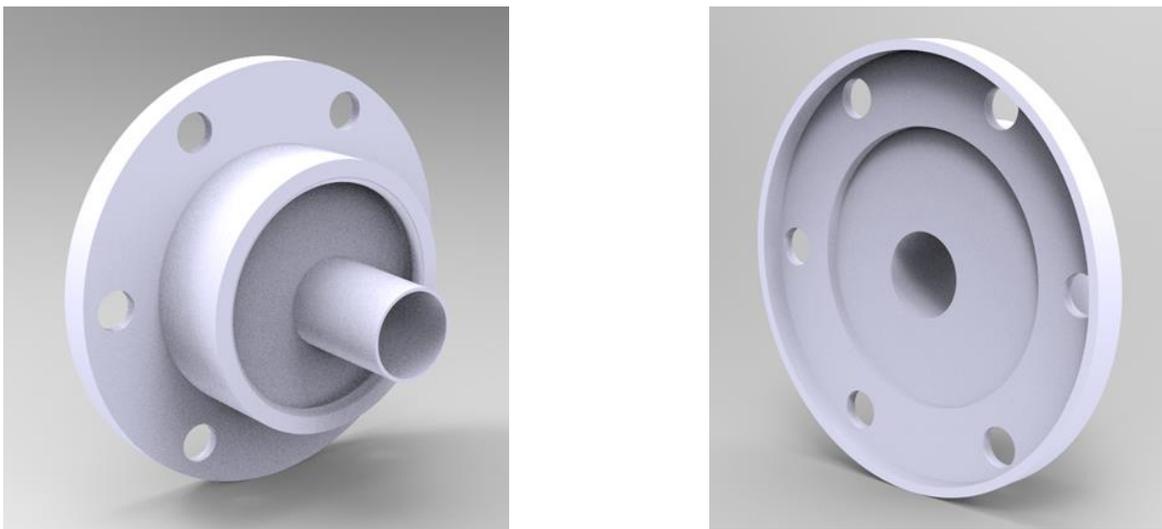
Figura 4-51. Modelo 3D del *housing*

Como se ha comentado previamente, para completar la junta homocinética, es necesario añadir unas tapas o *boots* para evitar que los elementos se puedan mover en exceso y produzca fallos en el sistema de transmisión. Para el modelado de esta pieza, al igual que con el resto de los componentes que conforman este elemento, se ha tomado como referencia el modelo de *boot* que ofrece la empresa alemana GKN. En concreto, se ha utilizado como referencia el modelo MS6J002.

Para implementar el modelo en CATIA, en primer lugar, se ha realizado una operación de Pad, para modelar la parte más ancha de la pieza, que se encontrará en contacto con el *housing*. Posteriormente se han realizado un par de operaciones de Pocket, para eliminar el material necesario para que ambas piezas encajen y se puedan montar.

Tras realizar esto, se realiza otra operación de Pad para modelar la parte superior del *boot*. Con esta operación de Pad, se realiza una operación de Groove para eliminar el material necesario para posteriormente poder alojar los elementos de material plástico que se encuentran en la pieza. Tras esto, se lleva a cabo una operación de Pad para modelar parte del elemento gomoso que abraza parte del palier, seguido de una operación de Pocket para que el Palier pueda alcanzar la pieza interna de la junta sin atravesar otro elemento.

Por último, se han realizado los taladros que ayudan a unir *boot* y *housing*. Para ello, al igual que con los taladros del *housing*, se ha realizado una operación de Pocket, seguido de un Circular Pattern para obtener el resto de los taladros. Con ello, ya se tendrían modelados los componentes que conforman la junta homocinética.

Figura 4-52. Modelo 3D del *boot* de la junta homocinética

#### 4.4.2.2. Palier

Por último, se modela el palier, elemento que se encarga de transmitir la potencia generada por la caja de cambios a las ruedas traseras. En lo que respecta al modelado, se ha empleado como referencia modelos ya existentes en otros monoplazas de F4, teniendo en cuenta que la normativa establece un diámetro mínimo de 21 mm en cualquier sección transversal de este elemento.

Con ello, en primer lugar, se ha modelado en primer lugar la parte dentada del palier. Para ello, sabiendo que la sección dentada es la que permite la unión entre palier y junta homocinética, se ha extraído el contorno de la sección dentada interior de dicha junta. Con el contorno extraído, se ha llevado a cabo una operación de Pad para obtener la primera parte del palier. Posteriormente, se ha añadido algo más de material al comienzo y al final de la zona dentada, mediante dos operaciones de Pad. Además, para hacer el escalón entre la sección dentada y la sección cilíndrica del palier más suave, se ha ejecutado un Groove sobre uno de los Pad realizados en el paso anterior.

Con ello, se ha pasado a realizar la parte cilíndrica del palier. Para ello, se ha llevado a cabo una operación de Pad, partiendo de un círculo de 22 mm de diámetro que hace las veces del contorno de la sección transversal de esta parte. Este Pad se extiende hasta el plano de simetría del elemento, lo cual hace que se pueda completar el modelado de esta pieza mediante una operación de Mirror, utilizando dicho plano de simetría como plano de referencia. Con ello, ya se tiene modelado el palier.

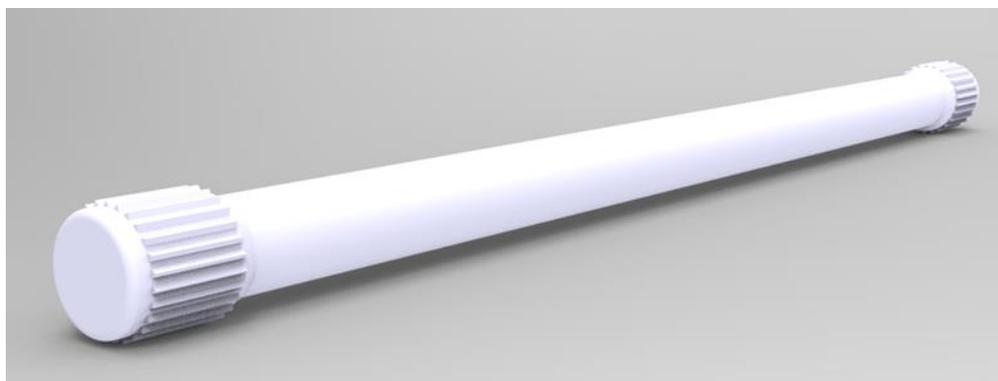


Figura 4-53. Modelo 3D del palier

## 4.5. Sistema de dirección

A continuación, se explicará cómo se han modelado los distintos elementos que conforman el sistema de dirección.

### 4.5.1. Volante

Para el modelado del volante, se ha tomado como referencia el volante de la marca francesa XAP, en concreto, el modelo *Single Seater Series STW 2P FS*. Se ha escogido este volante ya que, en primer lugar, es una marca conocida que desarrolla volantes para varias disciplinas, destacando la F2, la F3, la Formula E e incluso algunos campeonatos de F4; y, en segundo lugar, se ha escogido el modelo de 2 levas ya que la normativa indica que el embrague se debe accionar con un pedal en el pie, por lo cual no es necesario disponer de más levas (otros monoplazas, como los F1, F2 y F3 accionan el embrague mediante un par de levas en el volante). Por lo demás, se ha escogido este modelo por gusto personal, y por contar con planos de buena calidad.



Figura 4-54. Volante XAP *Single Seater Series STW* utilizado en un monoplaza de GP2

Para llevar a cabo el modelado de este elemento, se ha empleado el módulo de Sketch Tracer disponible en CATIA V5 dentro de la pestaña de Generative Shape Design. Este módulo, como se ha comentado en el apartado anterior, permite importar dibujos o planos, colocarlos y escalarlos a la medida adecuada para poder realizar un modelado por encima de ellos, un método similar a, por ejemplo, calcar por encima de un dibujo.

Para poder utilizar el módulo de Sketch Tracer, en primer lugar, se extraen capturas de las diferentes vistas del volante, vistas disponibles en el catálogo de XAP. Posteriormente, seleccionando por ejemplo la vista frontal, se importa la imagen a través del cuadro de diálogo disponible al ejecutar el módulo de Sketch Tracer. Una vez cargada la imagen, se mueven los ejes X e Y para que coincidan con una esquina de la imagen. Esto facilita posteriormente el escalado de la imagen. Una vez situados los ejes, se llevan las longitudes X e Y hasta el final de la imagen, intentando que coincida lo mejor posible. Con esto, ya se puede escalar la imagen a las medidas necesarias, cambiando el valor de la longitud en X a la deseada (este módulo mantiene la relación de aspecto de la imagen). Si se repiten los pasos con las otras imágenes, se puede obtener un cuadro de trabajo como el de la siguiente imagen, que facilitará el modelado del volante, en este caso.

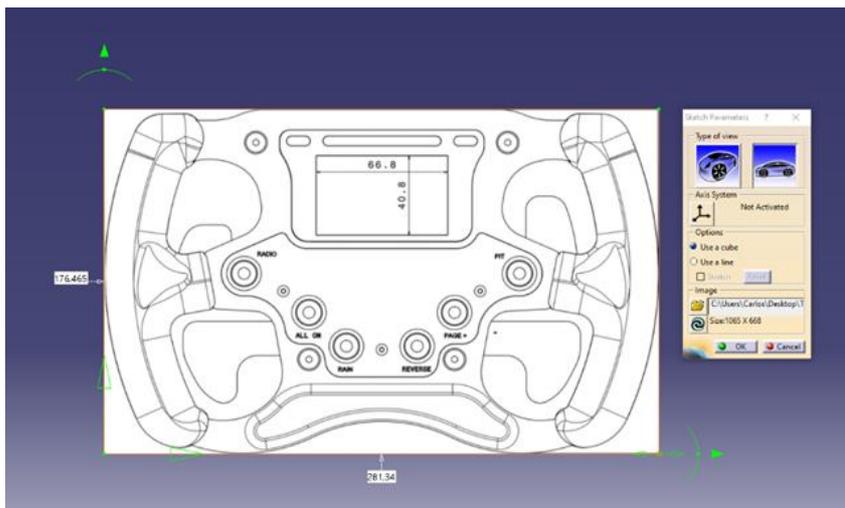


Figura 4-55. Módulo de Sketch Tracer

Para el modelado del volante, se han empleado las herramientas disponibles en la parte de Generative Shape Design, ya que, al ser uno de los primeros elementos que se han modelado, las herramientas de este módulo ya las había utilizado más recientemente con frecuencia.

En primer lugar, se modela la parte central del volante, sobre la que irá luego la pantalla y los botones. Para ello, se traza un sketch, siguiendo las líneas del volante que se tienen como referencia gracias a haber empleado el Sketch Tracer, para realizar posteriormente una operación de Extrude. Para las empuñaduras, el proceso es análogo. Además, se lleva a cabo una operación de simetría con respecto al plano medio del volante, previamente definido, para modelar la otra empuñadura.

Para la pantalla y el panel situado en la parte frontal, se sigue un proceso análogo, realizando operaciones de Extrude de pocos milímetros para que se pueda apreciar que efectivamente la parte frontal tiene la pantalla, el cuadro donde se sitúan los botones y los LED indicadores situados en la parte superior. Posteriormente, se realiza un Shape Fillet para suavizar la unión entre el cuadro de los botones y el resto del volante.

En la parte posterior, para la caja que guarda la electrónica del volante, se han realizado dos Sketches, representando secciones de este elemento desde dos vistas: una frontal (o trasera, según como se vea) y una de perfil. Posteriormente, se han realizado dos Extrude, y estas superficies se han cortado mediante una operación de Trim, para obtener la forma deseada. Por último, se ha realizado una operación de simetría con respecto al plano medio del volante, para completar la caja necesaria.

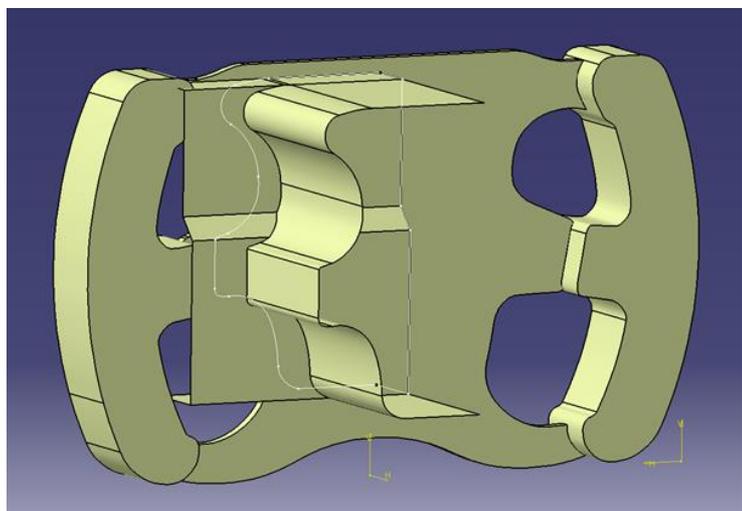


Figura 4-56. Superficies utilizadas para la caja que guarda la electrónica del volante, antes de realizar la operación de Trim correspondiente

Después, se modelan las levas. El proceso es análogo a los vistos para otras piezas del volante: se traza la sección transversal con ayuda de las imágenes preparadas con Sketch Tracer, y después se realiza un Extrude para darles grosor. Con ello, se realiza una operación de Symmetry con respecto al plano medio del volante para obtener la otra leva de cambio de marcha.

Varios meses más tarde, tras completar el modelado de otras piezas, se vuelve al volante, para dar los retoques finales al modelado de este elemento. En primer lugar, se pasa a tener una pieza formada por superficies a un sólido completo. Para ello, se realizan operaciones de Fill y Join donde sea necesario para cerrar los distintos cuerpos que conforman el volante. Una vez hecho esto, mediante la operación de Close Surface que se encuentra dentro del módulo de Part Design, se convierten las distintas piezas a elementos sólidos.

Una vez hecho esto, se procede con el modelado de los botones. Para ello, se van a llevar a cabo operaciones de Shaft, para modelar tanto el botón como el recubrimiento lateral de protección que tienen. Cabe destacar que, para realizar esta operación de Shaft, se ha trazado una mitad de la sección transversal de estos elementos, así como el eje sobre el cuál se va a realizar la revolución para obtener la pieza.

Una vez hecho esto, se conseguirían los botones de una mitad del volante. Para conseguir hacer los botones de la otra mitad del volante, debido a que la operación de Mirror daba error, se ha utilizado un Rectangular Pattern, con dos instancias separadas por una determinada distancia en Y.

Por último, se modela la estructura que se encarga de alojar el mecanismo de accionamiento de las levas. Para ello, con ayuda de las imágenes previamente preparadas mediante la herramienta Sketch Tracer, se traza la sección transversal externa; para después someterla a una operación de Pad. Con ello, ya se tendría modelado el volante.

Cabe destacar también que, para poder conectar el volante a la columna de dirección, en la actualidad se emplea un mecanismo conocido con su nombre en inglés, *Quick Release*. Esta pieza permite al piloto poner y sobre todo quitar el volante con facilidad, un atributo necesario para que éste salga del coche con rapidez en caso de un incendio, por ejemplo.

Existen numerosos distribuidores que fabrican este elemento. Sin embargo, al navegar por sus páginas web, no he sido capaz de obtener ningún dibujo ni imagen de referencia que se pueda utilizar para modelarlo. Afortunadamente, he sido capaz de encontrar un modelo STEP de un Quick Release fabricado por la marca americana SPA Technique, en el que tenía tanto el propio Quick Release como el trozo de columna de dirección inicial, a la cual va conectada esta pieza.

Con ello, y a la vista que no ha sido posible encontrar otro material de referencia, se ha decidido incluir este modelo directamente, creando para ello un CATProduct con el volante y este elemento. Además, al utilizar este modelo de Quick Release, ya está delimitado el diámetro que debe tener la columna de dirección, siendo esta de 1" (25.4 mm). Con ello, el conjunto volante más Quick Release queda como se muestra en la siguiente imagen.

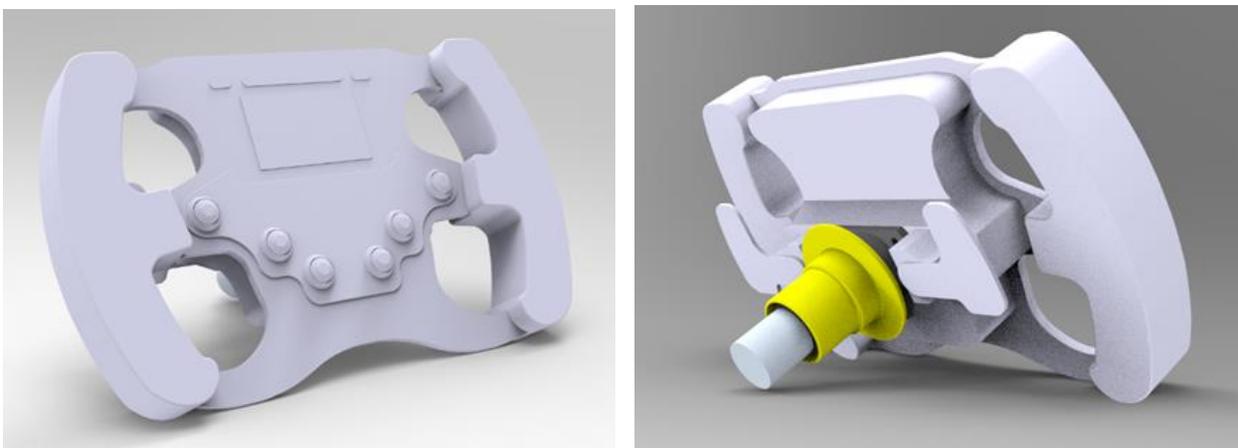


Figura 4-57. Modelo 3D del volante con el Quick Release instalado

#### 4.5.2. Columna de dirección

Para el modelado de la columna de dirección, al tratarse de una barra circular con su diámetro ya definido por el sistema de Quick Release instalado, se ha podido llevar a cabo a través de una operación de Pad, partiendo de una circunferencia con diámetro de 1" que sirve como sección transversal.

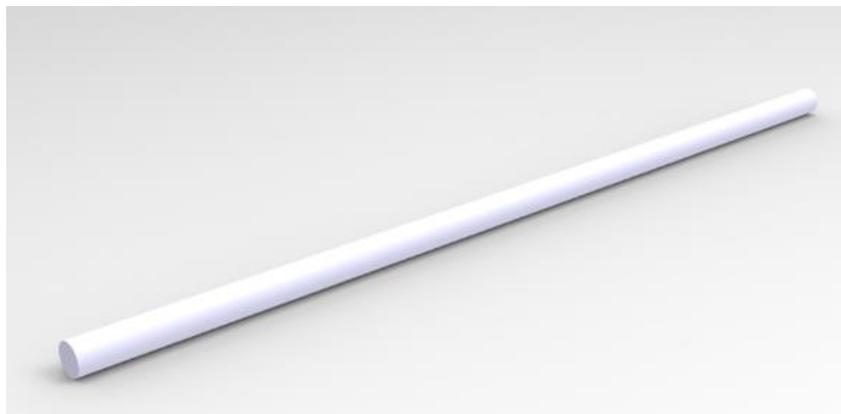


Figura 4-58. Modelo 3D de la columna de dirección

#### 4.5.3. Junta cardan

Para la junta cardán, elemento que se encarga de transmitir el movimiento de rotación desde la columna hasta la cremallera de dirección, se ha decidido tomar un modelo ya existente en el mercado. En concreto, se ha tomado el modelo 3D proporcionado por la empresa estadounidense McMaster-Carr, empresa que en su página web ofrece un amplio catálogo de todo tipo de piezas y herramientas con sus modelos 3D correspondientes.

Sin embargo, ha sido necesario transformar ligeramente el modelo obtenido de la web, debido a que los ejes que se pretenden conectar no son coaxiales. Para ello, se ha llevado a cabo una operación de Rotate, para poder girar los componentes necesarios para garantizar que todas las piezas encajan adecuadamente.

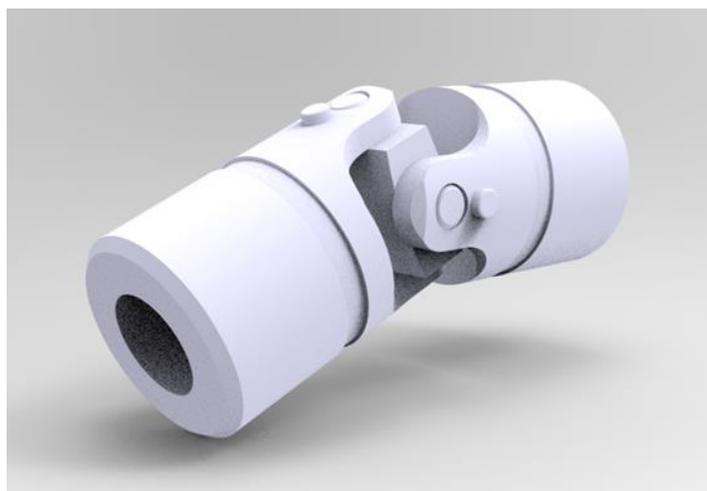


Figura 4-59. Modelo 3D de la junta cardán

#### 4.5.4. Cremallera de dirección

Para el modelado de la cremallera de dirección, se ha tomado como referencia visual modelos ya existentes o ideados en otros monoplazas de F4, ya sean reales o virtuales. En concreto, se ha tomado un modelo de cremallera ya modelado para el F4 existente en el simulador de conducción iRacing, ya que presentaba un

nivel de detalle bastante acorde con el alcance de este proyecto.

Para el modelado de la parte visible, se ha realizado un Pad para obtener la sección cilíndrica exterior. Además, se ha realizado una operación de Pocket para que se pueda alojar el elemento que conecta esta cremallera de dirección con las barras de dirección, elemento modelado posteriormente también mediante una operación de Pad. Por último, se ha realizado un Pad para modelar el elemento que fija la cremallera al monocasco, y se ha realizado una operación de Mirror para obtener el otro elemento fijador.

Además, esta cremallera de dirección debe ir unida de alguna manera a la junta cardán, para que este cumpla su función de transmitir el movimiento que el piloto exige a través del volante. Para ello, se han modelado dos barras mediante operaciones de Pad: una con un diámetro de 1", que se conecta a la junta cardán, y la otra de un diámetro menor, para dar un aspecto visual más cercano a los modelos ya existentes.

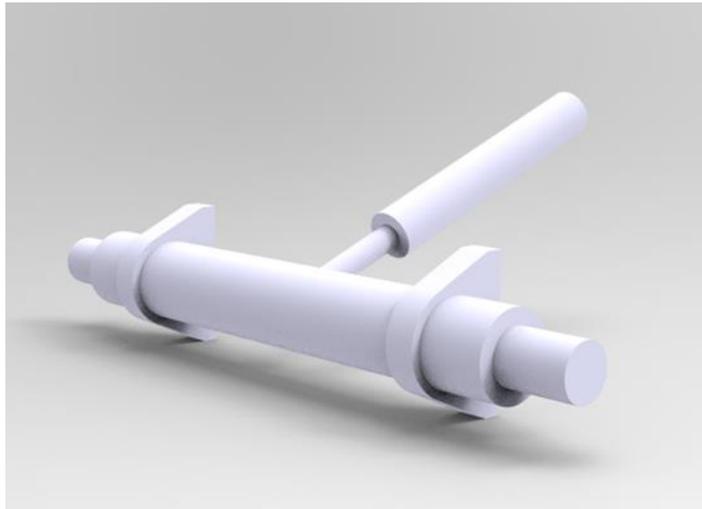


Figura 4-60. Modelo 3D de la cremallera de dirección

## 4.6. Sistemas auxiliares

A continuación, se detallará el modelado de algunos elementos auxiliares que se encuentran en el monoplaza. En concreto, en esta categoría se encuentran ciertos elementos auxiliares de seguridad, como el Halo, los espejos retrovisores o el extintor de incendios; así como otros elementos que se pueden encontrar en un monoplaza de F4, como el depósito de combustible o el parabrisas.

### 4.6.1. Halo

Para el modelado del Halo, elemento de seguridad introducido con la creación de esta segunda generación de monoplazas de F4, se ha trabajado especialmente en el módulo de Generative Shape Design, debido principalmente a que se va a utilizar con bastante frecuencia la herramienta Combine, herramienta ya utilizada para el modelado de otras piezas con formas más complejas, que permite crear una curva 3D a partir de dos proyecciones bidimensionales.

En primer lugar, se ha modelado el arco que rodea el habitáculo. Para ello, se ha modelado la curva guía a través de la herramienta Combine. Después, al comienzo de esta curva guía, se ha trazado la sección transversal, siendo este un círculo. Con ello, se ha realizado una operación de Sweep para obtener la forma deseada.

Posteriormente, se procede a modelar la estructura central, que se encuentra por delante del piloto. Para ello, con el fin de evitar que se genere una superficie torsionada y para tener un mejor control sobre la misma, se han creado nada menos que 8 curvas guía: 4 mediante la herramienta Combine, apoyándose de los planos auxiliares necesarios para ello; y las otras 4 mediante simetrías con respecto al plano de simetría del monoplaza. Además, habiendo trazado dos sketches, uno que delimita la sección inicial transversal de este

elemento y otro la sección final, se ha podido llevar a cabo una operación de Multi-Section Surface. Después, se ha realizado una operación de Split entre este elemento central y el arco previamente modelado, para obtener así la forma deseada.

Después, se modela el elemento que une la sección central del Halo con el monocasco. El procedimiento es similar al del modelado de la sección central previamente descrito: se han generado varias curvas guía mediante las herramientas Combine y Symmetry, y, con las secciones inicial y final trazadas, se ha realizado una operación de Multi-Section Surface.

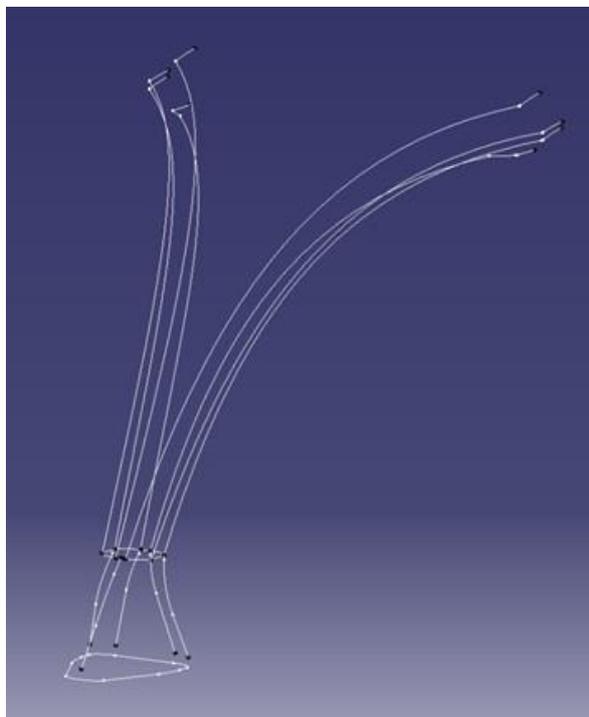


Figura 4-61. Curvas guía necesarias para modelar el pilón central del Halo

Por último, se procede a transformar el Halo a un elemento sólido. Para ello, en primer lugar, se realizan algunos cortes, mediante la operación de Split, al arco que rodea al habitáculo, con el fin de evitar que parte del Halo atravesase el monocasco. Después, se han realizado operaciones de Fill y Join para cerrar las superficies necesarias y así evitar posibles errores para pasar de un elemento formado por superficies a uno formado por sólidos. Para terminar, mediante operaciones de Close Surface, se pasan a tener dichos elementos sólidos.

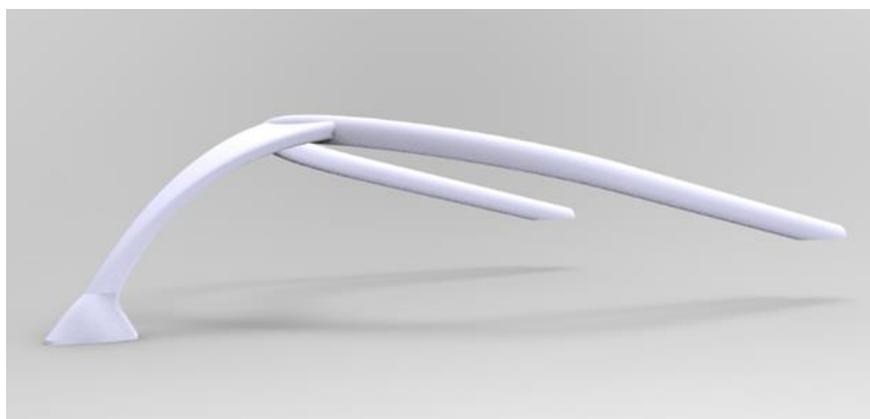


Figura 4-62. Modelo 3D del Halo

#### 4.6.2. Espejos retrovisores

Para el modelado de los espejos retrovisores, se ha debido tener en cuenta la sección 14.3 de la normativa técnica del monoplaza. En él, se estipula las dimensiones mínimas que debe tener el espejo retrovisor y la posición en la que puede estar, con el fin de garantizar al piloto la mayor visión, dentro de lo posible, hacia atrás.

Con ello, en primer lugar, se ha modelado la superficie especular, atendiendo a las restricciones impuestas por la normativa. Para ello, apoyándose en un plano auxiliar, se ha trazado un Sketch con la superficie rectangular. Con este sketch, se ha realizado una operación de Pad para darle volumen al espejo.

Tras esto, se procede con el modelado de la propia estructura que aloja el espejo. En primer lugar, se traza un Sketch paralelo al plano de referencia del monoplaza, para 'levantar' un sólido mediante un Pad. Con ello, se ha creado la estructura que se encuentra por detrás del espejo.

Posteriormente, se completa la estructura que aloja al espejo. Para ello, a partir de la superficie rectangular plana generada en el Pad anterior, se traza un nuevo Sketch que contenga el espacio necesario para albergar la superficie especular. Con este sketch trazado, se realiza un Pad hasta llegar al nivel del espejo.

Por último, se realiza el soporte del espejo al monocasco. Se ha tomado como referencia modelos ya existentes en el mercado de piezas montadas en monoplazas de F4 y similares. Con ello, en primer lugar, se ha trazado la curva guía que debe seguir la sección transversal de este soporte. Después, habiendo trazado dicha sección, supuesta circular, se realiza una operación de Sweep. Tras esta operación, se realiza un corte con la superficie del monocasco, para evitar que lo atraviese; y después, se transforma a un sólido mediante la operación de Close Surface.

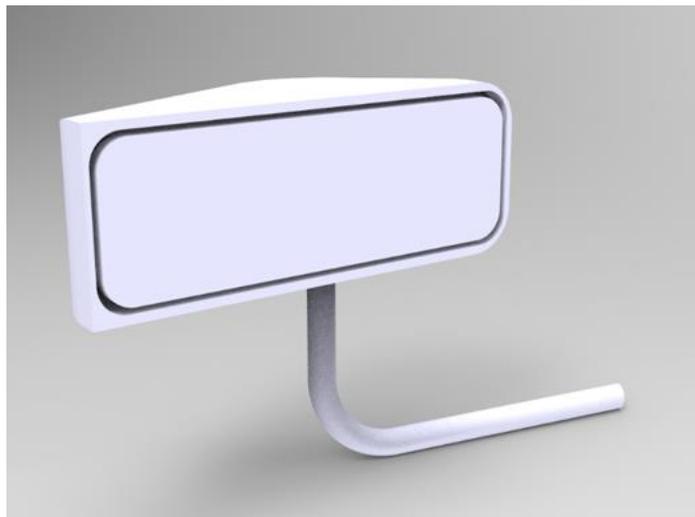
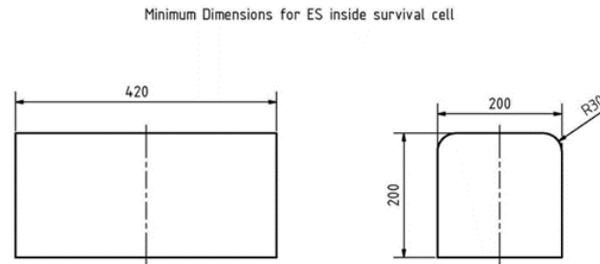


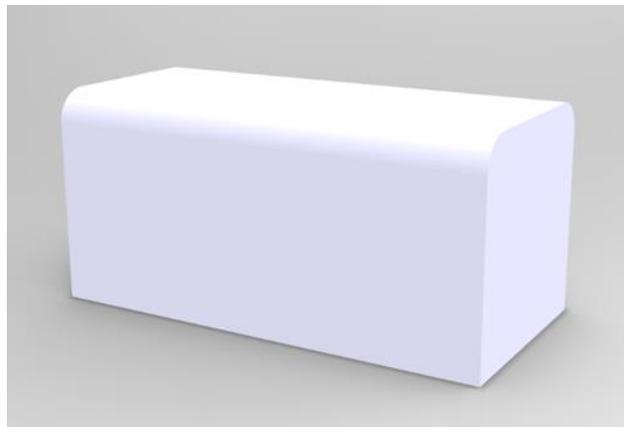
Figura 4-63. Modelo 3D del espejo retrovisor izquierdo

#### 4.6.3. ES Box

La normativa FIA estipula que el monocasco debe ser capaz de alojar un espacio reservado para los sistemas electrónicos que alimentan a distintos componentes del monoplaza. Este espacio, detallado en el Drawing 12 de la normativa para el monoplaza de F4 de 2ª generación, debe situarse por detrás del asiento del piloto, y en un espacio separado del habitáculo que aloja a dicho piloto.

Figura 4-64. *Drawing 12*

Con ello, el modelado en sí es similar a otras piezas ya vistas. Se ha trazado un sketch con la sección transversal de este volumen, y después se ha llevado a cabo una operación de Pad. Para este elemento, lo más interesante es la posición dentro del monocasco, ya que tiene un efecto directo en la forma de otro elemento que se describirá a continuación: el depósito de combustible.

Figura 4-65. Modelo 3D de la *ES Box*

#### 4.6.4. Depósito de combustible

Para el modelado del depósito de combustible, ha sido muy importante la integración entre este elemento, la ES Box y el monocasco, ya que la posición de estos dos elementos últimos tiene un gran efecto sobre la forma que adoptará el depósito de combustible. Con ello, una vez situada la ES Box, se ha realizado la sección transversal del depósito, de forma que el volumen resultante del depósito sea de 45L, una cifra bastante común, e incluso ligeramente superior a otros monoplazas de F4 ya existentes.

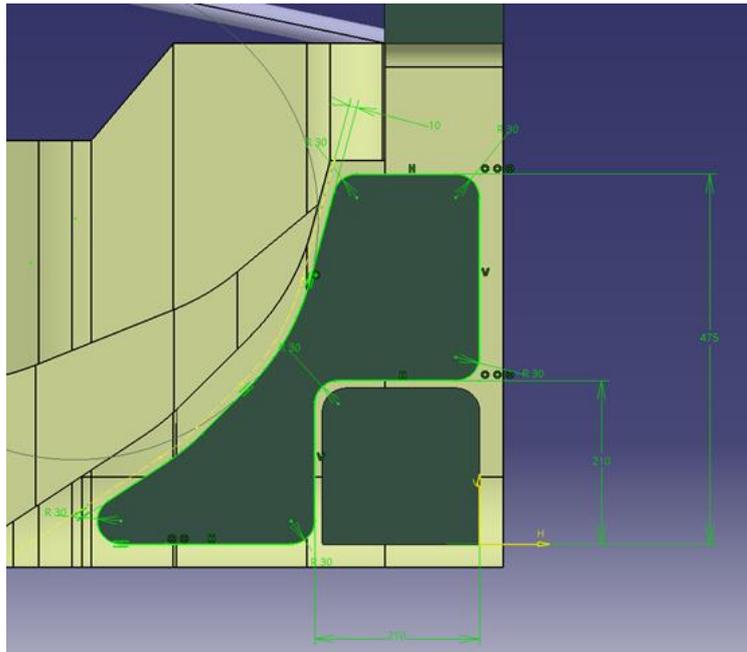


Figura 4-66. Sección transversal del depósito de combustible, con su contorno indicado en verde. Se puede apreciar cómo, debido a la existencia de la *ES Box* y a la forma del monocasco, se ha tenido que recurrir a un depósito con una forma personalizada

Con la sección transversal modelada, se ha realizado una operación de Pad para dotar de volumen al depósito. Con la operación de Pad ya realizada, se comprueba que el depósito efectivamente tenga una capacidad de 45L, condición que cumple.

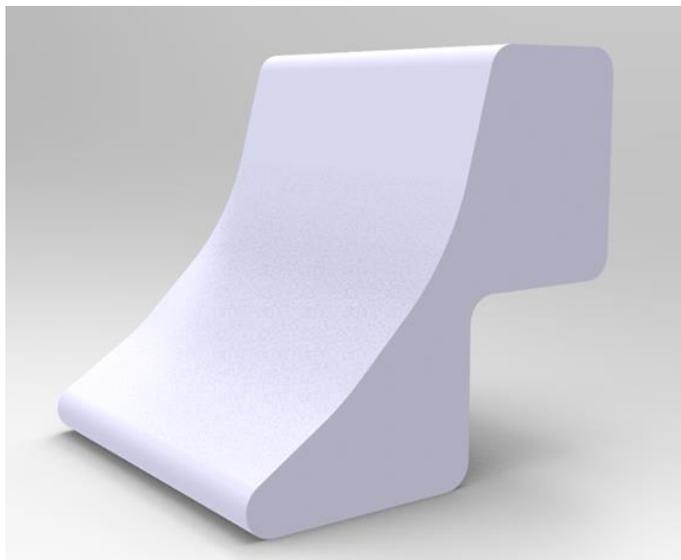


Figura 4-67. Modelo 3D del depósito de combustible

#### 4.6.5. Extintor de incendios

Los monoplazas de F4 deben tener un extintor para poder apagar las posibles llamas que se puedan generar dentro de la cabina. Este extintor, observando configuraciones de distintos tipos de monoplaza, se suele situar debajo de las piernas del piloto, en un compartimento separado del habitáculo.

Para el modelado de este elemento, se ha empleado como referencia un modelo de extintor ampliamente

utilizado en competición, en concreto en monoplazas: un extintor OMP CEFAL 3, extintor homologado por la FIA. A través de la página de OMP y del software AutoCAD, se han podido obtener las medidas requeridas para su modelado.



Figura 4-68. Extintor de incendios OMP CEFAL 3

Ya en CATIA, en primer lugar, se traza una de las mitades de la sección transversal de la parte principal del extintor. Con ello, se ha llevado a cabo una operación de Shaft para conseguir esa parte principal del extintor.

Para el modelado de las válvulas, el proceso es análogo al descrito en el párrafo previo: se traza la mitad de su superficie de revolución para someterlo a una operación de Shaft. Por último, se realizan un par de Edge Fillet para suavizar las intersecciones entre las válvulas y la bombona.

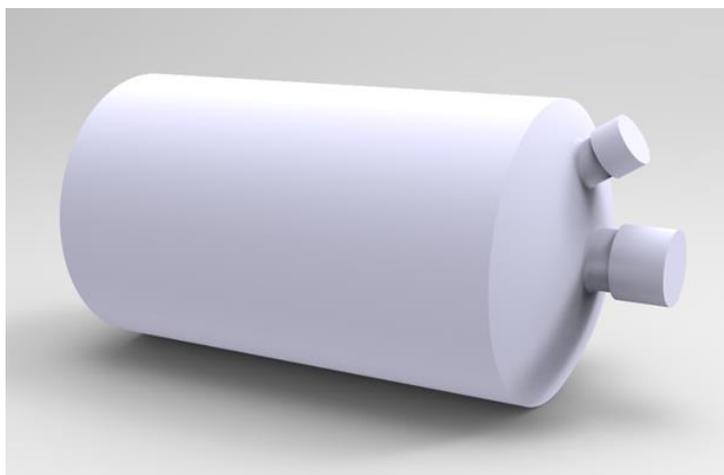


Figura 4-69. Modelo 3D del extintor de incendios

#### 4.6.6. Parabrisas

Dentro de los sistemas auxiliares del monoplaza, se ha modelado también el parabrisas, elemento que, como su nombre indica, evita que la corriente incidente impacte directamente contra el casco del piloto, pudiendo provocar incomodidad para el mismo o incluso llegar a situaciones en las que, por ejemplo, el casco tienda a levantarse.

Para el modelado de este, se ha aprovechado la forma del habitáculo para obtener algunas líneas de utilidad. En primer lugar, se ha trazado un sketch correspondiente al límite inferior de este elemento. Con ello, se ha podido realizar una operación de Pad para dotar de volumen al parabrisas. De esta operación, hay que destacar que se ha activado la casilla de Thick, precisamente para que este elemento cuente con un espesor.

Posteriormente, se ha realizado otro sketch para delimitar la parte superior del parabrisas. Con ello, se ha

realizado un Pocket para poder eliminar las esquinas sobrantes, y hacer que este elemento tenga una forma más similar a modelos ya existentes. Por último, se han realizado un par de Edge Fillet para redondear las esquinas de la parte superior.

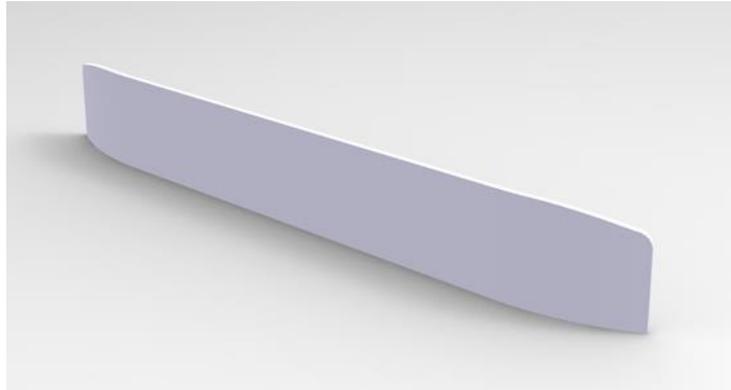


Figura 4-70. Modelo 3D del parabrisas

#### 4.6.7. Reposacabezas

A continuación, se explica el modelado del reposacabezas, elemento encargado de amortiguar el impacto del casco del piloto contra el propio monoplaza en caso de accidente, así como de ayudar a protegerlo de posibles latigazos cervicales. Este elemento se localiza con facilidad, ya que se encuentra rodeando la cabeza del piloto y, además, cuando éste se baja del monoplaza, es una pieza que tiene que quitar.

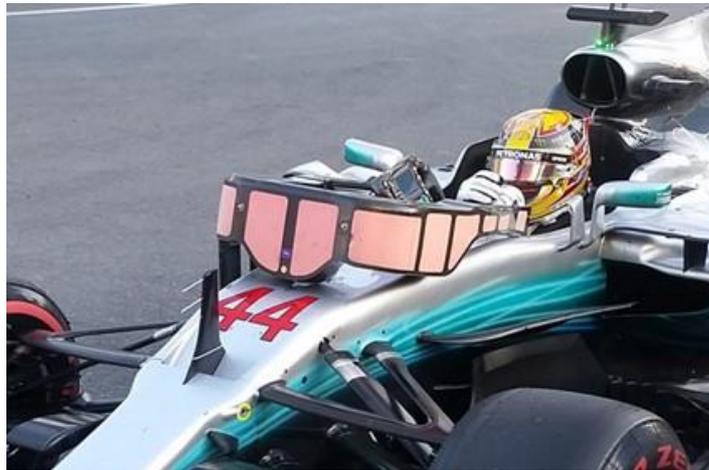


Figura 4-71. Lewis Hamilton bajándose de su monoplaza. Nótese cómo ha tenido que quitar el reposacabezas para poder bajarse del monoplaza

Para modelar este reposacabezas, se ha empleado la normativa de F4, en la cual incluyen las dimensiones características del mismo, así como un esquema del volumen que tiene que ocupar dicho elemento. En concreto, el proceso de modelado que se comentará a continuación va enfocado a obtener este volumen que indica la normativa.

En primer lugar, se realiza una operación de Pad a la superficie lateral exterior, empleando para ello el contorno de esta previamente trazado. Con ello, se obtiene una forma base a partir de la cuál se pueden ir modelando el resto de los detalles de este elemento. Tras este Pad, se lleva a cabo una operación de Pocket para que el reposacabezas pueda entrar en el espacio habilitado. Para ello, se ha extraído el contorno exterior de este espacio, pudiéndose hacer así dicha operación de Pocket.

Posteriormente, se ha realizado una operación de Pad para añadir el material necesario que se encuentra detrás del casco del piloto. Para llevar a cabo esta acción, de forma similar a la operación anterior, se ha aprovechado

la forma que tiene el monocasco en esta zona, extrayendo su contorno para realizar dicha operación. Después, se han llevado a cabo dos operaciones de Pocket: uno que permite eliminar el material que se encuentra en la zona central del sólido que se tenía modelado, para que ya el reposacabezas tenga su forma característica y pueda cumplir su función, y otro que se encuentra en la parte delantera. Este segundo Pocket se realiza para que las manos del piloto no choquen con el reposacabezas cuando éste gira el volante. Para modelar este corte en la parte derecha del reposacabezas, se ha realizado una operación de Mirroring. Este tipo de cortes para las manos es bastante común, debido a que el espacio disponible para el piloto es bastante limitado.



Figura 4-72. Imagen de la cámara a bordo de Fernando Alonso. Se puede apreciar como el reposacabezas se debe adaptar para que las manos del piloto se puedan mover libremente

Con ello, el reposacabezas ya está modelado, teniendo la forma que se muestra en la siguiente imagen.

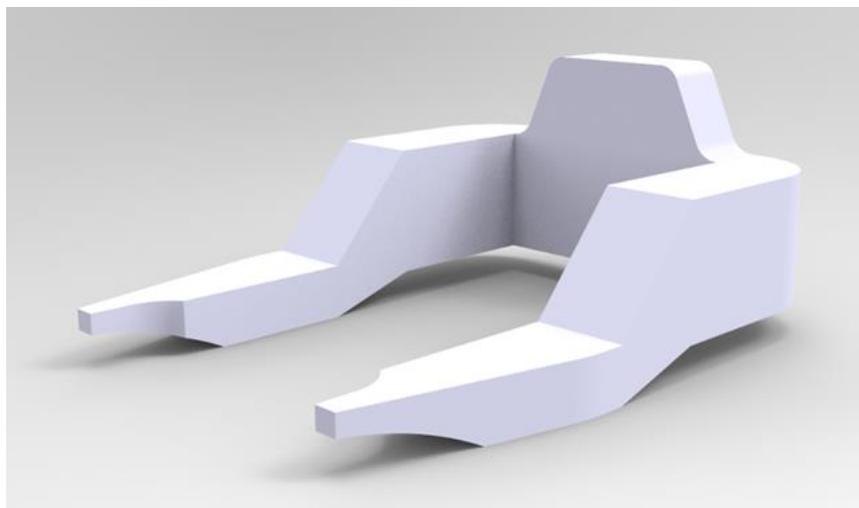


Figura 4-73. Modelo 3D del reposacabezas

## 4.7. Pedalera

Se procede a detallar el modelado de los pedales de acelerador, freno y embrague de los que dispone el monoplaza, y también de algunos elementos auxiliares que acompañan a estos, como el cilindro actuador y los depósitos de líquido que estos disponen.

### 4.7.1. Pedales

En primer lugar, se han modelado los propios pedales, así como la estructura que los fija a una superficie plana. Para el modelado de los pedales, se ha tomado como referencia el set de pedales CP5500-605 de la empresa británica AP Racing, ya que es muy modelo bastante conocido y utilizado en copas de promoción de monoplazas como la propia F4.

A continuación, se entrará en detalle sobre el modelado del pedal del acelerador, teniendo en cuenta que el proceso de modelado de los pedales del freno y embrague es prácticamente idéntico. En primer lugar, se empieza modelando el propio pedal. Para ello, se traza el contorno de la sección transversal, para poder someterlo a una operación de Pad. Tras esto, se realizan los taladros en el pedal que permiten modificar la posición de este, ajustándolo a las necesidades del piloto. Para ello, se realiza una operación de Pocket a una circunferencia previamente trazada en la esquina superior izquierda del pedal. Con el Pocket realizado, para obtener el resto de los agujeros, se realiza un Rectangular Pattern.

Después de realizar el pedal, se lleva a cabo el modelado de la estructura que sujeta a este. Para ello, se sigue un proceso similar al del modelado del pedal: se traza el contorno de su sección transversal y se somete a éste a una operación de Pad. Además, en la zona superior, se realizan tres de agujeros por lo que pasan los tornillos que ajustan el pedal a esta estructura, mediante una operación de Pocket.

Por último, el pedal del acelerador cuenta con una pieza situada a un lateral del mismo, que evita que se le ‘escape’ el pie del acelerador al piloto porque éste resbale. Para modelar este elemento, se traza el contorno de la sección transversal y se realiza una operación de Pad. Finalmente, se realizan operaciones de Edge Fillet para suavizar bordes.



Figura 4-74. Modelo 3D del pedal de acelerador

Como se comentó previamente, el modelado del pedal de freno y embrague es prácticamente seguir el mismo proceso, teniendo en cuenta que estos dos pedales no cuentan con esa pieza auxiliar que sí tiene el acelerador.

Tras tener los tres pedales, se procede con el modelado de la base de la pedalera, elemento que mantiene los pedales fijos de forma que puedan realizar el giro necesario para funcionar. Para esta pieza, se ha tomado una mayor libertad en el diseño, debido a que existen numerosas soluciones para ello, partiendo de diseños

complejos como los que tiene AP Racing disponibles y llegando incluso a contar con elementos individuales para cada pedal, como ocurre con los pedales de F1. Por tanto, y observando tendencias existentes en el mercado, se ha decidido realizar un diseño sencillo, pero que sea un bloque completo, para facilitar el ajuste de toda la pedalera para el piloto.

Para realizar esta pieza, en primer lugar, se han realizado dos operaciones de Pad, partiendo de los contornos de las secciones transversales necesarias. Con ello se obtiene la placa que va fija al monocasco y el bloque donde se encontrarán los mecanismos que sujetan a los pedales. Tras realizar estas operaciones, se modelan los huecos en los cuales irán los pedales. Para ello, se trazan secciones rectangulares en las posiciones adecuadas, y se someten a una operación de Pocket para quitar el material necesario. Por último, para que la placa plana adopte la forma del monocasco, ha sido necesario recortar ligeramente la parte inferior de esta. Para ello, utilizando el contorno de la sección interior del monocasco, se realiza otra operación de Pocket para eliminar el material sobrante.

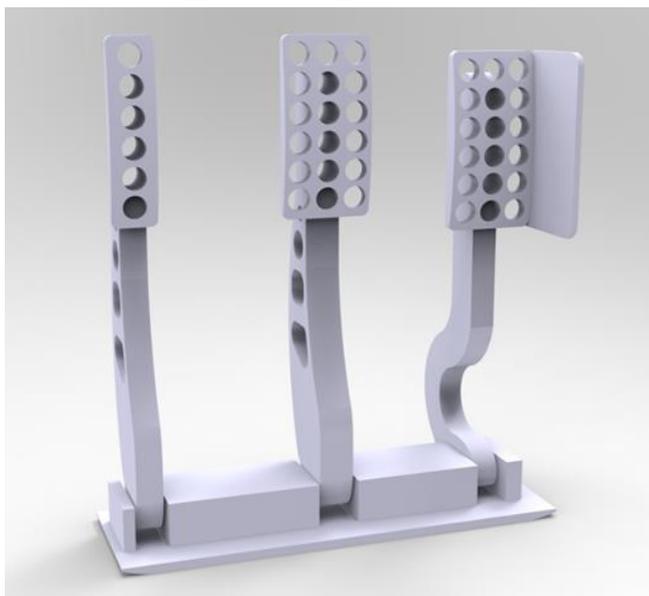


Figura 4-75. Modelo 3D de la pedalera

#### 4.7.2. Cilindro actuador

Se procede con el modelado del cilindro actuador, elemento que se encarga de transmitir la información de los pedales a los distintos elementos que controlan la aceleración y el frenado del coche. Para ello, se ha tomado como referencia un modelo de actuador de la marca AP Racing compatible con los pedales previamente modelados. En concreto, se ha tomado el modelo CP2623, modelo que también cuenta con sus planos que se pueden descargar en la página web de AP Racing.

Con ello, primero se ha modelado la sección cilíndrica principal. Para ello, se ha trazado una circunferencia que hará las veces de contorno de la sección transversal de esta parte. Con ello, después se ha realizado una operación de Pad, para obtener el sólido deseado.

Posteriormente, se han modelado los dos elementos que se sitúan en la parte superior del cilindro. Estos componentes son la entrada y salida de líquido hidráulico al cilindro. Para ello, de forma similar al modelado del propio cilindro, se han trazado los contornos de sus secciones transversales, para realizar posteriormente una operación de Pad.

Tras esto, se ha realizado el elemento encargado de fijar este cilindro actuador al monocasco. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una operación de Pad con la sección transversal de este elemento, previamente trazado. Con ello, se ha realizado una operación de Pocket para rebajar el material en los laterales de la cara que va pegada al monocasco, al igual que se tiene en la pieza real. Por último, se han llevado a cabo varias operaciones de Edge Fillet para suavizar algunos bordes.

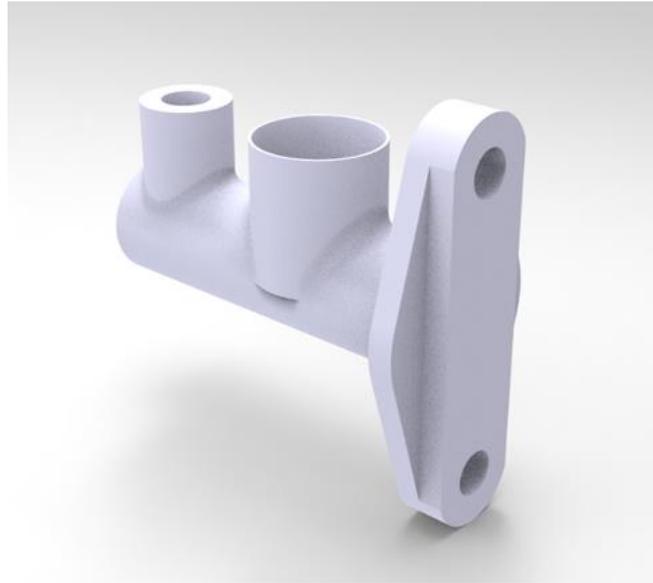


Figura 4-76. Modelo 3D del cilindro actuador

#### 4.7.3. Depósito del cilindro actuador

Como se ha comentado previamente, el cilindro actuador funciona de forma hidráulica. Es por ello por lo que cuenta con una entrada de fluido hidráulico. Este fluido se encuentra almacenado en unos depósitos cilíndricos, de forma que cada cilindro actuador cuenta con su propio depósito.

Para el modelado de estos elementos, se han tomado como referencia depósitos existentes en el mercado y compatibles con los actuadores que se han modelado. Por ello, se han tomado los depósitos de la misma marca AP Racing, en concreto el modelo CP4709. Cabe destacar que este modelo engloba a numerosos tamaños de cilindro. Para este trabajo, y tomando como referencia imágenes y configuraciones ya existentes, se han tomado unos depósitos de tamaño medio para los pedales del acelerador y del freno, mientras que, para el embrague, pedal que sólo se emplea en las salidas en parado, se ha tomado un depósito de menor tamaño.

En lo que respecta al modelado, en primer lugar, se ha trazado el contorno de la generatriz del cuerpo principal del cilindro. Con ello, se ha realizado, mediante una operación de Shaft dicho sólido. Posteriormente, se ha llevado a cabo un proceso análogo para el modelado del tapón del depósito. Tras obtener el tapón, se ha realizado una operación de Pocket, seguido de un Circular Pattern para eliminar el material sobrante en el tapón, dando un aspecto más parecido al real.

Con esto, y aprovechando que se tiene información sobre ello en los planos obtenidos de la página web de AP Racing, se ha modelado la rosca que ayudaría a mantener al depósito fijo en su posición establecida. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una operación de Shaft, trazando previamente el contorno de la generatriz de esta parte del depósito. Con ello, se procede a realizar una operación de Thread, con el fin de crear una rosca por encima del sólido que se acaba de generar. En cuanto al diámetro de la rosca, se han puesto los 15/16" que indica el fabricante. También se ha modificado el Pitch, de forma que haya 20 vueltas de rosca, obteniéndose así un Pitch de 1.27 mm.

Por último, cabe destacar que, debido a que la única diferencia entre los depósitos de tamaño medio y tamaño pequeño es la altura de este, se ha realizado una parametrización de dicha altura, de forma que sea sencillo cambiar el tamaño de estos depósitos, además de que así se practica más con esta funcionalidad que presenta CATIA. Con ello, los modelos de depósitos quedan como se muestran en las siguientes imágenes.

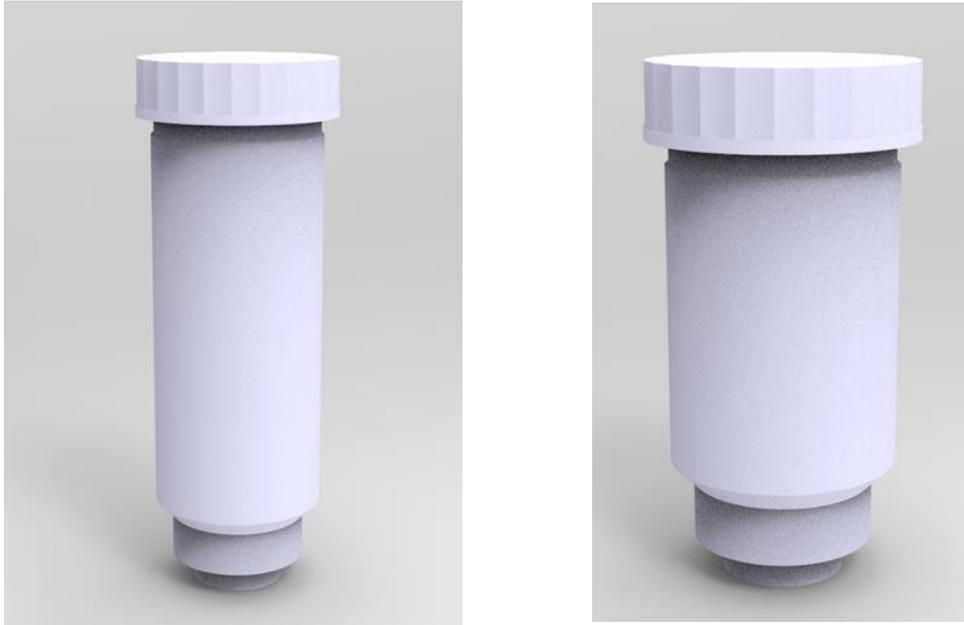


Figura 4-77. Modelos 3D del depósito mediano (izquierda) y pequeño (derecha)

# 5 DISEÑO DE UN MONOPLAZA TIPO F4: ENSAMBLADO

Se procede a realizar algunos comentarios acerca del proceso de ensamblado de las distintas piezas, para obtener el modelo completo del monoplaza de F4. CATIA V5 permite el ensamblado de piezas a través del módulo de Assembly Design.

Debido al elevado número de piezas que conforman nuestro monoplaza, se ha decidido seguir una estructura jerárquica, en la que se crean familias de piezas que pertenecen a un determinado subsistema. Las familias que se han creado son las que se han mencionado al comienzo de esta sección de la memoria. Con ello, cada grupo tiene asociado un conjunto de piezas que se van ensamblando como sea necesario, y ya después se crea un CATProduct genérico en el cual se incluyen los CATProduct de cada categoría. Esto se ha llevado a cabo para facilitar el trabajo de ensamblado y la lectura del árbol de CATIA.

Eso sí, en todos estos distintos grupos y subgrupos se mantiene una constante: el monocasco es el elemento central del monoplaza, es el componente sobre el cuál se montarán el resto de las piezas. Por eso, es muy importante que este elemento no cambie su posición en ninguna circunstancia. Una de las operaciones que se puede llevar a cabo en el módulo de Assembly Design es la de fijar la posición de un elemento (Fix Component en inglés), la cual va a ser siempre la primera acción que se lleve a cabo nada más importar la célula de supervivencia en cada uno de los CATProduct que se lleven a cabo.

En cuanto al ensamblado de las distintas piezas, se han adoptado dos estrategias: para piezas que se sabe de antemano la posición, como por ejemplo en el caso del paquete aerodinámico, cuyas piezas no se han movido desde que se han modelado, se ha llevado a cabo el siguiente proceso: el módulo de Assembly Design permite modificar las partes que conforman el ensamblado, así como crear piezas nuevas. Sin embargo, a la hora de crear este nuevo elemento, CATIA da la opción de elegir el punto de origen de esta, pudiendo escoger entre el punto de origen de uno de los componentes que ya se tienen en el Assembly o hacer que el origen de la pieza coincida con el origen del ensamblado completo.

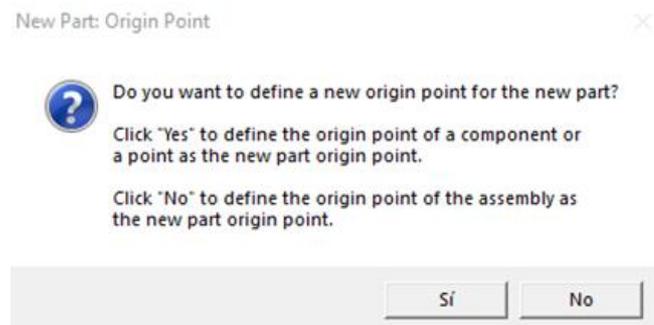


Figura 5-1. Cuadro de diálogo de CATIA que permite escoger el punto de origen de la nueva pieza creada en el módulo de Assembly Design

Para modelar el paquete aerodinámico se ha decidido usar esta ruta, haciendo que todos los puntos de origen de cada una de las piezas coincidan con el origen del Assembly. ¿Qué ventajas presenta esto? Tomando esta estrategia, uno ya no debe definir restricciones en el ensamblado, ya que la pieza que se modela ya está ubicada con respecto a un punto que es común en todo el Assembly.

Para el resto de las piezas que conforman el monoplaza, eso sí, se ha decidido optar por una estrategia más convencional, en la que pieza se modela por una parte, y luego se ubica en el ensamblado con ayuda de las distintas restricciones de posición que ofrece CATIA. Este enfoque se ha adoptado ya que el resto de las piezas sí son más susceptibles a cambios en su posición a medida que se va realizando el ensamblado, y estos cambios se hacen más fáciles si se modifican las restricciones en vez de aplicar operaciones de traslación en cada pieza en la que sea necesaria.

A continuación, se muestran los CADProduct de cada familia de piezas generada:

## 5.1. Suspensión

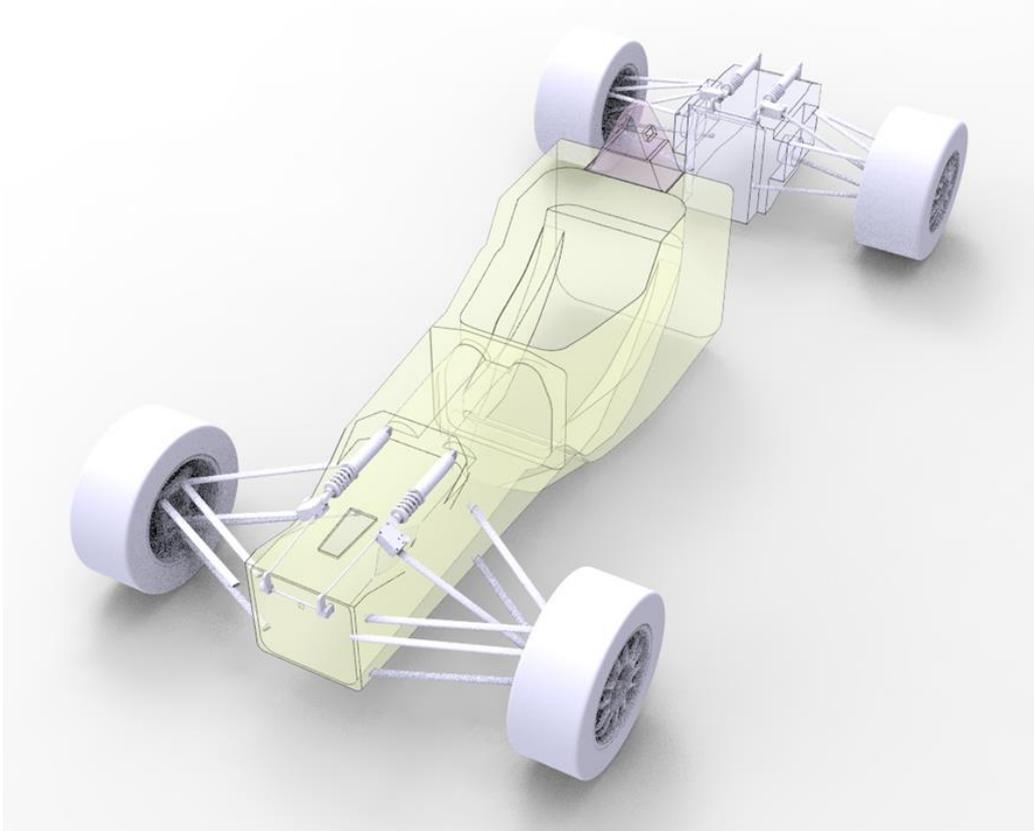


Figura 5-2. Sistema de suspensión ensamblado

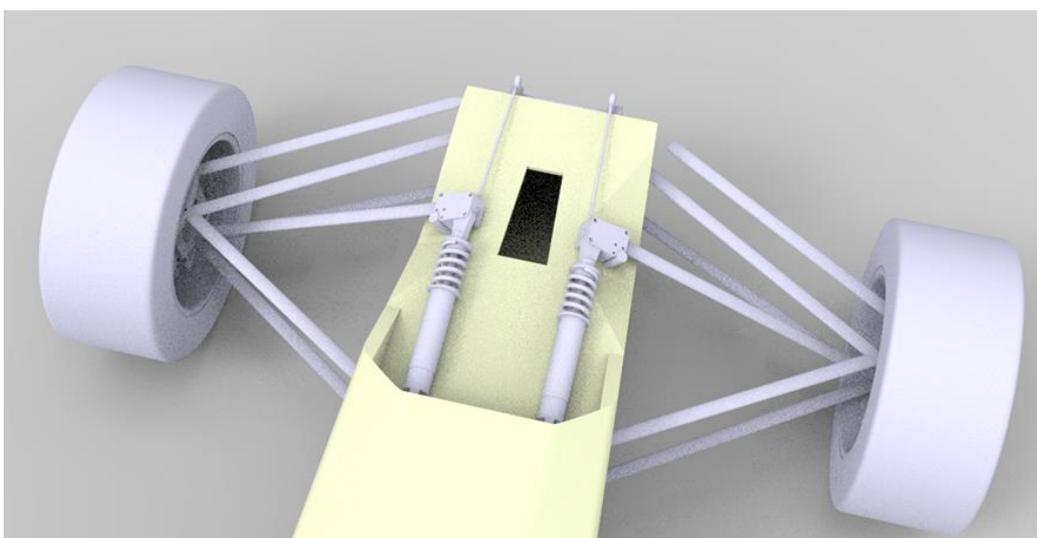


Figura 5-3. Detalle de la suspensión delantera del monoplaza

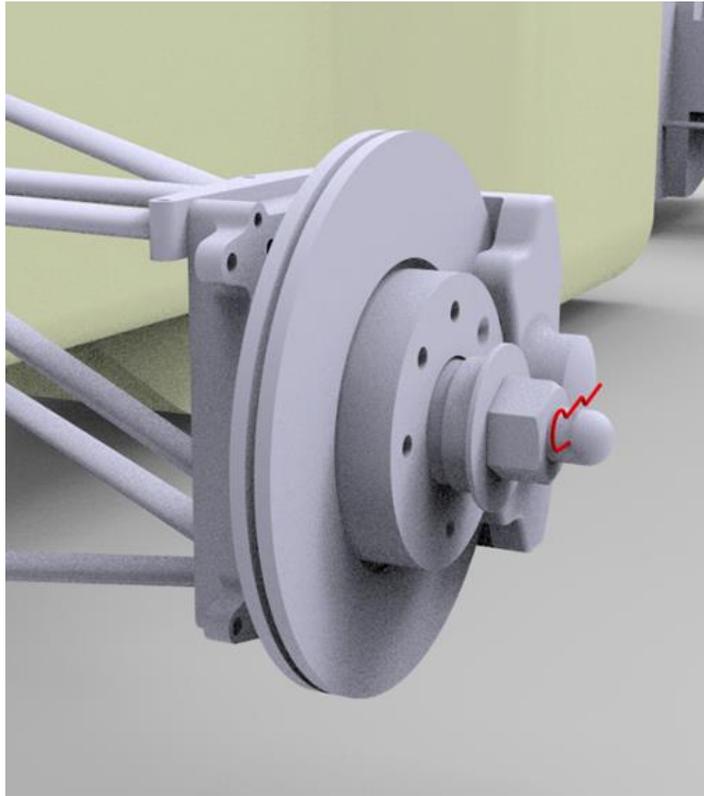


Figura 5-4. Detalle de los elementos que se encuentran en la rueda delantera derecha

## 5.2. Aerodinámica

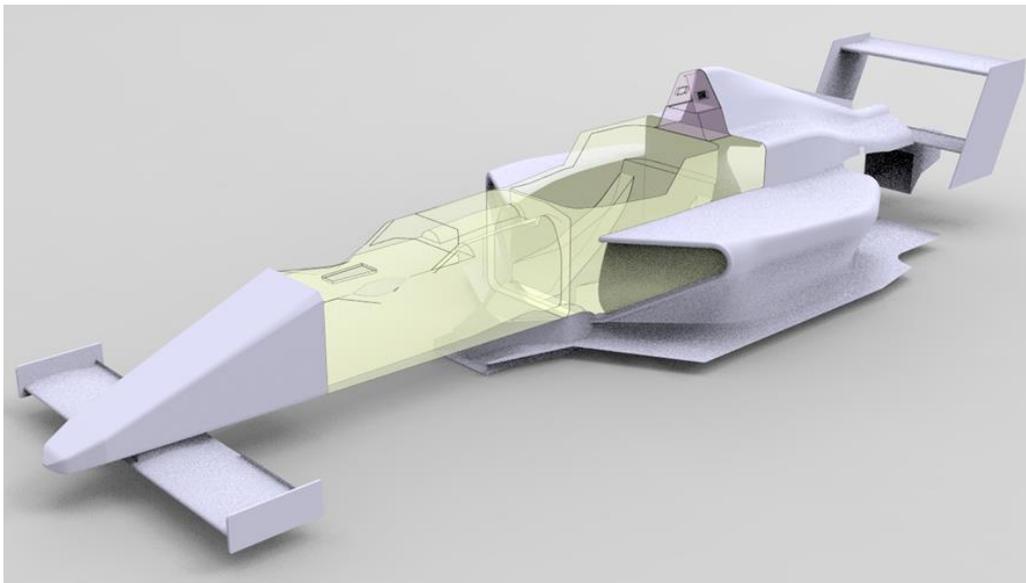


Figura 5-5. Paquete aerodinámico ensamblado

### 5.3. Planta de potencia

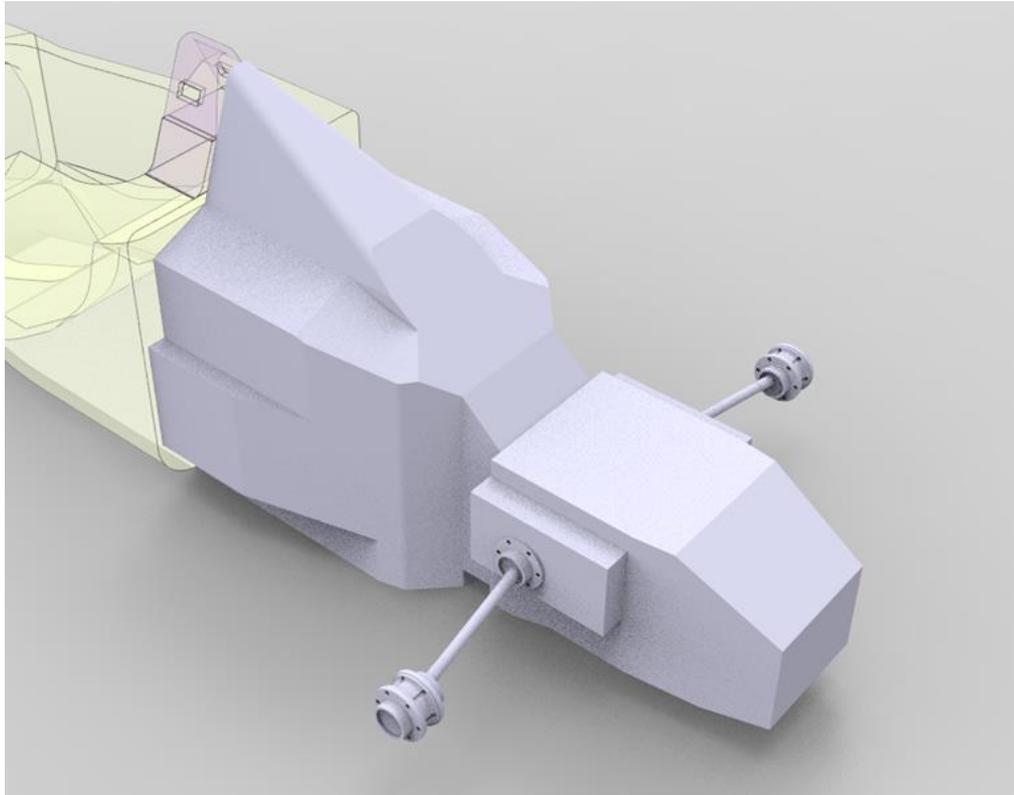


Figura 5-6. Planta de potencia ensamblada

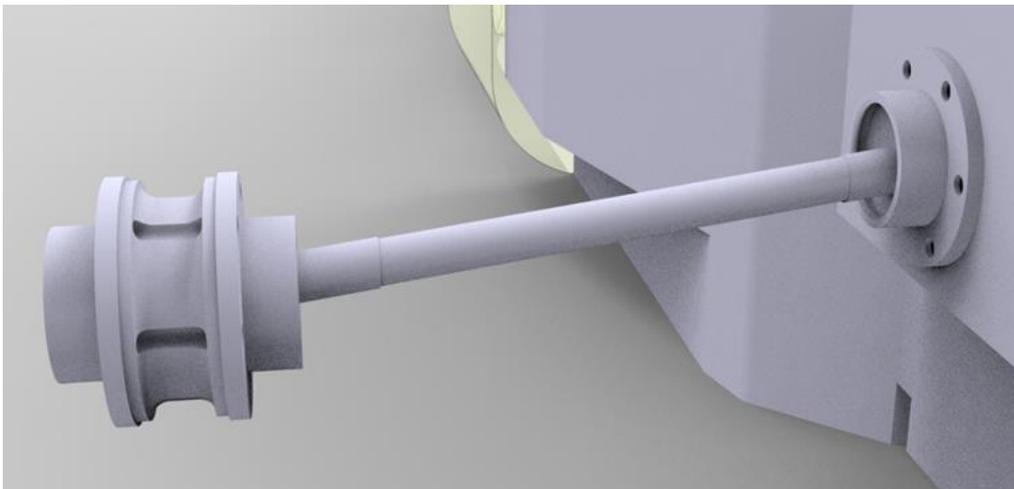


Figura 5-7. Detalle del eje de transmisión

#### 5.4. Sistema de dirección

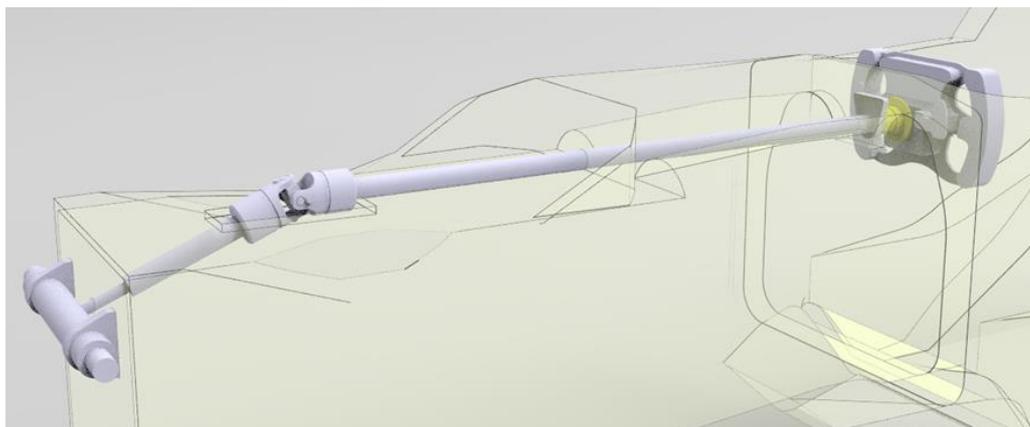


Figura 5-8. Sistema de dirección ensamblado

#### 5.5. Elementos auxiliares

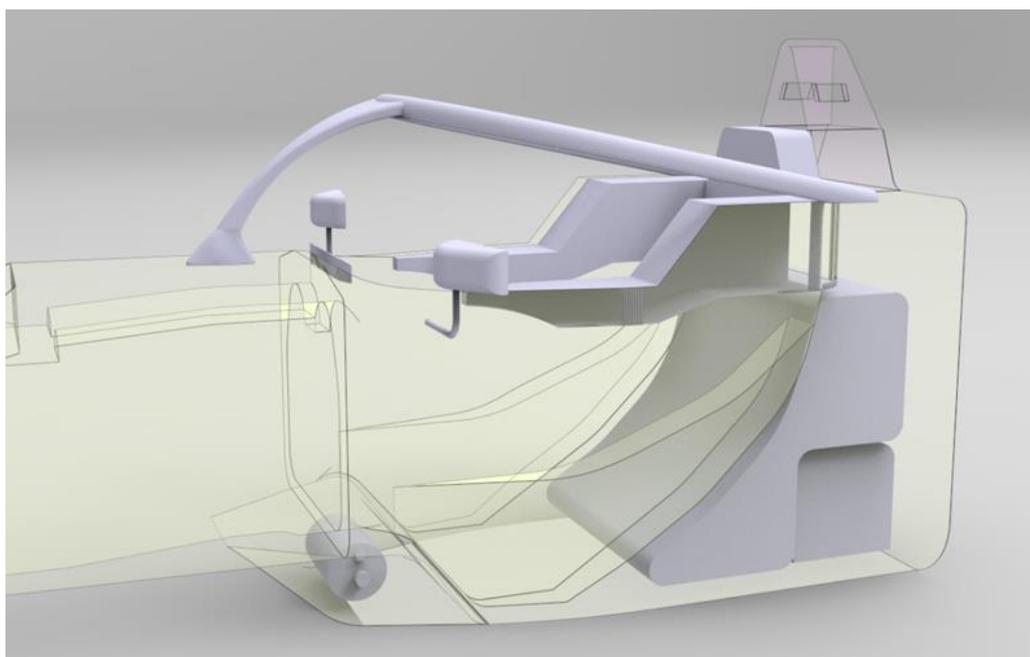


Figura 5-9. Conjunto de elementos auxiliares ensamblados

## 5.6. Pedalera

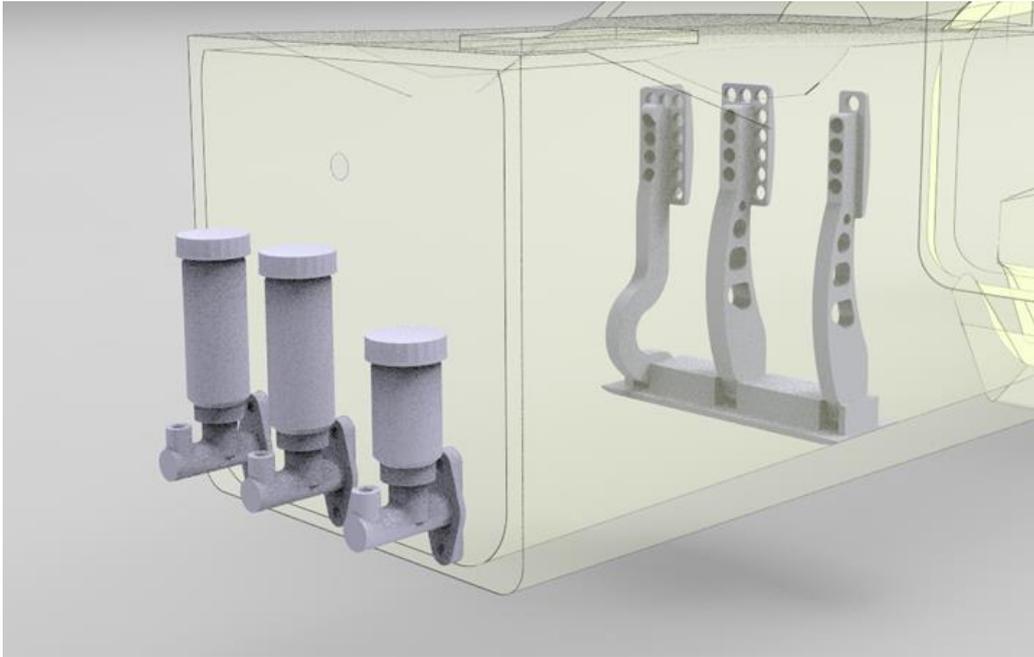


Figura 5-10. Pedalera ensamblada

## 6 DISEÑO DE UN MONOPLAZA TIPO F4: RENDERIZADO

Este proyecto también se ha sometido a una etapa de renderizado, en el que se ha buscado realizar fotografías más vistosas utilizando diversos programas de modelado y composición de imágenes. Esto se debe a que, a pesar de que CATIA cuenta con un módulo de renderizado, este es bastante limitado. Además, se ha aprovechado la experiencia previa que contaba con alguno de los programas.

El primer programa auxiliar que se ha empleado es Keyshot. Este software permite implementar modelos 3D para realizar composiciones, animaciones, etc. Una de las ventajas que presenta este programa frente a otros que se utilizan en el mercado es que funciona extremadamente bien con archivos de CATIA (bien sea CATPart o CATProduct). En la actualidad, los modelos 3D tienen numerosos formatos posibles (STL, OBJ, fbx, etc.), formatos aceptados por la gran mayoría de programas de modelado en 3D. Sin embargo, con los archivos de CATIA, la compatibilidad no se encuentra tan extendida, teniendo muchas veces que transformar estos archivos a formatos estándar, con su consecuente pérdida de información (por ejemplo, Blender, uno de los programas de referencia en el apartado de modelado y renderizado de gráficos 3D, no trabaja con archivos CATPart o CATProduct).

Sin embargo, Keyshot sí trabaja bien con este formato de archivos, pudiendo distinguir cada elemento que conforma el ensamblado. Por esto, y porque ya contaba con un poco de experiencia previa con el software, se ha decidido utilizarlo para fotografiar los modelos 3D y realizar las composiciones. Es más, las fotografías de los modelos 3D de las piezas y de los ensamblados que se han ido mostrando a lo largo de la memoria se han realizado en Keyshot.

Otra ventaja que presenta Keyshot es la amplia gama de materiales que tiene y que se pueden asociar a los distintos elementos, dando resultados bastante satisfactorios. Además, se pueden añadir etiquetas, pudiendo así añadir elementos que hace que el monoplaza parezca un monoplaza: dorsales, patrocinadores, la marca de los neumáticos en la franja de estos, etc.

Con ello, tras importar el monoplaza, el primer paso es asignarle los materiales adecuados, así como colocarle unos dorsales en el morro y en los endplates del alerón trasero. Los resultados se muestran en las siguientes imágenes:



Figura 6-1. Vista frontal del monoplaza

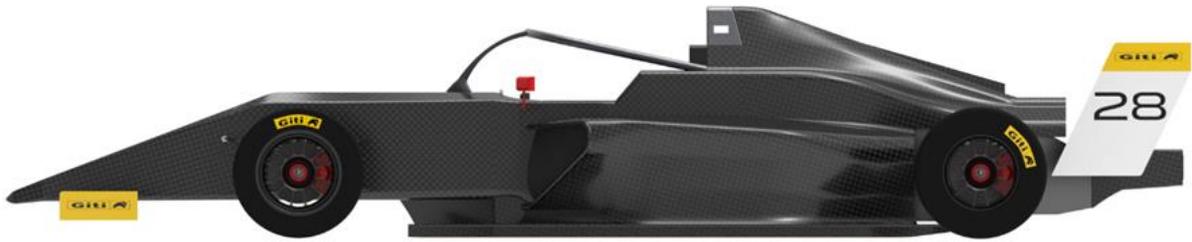


Figura 6-2. Vista lateral del monoplaza

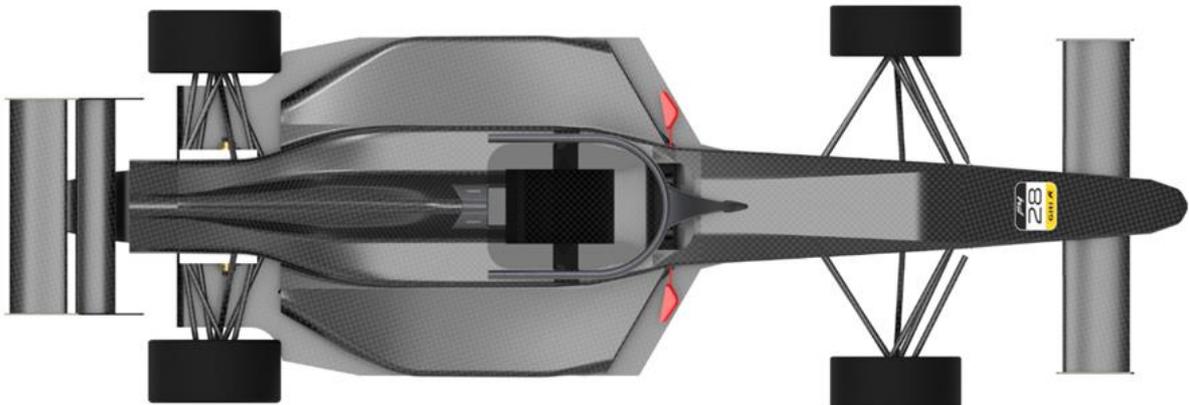


Figura 6-3. Vista en planta del monoplaza



Figura 6-4. Detalle de la suspensión delantera

Para poder continuar realizando algunas fotos más, ha sido necesario incluir también un piloto. Por desgracia, el maniquí de CATIA no se pudo importar a Keyshot, por lo que hubo que sacar un modelo de piloto de otro lugar. Por suerte, se pudo encontrar una solución, apoyándose en el simulador de conducción Assetto Corsa, ya que se pudo extraer un modelo 3D del piloto que utiliza el simulador por defecto.

Sin embargo, para poder modificar la postura del piloto, ha sido necesario transformar el CATProduct del F4 a un CATPart, para luego poder exportarlo a un formato estándar de gráficos en 3D y poder trabajar en Blender, debido a que es este programa el que permite modificar la postura del piloto. Afortunadamente, el transformar el ensamblado a una parte es un proceso sencillo, ya que CATIA cuenta con una operación específica para ello. Se trata de la operación Generate CATPart from Product, acción que se encuentra en la pestaña de herramientas del Assembly Design. Con ello, se ha podido generar un modelo del monoplaza de F4 en formato STL, un formato muy extendido y utilizado especialmente en impresión 3D.

Con el monoplaza y con el piloto ya ajustado, se ha importado a Keyshot para poder asociarle materiales. Cabe comentar que en Blender también es posible añadir texturas a los modelos 3D, sin embargo, debido a que no tenía experiencia con ello, y dado que las herramientas de Keyshot ya eran adecuadas para el alcance del proyecto que se pretende alcanzar, no se ha explorado la opción de texturizar el monoplaza de F4 en Blender. Así, tras asociar los materiales y colocar las etiquetas adecuadas, se obtiene el siguiente resultado:



Figura 6-5. Render del monoplaza con el piloto incluido

Tras llevar a cabo este proceso, se ha decidido realizar algunos renders en el que el monoplaza se encontraba en pista. Para realizar esto, ha sido necesario obtener unos modelos 3D de algunos circuitos. Afortunadamente, gracias a la comunidad que tiene Assetto Corsa, existen una gran cantidad de circuitos creados por terceros, por lo cual, se han podido emplear algunos de estos *mods* para realizar las fotografías que hagan falta. Otra de las ventajas de emplear este tipo de archivos es que ya vienen por defecto texturizados, lo cual simplifica mucho la tarea de realizar estas imágenes, ya que el trabajo más engorroso de colocar texturas a los modelos 3D ya está realizado.



Figura 6-6. Fotografía de la prueba de importación del modelo del circuito de Mónaco a Keyshot

Además de ello, Keyshot cuenta con un ciclo día-noche integrado, pudiendo hacer fotografías a distintas horas del día de forma sencilla. Con ello, algunas de las fotos realizadas se muestran a continuación:



Figura 6-7. F4 en el Red Bull Ring, circuito localizado en Austria



Figura 6-8. F4 en el circuito de Mónaco, situado en las calles del Principado



Figura 6-9. F4 en el circuito de Mónaco, a la salida del característico túnel



Figura 6-10. F4 en la subida de Eau Rouge-Raidillon, en el circuito de Spa-Francorchamps ubicado en Bélgica



Figura 6-11. F4 en Spa-Francorchamps, al atardecer

## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como conclusión y apuntes finales de este trabajo de fin de grado, cabe destacar que se ha obtenido un resultado muy bueno, y se ha cumplido con el objetivo de modelar un F4. Si se compara con imágenes de monoplazas de F4 reales, las proporciones de nuestro monoplaza son acertadas. Esto también se ha ido comprobando a lo largo del modelado y ensamblado de nuestro F4, ya que las piezas iban encajando sin mucha dificultad, como si fuese un puzle de gran precisión.

Quiero comentar también que este resultado satisfactorio se ha obtenido gracias a aprender a interpretar la normativa FIA correspondiente, cumpliéndose así otro de los objetivos impuestos, ya que, a fin de cuentas, si el monoplaza no cumple con la normativa, no puede participar. Eso sí, ha habido algunos puntos y matices de la normativa que se han suavizado, por tanto, es probable que haya que hacer pequeñas modificaciones para obtener un monoplaza 100% conforme con la normativa. Además, debido a las numerosas piezas de distintos fabricantes que se han utilizado como referencia, ha sido de gran utilidad aprender a buscar e interpretar los catálogos que éstos ponen a disposición.

También cabe comentar el peso que ha tenido apoyarse en Autocad para realizar determinadas operaciones y elementos, ya que a lo largo de este trabajo he ido aprendiendo a escalar una foto a partir de una de las dimensiones del elemento a modelar. Con ello, se han podido extraer las dimensiones reales de éste, pudiéndose además obtener datos que no se veían reflejados en la propia foto, siendo así posible el modelado de bastantes piezas que, de otra forma, no se hubiese podido llevar a cabo por no conocer los datos necesarios. Además, gracias a este proyecto, se han podido trabajar con otros programas de modelado y renderizado en 3D como Keyshot o Blender.

Por último, comentar también la vertiente académica de este trabajo, y es que, gracias a él, se han podido afianzar y ampliar los conocimientos que se han adquirido en la asignatura de Diseño y Fabricación Asistidos por Ordenador del grado. Además de seguir ampliando y explorando el módulo de Part Design que se ha trabajado en clase, o el Generative Shape Design que he trabajado y utilizado fuera del entorno académico, se han descubierto otros módulos de gran utilidad para este tipo de trabajos, como el Sketch Tracer o el Human Builder.

Cabe comentar también que todavía se puede trabajar en el modelo para obtener un resultado todavía mejor. En la parte de CATIA, ha habido procesos que, aunque lleven al mismo resultado, se han realizado de maneras diferentes, para poder practicar diferentes técnicas. Esto se refleja por ejemplo en los dos métodos que se han utilizado para ensamblar los componentes del monoplaza. En la realidad, y para el futuro, se tomará una de las dos opciones, en función de las necesidades del trabajo requerido. También ha habido algunas piezas o elementos en los que se han tenido que hacer concesiones, y no entrar en mucho detalle. El caso más claro es el del motor y el de la caja de cambios.

También, observando diseños y modelados diferentes, para el futuro, a la hora de trabajar en el módulo de Generative Shape Design, me gustaría enfocar el modelado a depender menos de la operación de Multi-Section Surface, y utilizar más herramientas como Fill o Sweep. Esto se debe a que, a pesar de que el Multi-Section Surface es un comando bastante versátil, que no suele dar errores, las superficies que genera no suelen ser limpias, apareciendo numerosas líneas intermedias, incluso si se trabajan con curvas guía suavizadas mediante el comando de Smooth Curve. Si se modela con operaciones de Fill, este problema desaparece, o al menos, se reduce considerablemente. Eso sí, para superficies grandes con una curvatura considerable, un Fill no es una opción recomendada, a menos que se separe el área en superficies más pequeñas. Una operación de Sweep también puede ser más indicada en estos casos.

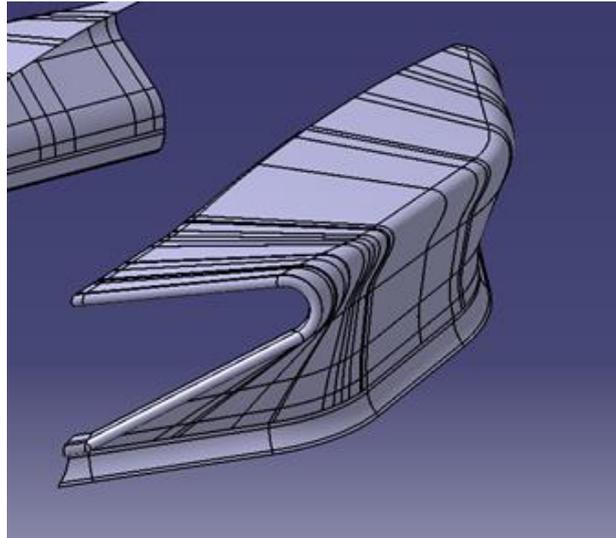


Figura 7-1. Pontón modelado con un Multi-Section Surface

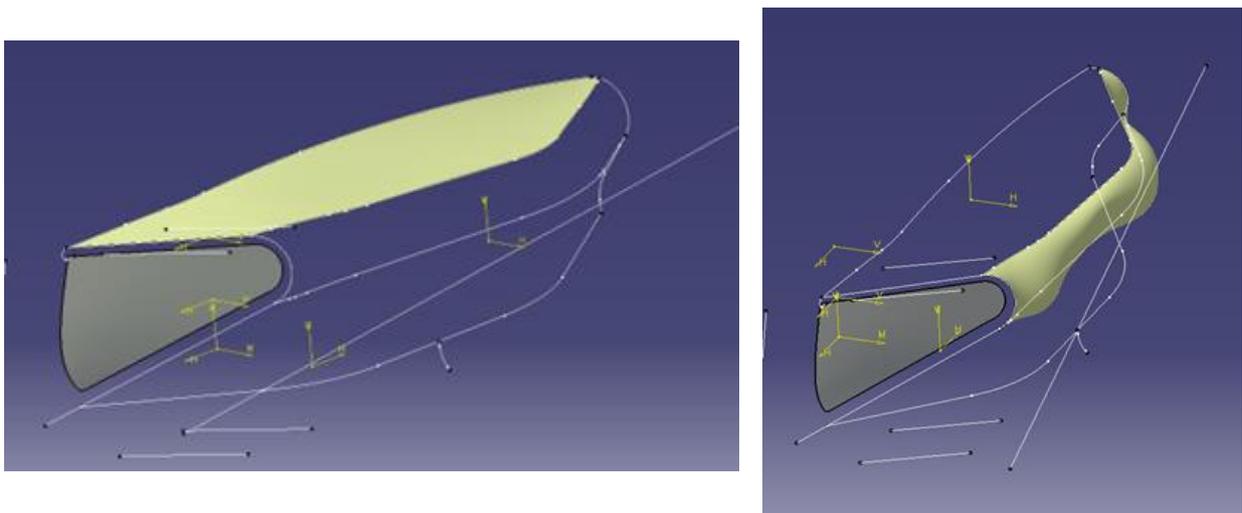


Figura 7-2. Porciones del pontón modeladas con operaciones de Fill. Se puede observar que, para casos con una gran curvatura, la operación de Fill puede dar errores o superficies no deseadas

Por último, como puntos de mejora, también se podría haber utilizado el módulo de Kinematics de CATIA, para asociar por ejemplo el movimiento del volante con un movimiento de las ruedas delanteras. También se podían haber explorado más opciones de renderizado (crear distintas pinturas para la carrocería con Blender, por ejemplo) o incluso el haber realizado alguna animación aprovechando que se tienen tanto el monoplaza como los circuitos disponibles. Sin embargo, como se ha considerado que esto supondría un tiempo todavía mayor de realización, se ha decidido cortar aquí, con lo presentado en esta memoria.



## 8 REFERENCIAS

- [1] Hasbollah, R. (2021). *Open-Wheel vs Closed-Wheel Racing: What Are The Differences?*. TOC Automotive College. <https://www.toc.edu.my/automotiveandmotorsports-hub/open-wheel-vs-closed-wheel-racing-what-are-the-differences>
- [2] Indianapolis Motor Speedway (15 de abril de 2015). *Ray Harroun*. <https://web.archive.org/web/20150415095003/https://www.indianapolismotorspeedway.com/history/people-of-ims/indianapolis-500-drivers/ray-harroun>
- [3] García, P. (7 de julio de 2019). *Marmon Wasp: el retrovisor se inventó en Indianápolis*. SoyMotor. <https://soymotor.com/coches/articulos/marmon-wasp-retrovisor-indianapolis-966097>
- [4] LocalHistory Wolverhampton (24 de enero de 2008). *Tom Barrett*. <https://web.archive.org/web/20080124191448/http://www.localhistory.scit.wlv.ac.uk/Museum/Transport/Cars/Sunbeam/TomBarrett.htm>
- [5] Etzrodt, H. (7 de julio de 2001). *Grand prix winners 1895-1949*. Kolumbus. <https://web.archive.org/web/20010707151839/http://www.kolumbus.fi/leif.snellman/gpw2.htm>
- [6] David, D. (23 de abril de 1999). *Alfa Romeo P3*. <https://web.archive.org/web/19990423132106/http://www.ddavid.com/formula1/alfap3.htm>
- [7] SnapLap. (2021). *Alfred Neubauer - The godfather of Silver Arrows*. <https://www.snaplap.net/alfred-neubauer/>
- [8] Snellman, L. (9 de enero de 2000). *Cars (Part 3)*. Kolumbus. <https://web.archive.org/web/20221203074229/http://www.kolumbus.fi/leif.snellman/c3.htm>
- [9] Simanaitis, D. (16 de diciembre de 2019). *Auto Union Type C*. Simanaitis Says. <https://simanaitissays.com/2019/12/16/auto-union-type-c/>
- [10] Snellman, L. (7 de marzo de 2000). *Cars (Part 9)*. Kolumbus. <http://www.kolumbus.fi/leif.snellman/c9.htm>
- [11] Motorpasión. (22 de octubre de 2012). *Mercedes-Benz W125, la vanguardia de la técnica*. <https://www.motorpasion.com/boxesdunlop/mercedes-benz-w125-la-vanguardia-de-la-tecnica>
- [12] Vinuesa, J. M. (29 de marzo de 2016). *Gran Premio de Trípoli de 1939*. SoyMotor. <https://soymotor.com/articulos/gran-premio-de-tripoli-de-1939-919069>

- [13] Mercedes-Benz. (2022). *Mercedes-Benz W 165 racing car, 1939*. <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/en/instance/ko/Mercedes-Benz-W-165-racing-car-1939.xhtml?oid=6835>
- [14] Manishin, G. B. (2018). *The Early Years*. Formula One Art & Genius. [http://www.f1-grandprix.com/?page\\_id=272](http://www.f1-grandprix.com/?page_id=272)
- [15] F1 Technical. (2011). *Lotus 25 Coventry Climax*. <https://www.f1technical.net/f1db/cars/163/lotus-25?sid=9c73f1d76743ce62a7c1b600318576d0>
- [16] F1 Technical. (2012). *Lotus 49 Cosworth*. <https://www.f1technical.net/f1db/cars/220/lotus-49>
- [17] Ramírez Sánchez, B. (1 de agosto de 2015). *Maravillas de la ingeniería: Lotus 49*. TheBestF1. <https://www.thebestf1.es/maravillas-de-la-ingenieria-lotus-49/>
- [18] F1 Technical. (2012). *McLaren MP4-1*. <https://www.f1technical.net/f1db/cars/476/mclaren-mp4-1>
- [19] Nardelli, A. (20 de julio de 2021). *MP4/1, el McLaren que revolucionó la Fórmula 1*. Eventos Motor. <https://www.eventosmotor.com/blog-premium/mp4-1-el-mclaren-que-revoluciono-la-formula-1/>
- [20] fljunkie08. (15 de septiembre de 2009). *John Watson shunts at Monza 81* [Archivo de vídeo]. Recuperado de [https://www.youtube.com/watch?v=UPZ\\_eU8rHWU](https://www.youtube.com/watch?v=UPZ_eU8rHWU)
- [21] Sáez, J. (1 de febrero de 2022). *¿Qué son y cómo funcionan los crash test para los coches de F1?*. Motorsport. <https://es.motorsport.com/f1/news/crash-test-coches-formula1-explicacion/7768393/>
- [22] Emparan, I. (22 de enero de 2012). *Lotus 78: el F1 más influyente de la historia*. FormulaF1. <https://www.formulaf1.es/16542/lotus-78-el-f1-mas-influyente-de-la-historia/>
- [23] Formula 1. (5 de abril de 2022). *The origins of ground effect*. <https://www.formula1.com/en/latest/article.watch-the-origins-of-ground-effect.6i1MZBs5xe6cjO2deb57hV.html>
- [24] Armstrong Wilson, C. (18 de marzo de 2016). *Use the Force - Ground-Effect Aerodynamics*. Drive-My. <https://drive-my.com/use-the-force-ground-effect-aerodynamics/>
- [25] Krejci, M. (2008). *Canadian-American Challenge Cup 1970*. World Sports Racing Prototypes. <https://web.archive.org/web/20130929153052/http://wsrp.ic.cz/canam1970.html>
- [26] García, P. (21 de julio de 2019). *Chaparral 2J: el coche 'ventilador' y la incansable búsqueda del 'downforce'*. SoyMotor. <https://soymotor.com/coches/articulos/chaparral-2j-ventilador-efecto-suelo-966663>
- [27] SEAS. (2012). *Ground Effect*. Formula1-Dictionary. [https://www.formula1-dictionary.net/ground\\_effect.html](https://www.formula1-dictionary.net/ground_effect.html)
- [28] F1 Technical. (2012). *Lotus 79 Cosworth*. <https://www.f1technical.net/f1db/cars/398/lotus-79>
- [29] Rodríguez, R. (25 de diciembre de 2020). *Así era el Brabham BT46B, el revolucionario coche ventilador que la Fórmula 1 tuvo que prohibir por abusón*. Motorpasión. <https://www.motorpasion.com/formula1/asi-era-brabham-bt46b-revolucionario-coche-ventilador-que-formula-1-tuvo-que-prohibir-abuson>

- [30] Plaza, D. (25 de marzo de 2016). *El turbo en la Fórmula 1: historia y fundamentos técnicos*. Motor. <https://www.motor.es/formula-1/el-turbo-en-la-formula-1-historia-y-fundamentos-tecnicos-201626775.html>
- [31] Driver61. (3 de noviembre de 2021). *The incredible evolution of Formula 1 horsepower | Track Evolution* [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9LK8hCsgd3U>
- [32] riceracingdonmega. (24 de marzo de 2013). *1450bhp F1 BMW Turbo* [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=4JIXPqgwQHk>
- [33] Ultimatecarpage. (2010). *Williams FW15C Renault*. <https://www.ultimatecarpage.com/car/1241/Williams-FW15C-Renault.html>
- [34] SEAS. (2012). *Gearbox*. Formula1-Dictionary. <https://www.formula1-dictionary.net/gearbox.html>
- [35] Ferrari. (2013). *1989 F1-89*. <https://web.archive.org/web/20130927170637/http://formula1.ferrari.com/cars/fl-89>
- [36] Howard, K. (Diciembre de 2001). *Active Suspension*. Motor Sport Magazine. <https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/december-2001/69/active-suspension/>
- [37] Fearnley, P. (25 de mayo de 2017). *The Rise of active suspension*. Motor Sport Magazine. <https://www.motorsportmagazine.com/articles/single-seaters/fl/rise-active-suspension/>
- [38] Collantine, K. (17 de mayo de 2007). *Banned: Active suspension*. Racefans. <https://www.racefans.net/2007/05/17/banned-active-suspension/>
- [39] Motor Sport Magazine. (Junio de 1994). *Black Sunday*. <https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/june-1994/16/black-sunday/>
- [40] Youson, M. (2 de mayo de 2019). *Imola '94 and the lasting safety legacy*. Formula 1. <https://www.formula1.com/en/latest/article.imola-94-and-the-legacy-of-improved-safety.5P8zqEzNjKzYw8qdckoYFF.html>
- [41] Duxbury, A. (4 de julio de 2022). *History of safety devices in Formula 1: The halo, barriers & more*. Autosport. <https://www.autosport.com/fl/news/history-of-safety-devices-in-formula-1-the-halo-barriers-more-4982360/4982360/>
- [42] SEAS. (2012). *HANS*. Formula1-Dictionary. <https://www.formula1-dictionary.net/hans.html>
- [43] Edmondson, L. (20 de julio de 2017). *What is Halo and why is it being introduced in F1 for 2018?*. ESPN. [https://www.espn.com/fl/story/\\_/id/20111099/what-halo-why-being-introduced-f1-2018](https://www.espn.com/fl/story/_/id/20111099/what-halo-why-being-introduced-f1-2018)
- [44] Lillo, S. (12 de septiembre de 2021). *¿Qué es el Halo y cómo salvó la vida a Hamilton en Monza?*. Motorsport. <https://es.motorsport.com/fl/news/halo-formula1-que-es-seguridad/4918513/>
- [45] Fédération Internationale de l'Automobile. (16 de octubre de 2021). *New safety features on Gen 2 Formula 4 car*. <https://www.fia.com/news/new-safety-features-gen-2-formula-4-car>

- [46] Dictionnaire de français Larousse. (2011). *Définitions: voiturette*.  
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/voiturette/82415>
- [47] Martin, J. (2007). *Voiturette-tricycle de Léon Bollée (France)*. Tintin raconte.  
[https://web.archive.org/web/20160303203023/http://users.skynet.be/tintinpassion/VOIRSAVOIR/Auto/Pages\\_auto/Auto\\_044.html](https://web.archive.org/web/20160303203023/http://users.skynet.be/tintinpassion/VOIRSAVOIR/Auto/Pages_auto/Auto_044.html)
- [48] alexrenault. (27 de julio de 2015). *Renault Type A (1898-1900)*. L'Automobile Ancienne.  
<http://lautomobileancienne.com/renault-type-a/>
- [49] Galpin, D. (2008). *A Record of Motorsport*. Speedfreaks.  
<http://www.dlg.speedfreaks.org/archive/book/1909.pdf>
- [50] pete. (13 de mayo de 2014). *Racing Voiturettes, 1931-1940*. VeloceToday.  
<https://velocetoday.com/racing-voiturettes-1931-1940/>
- [51] Bhambwani, R. N. (1 de septiembre de 2020). *The Magical Era of Voiturette Racing Cars*. Medium.  
<https://medium.com/formula-one-forever/the-magical-era-of-voiturette-racing-cars-151ed9d66c24>
- [52] Ömerdal, S. (2017). *Formula 2 Register*. The Fastlane.  
<https://www.the-fastlane.co.uk/formula2/index.html>
- [53] Jenkinson, D. (Diciembre de 1959). *Some Thoughts on Formula Junior*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/december-1959/16/some-thoughts-on-formula-on-junior/>
- [54] Jenkinson, D. (Mayo de 1964). *On The New Formula Two*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/may-1964/44/on-the-new-formula-two/>
- [55] Historic Sports Car Club (2022). *Historic Formula Junior*. <https://hsc.org.uk/championships/historic-formula-junior/>
- [56] Jenkinson, D. (Marzo de 1967). *Racing Notes March 1967*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/march-1967/18/racing-notes-2>
- [57] Motor Sport Magazine. (Marzo de 1976). *Racing engines for Formula Two*.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/march-1976/35/racing-engines-for-formula-two/>
- [58] Bamsey, I. (Julio de 1969). *Formula 2 review*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/october-1981/43/formula-2-review/>
- [59] Lawrence, M. (Mayo de 1985). *F3000: A Promising Start*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/may-1985/24/f3000-a-promising-start>
- [60] Di Geronimo, M. (22 de junio de 2017). *Tutti i difetti della formula monomarca*. Fuori Traiettorie.  
<https://www.fuoritraiettorie.com/4-ruote/tutti-difetti-della-formula-monomarca/>
- [61] Arron, S. (Febrero de 1995). *All for one, one for all*. Motor Sport Magazine.  
<https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/february-1995/20/all-for-one-one-for-all>

- [62] Arron, S. (Enero de 1996). *Breaking the price*. Motor Sport Magazine. <https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/january-1996/32/breaking-the-price>
- [63] Smith, D. (Mayo de 2004). *Limited revolution*. Motor Sport Magazine. <https://www.motorsportmagazine.com/archive/article/may-2004/54/limited-revolution>
- [64] Newbold, J. (21 de mayo de 2023). *Formula 3000: In defence of F1's unloved feeder series*. Autosport. <https://www.autosport.com/formula2/news/formula-3000-in-defence-of-f1s-unloved-feeder-series/6116717/>
- [65] Delfos. (16 de octubre de 2008). *La GP2 Asia Series 2008 arranca en Shanghai*. Motorpasión. <https://www.motorpasion.com/formula1/la-gp2-asia-series-2008-arranca-en-shanghai>
- [66] GP2 Series. (12 de julio de 2011). *GP2 Series and GP2 Asia Series to be merged*. [https://web.archive.org/web/20110714044446/http://www.gp2series.com/News-Room/News/2011/07\\_July/GP2-Series-and-GP2-Asia-Series-to-be-merged/](https://web.archive.org/web/20110714044446/http://www.gp2series.com/News-Room/News/2011/07_July/GP2-Series-and-GP2-Asia-Series-to-be-merged/)
- [67] Formula 1. (9 de marzo de 2017). *Newly renamed F2 series to feature at 10 Grands Prix*. <https://www.formula1.com/en/latest/article.newly-renamed-f2-series-to-feature-at-10-grands-prix.5DEz2LUnw4sYc4We4qQ6GE.html>
- [68] FIA Formula Two Championship. (2009). *The F2 Car*. <https://web.archive.org/web/20090602025300/http://www.formulatwo.com/technical/f2cartheF2car.aspx>
- [69] FIA Formula Two Championship. (2009). *Henry Surtees: statement from Jonathan Palmer, chief executive of MotorSport Vision*. <https://web.archive.org/web/20090724065830/http://www.formulatwo.com/news/henry-surtees-jp-statement.aspx>
- [70] Jacob Bosley. (22 de febrero de 2020). *The rejects: FIA Formula Two (2009-2012)* [Archivo de vídeo]. Recuperado de [https://www.youtube.com/watch?v=M51SNEB\\_C-s](https://www.youtube.com/watch?v=M51SNEB_C-s)
- [71] Elizalde, P. (6 de diciembre de 2012). *MotorSport Vision cancels Formula 2 championship*. Autosport. <https://www.autosport.com/general/news/motorsport-vision-cancels-formula-2-championship-4462268/4462268/>
- [72] Sáez de Asteasu, G. (16 de enero de 2022). *Robert Wickens vuelve a la competición tras su accidente*. SoyMotor. <https://soymotor.com/coches/noticias/robert-wickens-vuelve-competir-mas-de-1000-despues-en-la-impc-993796>
- [73] Blancafort, R. (27 de junio de 2022). *Robert Wickens lo ha logrado: se ha reencontrado con la victoria*. SoyMotor. <https://soymotor.com/blogs/rblancafort/robert-wickens-lo-ha-logrado-se-ha-reencontrado-con-la-victoria>
- [74] 500 Owners Association. (2022). *Home*. <http://500race.org/>
- [75] Serrano, M. (19 de julio de 2020). *Formula 3 (1964-1970), la edad de oro de los monoplazas*. RetroRacing. <https://retroracing.es/formula-3/>
- [76] F3 History. (2022). *History of Formula 3 Racing*. <https://www.f3history.co.uk/>

- [77] Pitkanen, S. (5 de marzo de 2006). *Formula 3 Story*. Clarinet. <https://web.archive.org/web/20070927225100/http://www.clarinet.fi/~spitkane/f3story.htm>
- [78] Pitkanen, S. (5 de marzo de 2006). *Formula 3 European CUP Championships 1975*. Clarinet. <https://web.archive.org/web/20071014001223/http://www.clarinet.fi/~spitkane/f3stat.htm#Formula%203%20Championship%201975%20Final%20Points>
- [79] Diepraam, M. (12 de diciembre de 2021). *Lower category champions*. 6th Gear. <http://www.forix.com/8w/6thgear/champs.html#EURF3CUP>
- [80] Motorsport.com. (30 de enero de 2003). *The merging of German and France F3 series*. <https://web.archive.org/web/20070930011216/http://www.motorsport.com/news/article.asp?ID=114401&FS=EUROF3>
- [81] Autosport. (2003). *DMSB blocks standalone German F3 series*. <https://web.archive.org/web/20070928025322/http://www.autosport-atlas.com/article.asp?id=30341>
- [82] Formula 3 Euro Series. (2007). *Technical regulations 2007*. [https://web.archive.org/web/20080329093954/http://www.f3euroseries.com/reglement\\_technik.php](https://web.archive.org/web/20080329093954/http://www.f3euroseries.com/reglement_technik.php)
- [83] Formula 3 Euro Series. (2008). *2008 Formula 3 Euro Series: 20 races on European soil*. <https://web.archive.org/web/20080325101941/http://f3euroseries.com/termine2008.php>
- [84] GP Update. (10 de diciembre de 2010). *F3 International Trophy created*. <https://web.archive.org/web/20110424064257/http://www.gpupdate.net/en/f3-news/249200/f3-international-trophy-created/>
- [85] Fédération Internationale de l'Automobile. (15 de marzo de 2012). *FIA European Formula 3 Championship*. <https://web.archive.org/web/20141025233353/http://www.fia.com/fia-european-formula-3-championship>
- [86] Simmons, M. (13 de marzo de 2017). *GP3 and European Formula 3 could merge as F1 support series in 2019*. Autosport. <https://www.autosport.com/fia-f3/news/gp3-and-european-formula-3-could-merge-as-f1-support-series-in-2019-5019969/5019969/>
- [87] Hewitt, C. (22 de septiembre de 2017). *World Motor Sport Council Confirms New Formula 3 Category for 2019*. The Checkered Flag. <https://www.thecheckeredflag.co.uk/2017/09/world-motor-sport-council-confirms-new-formula-3-category-2019/>
- [88] Elizalde, P. (3 de octubre de 2008). *GP2 organisers announce GP3 series*. Autosport. <https://www.autosport.com/fia-f3/news/gp2-organisers-announce-gp3-series-4424080/4424080/>
- [89] Fédération Internationale de l'Automobile. (7 de diciembre de 2022). *Appendix L to the International Sporting Code - 2022*. [https://www.fia.com/sites/default/files/appendix\\_1\\_2022\\_publie\\_le\\_7\\_decembre\\_2022.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/appendix_1_2022_publie_le_7_decembre_2022.pdf)
- [90] Pat W. (2011). *Super Licence 2012*. I Watch Too Much Racing. <https://toomuchracing.com/superlicence/superlicence2012/>

- [91] Motorsport.com. (6 de enero de 2015). *FIA reveals details of 2016 superlicence points system*. <https://www.motorsport.com/f1/news/fia-reveals-details-of-2016-superlicence-points-system/3220525/>
- [92] Fédération Internationale de l'Automobile. (10 de diciembre de 2019). *Appendix L to the International Sporting Code - 2019*. [https://www.fia.com/sites/default/files/appendix\\_1\\_2019\\_publie\\_le\\_4\\_decembre\\_2019.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/appendix_1_2019_publie_le_4_decembre_2019.pdf)
- [93] Williams, B. (30 de diciembre de 2020). *The Path to Greatness*. AutoAction. <https://autoaction.com.au/2020/12/30/the-path-to-greatness>
- [94] Formula 1. (2023). *F1 - The home of Formula 1 Racing*. <https://www.formula1.com/>
- [95] FIA Formula 2 Championship (2023). *Home - Formula 2*. <https://www.fiaformula2.com/>
- [96] FIA Formula 3 Championship (2023). *Home - Formula 3*. <https://www.fiaformula3.com/>
- [97] Fédération Internationale de l'Automobile. (6 de diciembre de 2017). *FIA announces World Motor Sport Council decisions*. <https://www.fia.com/news/fia-announces-world-motor-sport-council-decisions-8>
- [98] Fédération Internationale de l'Automobile. (2023). *Formula Regional Championships certified by FIA*. <https://www.fia.com/events/formula-regional-championships-certified-fia/season-2022/formula-regional-championships>
- [99] Formula Regional European Championship by Alpine. (2023). *Formula Regional EU by Alpine*. <https://formularegionaleubyalpine.com/>
- [100] Fédération Internationale de l'Automobile. (2023). *FIA Formula 4: Registered Manufacturers*. [https://www.fia.com/sites/default/files/f4\\_registered\\_manufacturers\\_0.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/f4_registered_manufacturers_0.pdf)
- [101] FIA F4 Italian Championship. (2023). *Formula4 Italian Championship*. <http://www.f4championship.com/>
- [102] ADAC Formula 4. (2022). *ADAC Formel 4*. <https://www.adac-motorsport.de/en/adac-formel-4/>
- [103] British F4 Championship. (2023). *F4 Championship*. <https://www.fiaformula4.com/>
- [104] Japanese FIA F4 Championship. (2023). *F4 Japanese Championship*. Wordpress. <https://fiaf4.wordpress.com/>
- [105] FIA Chinese F4 Championship. (2023). *Shell Helix FIA F4 Chinese Championship*. <https://fiaf4.com.cn/en/>
- [106] FIA Formula 4 NACAM Championship. (2023). *Formula 4 NACAM Championship*. <https://www.fiaformula4.mx/>
- [107] FIA F4 Spanish Championship. (2023). *F4 España*. <https://f4spain.org/>
- [108] F4 United States Championship. (2023). *Main - F4 US Championship*. <https://www.f4uschampionship.com/>

- [109] F4 United Arab Emirates Championship. (2023). *F4 UAE Championship Certified by FIA*. <https://www.f4uae.com/>
- [110] F4 Danish Championship. (2023). *Formel 4 Danmark*. <https://formel4.dk/>
- [111] FFSA Academy. (2023). *Championnat de France F4*. <https://www.ffsaacademy.org/championnat-de-france-f4/>
- [112] F4 Brazilian Championship. (2023). *Formula 4 | Home*. <https://www.stockproseries.com.br/stockcar/formula-4>