



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE DISEÑO Y ARQUITECTURA

CARRERA DE DISEÑO INDUSTRIAL

Tema:

“Influencia de las configuraciones morfológicas en el diseño del alerón trasero en vehículos de competencia en altitud elevada.”

Trabajo de Titulación, (proyecto de investigación) previo a la obtención del Título de Ingeniero en Diseño Industrial, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

Autor: Erick Roberto Quishpi Tite

Tutor: PhD. Andrés López Vaca

Ambato – Ecuador

Junio - 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación sobre el tema:

“Influencia de las configuraciones morfológicas en el diseño del alerón trasero en vehículos de competencia en altitud elevada” del alumno Erick Roberto Quishpi Tite, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, considero que dicho Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto de Investigación ha sido revisado en su totalidad, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Por lo tanto, autorizo la presentación del mismo, ante el organismo pertinente para ser sometido a la evaluación de los profesores calificadores designado por el H. Consejo Directivo de la Facultad.

Ambato, junio 2026



.....

Andrés López Vaca
C.C.: 18004078796
TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Erick Roberto Quishpi Tite con cédula de ciudadanía No 1805203138, declaro que los criterios emitidos en el trabajo de titulación, modalidad proyecto de investigación bajo el tema: **“Influencia de las configuraciones morfológicas en el diseño del alerón trasero en vehículos de competencia en altitud elevada”**, así como también los contenidos presentados, ideas, análisis, síntesis de datos y conclusiones, son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autor/a de este trabajo de Titulación

Ambato, junio 2026



Erick Roberto Quishpi Tite

C.C.: 1805203138

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Yo, Erick Roberto Quishpi Tite con C.C.: 1805203138 en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **TEMA “INFLUENCIA DE LAS CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS EN EL DISEÑO DEL ALERÓN TRASERO EN VEHÍCULOS DE COMPETENCIA EN ALTITUD ELEVADA”**, autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible con fines netamente académicos para su lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo una licencia gratuita e intransferible, así como los derechos patrimoniales de mi Trabajo de Titulación a favor de la Universidad Técnica de Ambato con fines de difusión pública; y se realice su publicación en el repositorio institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, siempre y cuando no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026



Erick Roberto Quishpi Tite

C.C.: 1805203138

AUTOR

TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado del Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación sobre el **TEMA “INFLUENCIA DE LAS CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS EN EL DISEÑO DEL ALERÓN TRASERO EN VEHÍCULOS DE COMPETENCIA EN ALTITUD ELEVADA”** de Erick Roberto Quishpi Tite, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, de la Facultad de Diseño y Arquitectura de conformidad con el Reglamento para la Titulación de Grado para obtener el título terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato, una vez revisado y calificado.

Ambato, junio 2026

Para constancia firman:

Título. Nombres y Apellidos

PRESIDENTE

C.C.:

Título. Nombres Apellidos

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

C.C.:

Título. Nombres Apellidos

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

C.C.:

DEDICATORIA

*A todos aquellos diseñadores en búsqueda de conocimiento,
que ven los problemas como nuevos desafíos para mejorar,
a aquellos diseñadores que encuentran nuevas fronteras por explorar,
que el conocimiento adquirido sea compartido con otros y con la comunidad.*

E.R

AGRADECIMIENTO

A la vida y a mis padres, autores de cada uno de mis logros.

A mis padres, quienes, con su amor incondicional, paciencia y esfuerzo constante se convirtieron en los pilares fundamentales de mi vida y de mi formación profesional.

A los docentes de mi facultad, por brindarme los conocimientos necesarios para crecer como profesional y enseñarme a descubrir nuevos caminos hacia el futuro.

Gracias por creer en mí en cada etapa de este camino, por transmitirme la constancia para superar los problemas y por enseñarme que los desafíos no son obstáculos, sino una manera de vivir la vida.

A todos ellos, gracias.

E.R

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO.....	xvi
ABSTRACT	xvii

CONTENIDO

Introducción	1
--------------------	---

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES GENERALES

1.1	Tema	3
1.2	Planteamiento del problema	3
1.2.1	Contextualización.....	3
1.2.2	Árbol de problemas.....	5
1.2.3	Enunciado del problema	5
1.3	Justificación.....	6
1.4	Objetivos	8
1.4.1	Objetivo General	8
1.4.2	Objetivos específicos.....	8
1.5	Línea de investigación.....	8
1.6	Pregunta de investigación – hipótesis	9
1.7	Antecedentes investigativos	9
1.7.1	Nivel Macro: Fórmula 1.....	9
1.7.2	Nivel Meso: Contexto Latinoamérica.....	12
1.7.3	Nivel Micro: Diseño de alerones para vehículos de competencia (Ecuador)	15
1.8	Marco Teórico	17
1.8.1	Categorías fundamentales	17
1.8.2	Red conceptual	18
1.8.3	Desarrollo del marco teórico	20
	Variable independiente.....	20
1.8.3.1	Estructura morfológica.....	20
1.8.3.2	Objetivo de la forma	24

1.8.3.3 Componentes desde lo sistemático	26
1.8.3.4 Categorías del componente	32
Variable dependiente.....	33
1.8.3.5 Diseño difuso y experto	33
1.8.3.6 Métodos de diseño	34
1.8.3.7 Simulación computacional	37
1.8.3.8 Configuración estructural	43

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Método de investigación	46
2.2 Enfoque de la investigación	47
2.3 Modalidad	47
2.4 Nivel de la investigación.....	48
2.5 Diseño de investigación	49
2.5.1 Población y muestra.....	50
2.5.2 Tipo de muestra	51
2.5.3 Tamaño de muestra	52
2.5.4 Selección de muestra	53
2.6 Técnicas de estudio.....	56
2.7 Operacionalización de variables	60
2.8 Matriz síntesis diseño metodológico	62

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1	Análisis y discusión de resultados	63
3.1.1	Dimensiones de análisis “Entrevistas”	64
3.1.2	Conclusiones	69
3.2	Desarrollo de la investigación fase de diagnóstico	70
3.2.1	Fase de diagnóstico: Análisis funcional y formal	70
3.2.2	Análisis de la Configuración Actual	71
3.2.3	Descomposición Funcional.....	74
3.2.4	Árbol de Objetivos	76
3.3	Fase de Experimentación	79
3.3.1	Construcción morfológica	79
3.3.1.1	Diagrama morfológico.....	81
3.3.1.2	Obtención de coordenadas del perfil.....	83
3.3.1.3	Digitalización del perfil.....	84
3.3.1.4	Reconstrucción de curvatura del perfil	86
3.3.1.5	Análisis de curvatura	88
3.3.1.6	Generación de superficies.....	89
3.3.1.7	Análisis Zebra	90
3.3.1.8	Generación del sólido	92
3.3.2	Configuración del Entorno de Simulación (CFD).....	93
3.3.2.1	Definición del dominio computacional	94
3.3.2.2	Propiedades del material y condiciones del flujo	97
3.3.2.3	Configuración del mallado y solver	100
3.3.2.4	Recolección de datos	104
3.3.2.5	Resultados de la configuración final	106
3.4	Fase de evaluación.....	108

3.4.1 Síntesis de resultados	108
3.4.2 Árbol de funciones y medios.....	110
3.5 Fase de propuesta.....	113
3.5.1 Conceptualización	113
3.5.2 Configuración morfológica seleccionada	115
3.5.3 Desarrollo de la propuesta.....	116
3.5.4 Representación final de la propuesta	120
3.5.4.1 Especificaciones de la parametrización: Dimples	121
3.5.4.2 Visualización de la propuesta	123
3.5.4.3 Integración de la propuesta	124
3.6 Verificación de pregunta de investigación.....	125

CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones	126
4.2 Recomendaciones	127
MATERIALES DE REFERENCIA	128
Referencias bibliográficas	128
Anexos.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Perfil de entrevistas.....	56
Tabla 2 Modelo de instrumentos.....	59
Tabla 3 Operacionalización de variable independiente	60
Tabla 4 Operacionalización de variable dependiente.....	61
Tabla 5 Dimensión de análisis (Entrevista 01)	64
Tabla 6 Dimensión de análisis (Entrevista 02)	65
Tabla 7 Dimensión de análisis (Entrevista 03)	67
Tabla 8 Identificación del Objeto en Estado Natural	71
Tabla 10 Registro Multiformato.....	73
Tabla 11 Tabla comparativa de perfiles NACA 44.....	80
Tabla 12 Configuración del dominio CFD.....	95
Tabla 13 Propiedades para el material equivalente tipo CFRP	97
Tabla 14 Velocidades encontradas en los tramos del Rally F.F.F.	98
Tabla 15 Propiedades del fluido.....	99
Tabla 16 Configuración del mallado.....	100
Tabla 17 Recolección de las fuerzas obtenidas en la simulación CFD.....	104
Tabla 18 Datos de la simulación en la malla S1-M5	106
Tabla 19 Resultados de los coeficientes de arrastre y coeficiente de sustentación.....	107
Tabla 20 Síntesis de resultados: Relación entre geometría y comportamiento aerodinámico	109
Tabla 21 Criterios morfológicos	112
Tabla 22 Parametrización del sistema de sujeción.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Árbol de Problemas.....	5
Figura 2 Geometría de una superficie arbitraria	11
Figura 3 Diseño del alerón que representa la disposición de los hoyuelos.....	12
Figura 4 TC2000: Gustavo Estrada explicó cómo será la aerodinámica de las SUV	13
Figura 5 La aerodinámica de última generación acompaña una silueta que refleja el gusto del mercado.	14
Figura 6 Diferencias geométricas entre alerón simétrico y asimétrico.	15
Figura 7 La síntesis del producto: Un modelo del proceso de diseño que muestra las etapas de la creación de un producto.....	23
Figura 8 Sistema de vínculos causales entre variables.....	25
Figura 9 Diagrama de un perfil aerodinámico	31
Figura 10 Métodos con marco de referencia lógico.....	35
Figura 11 Método del diagrama morfológico	36
Figura 12 Desplazamiento máximo del alerón con la máxima carga aerodinámica.	38
Figura 13 De izquierda a derecha: G0 (sin continuidad), G1 (tangente coincidente) y G2 (curvatura coincidente).....	41
Figura 14 De izquierda a derecha: G0 (posición coincidente), G1 (tangente coincidente), G2 (curvatura coincidente, G3 (flujo coincidente)	42
Figura 15 Componentes del vehículo FSAE UPS fabricados con preimpregnado de fibra de carbono.	45
Figura 16 Peugeot 207 1600 cc.....	54
Figura 17 Diagrama de relaciones jerárquicas.	77
Figura 18 Árbol de objetivos	78
Figura 19 Perfil NACA 4421	83
Figura 20 Coordenadas asociadas al perfil NACA 4421	84
Figura 21 NACA series 4 aerofoil generator	85
Figura 22 Perfil NACA 4421 representando la geometría observada en el alerón del caso de estudio	85

Figura 23 Perfil NACA 4421 invertido.....	86
Figura 24 Reconstrucción de las curvas del perfil	87
Figura 25 Análisis de curvatura	88
Figura 26 Una curva de grado 3 con tres tramos. El gráfico de curvatura conecta los extremos de los tramos.....	89
Figura 27 Generación de superficie del perfil NACA 4421	90
Figura 28 Continuidad de superficie	90
Figura 29 Análisis Zebra del perfil NACA 4421 de izquierda a derecha: Superficie G3, Superficie G2 Fuente: Autoría propia.	91
Figura 30 Detección de aperturas en el solido	92
Figura 31 Disposición de fronteras del dominio computacional	94
Figura 32 Modelo del alerón dentro del dominio de extremo a extremo.....	96
Figura 33 Condiciones de contorno	100
Figura 34 Proceso de refinamiento de malla.....	102
Figura 35 Grafica de resultados en base al refinamiento de la malla.....	105
Figura 36 Árbol de funciones y medios	111
Figura 37 Conceptualización de la propuesta	114
Figura 38 Diagrama morfológico.....	115
Figura 39 Distribución de la presión alrededor del borde de salida en la configuración endplate asimétrico.....	117
Figura 40 Implementación de dimples (Hoyuelos).....	121
Figura 41 Árbol de nodos para la parametrización Dimples (Hoyuelos).....	122
Figura 42 Visualización de la propuesta	123
Figura 43 Integración de la propuesta.....	124

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto de investigación aborda el efecto de las configuraciones morfológicas en el comportamiento aerodinámico de los alerones de los vehículos de competición no homologados en condiciones de altitud elevada, un desafío para la automovilística de rally en la provincia de Tungurahua. La importancia del tema radica en entender de qué manera la forma y disposición geométrica del alerón actúa en su funcionamiento y percepción visual. Por otra parte, la reducción de la densidad atmosférica en los entornos montañosos implica la reducción de la fuerza de adherencia del alerón, con el riesgo de comprometer la estabilidad y la seguridad del automóvil. La práctica local tiende a recurrir a algunas adaptaciones empíricas que indican el desfase con respecto al diseño contextualizado. Desde el punto de vista metodológico, el desarrollo del estudio se basa en un enfoque mixto cuasi-experimental de formato transversal con apoyo cualitativo por criterio experto, y centrado en el caso de estudio del Peugeot 207 categoría T3. Se realizó el levantamiento físico del componente en su estado natural por medio de observación abierta y para su posterior digitalización y reconstrucción de superficies con continuidad geométrica por medio de programas de modelado 3D. Para evaluar su comportamiento, se procedió a través de simulaciones de dinámica de fluidos, tomando una normalización por el perfil invertido NACA 4421. Integrada en la línea de investigación en Diseño, materiales y producción de la institución, la innovación concluye con una propuesta preliminar proyectual y sustentada por evidencia bibliográfica. La configuración morfológica final se compone con un gurney flap, endplates y con una micro-texturización superficial de hoyuelos alternados que funcionan como un sistema de control pasivo, de este modo, mejora el comportamiento aerodinámico del alerón.

DESCRIPTORES: ALERÓN, DISEÑO INDUSTRIAL, SIMULACIÓN CFD, RALLY

ABSTRACT

The present research project addresses the effect of morphological configurations on the aerodynamic behavior of spoilers in non-homologated competition vehicles under high-altitude conditions, a challenge for rally motorsports in the province of Tungurahua. The importance of the topic lies in understanding how the shape and geometric layout of the spoiler influence its performance and visual perception. On the other hand, the reduction of atmospheric density in mountainous environments implies a decrease in the spoiler's downforce, risking the automobile's stability and safety. Local practice tends to resort to empirical adaptations that indicate a gap regarding contextualized design. From a methodological standpoint, the development of the study is based on a mixed quasi-experimental approach with a cross-sectional format, supported by qualitative expert criteria, and centered on the case study of the Peugeot 207 category T3. Physical data collection of the component in its natural state was carried out through open observation for its subsequent digitization and surface reconstruction with geometric continuity using 3D modeling software. Proceeding, through computational fluid dynamics simulations, to evaluate the behavior of the spoiler, using a normalization based on the inverted profile NACA 4421. Integrated into the institution's Design, Materials, and Production research line, the innovation concludes with a preliminary design proposal supported by bibliographical evidence. The final morphological configuration is composed of a Gurney flap, endplates, and a surface micro-texturing of alternate dimples that act as a passive control system, thereby improving the aerodynamic behavior of the spoiler.

KEYWORDS: SPOILER, INDUSTRIAL DESIGN, CFD SIMULATION, RALLY

INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación que se presenta se inscribe en el campo del diseño industrial aplicado al desarrollo del diseño morfológico de autopartes que se utilizan en el ámbito del rally. El contexto de estudio se desarrolla en la provincia de Tungurahua, Ecuador, un entorno geográfico que cuenta con rutas de rally que se llevan a cabo en altitudes elevadas que presentan bajas densidades atmosféricas, contexto en el cual las cargas aerodinámicas muestran una notable pérdida de capacidad de proporcionar la fuerza de adherencia necesaria para asegurar una buena estabilidad y tracción sobre el automóvil. Entre la realidad regional de la competición se señala un problema en las categorías de competición no homologadas o Proto, en las cuales la forma geométrica del ala trasera se realiza de manera empírica. Estas soluciones se basan en la imitación internacional, lo que da lugar a una carencia normativa que supone un desfase con respecto al diseño contextualizado. Por lo cual, se ignora cómo las variaciones objetuales y perceptuales influyen directamente en el alerón.

Este estudio se justifica por la necesidad de generar conocimiento metodológico transferible que dé lugar al diseño industrial como una disciplina expansiva para la optimización de soluciones llevadas a cabo en contextos específicos. A nivel académico y profesional, la investigación aporta un marco de trabajo replicable para proponer el análisis de la forma como una variable determinante del comportamiento del objeto. Con el fin de dar respuesta a esta problemática se propone analizar la influencia de la configuración morfológica del alerón trasero en su comportamiento aerodinámico, mediante simulaciones computacionales. Con esto se establecen criterios de diseño en condiciones de altitud. De manera específica, el proyecto contempla la identificación formal y funcional del alerón que se encuentra en el caso de estudio representativo (Peugeot 207 categoría T3). Se determina la incidencia de la forma sobre los coeficientes de sustentación y arrastre, con lo cual se llega a la formulación de criterios de configuración morfológica.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, el documento adopta una estructura formal en cuatro capítulos interrelacionados. El Capítulo I incorpora los Antecedentes Generales, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y el Marco Teórico con una impronta que cubrirá las variables del estudio desde la complejidad morfológica, el diseño experto y los fundamentos de la simulación CFD; el Capítulo II incide en la Metodología, el cual presenta un enfoque mixto cuasi-experimental de formato transversal, las técnicas de observación abierta y el criterio experto, así como las herramientas de operacionalización de variables; el Capítulo III expone los Resultados y Discusión, donde se procesan los resultados de las entrevistas técnicas, el análisis de la configuración actual, la experimentación digital en entornos computacionales, así como la conceptualización de la propuesta final basada en la evidencia bibliográfica; y el Capítulo IV concluye resumiendo las Conclusiones y Recomendaciones de la investigación, validando la hipótesis y estableciendo líneas futuras de validación en pista.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Tema

Influencia de las configuraciones morfológicas en el diseño del alerón trasero en vehículos de competencia en altitud elevada.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Contextualización

La provincia de Tungurahua, Ecuador, presenta un entorno geográfico singular que impone desafíos en la industria automovilística de Rally. Conocida por su topografía montañosa, la región abarca altitudes que varían significativamente, con puntos de referencia como el Volcán Tungurahua, cuya cumbre se eleva hasta los 5,023 metros. Aunque las rutas de rally no alcanzan necesariamente esta altitud máxima, las etapas de competición se desarrollan a menudo por encima de los 1,800 metros, lo que establece un régimen operativo de alta altitud y baja densidad atmosférica (Tungurahua Automóvil Club , 2025).

El desempeño aerodinámico de los vehículos de rally constituye un factor determinante en su estabilidad, comportamiento dinámico y seguridad, especialmente en entornos de altitud elevada como la provincia de Tungurahua donde las condiciones atmosféricas propias de esta zona, caracterizadas por una reducción significativa de la densidad del aire, variaciones térmicas y alta humedad, modifican de forma relevante la interacción entre el flujo de aire y los elementos aerodinámicos del vehículo (Red Hidrometeorológica de Tungurahua, 2025). En este contexto, el alerón trasero adquiere un rol clave en la generación de carga aerodinámica, influyendo directamente en la

adherencia, la estabilidad direccional y el comportamiento dinámico durante las distintas fases de la conducción (Escuela de Rally, 2023).

En las competencias nacionales de rally, particularmente en las categorías no homologadas o Proto, la configuración del alerón trasero se compone de forma empírica. Si bien el regulador técnico de la FEDAK (2026) establece ciertas restricciones genéricas como la condición de que el alerón es un elemento fijo de forma, no regulable, y las dimensiones están limitadas a un volumen específico, no hace mención de la existencia de parámetros específicamente estrictos en la configuración del alerón. La baja especificación normativa da como resultado una configuración geométrica del perfil alar basadas en la experiencia práctica, la adaptación de soluciones existentes o la imitación de configuraciones utilizada para el ámbito internacional, dando como resultado que no se considere cómo las variaciones morfológicas influyen en el rendimiento aerodinámico en altitud elevada.

Con base a esta premisa, se hace necesario analizar cómo estas variaciones morfológicas se pueden encontrar en los alerones traseros de vehículos que no sean homologados, donde se entiende la morfología como el conjunto de aspectos geométricos que determinan la interacción del alerón con el aire. El estudio de estos cambios morfológicos permite identificar patrones formales recurrentes, así como establecer relaciones entre la geometría del alerón y su desempeño aerodinámico en condiciones reales de altitud elevada. Este análisis constituye un paso fundamental para comprender cómo la forma influye en la generación de fuerzas aerodinámicas bajo un régimen atmosférico no estándar.

1.2.2 Árbol de problemas

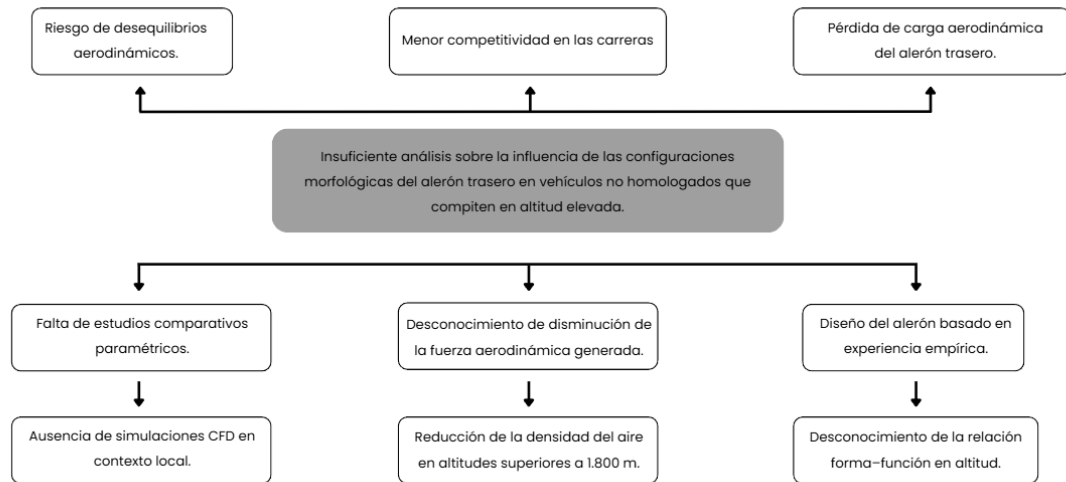


Figura 1 Diagrama de Árbol de Problemas

Fuente: Autoría propia.

1.2.3 Enunciado del problema

El rally es una disciplina del automovilismo con un profundo arraigo y una base de aficionados apasionados en la provincia de Tungurahua. Eventos como el "Rally Vuelta a la provincia de Tungurahua" son un pilar de la competición local y atraen a un gran número de participantes y espectadores (TAC, 2025). La topografía del lugar de conducción que los vehículos de rally necesitan para sortear los obstáculos del terreno es un factor crítico que impacta negativamente en la capacidad de generar carga aerodinámica. La pérdida de potencia del motor es directamente proporcional a la disminución de la masa de aire. Para los motores de aspiración natural, se estima una pérdida de entre un 10 % y un 15 % de potencia por cada 1,000 metros de altitud (Garrettmotion, 2019).

Según un análisis del WRCWings (2019), en altitudes de ~2.000 m la densidad del aire disminuye, lo que implica una reducción significativa de la fuerza aerodinámica (downforce) producida por los apéndices aerodinámicos (como alerones traseros). En ese mismo artículo estiman una pérdida de downforce del ~22% (WRCWings, 2019). Hay estudios y reportes sobre autos que se “levantan” (airborne) por desequilibrios aerodinámicos. Por ejemplo, un análisis de accidente con el Mercedes CLR muestra que cuando el coche sorteaba crestas o baches, su ángulo de cabeceo (pitch) podía subir, reduciendo la carga hacia delante y, en ciertos casos, generando sustentación o “lift” en el frente, lo que llevaba a que el auto se elevara. Por lo tanto, si en un rally en altura se usa un alerón trasero muy agresivo o sin considerar las condiciones, puede aumentar el riesgo de inestabilidad, pérdida de adherencia y, en el peor de los casos, accidentes o vuelcos (Rowland, 2017).

Los tipos de vehículos que compiten en la provincia representan una mezcla de lo local y lo internacional. Participan vehículos mundialmente reconocidos como el Rally 2 (conocido anteriormente como R5), pero en el caso del automovilismo de Tungurahua carece de exclusividad la clase internacional y se incluye a nivel regional la categoría T3. Esta categoría, junto con otras más de la FEDAK como la "2000 Preparados"; se pueden evidenciar algunos rasgos de una modalidad de competición que no espera ceñirse estrictamente al marco de la FIA sino que se transforma para generar un entorno competitivo y de acceso para los/as pilotos locales y regionales (TAC, 2025).

1.3 Justificación

La forma dentro del diseño industrial se constituye como una decisión estratégica donde se articula la función, contexto y desempeño, sobre todo en sistemas que son expuestos a condiciones extremas. De acuerdo con Ezio Manzini (2015), el diseño contemporáneo debe responder a escenarios complejos y situados, donde las variables ambientales dejan de ser externas para convertirse en factores determinantes del proceso proyectual. De esta manera, las configuraciones morfológicas del alerón trasero en los vehículos de competición en una altitud elevada son entendidas como un problema de diseño que está

condicionado por el entorno en el que se encuentra, llegando más allá que una simple optimización técnica.

Las competencias automovilísticas que tienen lugar en regiones montañosas, como la cordillera de los Andes posee la característica, en donde la densidad del aire sufre una reducción notable lo que provoca que el comportamiento aerodinámico y dinámico del vehículo se altere. Es decir, cuando la altitud asciende, la presión atmosférica se reduce, generando un impactando tanto en la resistencia aerodinámica como en la generación de carga descendente, comprometiendo la estabilidad, la tracción y el control del automóvil (Liang & Zhang, 2018).

No obstante, la mayoría de los alerones que se adoptan en el rally de Tungurahua responden a configuraciones genéricas, configuraciones muy bien trabajadas para situaciones de altitud próxima al nivel del mar sin tener en cuenta su adaptación morfológica para condiciones de baja densidad atmosférica. Por lo tanto, la presente investigación se justifica tanto a nivel académico como profesional, ya que el estudio del alerón trasero se plantea desde el punto de vista morfológico, contextual y funcional, orientado a condiciones de altitud.

En este sentido, el estudio proporciona un conocimiento para la disciplina del diseño industrial aplicado a la ingeniería de competición, ampliando los conocimientos sobre la forma como variable determinante del rendimiento y el comportamiento del vehículo en el rally de Tungurahua. Y finalmente representa la creación de un marco de trabajo replicable para futuras investigaciones o proyectos en vehículos no homologados, estableciendo al diseño industrial como una disciplina expansiva en la optimización aerodinámica y el diseño de soluciones para adaptarlas a contextos específicos que vayan más allá de las proporciones o los mecanismos de la forma.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar la influencia de la configuración morfológica del alerón trasero en su comportamiento aerodinámico, mediante simulaciones computacionales, para establecer criterios de diseño en condiciones de altitud elevada.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar la configuración morfológica del alerón trasero en condiciones aisladas de un vehículo de competencia no homologado representativo (caso Peugeot 207 T3) desde una perspectiva formal y funcional.
- Determinar la influencia de la configuración morfológica del alerón trasero sobre el coeficiente de sustentación (C_L) y el coeficiente de arrastre (C_D).
- Proponer criterios de configuración morfológica del alerón trasero basados en su comportamiento aerodinámico en condiciones de altitud elevada.

1.5 Línea de investigación

La presente indagación se encuentra dentro de la línea de investigación "Diseño, materiales y producción", que es parte del dominio institucional, denominado "Optimización de sistemas productivos, técnicos-tecnológicos y desarrollo urbanístico" dentro del Estatuto de la Universidad Técnica de Ambato, y que permite la investigación y el desarrollo de productos desde una perspectiva de diseño industrial, desde una perspectiva que cruza los aspectos morfológicos, funcionales y tecnológicos que participan en los procesos de concepción y producción de objetos. De modo coherente con la consecución de los objetivos del proyecto de tesis, se cierra el círculo de esta investigación donde el objetivo se centra en el análisis de las configuraciones morfológicas de un componente aerodinámico de los vehículos de

competición no homologados aplicando criterios proyectuales del que puede depender la innovación y la mejora de los productos.

1.6 Pregunta de investigación – hipótesis

¿En qué medida la configuración morfológica del alerón trasero, basada en perfiles NACA y de continuidad geométrica de superficies, influye en el coeficiente de sustentación (C_L) y el coeficiente de arrastre (C_D) en condiciones de altitud elevada?

"La configuración morfológica del alerón trasero, basada en perfiles NACA y de continuidad geométrica, influye en los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) en condiciones de baja densidad atmosférica propias de altitudes elevadas."

1.7 Antecedentes investigativos

1.7.1 Nivel Macro: Fórmula 1

En la Fórmula 1, la forma del alerón no responde a la estética, sino a una condicionante aerodinámica crítica: generar downforce. Como bien explica Padilla Yun (2021), este componente es el que literalmente "adhiera" el coche al asfalto, permitiendo pasos por curva a velocidades que desafían cualquier lógica. Esa función técnica es la que ha dado lugar a una silueta agresiva, donde cada curva que compone el vehículo se expresa como un símbolo de velocidad, dentro de las competiciones puede alcanzar más de 300 km/h.

Sin embargo, el rendimiento puro tuvo que dejar paso a un nuevo paradigma con la normativa de la FIA de 2022. Según Mendia Blázquez (2023), el diseño actual ha dado un giro de 180 grados hacia formas mucho más limpias. Ya no nos referimos únicamente a carga aerodinámica. La idea es intentar reducir el "aire sucio" que exista para permitir unas overtaking realistas (capacidad de un piloto para rebasar a otro en pista). Por otra parte, la "estética de la velocidad" no es un concepto abstracto; es, en realidad, una

compleja ingeniería de capas donde nada es accidental. Padilla Yun (2021) sostiene que todo el juego aerodinámico nace en la configuración de doble elemento ese binomio entre el plano principal y el flap secundario cuyo fin último es manipular la diferencia de presiones.

Mientras que Padilla Yun (2021) da prioridad a la perfecta eficiencia del perfil, Mendia Blázquez (2023) manifiesta que la normativa FIA 2022 la subordina a la mejora de los adelantamientos. Es decir, hacia el uso del aire limpio en lugar del aire sucio, introduce evidentemente una tensión entre el rendimiento máximo de cada monoplaza y el espectáculo deportivo que persigue la categoría.

Para Mendia Blázquez (2023), la solución ha consistido en convertir en superficies curvas los endplates que "abrazan" el aire para crear una forma que minimice el drag, renunciando así a las piezas sueltas como elementos de un sistema que tiende a ser orgánico. Es una precisión quirúrgica, la necesaria para retrasar el desprendimiento de la capa límite en perfiles que como el AH 79-100 B, hace evidente que la "estética de la velocidad" no es otra cosa que una ingeniería de capas en donde nada es puesto al azar.

La evolución de los alerones ha superado la simple configuración de sus planos para entrar en una era de optimización geométrica. Los diseños actuales se basan en uso de NURBS Morphing como herramienta de precisión. Según plantean Guendaoui et al. (2025), esta capacidad de alterar la curvatura del perfil de manera continua permite dar con ese "punto exacto" matemático: el equilibrio perfecto entre minimizar el arrastre (drag) y maximizar la sustentación negativa.

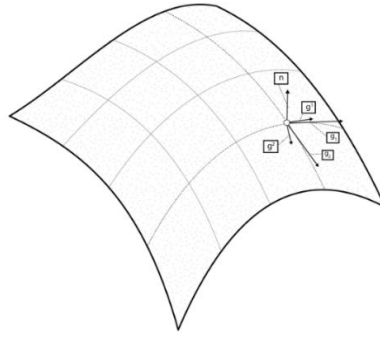


Figura 2 Geometría de una superficie arbitraria

Fuente: (Guendaoui et al., 2025).

Dicha aproximación del morphing nos dice que la estética de la velocidad se encuentra en fase de mutación. Migrando hacia superficies fluidas que se modulan mediante los parámetros, pasando del alerón que no es más que una respuesta de la geometría estática, al diseño que debe ser una respuesta de la geometría reactiva y optimizada que se adapta en tiempo real a las condiciones específicas del flujo de aire.

De la perfección de las grandes formas, el control de la capa límite ya ha disminuido a las escalas de la textura superficial. Ya no se trata solo de la silueta, sino de cómo "tocar" el aire. Shinde et al. (2021) exploran precisamente este fenómeno al analizar la implementación de hoyuelos o dimples en la piel del alerón. Al igual que ocurre en una pelota de golf, estas pequeñas hendiduras generan una turbulencia controlada que obliga al flujo a "abrazar" la superficie por más tiempo (Micro-vortex generation over a dimpled surface wing).

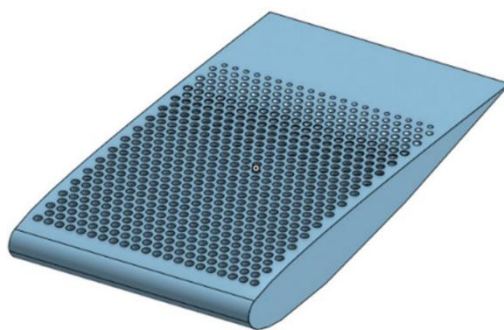


Figura 3 *Diseño del alerón que representa la disposición de los hoyuelos*

Fuente: (Shinde et al., 2021).

El resultado técnico es directo: se retrasa el desprendimiento de la corriente, lo que nos permite jugar con ángulos de ataque mucho más agresivos sin que el perfil entre en pérdida. Esto añade una dimensión fascinante a la identidad visual de la velocidad. Nos revela una micro-morfología funcional donde la rugosidad deja de ser un defecto para convertirse en una decisión de ingeniería crítica, demostrando que en la alta competencia, hasta el detalle más ínfimo está obsesivamente orientado al rendimiento.

1.7.2 Nivel Meso: Contexto Latinoamérica

Con la llegada de las SUV (Sport Utility Vehicle) al TC2000, la escena competitiva en Argentina se enfrenta a una paradoja de diseño: transformar carrocerías voluminosas de uso diario en máquinas de alto rendimiento. Esta iniciativa sienta un precedente fundamental para la investigación, ya que evidencia cómo la adaptación estructural y el rediseño aerodinámico deben evolucionar cuando el punto de partida es un vehículo de calle cuyas geometrías originales no fueron pensadas para la alta competencia.



Figura 4 TC2000: *Gustavo Estrada explicó cómo será la aerodinámica de las SUV*

Fuente: (Carburando, 2024).

El trabajo de Gustavo Estrada en estas unidades de competición evidencia una transición forzada de la morfología de calle a la pista. El desafío crítico radicaba en la arquitectura inherente de la SUV: demasiada altura y un área frontal que genera una resistencia excesiva. Para revertir esto, se proyectó un paquete aerodinámico integral. Elementos como el fondo plano con efecto suelo y el difusor trabajan en conjunto con el alerón trasero para 'pegar' el vehículo al asfalto, compensando mediante ingeniería lo que la carrocería original pierde por su geometría (Carburando, 2023).

El verdadero núcleo del proyecto no es solo la velocidad, sino el respeto por el ADN del modelo comercial. Existe una negociación constante entre la ingeniería extrema y la silueta original de la SUV; aunque el chasis sea una bestia técnica distinta, el espectador debe reconocer el vehículo que ve en la calle. Este equilibrio entre la 'metamorfosis' aerodinámica y la preservación de los rasgos identitarios es lo que hace a este caso un antecedente relevante. Esto es prueba suficiente para demostrar que la forma no sólo puede responder a la ingeniería pura, dentro del automovilismo moderno, sino que también puede responder a una estrategia de comunicación visual donde la marca debe ser la protagonista.



Figura 5 *La aerodinámica de última generación acompaña una silueta que refleja el gusto del mercado.*

Fuente: (LubriPress, 2026). Recuperado de <https://lubripress.com/tc2000-suv/>

Padilla Yun (2021) sostiene un principio aerodinámico transferible donde la configuración y selección del perfil se convierte en el primer campo de batalla técnico, donde la asimetría de los perfiles elegidos busca conciliar la eficiencia con la silueta del vehículo. Lejos de los diseños simétricos convencionales, el uso de un perfil principal FX76-MP-120 y un flap GOE 464 responde a una morfología técnica que prioriza una distribución de presiones uniforme, garantizando un comportamiento aerodinámico predecible sin sacrificar la carga aerodinámica necesaria para la competición.

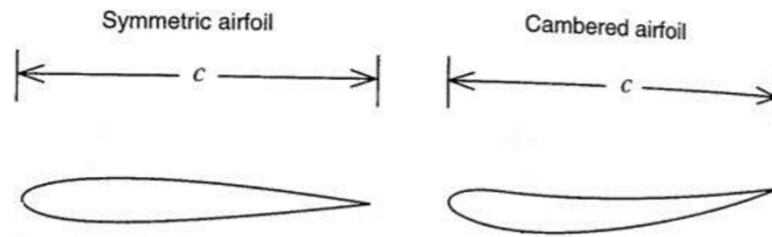


Figura 6 Diferencias geométricas entre alerón simétrico y asimétrico.

Fuente: Diseño y análisis de un alerón trasero de F1 (p. 46), por O.

Padilla Yun, 2021, Universitat Politècnica de Catalunya.

Aunque la investigación se enmarca en monoplazas de Fórmula 1, los principios aerodinámicos y los criterios de selección geométrica empleados son extrapolables a otras disciplinas del automovilismo, como el rally, donde la eficiencia aerodinámica también depende de la correcta relación entre la morfología del alerón y el comportamiento del flujo en condiciones dinámicas variables.

1.7.3 Nivel Micro: Diseño de alerones para vehículos de competencia (Ecuador)

Mientras que a nivel Macro la F1 busca la eficiencia extrema en condiciones controladas, a nivel Meso observamos una adaptación de estas formas a los reglamentos dentro de Latinoamérica, culminando en el nivel Micro con el desafío específico de diseñar alerones que funcionen en la geografía ecuatoriana.

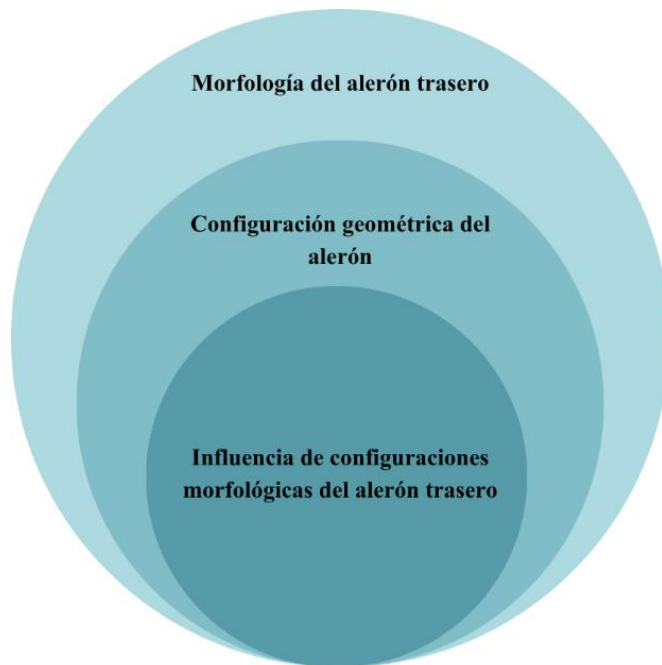
El alerón, lejos de ser un aditamento estético, se configura como la pieza clave de la arquitectura aerodinámica en vehículos de competencia. Su geometría deberá ser una respuesta adecuada a la física del flujo: pues haciendo uso de la lógica contraria a la de un perfil alar convencional, la morfología del componente hace de la presión del aire una fuerza de equilibrio descendente. Esta sustentación negativa, tal como en forma de ancla del tren posterior al asfalto como afirma Chuquín (2022) "Diseña y expresa el comportamiento por el cual la aerodinámica del alerón puede llegar a influir en el

comportamiento del tren posterior en cuanto a sus sustentos y comportamiento en modo de succión". En el contexto de las competencias en Ecuador, el diseño del alerón será mucho más agresivo: cada grado de incidencia con respecto a su perfil será clave para recuperar la escasa masa de aire, garantizando que, superando los 60 km/h, el neumático alcance un estado de contacto seguro y estable.

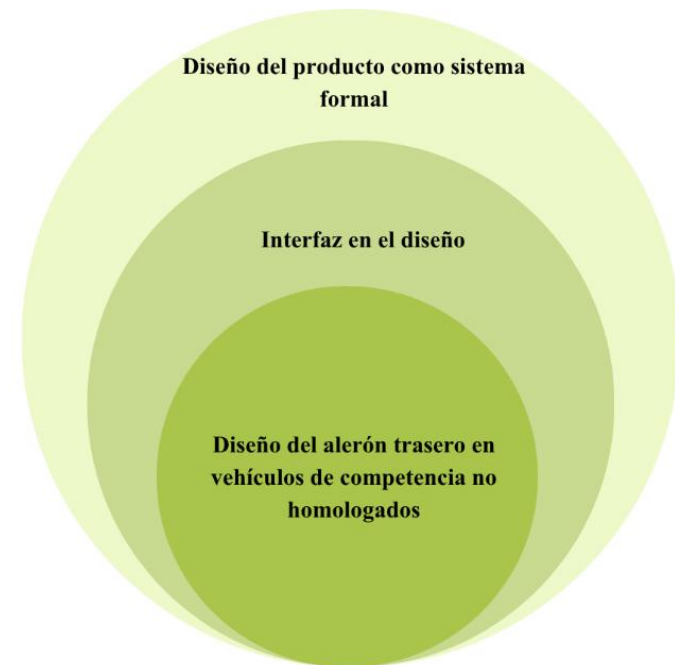
Definir la geometría ideal para la pieza no es un ejercicio de carácter estético, sino una respuesta técnica, se entiende que la selección de los perfiles alares se realiza a partir de los perfiles estandarizados. Para el diseño industrial, la adecuación del objeto tiene que ver con el delicado equilibrio entre el conseguir la carga aerodinámica necesaria y el no tener la resistencia al avance como punto en contra de la eficiencia. Solo a partir de este criterio de eficacia, Byron & Murillo Vega (2022), validan la geometría del perfil NACA 2412 como la más favorable en comparación con otras geometrías, como lo son el NACA 0012 o el NACA 4412. Su ventaja competitiva reside en su curvatura, la cual gestiona el diferencial de presiones de forma que el flujo laminar se mantenga 'anclado' a la superficie del componente. Esta continuidad en el borde de salida es vital; evita desprendimientos de capa límite que degradarían la función del objeto, transformando un dispositivo de control en una fuente de inestabilidad para el usuario.

1.8 Marco Teórico

1.8.1 Categorías fundamentales

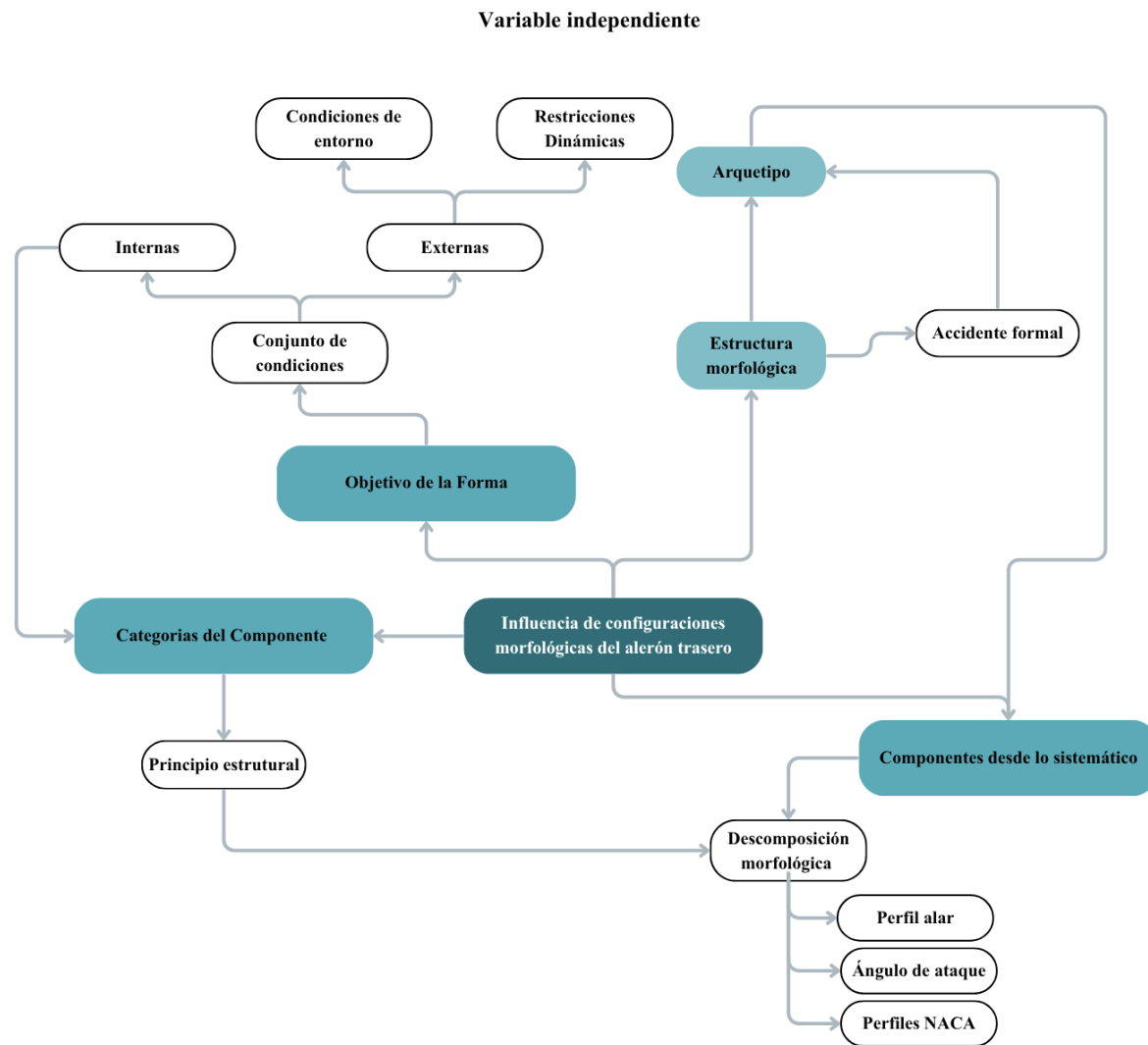


Variable independiente

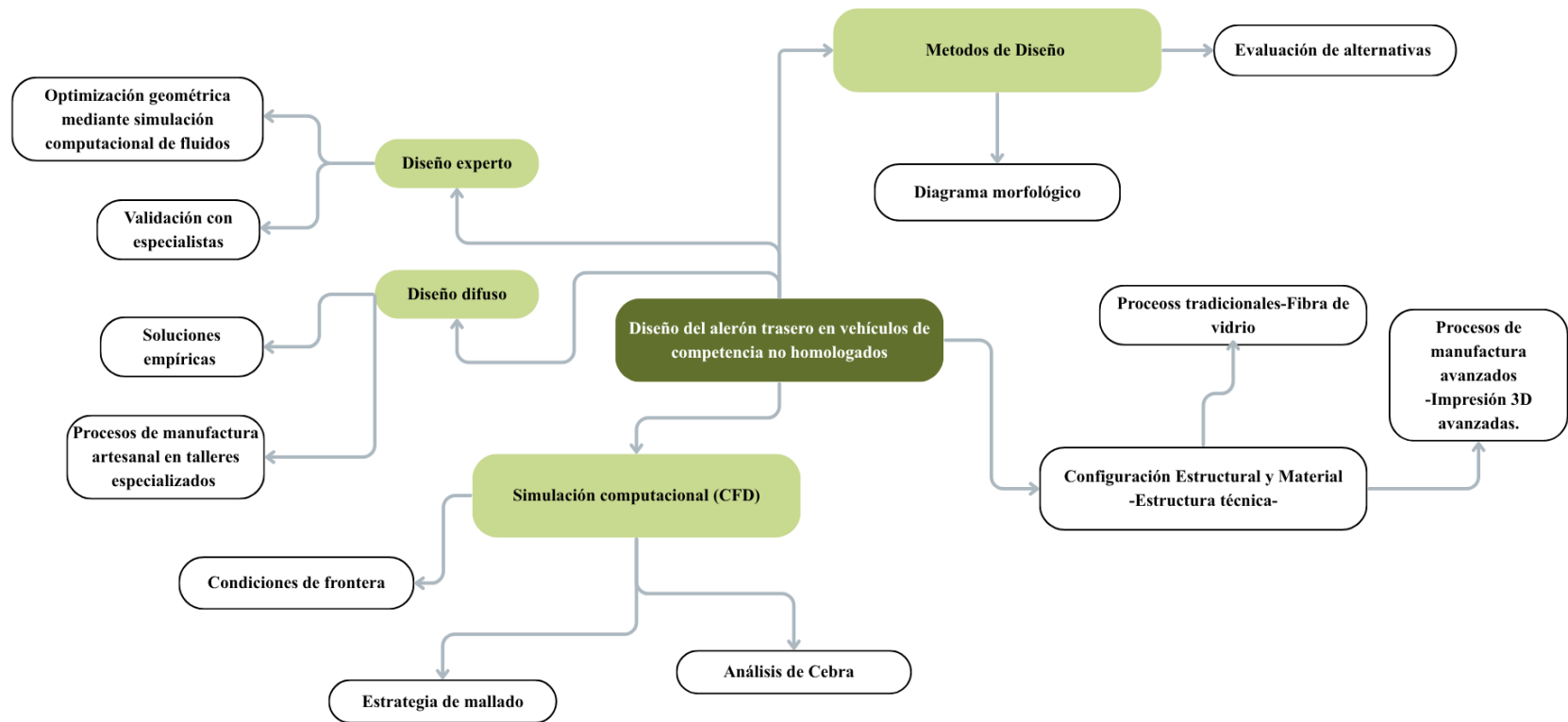


Variable dependiente

1.8.2 Red conceptual



Variable dependiente



1.8.3 Desarrollo del marco teórico

Variable independiente

1.8.3.1 Estructura morfológica

“La forma es un conjunto de elementos organizados y reconocibles que componen una estructura, floreciendo como orden tridimensional, configuración y representación de un concepto“ (Valencia, 2005, pág. 8). Desde esta perspectiva, se concibe como el cuerpo del objeto, el cual cuenta con una dimensión que es la estructura morfológica, que equivaldría a su estado de "real": lo que se puede ver, tocar, reconocer, percibir con arreglo a la condición humana, que no debe ser superada. Este concepto es el que cierra la estructura significativa, se convierte en el espacio en el que puede producirse la interacción con el usuario; por lo tanto, aquello que queda fuera de esta instancia no tiene sentido. También, la estructura representa, realiza y deja un mensaje en la memoria, haciendo una referencia a la forma como un objeto real y estable y al espacio como un vacío que se convierte en significativo como consecuencia de esta configuración (Valencia, 2005).

Alexander (1964) menciona que “Si el mundo fuera totalmente regular y homogéneo, no habría fuerzas ni formas. Todo sería amorfo. Pero un mundo irregular intenta compensar sus propias irregularidades adaptándose a ellas, y así adquiere forma” (p.15). Este planteamiento corresponde con la idea de que la forma es un “diagrama de fuerzas”, idea que pertenece a D'Arcy Wentworth Thompson, donde cada característica formal de un objeto re-expresa, a ojos de la forma, directamente las fuerzas funcionales que le corresponden. Esto quiere decir que la morfología no se entiende como una decisión estética aislada, sino como la materialización visible de variables funcionales, estructurales y de contexto.

La articulación de la postura de Valencia y la de Alexander permite dar un salto hacia una visión de la forma no estática, sino que es una forma sistémica y relacional. El primero se describe como una estructura perceptible, cerrada e importante para la interacción con el usuario, mientras que el segundo introduce un carácter dinámico presentando la forma como resultado de un campo de fuerzas que buscan el equilibrio frente a la irregularidad del medio. En ese cruce de teorías, la forma desaparece como un “resultado final” o una forma visible, y se convierte en una interfaz entre lo perceptual y lo funcional, donde hay confluencia de la experiencia del usuario y los requisitos técnicos que dan origen al objeto.

1.8.3.1.1 Accidentes formales

Se puede entender que los elementos que se encuentran dentro de una forma objetual son elementos o componentes que, a pesar de que dependen del mismo objeto del cual son parte, adquieren un grado de autonomía y por lo tanto un grado de identidad. Se trata de elementos materiales percibidos y reconocidos como partes distinguibles que componen al todo; a estos elementos se les denomina “accidentes”. Por otro lado, la forma de un objeto puede responder a diferentes grados de complejidad en función del número y la disposición de los accidentes, desde aquellos casos en los que un solo elemento determina por completo la forma, hasta aquellos casos en los que hay un gran número de elementos constitutivos que acaban enriqueciendo la forma (Valencia, 2005).

Una forma construida a partir de un único accidente tiende a la ambigüedad, a ser poco contextual y a abrirse a múltiples interpretaciones. En cambio, a medida que se incorporan más accidentes (que actúan como portadores de significado dado que cada uno de ellos aporta parcialmente a comunicar un mensaje), llega un momento en que los accidentes, aunque sean de alto grado, pueden generar el efecto contrario: muchos accidentes pueden dar lugar a un marco demasiado complejo, que puede dificultar su interpretación, limitando la claridad y la comprensión.

En concordancia con lo mencionado, se evidencia como estos “accidentes” son portadores de información técnica y simbólica. Un alerón es parte de un objeto más complejo, el vehículo, con elementos muy escasos será más simple, más genérico, menos expresivo (en la línea de la forma “ambigua”), un alerón con muchos elementos específicos (el opuesto) será más complejo (por ejemplo, relacionado con su tecnología) y con la explicación (más exploración) de la optimización aerodinámica. Pero, como también pone de manifiesto el texto, existe un “punto de ruptura”. Cuando no hay límite y el diseño se ve resuelto con todos los elementos con los que se ha podido dotar, el alerón puede tener un visual muy saturado, que puede alcanzar la sensación de “desorden”, algo que no es deseable. Pero la clave reside en que el objeto, es decir, el vehículo, busca un equilibrio morfológico, donde los “accidentes” no han de ser solo cosa de resolver las fuerzas aerodinámicas, sino que han de estructurar también la legibilidad y coherencia formal del objeto.

1.8.3.1.2 Arquetipo

El referente de un objeto puede interpretarse como una estructura que articule diversos grados de exigencia como, por ejemplo, lo básico, lo ideal, lo esencial, lo social y lo inherente. No son sinónimos, sino criterios complementarios que permiten ver una forma cierta y válida de ella en una categoría. Para que un objeto adquiriera carácter arquetípico tiene que cumplir con un número de tales aspectos, preferiblemente con la mayoría de ellos; dado que no siempre es posible que incluya a todos ellos a la vez (Valencia, 2005).

Por otra parte, Tjalve (1979) presenta un modelo detallado al que llama "síntesis del producto". El proceso de diseño comienza definiendo la función de la solución que se quiere encontrar para luego dividirla en una serie de subfunciones de modo que, el diseñador pueda identificar los medios técnicos que le permitirán realizar aquellas subfunciones. Podemos describirlo como que el diseñador establece una solución básica que va evolucionando en una "estructura

cuantificada" donde se optimizan los parámetros críticos y se determina la disposición relativa de los elementos de la solución que se quiere encontrar antes de establecer la solución definitiva. Este procedimiento permite que cada decisión de diseño esté siempre precedida de criterios de optimización y no únicamente de preferencias visuales (Tjalve, 1979).

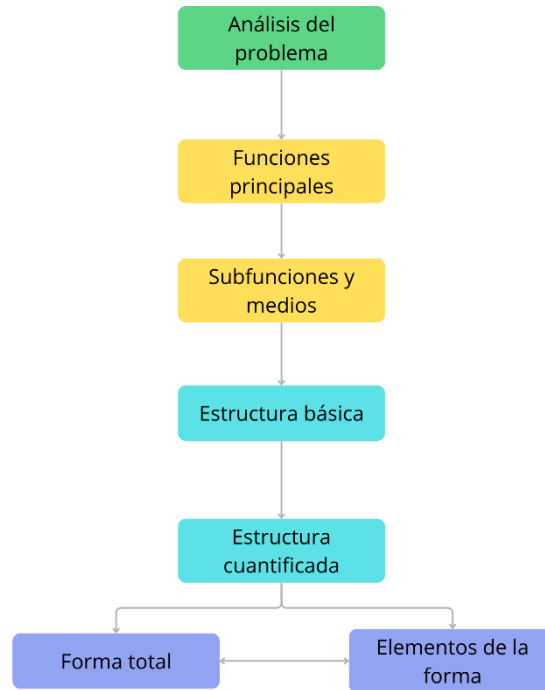


Figura 7 *La síntesis del producto: Un modelo del proceso de diseño que muestra las etapas de la creación de un producto.*

Fuente: Adaptado de (Tjalve, 1979).

Así, hay objetos que pueden, por ejemplo, gozar de un claro reconocimiento social o no carecer de una condición inherente, pero no poseen una forma ideal, una forma esencial definida. El arquetipo, en este sentido, no se quedaría como una única condición, sino que en cambio vendría a ser el resultado de la confluencia de diversas condiciones que articulan una identidad. Constituir arquetipos posee dos maneras: el pasivo, por la evolución y el afianzamiento histórico de una forma, y el activo, donde se considera sistémicamente conceptos

y proyecciones, los que aceleran sus procesos evolutivos pertinentes a la apropiación y a la textualización.

Con base a lo mencionado entendemos que un alerón arquetípico no se define únicamente por “tener una forma aerodinámica”, sino por integrar condiciones básicas (generar carga), esenciales (perfil alar), inherentes (interacción con el flujo de aire), ideales (eficiencia aerodinámica) y sociales (asociación con alto rendimiento o competición). La convergencia de estos factores es lo que permite que, incluso con variaciones formales, un alerón siga siendo identificado como tal dentro de su categoría.

1.8.3.2 Objetivo de la forma

La finalidad de la forma, según Alexander (1964) no sólo está dada por la forma misma, sino por la adecuación que es capaz de proporcionar ante un determinado conjunto de exigencias o condiciones que se imponen. En este sentido, la forma es el resultado de un proceso de adecuación entre el objeto y su contexto, y en donde se proponen limitar al mínimo los desajustes. Como bien expone el autor, “the form is the solution to the problem” (la forma es la solución del problema), para decir que la forma no es arbitraria, pues es respuesta directa a las exigencias del sistema.

Además, afirma que el diseño se refiere a alcanzar el estado en el cual no existen desajustes significativos entre forma y contexto, pues, a su juicio “Se produce un desajuste siempre que existe una falta de adaptación entre la forma y su contexto”. De este modo, la finalidad de la forma es la de obtener una forma que elimine o disminuya estos desajustes, concretándose en una solución congruente y, si se quiere, coherente.

1.8.3.2.1 Conjunto de condiciones

La forma parte de la obtención de un conjunto de condiciones que ha de cumplir. El conjunto de condiciones forma, por tanto, un sistema complejo de variables interrelacionadas. Para Alexander (1964) en el transcurso del proceso de creación de formas existe un sistema dinámico de carácter conceptual. Dicho sistema está conformado por variables que, en última instancia, representan las distintas funcionalidades que deben cumplir las condiciones para llegar a una relación suficientemente adecuada entre la forma y el contexto.

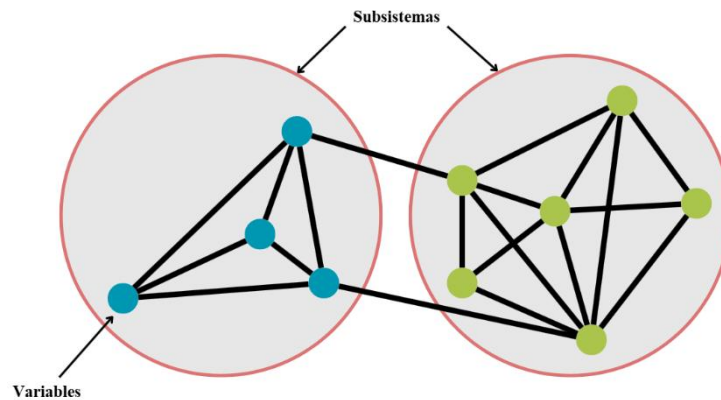


Figura 8 Sistema de vínculos causales entre variables.

Fuente: Adaptado de (Alexander, 1964).

Las relaciones que tienen lugar en el interior de este sistema son, precisamente, causales entre las variables que quedan vinculadas entre sí. Si este tipo de relaciones fueran a representarse, podríamos referir cada variable como un punto y cada relación causal como un vínculo entre ellos, dando lugar a una estructura en la que todos sus elementos evidencian una interdependencia.

Siempre se hallarán subsistemas, como los que se muestran enmarcados con un círculo, que pueden ponerse en funcionamiento, en principio, con bastante independencia. Por lo tanto, podemos incluso imaginar el proceso de la creación de las formas como la acción de una serie de subsistemas, todos ellos interrelacionados, pero lo bastante independientes unos de otros como para poderse ajustar entre sí de manera autónoma en un intervalo de tiempo razonable.

Funciona porque los ciclos de corrección y re-corrección que se producen durante la adaptación quedan limitados, cada vez, a un único subsistema.

(a) Internas

Las condiciones internas corresponden a la estructura propia del problema y a las relaciones entre sus componentes. Estas condiciones determinan la coherencia interna de la forma, permitiendo que los distintos elementos funcionen como un sistema integrado. De esta manera, el problema se descompone en partes manejables con el fin de entender toda la estructura interna de los métodos de mejora. Esto va a permitir descubrir ciertas regularidades que sirven de indicación a la configuración de la forma.

(b) Externas

Las condiciones exteriores hacen referencia a la situación en que la forma se "desenvuelve", donde comprende aspectos ambientales, sociales, de uso, y a las exigencias que se imponen al objeto por el entorno en el que este se desenvuelve. Se produce un error de inconsistencia cuando la forma no cumple alguna de las condiciones del contexto. Por lo tanto, una forma solo va a funcionar como adecuada si satisface correctamente estas condiciones externas,

1.8.3.3 Componentes desde lo sistemático

La concepción sistémica que establece Asimow (1962) plantea que los objetos de diseño han de ser considerados como estructuras jerárquicas formadas por diferentes niveles de complejidad, de forma tal que el sistema, tal como viene dado, se enfrenta a su descomposición a través de subsistemas, componentes, partes, donde cada uno de esos niveles tiene una función particular dentro del todo. De forma que los subsistemas son unidades funcionales de mayor escala que pueden ser objeto de análisis relativamente de forma independiente y que, al mismo tiempo, también son interdependientes del sistema

global. Como señala Asimow (1962), "the subsystems usually comprise some number of components, which are developed in much the same way as the subsystem" (pág. 35), (Los subsistemas suelen constar de varios componentes, que se desarrollan prácticamente de la misma manera que el propio subsistema), lo cual pone de manifiesto una lógica de descomposición desde un enfoque estructurado que permite abordar el diseño de una forma organizada y funcional Asimow (1962).

El modelo sistémico desarrollado por Morris Asimow nos permite entender al alerón como un elemento insertado dentro de un sistema jerárquico superior, donde tal forma está determinada en función de relaciones funcionales y de compatibilidad con el sistema vehículo. Dispuesta desde este modelo, la forma no parte de un inicio, sino es producto de varias interacciones estructurales entre subsistemas, componentes y partes. Por el contrario, el modelo de Löbach establece como centro de interés la configuración formal del objeto, entendiendo que esta se argumenta a partir de la forma, la superficie, el material y el color, los cuales determinan la manera de ser percibido y manifestado por el producto.

Desde este punto de vista, ambos posicionamientos no se niegan, sino que se complementan en el análisis del alerón: el primero establece las condiciones estructurales y funcionales que orientan el diseño del componente estructural, mientras que el segundo establece las condiciones formales, las decisiones relativas al diseño del componente, tales como la geometría, las proporciones y la superficie. Así la forma está determinada por una doble condición: por un lado, está la determinación a su pertenencia por un sistema técnico y otro a los propios principios configuracionales que determinan su configuración como objeto de diseño.

1.8.3.3.1 Descomposición morfológica

La descomposición morfológica se puede aplicar prácticamente a través de la creación de un "árbol topográfico" o diagrama de jerarquía. Según Löbach (1981), este método hace referencia en desglosar el producto industrial, entendido como un sistema complejo, en subsistemas, grupos de piezas y piezas simples. La división no es arbitraria. Lo que se busca mediante dicha división en subsistemas, grupos de piezas y piezas individuales es determinar la función técnica de cada elemento y la posición que un determinado elemento tiene en el sistema.

A través de esta organización jerárquica facilita el análisis de la madurez técnica del producto. Mediante el árbol de componentes, el diseñador identifica redundancias, comprueba si es más asequible combinar varias piezas en una y simplificar el proceso de fabricación, o determina si se trata de la disposición más adecuada en la interacción con el usuario Löbach (1981). A partir de esta técnica se transforma una estructura física que aparentemente no puede ser dividida en un esquema claro de funciones y formas que se pueden optimizar de forma independiente. Dicho esto, los componentes clave del alerón son:

(a) Plano principal

El plano principal es la superficie de la que se sirve el alerón trasero para generar carga aerodinámica, ya que se basa principalmente en la diferencia de presiones que existen entre la cara superior y la cara inferior. El plano actúa como un perfil aerodinámico invertido, ya que el flujo de aire provoca una alta presión en la cara superior y una baja presión en la cara inferior, de manera que provoca una fuerza negativa que sirve para incrementar la adherencia del vehículo (Kanal, 2025). El plano de los vehículos de rally tiene una geometría menos agresiva que el del resto de disciplinas, ya que se prioriza la estabilidad frente a la carga máxima, algo que responde a la necesidad de mantener el control en superficies cambiantes y en condiciones muy dinámicas.

(b) Extensiones laterales (endplates)

Las extensiones laterales o endplates corresponden a los elementos que se ubican en la parte extrema del plano principal y que permiten mejorar la eficiencia aerodinámica del alerón. Estos componentes evitan la mezcla entre el flujo de aire de alta presión (parte superior) y el de baja presión (parte inferior), lo cual permite mantener la diferencia de presiones y, por tanto, potenciar la generación de carga aerodinámica (WRCWings, 2018). En el ámbito del rally, los endplates tienen varias configuraciones desde geometrías planas a superficies inclinadas o parcialmente abiertas que se ajustan a condiciones de flujo no uniforme como las que se producen durante una maniobra de derrapaje, donde el aire viene en dirección lateral hacia el vehículo.

(c) Soportes estructurales

Los soportes estructurales constituyen los elementos que conectan el alerón a la carrocería, garantizando en este caso tanto la estabilidad como la correcta posición en el flujo de aire. En esta aplicación de vehículos de rally, los soportes destacan especialmente por las duras condiciones de funcionamiento, que se caracterizan por la presencia de vibraciones, impactos y condiciones de terreno que cambian rápidamente. Los soportes estructurales, además de desempeñar una función estructural, pueden alterar el comportamiento de la parte aerodinámica al interferir con el flujo de aire, lo que obliga a tener en cuenta tanto la resistencia como la reducción de perturbaciones durante su desarrollo (WRCWings, 2023). Por lo general, se emplean configuraciones robustas, como por ejemplo soportes del tipo swan-neck (cuello de cisne) o soportes anclados mediante un sistema lateral reforzado.

Bajo esta lógica de sistemas el perfil alar es la unidad morfológica básica de un subsistema de sustentación, donde cada parámetro geométrico representa cada componente funcional crítico. Para entender el rendimiento del alerón, es necesario abstraer la forma física del alerón hacia un esquema que permita identificar las variables que controlan su comportamiento aerodinámico.

(d) Gurney flap

Un Gurney flap es un pequeño ángulo añadido al borde de salida del lado de alta presión de un perfil aerodinámico. Ayuda a aumentar su $C_{l_{máx}}$ de forma similar a lo que ocurre al desplegar un alerón. También aumenta la resistencia del ala y el momento de cabeceo hacia abajo. El dispositivo no es más que una tira de un ángulo de aluminio extruido (o una chapa metálica doblada). Forma una zona de circulación que modifica la forma de la circulación general sobre el perfil aerodinámico.

Perfil aerodinámico

Según Karaki et al. (2025) un perfil aerodinámico es una forma diseñada para generar sustentación cuando el aire fluye sobre ella. Esta forma está presente típicamente en las secciones transversales de alas, pálas y otras superficies que se desplazan por el aire, como las alas de los aviones, palas del rotor de un helicópteros, hélices y turbinas eólicas. Normalmente se ilustran los siguientes elementos:

- **Camber line:** La línea de curvatura representa la curva que define la distancia máxima entre las superficies superior e inferior del perfil aerodinámico. Caracteriza la curvatura del perfil aerodinámico. Esta línea es fundamental para determinar las características de sustentación del perfil aerodinámico, ya que influye en la distribución de la presión alrededor de la superficie.

- **Chord line:** La línea de cuerda es una línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de salida del perfil aerodinámico. Sirve como referencia fundamental para el análisis aerodinámico. El ángulo de ataque, un parámetro crucial para la generación de sustentación, se mide normalmente con respecto a la línea de cuerda.
- **Thickness:** El espesor del perfil aerodinámico es la distancia máxima entre las superficies superior e inferior, perpendicular a la línea de cuerda. Esta dimensión contribuye a las características aerodinámicas generales y a las consideraciones estructurales del perfil aerodinámico.
- **Trailing edge:** El borde posterior de un perfil aerodinámico es donde el flujo de aire se separa de las regiones del borde de ataque y donde se encuentran las superficies de control esenciales.

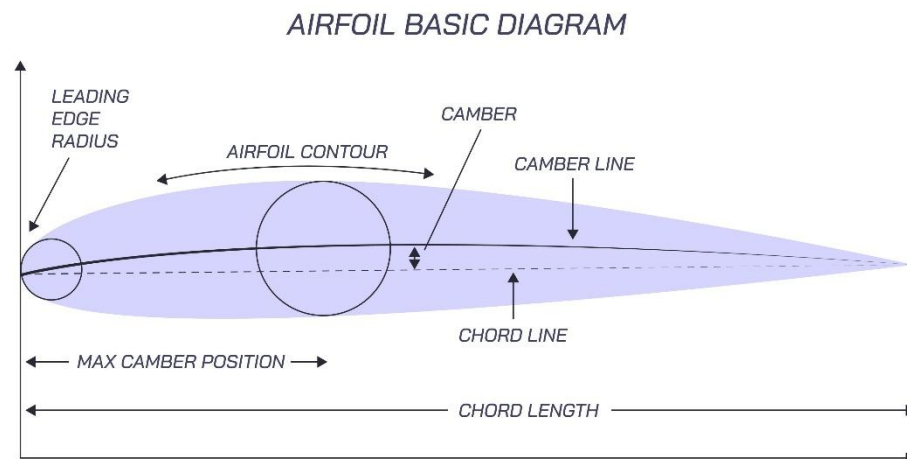


Figura 9 Diagrama de un perfil aerodinámico

Fuente: Karaki et al. (2025) [Imagen mejorada por IA]. Google AI.

<https://gemini.google.com>.

1.8.3.4 Categorías del componente

Para Löbach (1981) “La forma del producto está determinada por el fin práctico, y su desarrollo no ofrece ninguna atención especial” (pg. 51), en el marco de su clasificación de productos industriales, los llamados productos de uso III corresponden a aquellos con los cuales el usuario posee una relación indirecta, que, a su vez, lo caracterizan por no ser anónimos del entorno técnico, sino por estar definidos por su concreta función práctica. En este tipo de productos, la configuración formal viene determinada, ante todo, por exigencias técnicas y constructivas, pero no por criterios de tipo de interacción o por consideraciones de tipo perceptivo en el usuario (Löbach, 1981).

Al aplicar este criterio, el alerón en vehículos de competición a los que se les asocia en particular el contexto de rally puede considerarse un objeto próximo a esta categoría puesto que su forma está determinada en gran medida por el cumplimiento de exigencias aerodinámicas o de rendimiento, manteniendo a la vez una relación indirecta con el usuario. Sin embargo, esta clasificación pone de relieve la tensión generada dentro del diseño contemporáneo mediante la cual, aun teniendo un carácter técnico, el contorno de este tipo de elementos puede llegar a padecer la influencia de otros factores como el mercado y la competencia o la necesidad de encajar formalmente en el automóvil, lo cual, por otro lado, complica considerablemente la tarea del diseñador industrial.

1.8.3.4.1 Principio estructural

Ya se ha definido que la forma es un grupo de objetos o elementos reconocibles y organizados que constituye "un todo estructurado". En este sentido Valencia (2005) menciona el concepto de complejidad, donde, este adquiere una importancia crucial, pues no se considera en función del tamaño o del número, sino que se relaciona con la calidad de las respuestas funcionales y significativas que permite ofrecer y con su capacidad de responder a las expectativas que se manifiestan en un contexto determinado, principio que suele denominarse también “alometría”.

Así, un objeto que parece simplista puede dar lugar a un grado de complejidad elevado, en la medida que puede ofrecer distintas respuestas funcionales y significativas, conjugando su dimensión estructural (relativa a los posibles estados, a la posición y a la relación de las distintas partes que la componen) y su dimensión significativa (que alude a los valores, los usos, los mensajes y las prácticas que pone en juego).

En este sentido el alerón puede ser entendido como una forma estructurada constituida por elementos como el plano principal, soportes y extensiones laterales, dispuestos de acuerdo a principios aerodinámicos y constructivos. La cuestión relacional no se refería a las partes aisladas sino a su funcionamiento como un todo coherente. En este sentido, la complejidad del alerón no viene determinada por el número de componentes que lo constituyan sino por la calidad de sus respuestas en el contexto de uso. Pese a su formal simplicidad, especialmente en rally, responde perfectamente a variables como la velocidad, el flujo de la corriente de aire y las condiciones del terreno.

Variable dependiente

1.8.3.5 Diseño difuso y experto

“Every human talent may evolve into a skill and sometimes into a discipline” (Todo talento humano puede convertirse en una habilidad y, a veces, en una disciplina) (Manzini, 2015, pág. 37) Manzini establece que todo ser humano posee la facultad de diseñar, no obstante, no todas las personas son competentes en el diseño y muy escasas se convierten en diseñadores. Aquí se encuentra la consideración de un campo potencial para los diseñadores, lo que significa que en ese sentido, el planteamiento del diseño difuso o "diffuse design" y del diseño experto o "expert design" no hacen más que vincularse con esta idea de que existen distintas posibilidades de un mismo talento.

El diseño difuso es la primera y también la más básica y la más intuitiva salida de la facultad de diseñar, mientras que el diseño experto es el desarrollo de la facultad de diseñar como una disciplina, también entendida por formación, herramientas y modo de ser profesional. Por tanto, ambos extremos no son opuestos que se excluyen, sino que son parte de un desarrollo del talento humano. Lo importante es la amplitud de esta línea, donde aparecen también muchos niveles intermedios en función del contexto sociocultural de cada persona.

Desde esta perspectiva entendemos que la forma del alerón responde a los diferentes niveles de desarrollo del conocimiento. En donde, la forma del alerón puede provenir de una aproximación intuitiva del tipo de diseño difuso que parte de un cierto proceso de prueba y error, pero que se va enriqueciendo y se van incorporando experiencias previas, experiencias obtenidas y criterios empíricos, a medida que se va demandando la complejidad del alerón. Finalmente, debido a la complejidad de determinadas variables involucradas, aparece el diseño experto, que ahora sirve de soporte para trabajar mediante herramientas conceptuales y técnicas.

1.8.3.6 Métodos de diseño

De acuerdo con Cross (2002) cualquier forma reconocible de afrontar el trabajo se entiende como un método, incluso el dibujo que es uno de los más usados, ya que muchos diseñadores lo utilizan como una de sus principales herramientas de trabajo en la generación de ideas. A grandes rasgos, los métodos de diseño incluyen el conjunto de procedimientos, técnicas y recursos que facilitan el proceso proyectual. Los métodos de diseño constituyen diversas prácticas que el diseñador desarrolla al interior de un proceso completo. Algunos de estos son convencionales (como el dibujo), pero en los últimos años han aflorado un gran número de métodos poco ortodoxos que amplían y enriquecen el ámbito de los métodos de diseño.

Existen abundantes métodos de diseño que cubre totalmente el proceso de diseño, desde la clarificación del problema hasta el diseño de detalles. Cross presenta una

selección sistemática de los métodos más relevantes y más utilizados, que cubren todo el proceso de diseño. Al principio, se clarifican los objetivos utilizando herramientas tales como el árbol de objetivos, para poder determinar las capacidades y los límites del sistema mediante el análisis de funciones. Posteriormente se determinan los requerimientos y las características técnicas necesarias que garanticen la cobertura de las necesidades del usuario. El desarrollo de alternativas utilizando diagramas morfológicos nos permite avanzar en la búsqueda de múltiples soluciones posibles. Por último, estas alternativas se evalúan mediante criterios ponderados.

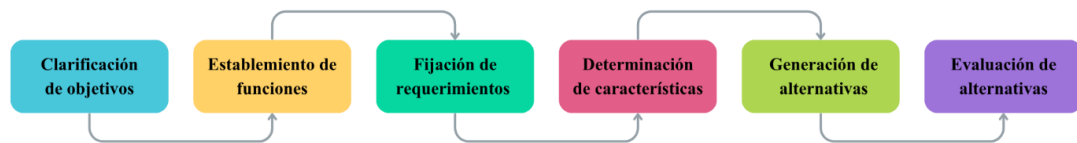


Figura 10 Métodos con marco de referencia lógico

Fuente: Adaptado de (Cross, 2002).

1.8.3.6.1 Generación de alternativas

Gran parte de la teoría y la enseñanza del diseño tiende a centrarse en la creación de productos completamente nuevos, como si estos surgiesen sin esfuerzo alguno de la mente del diseñador. Sin embargo, esta idea ignora que la mayor parte de los diseños son adaptaciones o bien mejoras de procedimientos que ya se conocen en el contexto práctico. En este sentido, una de las características más relevantes del diseño consiste en su capacidad de hacer variantes de modelos anteriores, algo que constituye una base real del pensamiento creativo. De esta manera, la creatividad no siempre implica inventar acerca de una idea ajena a la anterior, sino reordenar elementos bien conocidos y recombinarlos para obtener algo original. Este proceso es posible porque bien podríamos llegar a articular un

número limitado de elementos de múltiples maneras hasta llegar a diferentes configuraciones formales (Cross, 2002).

1.8.3.6.2 Diagrama morfológico

En el marco de aplicación del diagrama morfológico, elaborar una lista para las características o funciones esenciales. La finalidad de la lista consiste en analizar aquellas características primordiales que debe englobar el producto o definir aquellas funciones que debe ser capaz de realizar. Las características son normalmente abstractas y se concretan bajo el término de requisitos funcionales. Dentro del marco del diagrama morfológico, las características se denominan parámetros de diseño y se elaboran teniendo en cuenta las funciones antes que los componentes físicos (Cross, 2002).

De acuerdo para Cross (2002) para que esta herramienta funcione correctamente, los elementos de la lista tienen que estar al mismo nivel de generalidad, ser lo más independientes entre ellos y abarcar en su totalidad las funciones del producto. No obstante, es conveniente que la lista no sea en exceso extensa, ya que puede dar lugar a combinaciones de parámetros bastante difíciles de gestionar. Por eso se recomienda mantener la lista en un número aproximado de cuatro a ocho funciones o características.

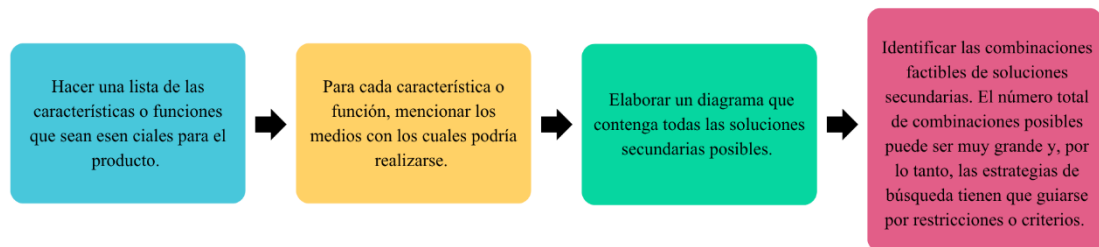


Figura 11 Método del diagrama morfológico

Fuente: Adaptado de (Cross, 2002).

1.8.3.7 Simulación computacional

La simulación por computadora, concretamente mediante el Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se presenta como una herramienta fundamental para evaluar el rendimiento aerodinámico de los elementos de los automóviles antes de su ejecución material. Este proceso se inicia con el diseño de modelos tridimensionales a partir de software para el diseño (CAD) como por ejemplo el Onshape, que posteriormente son importados a entornos de simulación como el entorno de SIMSCALE. En este entorno se dan las variables de delimitación de mayor relevancia como por ejemplo la creación de un recinto de flujo, elección de material (aire), velocidad concreta y el comportamiento de las fuerzas de drag y lift (Metar, 2021).

En el artículo “Aerodynamic analysis of spoiler at varying speeds and angles” [Análisis aerodinámico del alerón a diferentes velocidades y ángulos] dicho método se da por garantizado porque existe un proceso de refinamiento que contiene la manera de realizar una malla (meshing) y de ejecutar flujos incompresibles para obtener resultados de presión y velocidad concretos. La aceptación de las simulaciones que se obtienen de forma virtual y mediante métodos tradicionales se verifica de forma satisfactoria al comparar las cifras obtenidas con ambos procedimientos. Se observa que las diferencias obtenidas para la fuerza descendente no son muy amplias y que varían entre 0.5 N y 3.91 N. De un modo u otro, la simulación permite predecir, con una gran fiabilidad, el modo en que otras variables como el ángulo de ataque y la velocidad del aire ejercen influencia sobre el alerón del vehículo (Metar, 2021).

El autor Kyei, (2014), en su investigación “Composite Car Rear Spoiler” usa el análisis de elementos finitos (FEA) con NASTRAN (solucionador de análisis de elementos finitos de alto rendimiento) para analizar cuál es la carga estructural que se obtiene al aplicarle la interacción con el aire. El autor argumenta que el funcionamiento de un alerón se basa en conseguir una distribución de presiones óptima en cada una de las dos caras del perfil (la superior y la inferior), lo que deriva en la diferente presión que se necesita para producir la carga aerodinámica o downforce. La simulación que permite este

estudio consigue visualizar que el aire que circula a distintas velocidades sobre las superficies del perfil produce un diferencial de presión que "empuja" el vehículo hacia el suelo, de esta manera aumentando la tracción de los neumáticos.

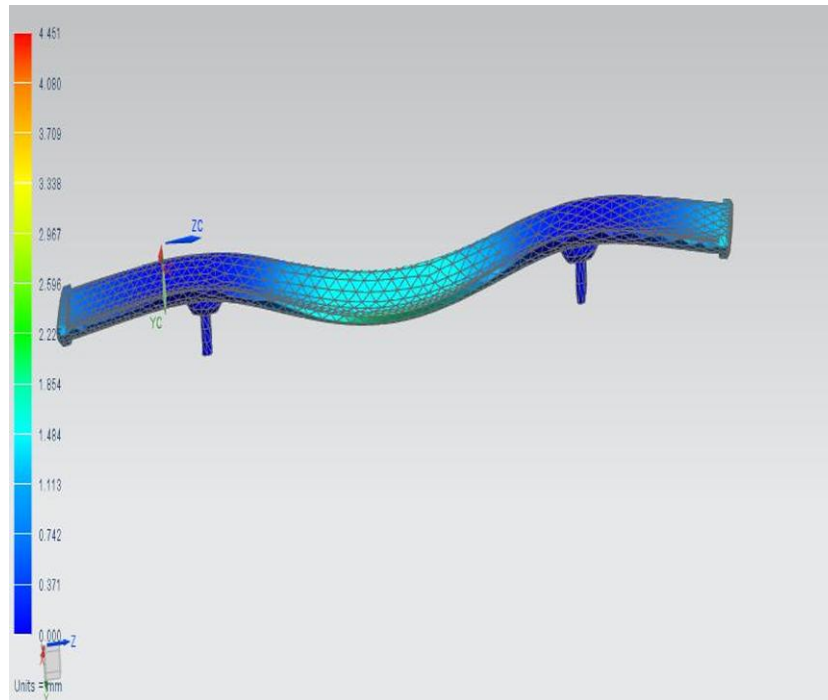


Figura 12 Desplazamiento máximo del alerón con la máxima carga aerodinámica.

Fuente: (Kyei, 2014).

1.8.3.7.1 Condiciones de frontera

El conjunto de condiciones de frontera produce el entorno físico y las especificaciones del flujo, de forma tal que el software de fluidos se ajuste para solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes. Al configurar el dominio, se obtiene un recinto o “enclosure” que contiene al objeto (spoiler o alerón) y a su vez se reemplaza esta zona en la región de flujo de aire. Es indispensable definir un plano de entrada (inlet) con una velocidad predefinida normalmente configurada a 30 m/s para simular límites de velocidad de la carretera, un suelo en movimiento (moving floor) para simular la relación con el asfalto y la salida (outlet) para evacuar el flujo. La correcta utilización de las condiciones de frontera, incluyendo

el uso de las funciones de pared para el modelo de turbulencia, garantiza que las variables de presión y velocidad sean físicamente coherentes (Qiu & Zhang, 2023).

En el artículo “Aerodynamics-based design of the rear wing of a sports car” para garantizar la fidelidad de la simulación, es imperativo configurar el material del fluido como aire con una densidad específica. La implementación de un flujo incompresible bajo las ecuaciones de Navier-Stokes permite capturar el comportamiento del aire en regímenes de velocidad de carretera y competición. Además, la definición de condiciones de "no deslizamiento" en las superficies del spoiler y el uso de funciones de pared en el modelo de turbulencia son esenciales para modelar la capa límite y predecir con exactitud la resistencia por fricción superficial. Estas configuraciones permiten que el software calcule cómo la presión se distribuye en la parte superior e inferior del perfil, determinando finalmente la magnitud de la fuerza descendente (Qiu & Zhang, 2023).

1.8.3.7.2 Estrategia de Mallado (Meshing Strategy)

A través del mallado se realiza la discretización del dominio a elementos finitos que permiten resolver numéricamente la dinámica de fluidos. Un nuevo enfoque se reduce a aplicar refinamientos de región, usando cajas cartesianas que rodean el alerón para mejorar la densidad local de la malla donde el flujo es crítico (en dependencia de los gradientes). La resolución de la malla ya sea gruesa, media o fina influye directamente en los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L). En este sentido, el “meshing” es también el paso técnico crucial a partir del cual se consigue caracterizar fenómenos complejos como la separación del flujo en los bordes de salida (Qiu & Zhang, 2023).

En el artículo “Aerodynamics-based design of the rear wing of a sports” la utilización de técnicas de refinamiento local, en particular, la generación de una caja cartesiana de gran densidad alrededor del alerón, resulta imprescindible para resolver los vórtices de la zona de la estela. De hecho, es el detalle del meshing el

que permite que, por ejemplo, el solver FLUENT procese con rigor las variaciones morfológicas. Un buen diseño de la malla, por consiguiente, se convierte en la relación entre un modelo digital y una predicción física si se desea minimizar el error con respecto a ciertos datos analíticos (Qiu & Zhang, 2023).

1.8.3.7.3 Análisis Zebra

El análisis de continuidad entre superficies mediante el Zebra Analysis se basa en la referencia visual de las bandas de reflexión, cuya alineación y suavidad determinará la calidad del empalme geométrico. Según los postulados de las funciones de base de B-splines y de NURBS, la continuidad está asociada al grado de la función (p) y a la multiplicidad de los nudos (k) en la zona de unión, esto es, matemáticamente, la superficie es al menos $p-k$ veces continuamente diferenciable en un nudo de multiplicidad (k) (Piegl & Tiller, 1997).

El análisis zebra permite monitorear los niveles de continuidad entre superficies, como la continuidad de posición ($G0$), de tangencia ($G1$), de continuidad de curvatura ($G2$), basado en cómo se examinan las franjas en la zona de unión. Las líneas que no se alinean demuestran la discontinuidad geométrica; en cambio, una progresión suave o continua permite asegurar un adecuado paso entre superficies (Autodesk, 2025). Esta metodología es de gran importancia, sobre todo en componentes aerodinámicos, porque la discontinuidad y las imperfecciones entre superficies pueden afectar el análisis del flujo de aire en los sistemas aerodinámicos, incrementando la resistencia aerodinámica y causando un impacto negativo en el rendimiento del sistema.

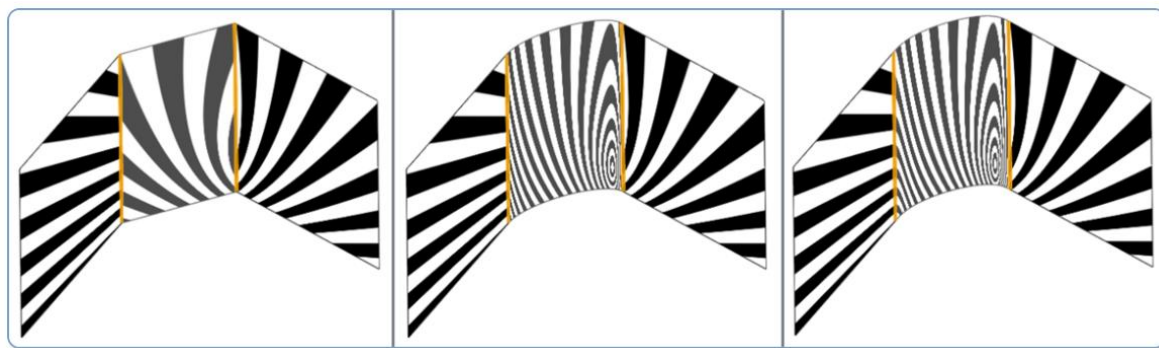


Figura 13 De izquierda a derecha: $G0$ (sin continuidad), $G1$ (tangente coincidente) y $G2$ (curvatura coincidente).

Fuente: Onshape. (2026). Modelado de superficies. Recuperado de:
https://cad.onshape.com/help/es/Content/PartStudio/surface_modeling.htm

En el artículo “Continuidad en superficies espaciales para diseño industrial”, Muñoz & Coronel (2013) mencionan que existen también herramientas avanzadas que permiten un control real de niveles de continuidad geométrica superiores, como $G3$ y $G4$. En la continuidad $G3$, además de garantizar la coincidencia en la posición, la tangencia y la curvatura (continuidad $G2$), se añade la continuidad en el cambio de la curvatura, es decir, la superficie también crea la variación en el cambio de la curvatura, generando una transición aún más suave. La continuidad $G4$ es, por lo tanto, el desarrollo del criterio $G3$, en la medida en que también controla la continuidad en el cambio del cambio, generando, por tanto, un comportamiento geométrico aún más sofisticado (Muñoz & Coronel, 2013). Estas clasificaciones de continuidad se describen como:

- a) $G0$ (posición coincidente): la posición coincide entre las 2 curvas/superficies. Ambas curvas/superficies comparten una posición común en la unión.
- b) $G1$ (tangente coincidente): la tangencia coincide entre las 2 curvas/superficies. Ambas curvas/superficies se tocan y comparten un ángulo común que es igual en ambos extremos. Un empalme es un buen ejemplo de este tipo de coincidencia de continuidad.

- c) G2 (curvatura coincidente): la curvatura (radio) coincide entre las 2 curvas/superficies. Ambas curvas/superficies se tocan, son tangentes y tienen la misma curvatura en el punto en el que se tocan (ambas tienen radios idénticos).
- d) G3 (flujo coincidente): el flujo coincide entre las 2 curvas/superficies. Ambas curvas/superficies se tocan, son tangentes, tienen una curvatura similar y muestran la cantidad de cambio en la curvatura a lo largo de la longitud de la curvatura (flujo).

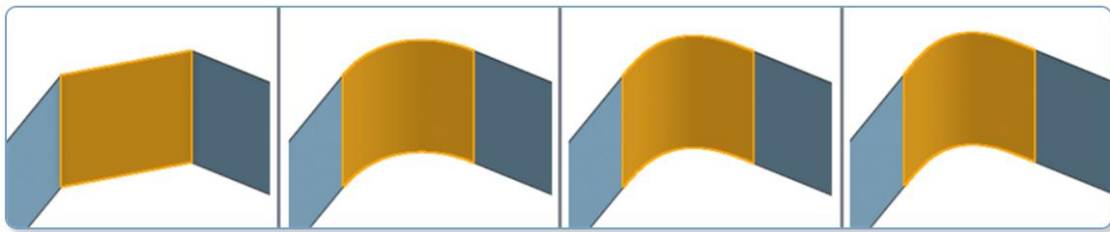


Figura 14 De izquierda a derecha: G0 (posición coincidente), G1 (tangente coincidente), G2 (curvatura coincidente), G3 (flujo coincidente)

Fuente: Onshape (2026). Recuperado de:
https://cad.onshape.com/help/es/Content/PartStudio/surface_modeling.htm

Este tipo de superficies es característico de aplicaciones muy exigentes, como por ejemplo en la industria del automóvil, donde la calidad superficial es un objetivo tanto funcional como estético. Se utilizan curvas y superficies tipo blend, es decir, las denominadas 'curvas y superficies de continuidad de orden superior', que representan una forma específica de las NURBS, pues incluyen un grado mayor de información en su construcción y son susceptibles a un control más afinado en niveles de continuidad muy elevados. Tales herramientas son imprescindibles para obtener superficies de gran calidad, y a veces, en contextos en los que las transiciones suaves tienen una repercusión directa en la percepción del producto y, en consecuencia, en su desempeño (Muñoz & Coronel, 2013).

1.8.3.8 Configuración estructural

La configuración estructural de un alerón se identifica con los criterios técnicos que han regido la selección de materiales como la disposición geométrica de este componente, ya que se considerará a partir de este último la maximización del rendimiento aerodinámico y de la resistencia mecánica, las dos propiedades fundamentales del alerón. Desde este punto de vista, el alerón se considerará una estructura rígida, liviana y capaz de resistir los esfuerzos que le imponga el diseño aerodinámico "deprimido". De este modo, se evitará que el alerón sufra deformaciones que lleven a un rendimiento comprometido (Miralles, 2019).

En el artículo “Diseño y análisis de un alerón trasero para un vehículo de competición utilizando material compuesto con fibras naturales” Miralles (2019), la elección de materiales de manera combinada (compuestos de fibra de vidrio o fibra de carbono) mejoran la relación resistencia-peso, haciendo siempre mejor la respuesta estructural del componente sin que la masa del vehículo aumente de manera significativa. En segundo lugar, la configuración técnica tiene en cuenta otros elementos como los perfiles, las varillas de soporte, los refuerzos internos que conforman en conjunto un diseño técnico que, aun tratándose de los elementos que dan la forma geométrica del alerón, deben funcionar conjuntamente en su conjunto: estabilidad del alerón, eficiencia del alerón y durabilidad del mismo con exigencias de funcionamiento (Miralles, 2019).

1.8.3.8.1 Procesos tradicionales

Los procesos tradicionales de fabricación de componentes aerodinámicos, como los alerones, están basados en procesos de moldeo abierto y laminado manual de plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV), consideradas las formas de manufactura más antiguas y extendidas en el contexto de la industria desarrollada de materiales compuestos. Este proceso consiste en la aplicación manual de capas de fibra sobre un molde, impregnando estas fibras con resinas poliméricas, las cuales distribuyen y compactan el material con la ayuda de rodillos

o brochas para eliminar burbujas de aire y lograr la cohesión del material (INSST, 2012). El proceso, además, se puede encuadrar dentro de un proceso artesanal, ya que gran parte del resultado del proceso depende de la gran experiencia del operario, lo que puede dar lugar a variabilidad en la calidad del producto final del proceso. A pesar de las limitaciones del proceso, el laminado manual sigue siendo un método ampliamente utilizado como consecuencia de su bajo coste, simplicidad técnica, y adaptación a geometrías complejas, ofreciendo la posibilidad de fabricar estructuras ligeras y funcionales, en el sector del transporte y la industria aeronáutica (Quiminet, 2020).

La Universidad Politécnica Salesiana (UPS) se ha enfocado en la investigación en fibra de carbono en proyectos de coches de tipo Fórmula SAE, en los que los alumnos aprenden a diseñar y fabricar piezas-sistemas estructurales en materiales compuestos de acuerdo con los reglamentos de competición. En estos trabajos se emplean laminados de fibra de carbono reforzados con resinas epóxicas, que suponen el principal material de construcción de monoplazas. La fabricación de estas piezas-sistemas se lleva a cabo mediante técnicas de fabricación de componentes como las configuraciones de fabricación con materiales preimpregnados (prepreg) y procesos de curado en vacío, que permiten obtener estructuras de elevada rigidez mecánica y bajo peso. También se estudia la influencia de la orientación de las fibras en propiedades como la rigidez o la resistencia, lo que pone de manifiesto el comportamiento anisotrópico típico de estas estructuras (Fajardo et al., 2019).



***Figura 15** Componentes del vehículo FSAE UPS fabricados con preimpregnado de fibra de carbono.*

Fuente: (Fajardo et al., 2019).

1.8.3.8.2 Procesos de manufactura avanzados -Fibra de carbono

A diferencia de los métodos y productos tradicionales, las técnicas de manufactura avanzada, como la impresión 3D o fabricación aditiva, han cambiado el diseño y la manufactura de los componentes aerodinámicos, como los alerones. Esto es posible gracias a la utilización de geometrías complejas, óptimas desde el punto de vista aerodinámico y funcionalmente integradas en una única pieza, lo que reduce el número de componentes y mejora la eficiencia estructural del todo (EOS, 2026).

La técnica de impresión 3D también permite el prototipado rápido, la customización, y una disminución de los tiempos de producción, siendo de especial interés en la propia evolución de los sistemas de alerones, activos o ajustables; a su vez, el uso de materiales punteros, como termoplásticos de alto rendimiento o compuestos de fibra, permite la obtención de piezas ligeras pero resistentes aun cuando esta producción suma la impresión 3D como una opción importante en la ingeniería aerodinámica actual (Neway 3D, 2026).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Método de investigación

De acuerdo con la visión holística defendida por Hurtado de Barrera (2007), bajo el método analítico-sintético no debe reconocerse un proceso desintegrado, sino una unidad dialéctica en la que el análisis hace posible dividir el fenómeno en partes mientras la síntesis lo integra en un nuevo significado que no puede ser la simple suma de las partes. Este enfoque rechaza la dicotomía, refutando la idea de que hay una verdadera ciencia que provenga de la permanencia de las partes y de su integración en una posibilidad general y enriquecida.

En esta investigación se adopta un método analítico-sintético que se justifica debido a la naturaleza tanto técnica como también formal del objeto de estudio, permitiendo abordar la complejidad del alerón trasero mediante su descomposición en variables geométricas y operativas básicas. En la fase analítica, dicho método contribuye a un análisis exhaustivo de los componentes morfológicos del alerón trasero (perfil alar, endplates, ángulo de incidencia, etc.) y de cómo se comprometen individualmente con las características del flujo bajo condiciones de baja densidad atmosférica.

Esta fragmentación es indispensable para identificar qué variaciones específicas de la forma provocan que las variaciones con los coeficientes de sustentación (C_l) y de arrastre (C_d) sean más o menos significativas, permitiendo un conocimiento acabado de lo que ocurre realmente en los fenómenos físicos asociados a la gran altitud. La fase sintética del método, por otro lado, proporciona la vía para la reconstrucción del fenómeno a partir de la conjunción de los resultados alcanzados en la fase anterior. Tal como se había analizado el comportamiento de cada variable aerodinámica y formal de modo aislado, la fase de la síntesis permite establecer una relación de coherencia entre la forma que configura la geometría, que, de este modo, no solo se ciñe a la descripción propia de su funcionamiento,

sino que finaliza en la introducción de criterios morfológicos integrales que atienden de forma eficiente a las necesidades planteadas por el contexto geográfico y técnico considerados en la investigación realizada para los vehículos de competición no homologados.

2.2 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación se realiza con un enfoque (Mixto) experimental, con apoyo cualitativo por criterio experto, ya que permite entender el fenómeno aerodinámico, el cual es abordado de una forma técnica y formal. El componente cualitativo aparece implícito en el primer momento de análisis morfológico y tipológico, cuando se interpreta el aspecto visual y el aspecto funcional de las configuraciones de los alerones en vehículos no homologados. Es así que, mediante la construcción de matrices de relaciones y de diagramas morfológicos, se interpreta la lógica compositiva con la que el diseño responderá. Este enfoque se vuelve relevante para agrupar aquellas variantes geométricas y logra ayudar a entender de qué manera la "forma" busca satisfacer una necesidad de uso, fundamentada para el contexto de competición.

Por otro lado, a través de la recopilación y análisis de datos objetivos derivados de las simulaciones (CFD), se incorpora la dimensión cuantitativa. En esta fase, el enfoque consiste en una medición de las variables numéricas, tales como los coeficientes de sustentación (C_L), los coeficientes de arrastre (C_D), o los cambios en la densidad y presión del aire como consecuencia de la altitud, etc.

2.3 Modalidad

De acuerdo con (Albornoz Zamora et al., 2023) el diseño experimental se da lugar cuando se produce la intervención directa sobre las variables y se compara grupos elegidos al azar con el objetivo de validar científicamente cómo una determinada realización condiciona los resultados. Bajo este criterio esta investigación se presenta bajo la modalidad experimental, la cual se centra en la obtención de datos objetivos a partir del control y la

manipulación de las variables técnicas haciendo uso de un espacio digital. Esta modalidad es la que se elige para orientar el propósito del trabajo, dado que la necesidad de investigar el problema hace necesario determinar, en este caso, el posible efecto que puede tener la forma geométrica del alerón sobre su comportamiento aerodinámico en condiciones de altitud elevada.

La elección de esta modalidad se fundamenta en la necesidad de conseguir datos empíricos que permitan validar el comportamiento funcional de las variantes morfológicas antes de su posible implementación física. Teniendo resultados preliminares en un contexto de altitudes elevadas, caracterizados por una menor densidad atmosférica, el método experimental permite aislar las condiciones de este ambiente para estudiar con un rigor científico variables como la resistencia (C_D) o la carga aerodinámica (C_L). Esta modalidad se encuentra alineada directamente con el objetivo de proponer criterios de diseño, con la certeza de que se generarán resultados preliminares que aportan criterios técnicos y fundamentos teóricos, que a su vez servirán como base para futuras etapas de validación, optimización y aplicación en situaciones competitivas.

En relación con la aplicación contextualizada, las pruebas de exploración se llevarán a cabo bajo la modalidad de Simulación Computacional de Dinámica de Fluidos (CFD). En el proceso se someterán a evaluación diferentes versiones de modelos tridimensionales del alerón trasero realizando variaciones sistemáticas de indicadores como la tipología de formas de las superficies (G3 y G4) para evaluar la variación de los resultados de desempeño; con esto se obtienen resultados que comparan configuraciones tradicionales con configuraciones específicas para altitud, utilizando matrices de resultados y análisis de comparativos de flujo que permitan saber cómo se configura morfológicamente la mejor respuesta a los lineamientos aerodinámicos planteados en la configuración definida.

2.4 Nivel de la investigación

La investigación que se muestra aquí tiene como base el nivel experimental, que para Arias (2012) es un proceso en el que un objeto o un grupo se encuentra expuesto a unas

determinadas condiciones, estímulos o variantes (la variable independiente), observándose los efectos o reacciones que se producen (la variable dependiente). Este nivel experimental en esta investigación se muestra a través de la manipulación técnica de las configuraciones morfológicas del alerón trasero, con el objetivo de medir y estudiar su efecto directo sobre los coeficientes aerodinámicos de sustentación y de arrastre en condiciones de gran altitud.

La elección de optar por este nivel se justifica por la necesidad de verificar una hipótesis técnica: que determinadas variaciones de la curvatura y la continuidad de las superficies (G3/G4) harán posible suplir las pérdidas de densidad del aire. Dentro de un nivel experimental, la investigación no solo consiste en el diseño, sino que también representa una relación de causalidad entre la forma geométrica que se plantea y el rendimiento del vehículo. Según Arias (2012), este nivel de profundidad nos permite un control exhaustivo de las variables que intervienen, lo cual es básico para poder considerar que el resultado de las simulaciones CFD son resultados precisos.

Finalmente, el alcance de este nivel experimental es comparativo y proyectivo, es decir que compararemos diversas iteraciones de diseño bajo las mismas condiciones controladas para averiguar a cuál de ellas le corresponde el mejor resultado obtenido. Este rigor experimental es el que permite, en la parte final de la investigación, poder proponer criterios de configuración morfológica que no dependan simplemente de la estética del diseño, sino de datos empíricos que se pueden poner a prueba, de este modo, se generarán resultados de carácter analítico y simulativo.

2.5 Diseño de investigación

La presente investigación se compone de un diseño cuasi experimental de formato transversal, dado que se realiza la manipulación de las variables independientes levantadas a partir de las configuraciones morfológicas propias y del perfil alar en función del coeficiente de sustentación y arrastre en condiciones atmosféricas de gran altitud. Así mismo, esto es un diseño transversal porque la recolección y el análisis de datos que

proviene de las simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) se producen bajo una sola recolección, lo que permite unir una comparación técnica en función de los distintos resultados digitales que surgen.

Este diseño de investigación es el que más se ajusta a la cuestión planteada; la influencia aerodinámica requiere un control de las condiciones del medio que justifiquen la hipótesis planteada en esta investigación. Al realizar un análisis en un entorno controlado mediante software CFD se logra establecer que las variaciones del alerón se generan por los cambios geométricos propuestos. La forma elegida permite pasar de los objetivos teóricos a los resultados necesarios para determinar la configuración morfológica más acorde con los lineamientos a satisfacer.

2.5.1 Población y muestra

En el proceso de la investigación, la delimitación de las unidades de análisis implica un paso previo necesario para la elección de las unidades de análisis o casos sobre los que se recolectarán los datos. La población o universo se entiende como el conjunto total de casos que encajan en una serie de especificaciones concretas de contenido, lugar y tiempo (Hernández et al., 2014). Por su parte, la muestra se entiende como un grupo o subconjunto representativo de aquella población, utilizado fundamentalmente por necesidades de economía de tiempo y recursos, para que los resultados obtenidos en dicho grupo pequeño puedan ser generalizables al universo total.

La población de esta investigación se caracteriza desde dos dimensiones: por un lado, los objetos de estudio; por otro, los expertos técnicos. Así por una parte, la dimensión de objetos incluye los alerones traseros de los vehículos de rally de categorías no homologadas o Proto, como, por ejemplo, T3, T4 o "2000 Preparados" que compiten en los escenarios geográficos que circunscriben la provincia de Tungurahua y por otra parte, la población de expertos está constituida por la comunidad de profesionales especialistas en ingeniería automotriz, diseño de autopartes y dinámica de fluidos computacional (CFD) que tengan conocimiento técnico en el sector del automovilismo de competición.

La muestra para esta investigación desde los objetos de estudio consiste en llevar a cabo la selección de una configuración particular que permita representar el estado actual del diseño empírico, el cual representa el diseño difuso, para poder contrastarlo con las propuestas optimizadas que prevalecen bajo criterios de diseño experto (geometrías G3/G4 y perfiles NACA). La muestra para la dimensión de expertos estará conformada por 3 expertos en ingeniería, diseño automotriz y CFD (dinámica de fluidos computacional) que cuentan con la experiencia necesaria en el análisis de cálculos del análisis aerodinámico. La elección de estos especialistas se sustenta en la capacidad técnica y el criterio que permiten comprobar y validar los parámetros que definen el alerón trasero, garantizando que los datos obtenidos mediante simulación para el alerón trasero representen datos precisos y de gran validez.

2.5.2 Tipo de muestra

La elección del tipo de muestra está profundamente relacionada con el planteamiento del problema, con las implicaciones del estudio y con el diseño de la investigación. La muestra puede clasificarse en dos vertientes: las probabilísticas, en las que todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de ser elegidos y las no probabilísticas o dirigidas, en las que la selección dependerá de las decisiones del investigador o de las características concretas del estudio (Hernández et al., 2014). En la investigación cuantitativa, se buscan muestras probabilísticas para garantizar que la muestra sea representativa, mientras que en el cualitativo se usa muestras dirigidas que priorizan la profundidad.

La muestra de esta investigación se ha establecido mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional o criteriado, seleccionando unidades que poseen las características necesarias para validar la hipótesis planteada. En cuanto a la dimensión de los objetos, la muestra se ha definido a partir de un modelo de alerón trasero perteneciente a un vehículo de rally de la categoría T3, el cual se contrastará frente a criterios de diseño experto, determinados por morfologías concretas, tales como perfiles NACA.

En la dimensión de expertos la investigación estará compuesta por un conjunto de tres expertos cuya selección ha sido guiada por una serie de criterios de inclusión como: estudios superiores universitarios en la rama de ingeniería, experiencia previa en software CFD aplicados en manufactura de materiales compuestos, al mismo tiempo que se garantiza una adecuada saturación teórica y una precisión técnica en la validación de los resultados.

2.5.3 Tamaño de muestra

Establecer el tamaño óptimo de la muestra es el proceso de determinar cuántas unidades como mínimo se requiere para garantizar un nivel de confianza establecido y un margen de error aceptable. En el caso de la muestra probabilística, el tamaño de la muestra se basa en el tamaño del universo y en los niveles de error aceptables; en cambio, en la investigación cualitativa, el tamaño de la muestra no se determina mediante fórmulas, sino en función de la capacidad operativa de recolección y el principio de saturación de categorías, cuando ya no se obtiene información nueva de los nuevos casos (Hernández et al., 2014).

Para esta investigación el tamaño de muestra que corresponde a la dimensión de los objetos de estudio se limita a un modelo de alerón trasero de un coche de la categoría T3, el uso de un único modelo permite profundizar más en el análisis en las simulaciones CFD, de modo que los criterios de diseño que se obtendrán son aplicables y replicables como un marco para los demás casos de estudio con características técnicas similares.

Por otra parte, dentro de la dimensión de los expertos dado el componente cualitativo del enfoque mixto de la investigación, el tamaño de la muestra no se determinó por medio del cálculo, pero sí se tuvo en cuenta la saturación teórica y la pertinencia de los participantes. Se seleccionan de forma intencionada a tres expertos que satisfacen criterios de inclusión y exclusión.

2.5.4 Selección de muestra

Dimensión de los objetos

La elección de un solo objeto de estudio se basa en un método a medida de transparencia técnica que, dejando a un lado la aleatoriedad típica de los diseños netamente cuantitativos, se apoya en una elección dirigida y justificada en función de la pertinencia del caso. Según los criterios planteados por Hernández et al. (2014) en investigaciones con complejidad técnica que requieren un control estricto de las variables, el empleo de un muestreo no probabilístico sirve como una unidad tipo representativa del universo de vehículos de competencia no homologados que existe en la provincia de Tungurahua.

Se establecieron los siguientes criterios para seleccionar el caso de estudio la cual se aplicará también a la observación abierta, garantizando que la selección posea transparencia.

- **Integridad Geométrica para Digitalización:** El componente deberá permitir que se haga un levantamiento de la información de forma adecuada (ya sea con herramientas de medición o con escáner) que asegure la fidelidad del modelo 3D para posteriormente simular Dinámica de Fluidos (CFD).
- **Categoría:** El vehículo tendrá que pertenecer a una categoría en las competencias de Tungurahua, como la categoría T3 o 2000 Preparados.

Caso de estudio: Alerón trasero “(Vehículo Peugeot 207 1600 cc categoría T3)”.

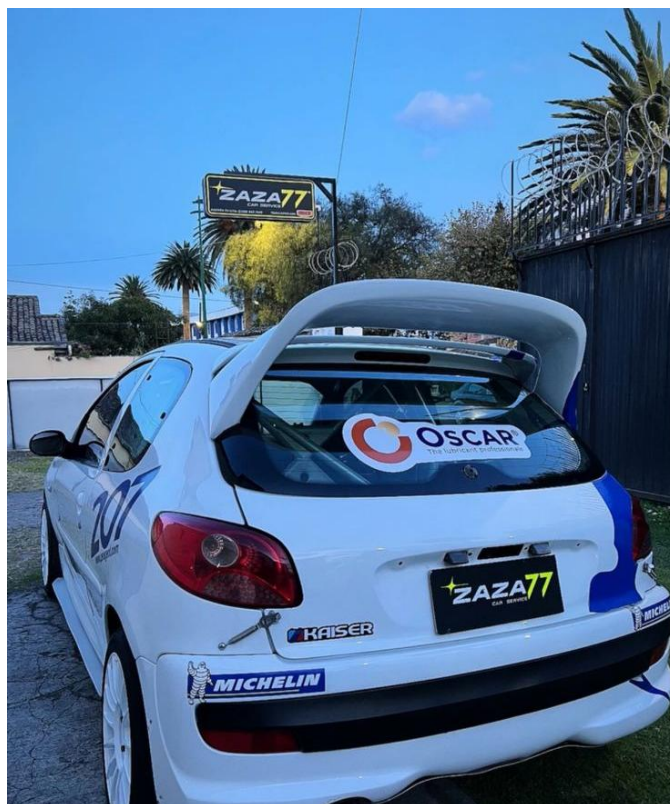


Figura 16 Peugeot 207 1600 cc

Fuente: Autoría propia

Esta decisión resulta en que el proceso sea capaz de ser visto con transparencia con respecto a un vehículo con características estándar dentro de la subcategoría T3 y que, al mismo tiempo, el procedimiento de verificación del mismo alerón trasero sea fuente de datos fiables y reproducibles.

Dimensión de los expertos

Dentro del contexto de la investigación dado el componente cualitativo, la definición de la muestra se aleja de las pautas de muestreo probabilístico habituales en la investigación en la tradición cuantitativa, para primar el carácter rico, profundo y de calidad de la información que se pueda alcanzar. En este sentido, Hernández et al. (2014)

apuntan que en la investigación cualitativa el tamaño de la muestra no se puede predefinir antes de la recolección de datos, sino que se decide en función de la primera inmersión con los detalles y los inicios de categoría, algo que viene siempre guiado por el principio de saturación.

Se establecieron los siguientes criterios para seleccionar a los participantes, garantizando que su juicio técnico y experiencia sea el adecuado para la investigación.

- **Criterios de inclusión:** Profesionales con formación en ingeniería o diseño, con experiencia en el uso de software CFD y conocimientos en aerodinámica aplicada.
- **Criterios de exclusión:** Personas sin experiencia en herramientas de simulación numérica, estudiantes de pregrado sin especialización técnica terminada o profesionales ajenos al área de la mecánica de fluidos y diseño automotriz.

El proceso de selección a expertos se realizó a través de contactos directos, recomendaciones (muestreo bola de nieve). Se garantizó que las aportaciones de todos los participantes fueran relevantes y suficientes en relación con el problema abordado en el estudio, que en este caso es la interpretación de los resultados de sustentación y arrastre en la configuración morfológica del alerón trasero en condiciones de gran altitud.

Perfiles de entrevista

Los expertos seleccionados para este estudio se especializan en áreas de la ingeniería mecánica, el diseño industrial y autopartes. Su aporte es importante para la investigación, ya que permiten contrastar la información recopilada con nuevos criterios a considerar durante en desarrollo de los análisis y datos que se obtengan.

Perfiles de entrevista

Tabla 1 Perfil de entrevistas

Perfil de entrevistas

Enfoque de conocimiento	Entrevistado	Especialidad/Rol
Fabricación de autopartes en fibra de vidrio y fibra de carbono	Edwin Abarca	Especialista en fabricación de autopartes
Modificación de vehículos de competencia	Juan Carlos Paredes	Ingeniero Industrial
Ingeniería de automovilismo incluyendo dinámica vehicular, aerodinámica, análisis de datos, ingeniería de motores	Paúl Zea	Máster en Ingeniería de Motorsport.

2.6 Técnicas de estudio

Entrevista semiestructurada

Según Hernández et al. (2014), la entrevista cualitativa se caracteriza como un proceso abierto, flexivo e íntimo, cuyo objetivo último es el intercambio de información mediante la celebración de una reunión entre el o la entrevistadora y uno o varios entrevistados para la construcción, entre ambos, de significados conjuntos. Las distintas variantes que pueden adoptar se agrupan siguiendo la estructura que implementan: estructuradas, cuando se apoya estrictamente en una guía; semiestructuradas si permiten la introducción de

preguntas adicionales para profundizar sobre conceptos; o abiertas cuando la flexibilidad del contenido es total.

La entrevista semiestructurada resulta ser una herramienta clave para esta investigación, tanto que permite llevar a cabo un intercambio de información flexible, adaptativo y profundo con los expertos en ingeniería automotriz, fabricación de autopartes y dinámica de fluidos (CFD). Este tipo de herramienta permite utilizar una guía preconcebida para la entrevista, pero a la vez poder introducir preguntas nuevas que profundizan sobre conceptos técnicos o bien aclarar dudas.

Pasos para realizarla:

Una vez se ha elegido al entrevistado:

- Se debe proceder a establecer contacto inicial, presentándose y explicando explícitamente los objetivos del estudio. Este último paso ha de salvaguardarse en la correspondiente promesa de la confidencialidad de lo recabado e intentar, además, recabar su aceptación para el ser entrevistado.
- Posteriormente, se ha de elaborar una guía de la entrevista de carácter flexible o poco estructurada. Para su elaboración resulta interesante utilizar técnicas como enumeración de ideas en el desarrollo de la guía, teniendo en cuenta que las preguntas sean comprensibles y consistentes con las preguntas formuladas en el planteamiento que da origen al estudio.
- Antes de hacer el uso oficial de la misma, se recomienda ensayarla con una persona que tenga características similares a las del participante para ajustar errores si lo hubiesen.
- Cuando se realice la entrevista, se pueden utilizar múltiples recursos como la grabación en audio, video, anotaciones con cuadernos, dispositivos electrónicos, registrar el contenido mediante digitalización, registrar el contenido mediante una fotografía o programas de ordenador cuando el caso lo requiera, entre otros.

- Con respecto a la presentación personal, hay que adecuarse al contexto y al perfil del sujeto de la entrevista; por ejemplo, un estilo formal en el medio profesional, o un estilo más informal en otros contextos.

Observación abierta

La observación abierta para Hernández et al. (2014), es una de las técnicas más significativas y más activas que se despliegan durante el proceso de investigación cualitativa. A diferencia de los medios de obtención de datos más rígidos, La observación abierta no se limita al reconocimiento visual; requiere del observador una participación activa y una sensibilidad general para captar los matices de los espacios físicos y humanos sin modificarlos.

La observación abierta se presenta como la técnica activa y polivalente básica para obtener la realidad física del objeto de estudio en su estado natural. Dicha técnica permite a la investigación; tomar los aspectos visuales y lógicos del objeto que a menudo responden a un diseño empírico o difuso. A partir del uso de registros multiformato se abren niveles de comprensión para la clarificación de la información y posteriormente de las dimensiones del alerón incluso antes de su levantamiento digital.

Pasos para realizarla:

- Definir los criterios de observación.
- Identificación del objeto de estudio en su estado natural (montado en el vehículo de competición).
- Registro multiformato para la documentación de aspectos visuales y elementos del mismo.
- Transición a la medición cuando ya se entendió la lógica del objeto en su estado natural, se toma las dimensiones físicas.
- Organizar la información mediante mapas o diagramas.

Modelo de instrumentos

Tabla 2 Modelo de instrumentos

Modelo de instrumentos

Técnica	Herramienta	A quien se aplica	Para que se aplica
Entrevista semiestructurada	Guía de entrevista y grabadora de audio	Profesionales con formación en ingeniería o diseño, con experiencia en el uso de software CFD y conocimientos en aerodinámica aplicada.	Se emplea la entrevista semiestructurada para obtener información acerca de conceptos técnicos dentro de las áreas de ingeniería automotriz, fabricación de autopartes y simulación (CFD), desarrollando la comprensión de los resultados que se puedan obtener; de esta manera, se validan y contrastan dichos resultados.
Observación abierta	Ficha de observación	Caso de estudio (Alerón trasero del Vehículo Peugeot 207 1600 cc categoría T3).	Se aplicará para la comprensión del objeto, en este caso el alerón trasero en su estado natural; es decir, montado en el vehículo. De esta manera, se pueden identificar aspectos visuales y elementos del mismo que no se habrían previstos. Con esto se obtiene un registro multiformato para organizar la información.

2.7 Operacionalización de variables

Variable Independiente

Tabla 3 Operacionalización de variable independiente

Operacionalización de variable independiente

Variable	Dimensión	Indicador	Ítem	Técnica / Instrumentación
	Morfología del objeto	Envergadura	¿Cuál es la geometría del perfil del alerón?	Observación / Ficha morfológica / Escáner 3D
		Cuerda y espesor de la Sección	¿Cuál es la distancia en línea recta desde la “nariz” (borde de ataque) hasta la “cola” (borde de salida) de ese perfil específico?	
		Ángulo de ataque	¿Qué ángulo de ataque presenta?	
Influencia de configuraciones morfológicas	Funcionalidad	Relación forma– función	¿Cómo responde la geometría a la función identificable?	Análisis de correspondencia / Síntesis de producto
		Complejidad Morfométrica	¿De qué manera las respuestas funcionales del objeto son dadas?	
	Superficies	Continuidad G2, G3, curvatura	¿Existe continuidad geométrica optima entre superficies?	Surface evaluation (Inspección de curvatura) / Zebra Analysis (Rhinceros V8.2)

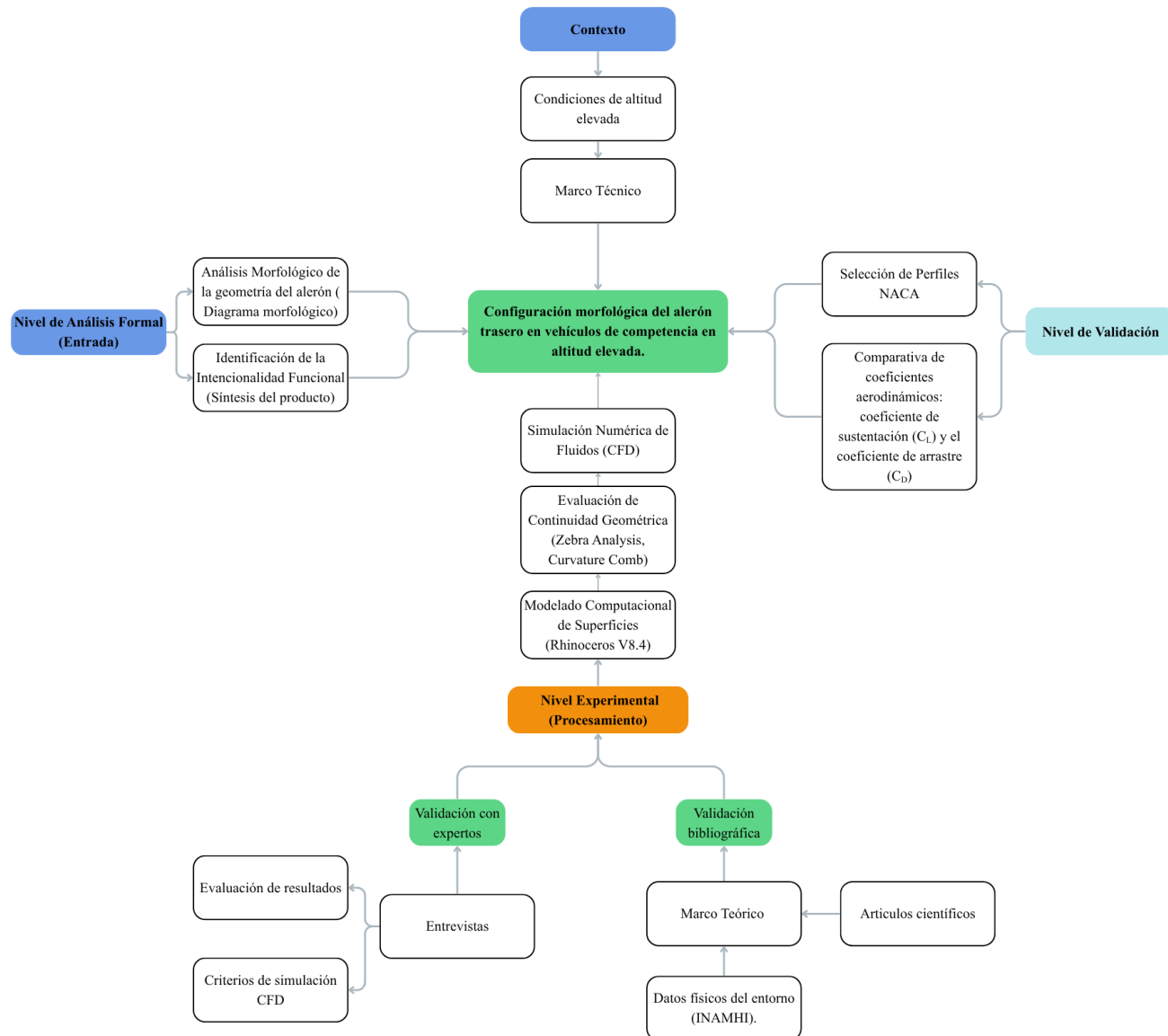
Variable dependiente

Tabla 4 Operacionalización de variable dependiente

Operacionalización de variable dependiente

Variable	Dimensión	Indicador	Ítem	Técnica / Instrumentación
Diseño del alerón trasero en altitud elevada	Aerodinámica	Coeficiente de Arrastre (C_D)	¿Cuál es el coeficiente de Arrastre (C_D) en altitud elevada?	Simulación CFD / Autodesk CFD
		Coeficiente de Sustentación (C_L)	¿Cuál es el coeficiente de sustentación (C_L) en altitud elevada?	
	Condiciones en altitud elevada	Densidad del aire (kg/m^3), Altitud (msnm)	¿Cuál es la densidad del aire en el entorno de simulación?	Revisión de datos meteorológicos (INAMHI, 2025)
		Presión atmosférica (hPa o mmHg)	¿Cómo afecta la presión atmosférica al comportamiento del flujo del alerón?	
		Número de Reynolds (Re) local	¿Qué tipo de flujo se presenta en el alerón?	
	Perfiles NACA	Tipo de perfil	¿Qué perfil NACA se emplea?	Comparación de perfiles / Síntesis de resultados
		Longitud de cuerda	¿Es el perfil seleccionado óptimo para las condiciones de altitud elevada?	

2.8 Matriz síntesis diseño metodológico



CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de resultados

Con el fin de llevar a cabo un procesamiento y análisis de información a partir de las entrevistas semiestructuradas realizadas, se recurrió a la aplicación de un enfoque cualitativo mediante la técnica de análisis de contenido, de tal modo que se pueda llevar a cabo la interpretación de los criterios técnicos aportados por los expertos que intervienen en el ámbito de la ingeniería automotriz, la fabricación de autopartes y la dinámica de fluidos computacional (CFD).

En primer lugar, las entrevistas fueron revisadas a partir de una lectura comprensiva de las transcripciones y registros obtenidos, en las que se llegaron a identificar respuestas que se vinculan con los objetivos de la investigación. En segundo lugar, la información obtenida fue organizada a través de las dimensiones de análisis, las cuales habían sido previamente definidas, en relación con aspectos tales como las metodologías de simulación, las configuraciones morfológicas, la adaptación aerodinámica a alta altitud, la estabilidad de un vehículo y los procesos de fabricación de alerones traseros.

A partir de esta organización, se desarrolló una codificación temática de los hallazgos más relevantes, agrupando las unidades de significado de manera de establecer patrones de coincidencia, similitudes, contradicciones y aportes técnicos que surgen de los diferentes entrevistados. Este procedimiento sirvió de base como soporte para poder construir una interpretación analítica de los criterios expertos.

3.1.1 Dimensiones de análisis “Entrevistas”

Entrevista 01: Edwin Abarca

Especialidad: Modificación de Vehículos de competencia y Asesor comercial

Tabla 5 Dimensión de análisis (Entrevista 01)

Tema Principal	Descripción del Hallazgo	Aporte para la Investigación
1. Metodología Empírica	El diseño se basa en observación visual ("ojímetro") y referencias de fotos de la WRC por falta de túneles de viento.	Justifica la necesidad del estudio: pasar del diseño intuitivo a la simulación (CFD).
2. Estandarización de Modelos	El Kia Picanto y Hyundai Grand i10 son los vehículos no homologados más comunes en el parque automotor local.	Define el modelo base ideal para la validación morfológica y posterior simulación.
3. Conflicto Estética vs. Función	Existe una tendencia al uso de alerones "tuning" (decorativos) que no aportan funcionalidad aerodinámica real.	Señala la importancia de compartir al sector sobre la funcionalidad del objeto frente a lo meramente estético.
4. Factibilidad Económica	El uso de fibra de vidrio predomina por costo (\$120), mientras que la fibra de carbono es un 300% más cara.	Sugiere que cualquier propuesta de diseño puede ser accesible por un rango variable de precios.

Entrevista 02: Juan Carlos Paredes

Especialidad: Ingeniero Industrial-Taller de modificación de vehículos ZAZA77

Tabla 6 Dimensión de análisis (Entrevista 02)

Tema Principal	Descripción del Hallazgo	Aporte para la Investigación
1. Priorización de Seguridad y Estructura	Las modificaciones iniciales y obligatorias se centran en la protección del piloto (<i>roll bar</i> , asientos y bases homologadas) y control de frenado.	Establece el "piso técnico" del vehículo. La investigación debe considerar que cualquier modificación del alerón no puede comprometer la estructura de seguridad preexistente.
2. Rezago en Desarrollo Aerodinámico	En el rally ecuatoriano, el enfoque técnico está en la potencia (motor) y estabilidad (suspensión), dejando la aerodinámica como el área menos desarrollada y más empírica.	Justifica la relevancia y novedad de tu estudio. Existe una brecha de conocimiento donde la ingeniería formal no ha sido aplicada en el entorno local.
3. Variable Crítica: Altitud y Presión	La baja presión atmosférica en las zonas altas de Ecuador reduce drásticamente la eficiencia de los alerones convencionales diseñados para nivel del mar.	Define la variable independiente principal de la investigación. La morfología del alerón influye en la densidad del aire en la región.
4. Clasificación por Origen y Homologación	Coexisten vehículos con aerodinámica europea de fábrica (N5) y vehículos de fabricación nacional (T1-T4) con preparaciones artesanales.	Permite seleccionar la muestra del caso de estudio dentro de las categorías T1-T4.

5. Vacíos Legales y Reglamentarios	El reglamento de la FEDAK para categorías nacionales no especifica restricciones sobre el diseño o intervención de alerones, a diferencia de las categorías internacionales.	Justifica el objetivo de la investigación. Esto permite experimentar con una propuesta sin infringir la normativa técnica actual en categorías T1-T4.
---	--	---

Entrevista 03: Paúl Zea

Especialidad: Máster en Ingeniería de Motorsport.

Tabla 7 Dimensión de análisis (Entrevista 03)

Tema Principal	Descripción del Hallazgo	Aporte para la Investigación
Metodología de Simulación (CFD)	El proceso requiere definir condiciones de contorno (suelo móvil, velocidad) y un mallado fino en zonas críticas como la estela y elementos aerodinámicos para asegurar la convergencia.	Establece la ruta técnica para realizar simulaciones válidas, evitando errores comunes en el mallado y la configuración del entorno virtual.
Interacción Cuerpo-Alerón	La aerodinámica del vehículo completo afecta drásticamente el flujo que llega al alerón, sin embargo es un procesos más complejo	Opción de incluir un modelo simplificado del vehículo para obtener datos en relación a las proporciones del vehículo en un entorno más realista.
Integridad del Modelado Digital	Los archivos para CFD (STL) deben ser geometrías "cerradas" y validadas con el coeficiente de resistencia real del fabricante antes de añadir modificaciones.	Proporciona un protocolo de control de calidad para el diseño 3D, asegurando que los resultados del software no sean erróneos por fallas en el archivo.
Estandarización de Perfiles Alares	La medición de alerones empíricos (artesanales) es difícil de validar científicamente; es preferible usar perfiles NACA con datos preexistentes.	Orienta la selección del diseño del alerón hacia estándares internacionales (NACA), lo que fortalece la validez académica y técnica del marco teórico.

Tema Principal	Descripción del Hallazgo	Aporte para la Investigación
1. Metodología de Cálculo Aerodinámico	Priorización de cálculos manuales mediante fórmulas de física clásica (Downforce, Drag) y perfiles NACA.	Proporciona un método de interpretación de resultados rápida para los objetivos iniciales, ahorrando tiempo y recursos.
3. Adaptación a Condiciones de Altitud	Necesidad de configurar las simulaciones y cálculos considerando la densidad del aire específica de la sierra (Ambato) y velocidades reales de competencia.	Define las variables de entorno para el tercer objetivo, asegurando que la propuesta morfológica sea funcional para el contexto geográfico real.
4. Automatización y Parametrización CAD/CFD	Uso de coordenadas parametrizadas y herramientas como Grasshopper para generar muestras de alerones de forma eficiente.	Ofrece una solución técnica para cumplir con el requisito de la morfología del alerón.
5. Calidad Superficial y Viabilidad Técnica	La calidad de la superficie afecta la capa límite y el flujo de aire, aunque en simulaciones académicas se recomienda simplificar a superficies "perfectas".	Delimita el alcance de la simulación para evitar excesos de carga computacional, dejando el análisis de materiales y rugosidad como líneas futuras.

3.1.2 Conclusiones

Esta fase de investigación ha permitido llevar a la práctica las herramientas metodológicas cualitativas adecuadas para realizar el análisis técnico y morfológico del alerón trasero aplicado a vehículos de competición no homologados. Las entrevistas semiestructuradas a expertos en el campo de la ingeniería automotriz, fabricación de autopartes y en dinámica de fluidos computacional (CFD) han permitido recoger de forma correcta los criterios de expertos vinculados a aerodinámica, fabricación de autopartes en materiales compuestos y simulación (CFD). La aplicación de dimensiones de análisis ha permitido clasificar la información obtenida en categorías de información, facilitando la interpretación de los resultados en función de los objetivos formulados.

Los resultados obtenidos se incorporan al desarrollo de la investigación, donde la parte crítica de la influencia aerodinámica está específicamente formulada para las condiciones de altitud elevada de la región andina ecuatoriana mediante el uso de variables como la densidad del aire, presión atmosférica o velocidades reales de competencia en el proceso de simulación y evaluación. Igualmente se considera un caso de estudio pertinente como punto de partida para justificar el uso de perfiles alares estandarizados que permitan obtener configuraciones que sean reales y computacionalmente reproducibles dentro de los entornos CFD.

3.2 Desarrollo de la investigación fase de diagnóstico

3.2.1 Fase de diagnóstico: Análisis funcional y formal

La fase de diagnóstico es el punto de partida clave para abordar la relación entre el objeto de estudio y su entorno operativo. En este punto, el análisis funcional se centra en obtener aquellos requerimientos técnicos que ha de satisfacer el alerón trasero para generar carga aerodinámica (downforce) y resistencia aerodinámica (drag), considerando que la forma no es, sino un conjunto de objetos interpretables y organizados que constituyen, "un todo estructurado". Bajo esta premisa, la noción de complejidad propuesta por Valencia (2005) adquiere una relevancia clave: pues no se considera en función del tamaño o del número, sino que se relaciona con la calidad de las respuestas funcionales y significativas que permite ofrecer y con su capacidad de responder a las expectativas que se manifiestan en un contexto determinado, principio que suele denominarse también "alometría".

Mientras que Valencia (2005) aborda el concepto de forma desde un sentido cualitativo y allí la complejidad se define por la posibilidad de respuesta del objeto y por la posibilidad de conformarse como un "todo estructurado" que tiene identidad y está lleno de "accidentes", mientras que para Alexander (1964), es un enfoque más pragmático y sistémico, ya que la forma no es simplemente la búsqueda de identidad o lo rico visualmente, sino una consecuencia de un sistema dinámico de tipo conceptual que hace frente a un determinado conjunto de condiciones. De ese modo y desde esta perspectiva, el diseño del alerón se entiende como un proceso de ajuste y donde la búsqueda es el encaje de forma y contexto.

3.2.2 Análisis de la Configuración Actual

A través de la observación abierta como técnica principal de recolección de datos se obtiene una información multiformato sin limitación en la manera de extraer las características físicas del objeto de estudio. Esta fase inicial se considera de gran importancia a la hora de identificar las variables que conforman el estado actual del objeto de estudio y, posteriormente, la información obtenida será llevada a un diagrama morfológico, que descompone el sistema en sus atributos principales y puede mostrar, de una forma visual, la interrelación de sus partes.

Identificación del Objeto en Estado Natural (Análisis Visual)

Tabla 8 Identificación del Objeto en Estado Natural

Identificación del Objeto en Estado Natural

Elemento	Hallazgos Basados en Imágenes	Observaciones
Alerón Superior	Elemento principal de gran envergadura y perfil alar definido, elevado sobre la línea del techo.	Fabricado en fibra de vidrio con acabado en color blanco.
Configuración	No es un sistema biplano (no hay interacción de ranura o slot). Es una configuración de alerón con un spoiler inferior independiente.	Es una configuración de alerón con un spoiler inferior independiente.
Sujeciones	El sistema de sujeción es metálico.	Sistema de sujeción metálico por dentro de la carrocería con ayuda de un aditivo fuerte: (Sikaflex).

Transición a la Medición (Datos Físicos Específicos)

Tabla 9

Transición a la Medición

Variable	Estimación Visual
Envergadura	Aprox. 1200 mm
Cuerda	Aprox. 200 mm
Espesor	Aprox 42mm
Ángulo de Ataque	Aprox. 14°-15°)

Registro Multiformato (Documentación de Aspectos Visuales)

Tabla 10 Registro Multiformato

Registro Multiformato

Perspectiva	Observación	Registro fotográfico
Lateral	Se observa un perfil alar con una curvatura pronunciada en el plano superior.	
Trasera	El alerón está integrado con el ensanchamiento de la carrocería (widebody kit).	
Superior	El alerón principal superior está montado en una posición elevada sobre el techo del vehículo.	

Conclusión descriptiva

Utilizando la técnica de observación abierta se encontró que el diseño del alerón posee un carácter de integración visual con la carrocería del vehículo, en el que la pieza se unifica con los ensanchamientos laterales para dar una imagen de unidad y continuidad. Su diseño se caracteriza por una curvatura muy pronunciada junto con una ubicación elevada que sobresale de la línea del techo.

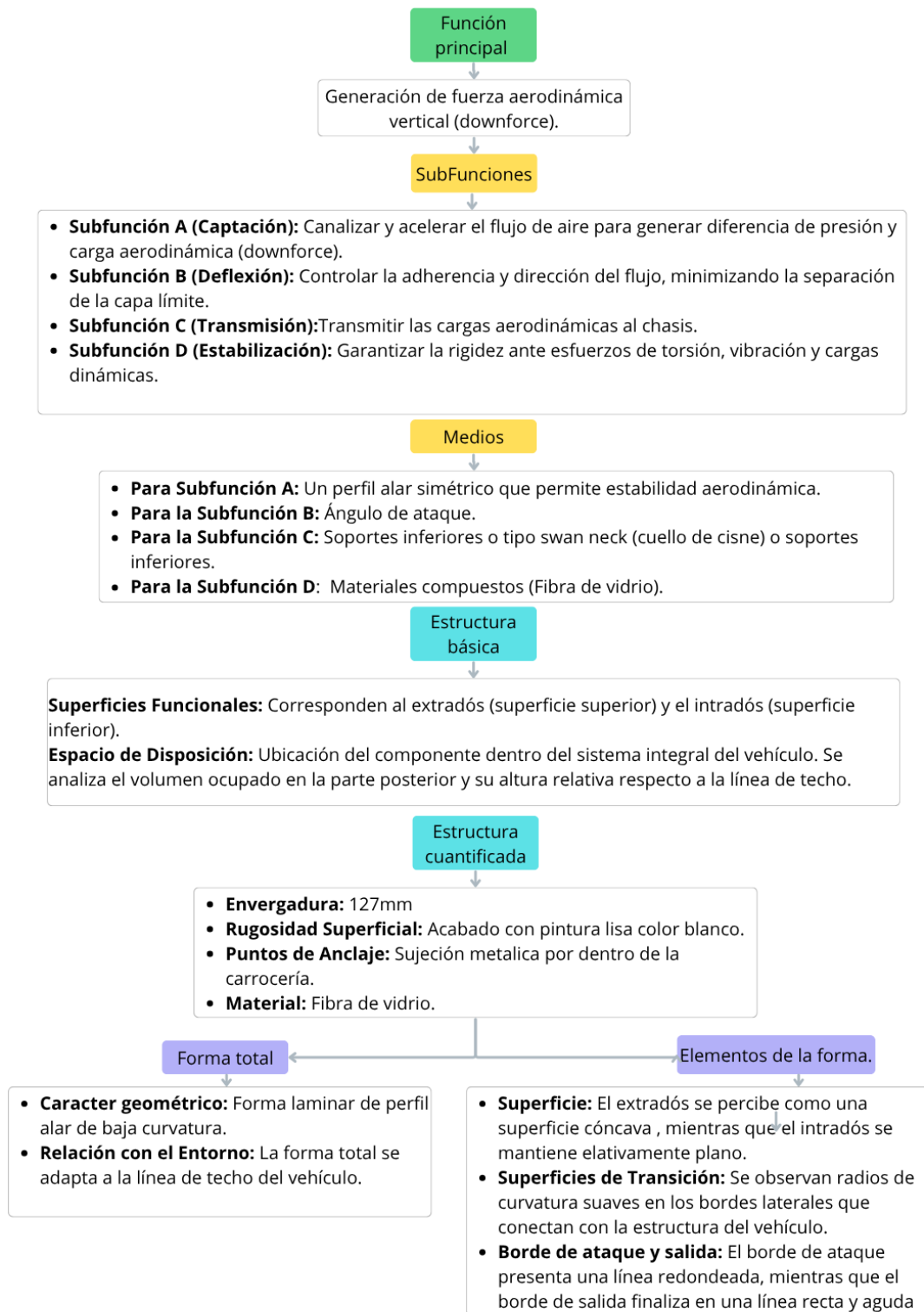
3.2.3 Descomposición Funcional

Para proceder con el desarrollo de este punto, se lleva a cabo un análisis sistemático el cual se basa en la metodología de síntesis de productos propuesto por Tjalve (1979) la cual consiste en la descomposición de la función principal que da origen al objeto de estudio, para obtener una estructura jerárquica de la función principal a través de subfunciones y medios, de esta manera se identifica las interrelaciones operativas que va a determinar su funcionamiento.

En este sentido, la descomposición funcional no solo permite identificar las subfunciones que conforman la ejecución del objeto, sino que permite, a su vez, establecer una relación entre estas subfunciones y las soluciones implementadas que las materializan. Según Tjalve (1979), estas subfunciones se asocian a soluciones parciales que, integrándose, permiten componer el sistema global y poder visualizar como se ejecuta el objeto.

Mediante esta descomposición funcional se trata de intentar entender la finalidad técnica de cada uno de los componentes del objeto de estudio, pero también se intenta entender cómo la función principal se va constituyendo a partir de las contribuciones que hacen las diferentes funciones individuales, así como los requerimientos aerodinámicos y estructurales que debe responder en condiciones de altitud elevada y, de este modo, llegar a determinar su configuración morfológica.

Síntesis del producto:



3.2.4 Árbol de Objetivos

El árbol de objetivos es un proceso de diseño sistemático y racional que busca, fundamentalmente, clarificar los objetivos y los subobjetivos del proyecto, así como las relaciones jerárquicas y los medios de conseguirlo Cross (2002). Dado que en diseño se comienza normalmente con un problema no bien definido o con un planteamiento impreciso por parte del solicitante, se puede afirmar que este método sirve para exteriorizar los procesos mentales, así como para formalizarlos en un esquema tipo diagrama que facilite el consenso entre diseñador e interesados. El árbol convierte fines abstractos en requerimientos concretos, ya que no solo implica qué debe conseguir algo o la solución del problema, sino que también implica el cómo (Cross, 2002).

La descomposición funcional sirvió para encontrar un modo de estructurar el objeto de estudio en términos de función principal, subfunciones y medios, pero que presenta las interacciones que rigen su comportamiento aerodinámico en condiciones de altitud. Ese análisis del sistema existente se tiene que complementar con otro tipo de herramienta que oriente la síntesis del proceso de diseño. En este sentido, el árbol de objetivos se convierte en un recurso prometedor para traducir las evidencias funcionales en objetivos jerarquizados, precisando así lo que pueden ser los fines que busca el proyecto y con qué medios se pueden lograr.

Ejecución del árbol de objetivos

Antes de comenzar a elaborar el árbol de objetivos, se genera un primer diagrama de relaciones jerárquicas con el objetivo de organizar y aclarar los objetivos primordiales y secundarios del proyecto. De acuerdo con Cross (2002), esto permite ir estructurando los objetivos de manera progresiva, que servirán para poder desglosarlos a niveles cada vez más concretos y fijar relaciones de tipo fin-medio.

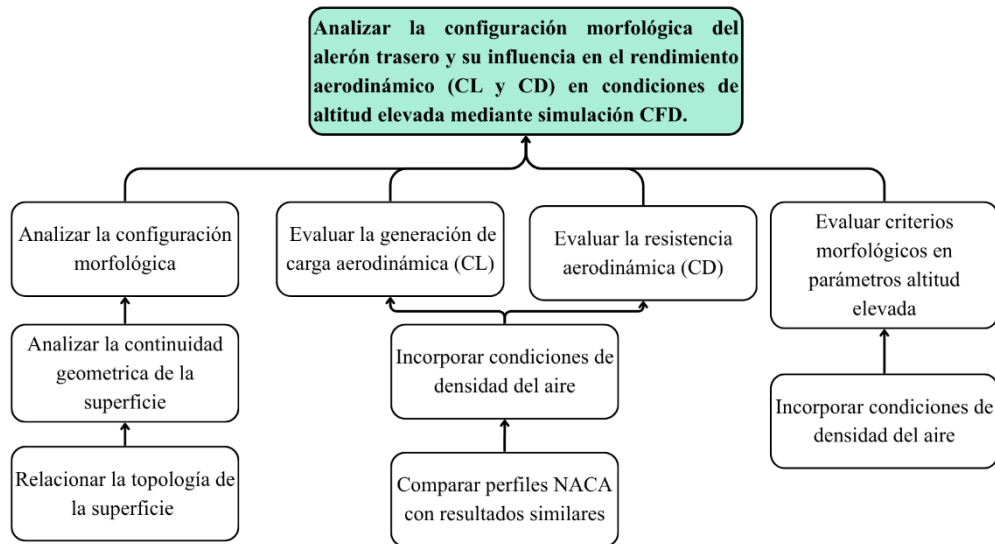


Figura 17 Diagrama de relaciones jerárquicas.

Fuente: Autoría propia

Después de haber realizado el diagrama de relaciones jerárquicas cuyo objetivo más importante fue la organización y explicitar los objetivos primordiales y secundarios del proyecto, se comienza con la construcción del árbol de objetivos, marcando así un camino lógico de subobjetivo que permite la decisión y el acuerdo del desarrollo de la investigación.

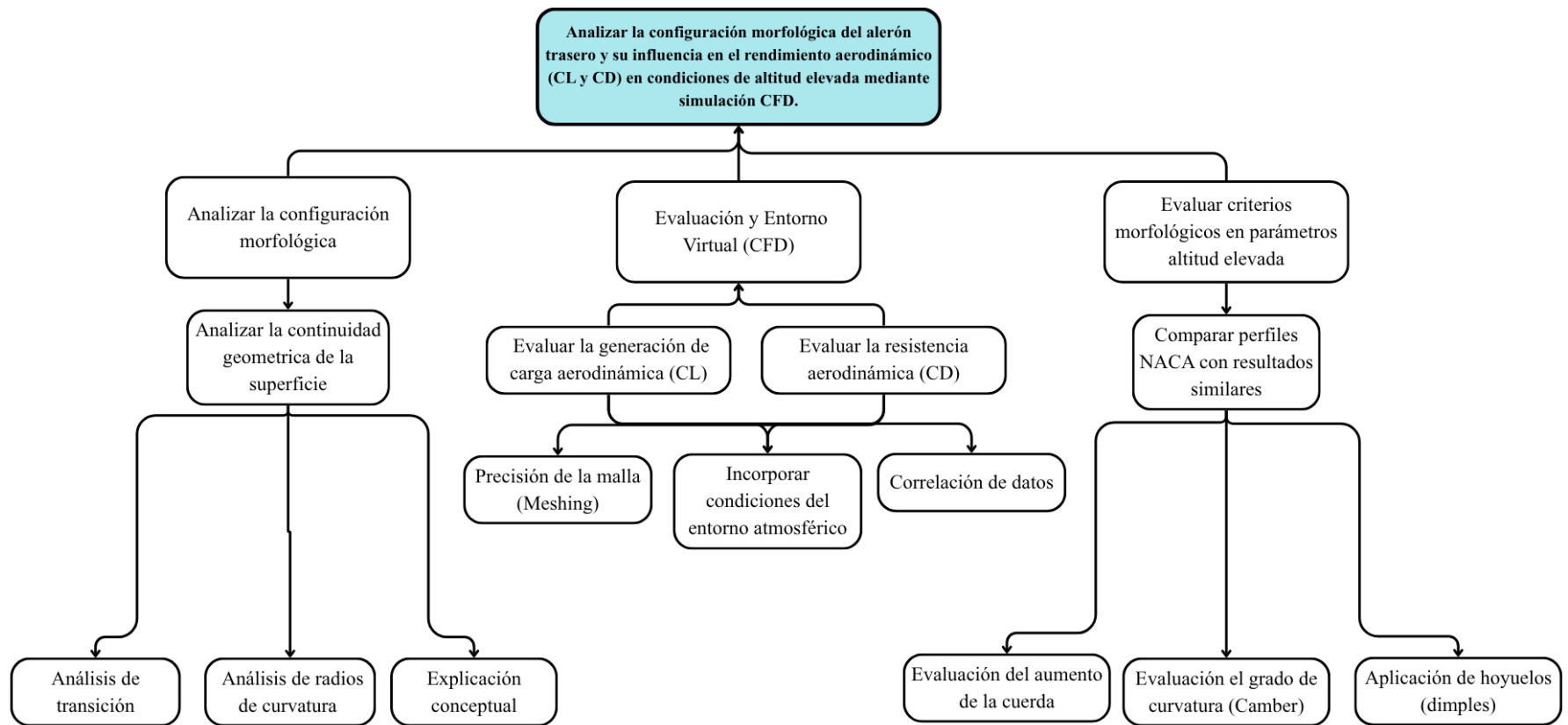


Figura 18 Árbol de objetivos

Fuente: Autoría propia

3.3 Fase de Experimentación

3.3.1 Construcción morfológica

El proceso de la construcción morfológica es una fase fundamental en la generación de alternativas, arrojada desde la explotación sistemática que permite encontrar soluciones diferentes. Este procedimiento, según Cross (2002) permite al diseñador superar las ideas preconcebidas logrando que el problema se divida en funciones primordiales o "parámetros" los cuales se exploran en una gama de "medios" técnicos que pudieron satisfacerlos (Cross, 2002). En este sentido, la inclusión de una matriz de perfiles NACA actúa como un formato estandarizado de soluciones secundarias parametrizadas que son, concretamente, los medios físicos que permiten ejecutar las funciones del objeto.

Durante el proceso de la caracterización aerodinámica del alerón trasero se realizó una aproximación de carácter comparativo conforme a perfiles de la serie NACA 44, debido a la analogía observada a partir de la curvatura (camber) y distribución de espesor entre perfiles pertenecientes a la citada serie y del alerón. Con las mediciones obtenidas, concretamente una relación de espesor relativa del entorno del 20%. Se seleccionaron los perfiles representativos en dicha familia para estimar la correspondencia geométrica. La siguiente tabla presenta la comparación de diferentes perfiles NACA, con el objetivo de encontrar el perfil que sea más próximo a la configuración del elemento a estudiar y justificar la elección para la misma.

Tabla 11 Tabla comparativa de perfiles NACA 44

Tabla comparativa de perfiles NACA 44

Perfil	Espesor (%)	Camber (%)	Espesor real (mm) (<i>c=200 mm</i>)	Ajuste geométrico	Comportamiento aerodinámico	Compatibilidad
NACA 4412	12%	4%	24 mm	Muy delgado	Bajo drag, menor downforce	Baja
NACA 4415	15%	4%	30 mm	Delgado	Buen balance	Media-baja
NACA 4418	18%	4%	36 mm	Cercano	Buen balance CL/CD	Media-alta
NACA 4420	20%	4%	40 mm	Muy cercano	Alto CL, mayor drag, estable	Alta
NACA 4421	21%	4%	42 mm	Exacto	Más CL, más drag, muy robusto	Muy Alta
NACA 4424	24%	4%	48 mm	Muy grueso	Drag elevado, poco eficiente	Baja

3.3.1.1 Diagrama morfológico

Parámetros (Funciones)	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Perfil Base (NACA 44)			
Espesor Relativo (%)	12%	15%	18%
Espesor Real (mm) (c=200 mm)	24 mm	30 mm	36 mm
Ajuste Geométrico	Muy delgado	Delgado	Cercano
Prioridad Aerodinámica	Bajo drag	Compromiso	Balance CL/CD
Nivel de Compatibilidad	Baja	Media-baja	Media-alta

Parámetros (Funciones)	Solución 4	Solución 5	Solución 6
Perfil Base (NACA 44)			
Espesor Relativo (%)	20%	21%	24%
Espesor Real (mm) (c=200 mm)	40 mm	42 mm	48 mm
Ajuste Geométrico	Muy cercano	Exacto	Muy grueso
Prioridad Aerodinámica	Estabilidad	Robustez	Drag elevado
Nivel de Compatibilidad	Alta	Muy Alta	Baja

El perfil del alerón del caso de estudio presenta una alta similitud geométrica con perfiles de la serie NACA 44, particularmente con el NACA 4421, debido a su relación de espesor del 21% y curvatura moderada. No obstante, se identifica como un perfil modificado adaptado a condiciones reales de flujo. El ángulo de ataque del alerón se estima en aproximadamente 14° , determinado mediante análisis geométrico visual de la línea de cuerda respecto a la horizontal del vehículo.

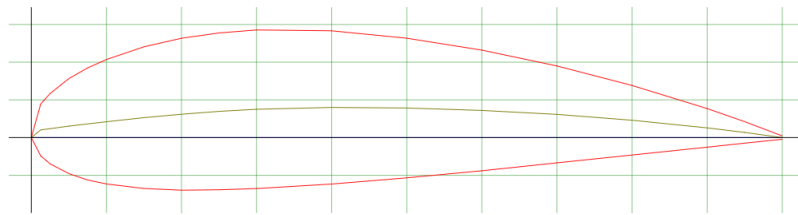


Figura 19 Perfil NACA 4421

Fuente: Airfoil Tools (2026).

3.3.1.2 Obtención de coordenadas del perfil

Habiendo definido el perfil aerodinámico de referencia, se realizó la obtención y preparación de sus coordenadas geométricas para su posterior tratamiento en el modelado digital. Las coordenadas asociadas al perfil NACA elegido fueron extraídas, y convirtiéndose al formato .dat, el cual tiene la información de los puntos que describen la geometría bidimensional del perfil. El archivo .dat fue posteriormente importado a través de un complemento compatible con Rhinoceros, habiendo de este modo también creado de la forma adecuada la sección del perfil aerodinámico, que también servirá como base geométrica para los futuros pasos de modelado, análisis y simulación del alerón trasero.

NACA 4421		Details
1.0000	0.0022	(naca4421-il) NACA 4421
0.9500	0.0211	NACA 4421 airfoil
0.9000	0.0385	Max thickness 21% at 30% chord.
0.8000	0.0691	Max camber 4% at 40% chord
0.7000	0.0950	Source UIUC Airfoil Coordinates Database
0.6000	0.1160	Source dat file
0.5000	0.1318	The dat file is in Selig format
0.4000	0.1416	
0.3000	0.1427	
0.2500	0.1388	
0.2000	0.1317	
0.1500	0.1204	
0.1000	0.1035	
0.0750	0.0924	
0.0500	0.0782	
0.0250	0.0584	
0.0125	0.0445	
0.0000	0.0000	
0.0125	-0.0242	
0.0250	-0.0348	
0.0500	-0.0478	
0.0750	-0.0562	
0.1000	-0.0615	
0.1500	-0.0675	
0.2000	-0.0698	
0.2500	-0.0692	
0.3000	-0.0676	
0.4000	-0.0616	
0.5000	-0.0534	
0.6000	-0.0440	
0.7000	-0.0335	
0.8000	-0.0231	
0.9000	-0.0127	
0.9500	-0.0074	
1.0000	-0.0022	

Figura 20 Coordenadas asociadas al perfil NACA 4421

Fuente: Airfoil Tool (2026). Recuperado de:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4421-il>

3.3.1.3 Digitalización del perfil

Para la digitalización del perfil aerodinámico se empleó el programa Rhinoceros V8.2 junto con la herramienta Grasshopper y el uso del addon “Generador de perfil aerodinámico NACA serie 4” basada en las ecuaciones de Abbott y von Doenhoff expuestas en su obra clásica "Theory of Wing Sections". Mediante esta extensión es posible la reconstrucción automática de la geometría bidimensional del perfil NACA 4421 a partir de las coordenadas obtenidas anteriormente. Con ello se llegó a construir una spline precisa, continua y sin pérdidas de información, construyendo la base geométrica para el desarrollo de la geometría tridimensional del alerón.

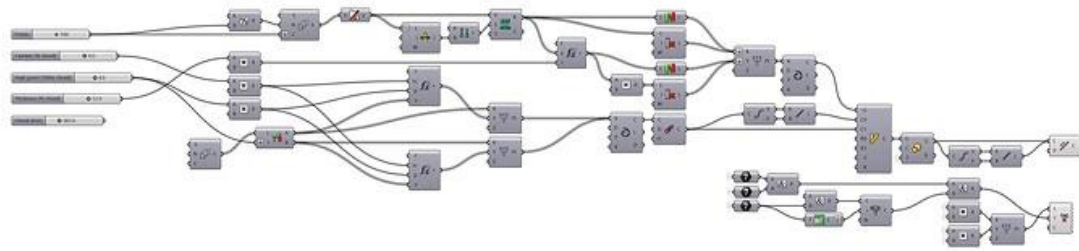


Figura 21 *NACA series 4 aerofoil generator*

Fuente: Gareth Paterson (2018)

Se establecieron parámetros siguiendo una cuerda de 200 mm, una curvatura (camber) máxima del 4% al 40% de la cuerda y un espesor del 21%. La elección de este perfil pretende representar la geometría observada en el alerón del caso de estudio mencionado anteriormente. Para propósitos de la calidad superficial y donde la continuidad de la geometría pueda ser más fácil de evaluarse, el perfil fue configurado con una alta densidad de puntos de control para facilitar procesos de reconstrucción NURBS posteriores.

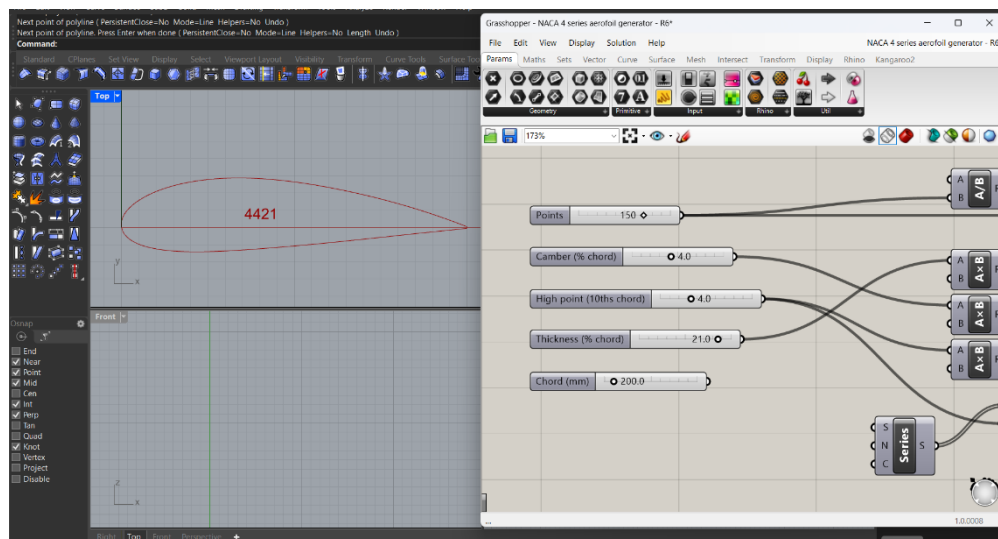


Figura 22 *Perfil NACA 4421 representando la geometría observada en el alerón del caso de estudio*

Fuente: Autoría propia.

3.3.1.4 Reconstrucción de curvatura del perfil

El perfil aerodinámico del alerón se encuentra dispuesto con la orientación invertida con respecto a la convencionalmente dada por las alas en aeronáutica, pues la función del alerón no será la de buscar una sustentación ascendente, sino al contrario: buscar la carga aerodinámica descendente (downforce). Diversos estudios y publicaciones en aerodinámica automovilística indican que los alerones de competición contratan el perfil invertido para producir, mediante la diferencia de presiones del alerón, la fuerza que presiona al vehículo hacia el suelo e incrementa la adherencia, la estabilidad y la capacidad de tracción en maniobras a alta velocidad (Doig, 2014).

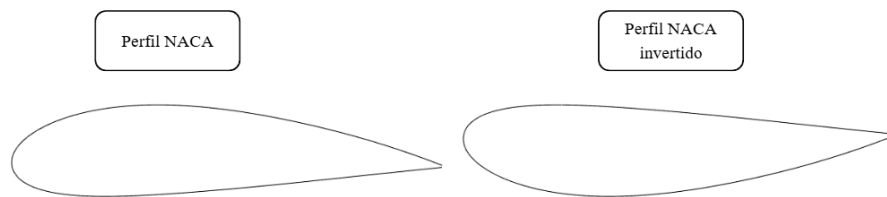


Figura 23 Perfil NACA 4421 invertido

Fuente: Autoría propia

Con la finalidad de ajustarse mejor a la geometría real del alerón que se está considerando, se añade un Gurney flap del 2% en relación con la cuerda en el borde de salida del perfil NACA 4421. Según Hillbank Motor Corporation (2025) este elemento consiste en una leve extensión de aproximadamente el 1–2 % de la cuerda, por otra parte, el espesor se mantiene alrededor del 25–40% de la altura para evitar fragilidad estructural. Esto con el fin de incrementar la carga aerodinámica que genera el perfil y estabiliza el comportamiento del vehículo en condiciones de carrera.

En este apartado el perfil importado fue ajustado, estableciendo una cuerda aproximada de 200 mm, una envergadura cercana a 1270 mm, junto a su Gurney flap y el correspondiente ángulo de ataque. De este perfil se realizó un flujo basado en curvas reconstruidas puesto que para acercarse a una continuidad de superficie G3 se necesita trabajar principalmente en la calidad de las curvas base.

A través de este proceso, se logra distribuir la dispersión de los puntos de control y disminuir irregularidades geométricas, que originan posteriormente ondulaciones en la superficie. Se utiliza curvas de grado 5 y una cantidad de puntos de control adecuada, ya que con una configuración demasiado densa dificulta el control de la curvatura y también se puede afectar la suavidad superficial.

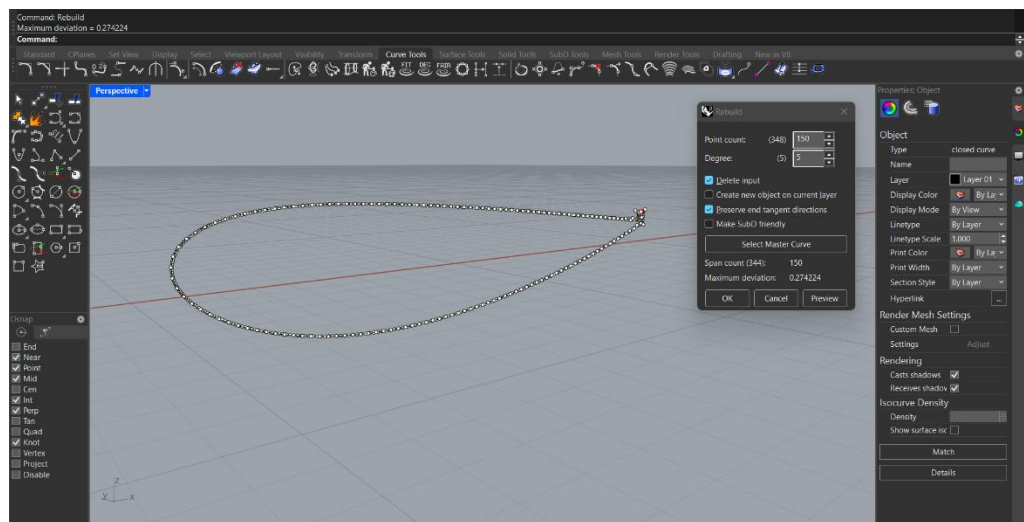


Figura 24 Reconstrucción de las curvas del perfil

Fuente: Autoría propia.

3.3.1.5 Análisis de curvatura

El análisis mediante curvatura, se convierte en un punto de partida esencial para la evaluación de la geometría y una transición a lo largo de curvas y superficies NURBS en Rhinoceros 8; mediante el uso del comando CurvatureGraph, se puede graficar la curvatura a lo largo de la curva o superficie, lo que nos permite localizar discontinuidades, saltos abruptos o irregularidades en la distribución de la curvatura.

Tal como explica Rhino 8 Documentation (2026) la documentación oficial de Rhinoceros, una transición continua en los gráficos de curvatura quiere decir que hay una continuidad geométrica suave entre los segmentos a verificar, sin embargo, existen discontinuidades tangenciales o discontinuidades de curvatura, si en cambio se aprecian saltos, chasquidos o variaciones bruscas. En la parametrización del perfil aerodinámico del alerón trasero, es importante particularizar este análisis para corroborar que los parámetros superficiales del perfil NACA se acercan a un estado de continuidad geométrica avanzada, para mejorar la estabilidad del flujo y la calidad de la aerodinámica de la superficie a parametrizar.

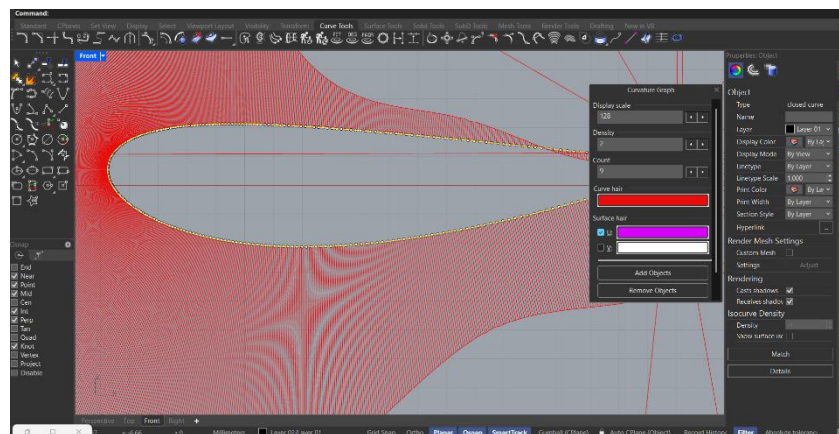


Figura 25 Análisis de curvatura

Fuente: Autoría propia.

En el gráfico se muestra cómo No hay saltos en la gráfica de curvatura. La gráfica de curvatura del primer tramo se conecta de extremo a extremo con la gráfica de curvatura del segundo tramo. Esta curva es continua en curvatura (G2) a lo largo de sus tramos, ya que su curvatura no cambia bruscamente de un valor a otro. Sin embargo, la gráfica de curvatura del primer tramo no progresa al mismo ritmo que la del segundo tramo. Por lo tanto, aunque la curvatura se mantiene constante, la tasa de curvatura cambia repentinamente.

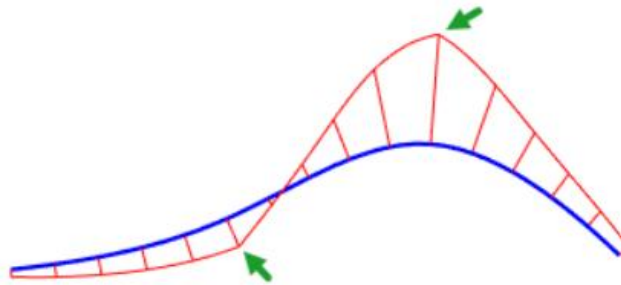


Figura 26 Una curva de grado 3 con tres tramos. El gráfico de curvatura conecta los extremos de los tramos.

Fuente: Rhino 8 Documentation (2026).

3.3.1.6 Generación de superficies

Una vez han sido correctamente estructuradas las curvas guía, se plantea el proceso de creación de la superficie principal del perfil usando herramientas de modelado NURBS. La herramienta BlendSrf fue utilizada en la creación de la superficie aerodinámica, debido a su funcionalidad de poder generar transiciones suaves y controladas entre las superficies tipo NURBS, manteniendo continuidad geométrica G3 en los bordes de conexión. Además, se utilizaron valores normales de parámetros de Tension y Straighten, para tratar de estabilizar el flujo longitudinal de la superficie y minimizar las deformaciones y torsiones durante la interpolación.

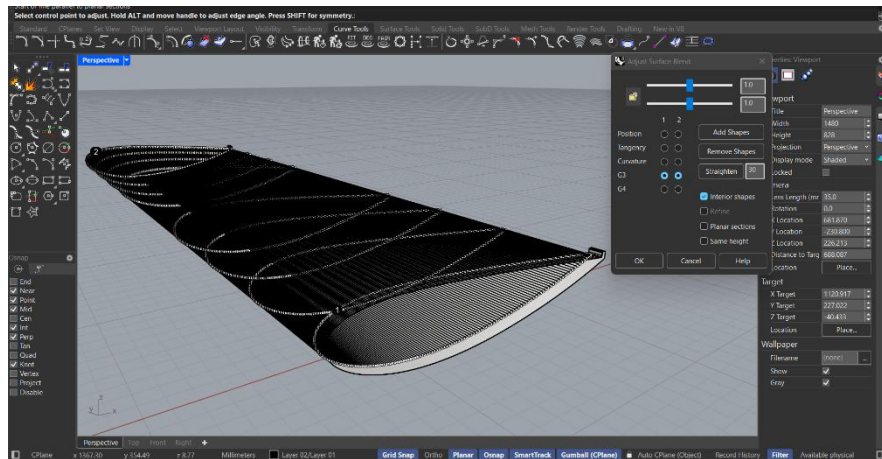


Figura 27 Generación de superficie del perfil NACA 4421

Fuente: Autoría propia.

3.3.1.7 Análisis Zebra

La continuidad superficial G_0 , G_1 , G_2 y G_3 en Rhinoceros permite analizar cómo se comportan geométrica y visualmente las transiciones entre curvas y superficies, mediante herramientas como Zebra y Curvature Comb. De acuerdo con Justin (2022) en el foro oficial de rhinoceros, la continuidad geométrica no asegura una superficie bien acabada visualmente, ya que la calidad final también depende del flujo general de la curvatura, así como de la construcción cuidada de las superficies base.

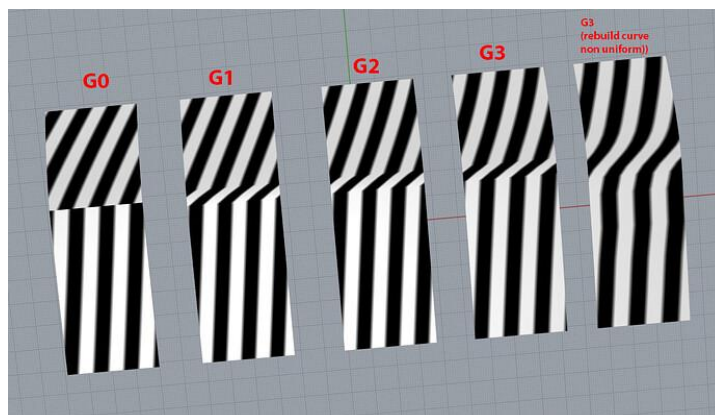


Figura 28 Continuidad de superficie

Fuente: (Justin, 2022).

En este sentido, se menciona que una continuidad G2 suele ser visualmente suficiente para la mayoría de aplicaciones, mientras que la G3 ofrece transiciones más suaves de la aceleración de la curvatura, aunque dichas diferencias no son evidentes en un análisis Zebra habitual. De la misma manera, se consideran que las discontinuidades que con más frecuencia aparecen de la superficie teórica y de la distribución de la curvatura de las superficies principales.

El análisis Zebra aplicado sobre la superficie del perfil NACA 4421 ha servido para corroborar una continuidad visual y una uniformidad de las reflexiones sobre la geometría modelada. A la hora de comparar una superficie con continuidad G3 con la superficie convencional, no se encontraron diferencias visuales notoriamente marcadas, pues ambas describen transiciones suaves en relación a la reflexión superficial. Este hecho resulta acorde con las características del análisis Zebra, en la medida que este tipo de análisis pone de relieve en gran medida discontinuidades visuales de tangencia y de curvatura (G1 y G2), mientras que las variaciones ligadas a una continuidad G3 se entienden por cambios mucho más sutiles en la tasa de variaciones asociadas a la curvatura.

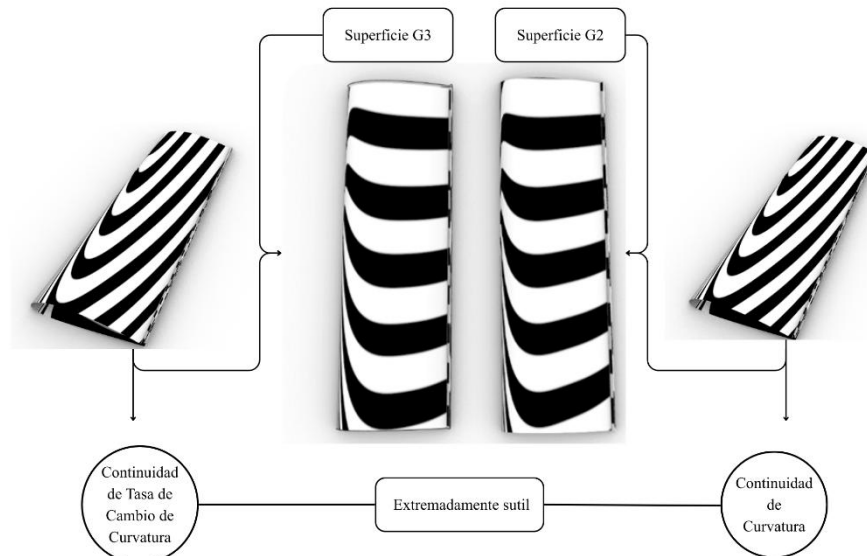


Figura 29 Análisis Zebra del perfil NACA 4421 de izquierda a derecha: Superficie G3, Superficie G2

Fuente: Autoría propia.

3.3.1.8 Generación del sólido

Una vez que se ha determinado la superficie se procede a la obtención del sólido tridimensional del alerón cerrando y uniendo las superficies generadas. Esto permite realizar la transformación de una geometría superficial en un volumen continuo y, por lo tanto, apto para el proceso de simulación computacional. En esta fase se comprobaron la correcta continuidad de los bordes, la inexistencia de aperturas de la geometría, así como la estabilidad topológica del modelo realizando una serie de operaciones de unión, cierre y refinamiento de superficies.

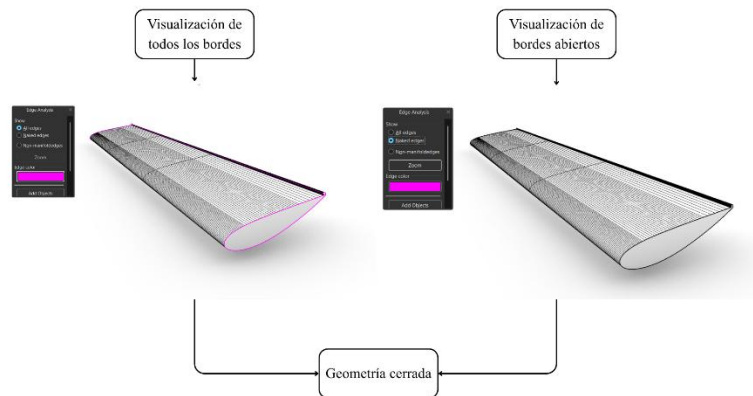


Figura 30 Detección de aperturas en el solido

Fuente: Autoría propia

Asimismo, se consideró el ángulo de ataque del 25% de cuerda estimado del alerón correspondiente al caso de estudio. Las medias del caso de estudio fueron aplicadas considerando la envergadura aproximada de 1270mm y una cuerda de 200mm. El resultado final fue un sólido tridimensional completamente definido y listo para exportarlo en formato. step con el fin de llevarlo a las posteriores etapas de simulación CFD.

3.3.2 Configuración del Entorno de Simulación (CFD)

La configuración del entorno de simulación CFD constituye un paso necesario para garantizar la precisión y la fiabilidad del análisis aerodinámico del alerón hecho a partir del perfil NACA 4421. En esta fase se definen las condiciones iniciales y de contorno que permiten representar de una forma controlada el comportamiento del aire que fluye en torno al modelo tridimensional para el cálculo de las fuerzas aerodinámicas. Para tal propósito se define un dominio fluido suficientemente amplio con el objetivo de evitar alteraciones no deseadas en la presión del fluido y en la generación de estelas.

Los autores Golmirzaee & Wood (2024) ponen de manifiesto que tanto el tamaño del dominio computacional como la correcta definición de las condiciones de frontera influyen determinadamente en la exactitud de los coeficientes aerodinámicos resultantes de la simulación CFD. Asimismo, la simulación CFD requiere la definición de ciertos parámetros que deben ser también indicados, como velocidad de entrada, presión atmosférica, densidad del aire, condiciones de salida, etc (Golmirzaee & Wood, 2024).

Para el desarrollo de la simulación se empleó el software Autodesk CFD, en el sitio web oficial Autodesk menciona que es una herramienta de dinámica de fluidos computacional utilizada para analizar el flujo de aire sobre un modelo tridimensional a partir de métodos numéricos que permiten evaluar las variables aerodinámicas (distribución de presión, velocidad del flujo, turbulencia, coeficientes de sustentación y de arrastre, entre otras), para simular las condiciones más cercanas a un entorno real de operación. Además, el software Autodesk CFD también cuenta con herramientas para la generación de la malla, configuración de condiciones de frontera y la convergencia del análisis, convirtiéndose en una herramienta adecuada para el estudio aerodinámico del alerón basado en el perfil NACA 4421.

3.3.2.1 Definición del dominio computacional

De acuerdo con Golmirzaee & Wood (2024) en simulaciones aerodinámicas de flujo externo el dominio computacional debe tener dimensiones suficientemente grandes para evitar que las fronteras modifiquen el comportamiento natural del flujo alrededor del modelo que se analiza (Golmirzaee & Wood, 2024). De acuerdo con dicho criterio, la configuración del dominio computacional a simular para el alerón basado en el perfil NACA 4421 fue mediante un dominio de tipo túnel de viento virtual.

Las fronteras superior e inferior del dominio computacional, con separación de una distancia de alrededor de 5 veces la cuerda del perfil, la longitud de salida 10-15 veces la cuerda, lo cual permite que la estela turbulenta que se genera detrás del alerón se desarrolle correctamente. También se han dispuesto las fronteras superior e inferior del dominio a distancias de aproximadamente 5 veces la cuerda, para evitar la aparición de efectos de bloqueo aerodinámico durante el análisis CFD.

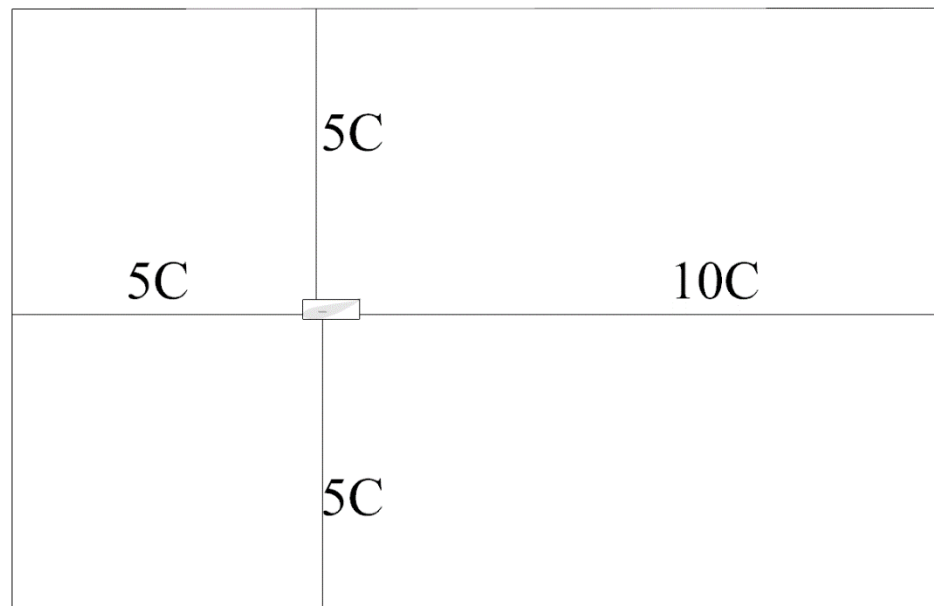


Figura 31 Disposición de fronteras del dominio computacional

Fuente: Autoría propia.

Tabla 12 Configuración del dominio CFD*Configuración del dominio CFD*

Parámetro del dominio computacional	Configuración recomendada	Relación respecto a la cuerda (c)	Aplicación en el perfil NACA 4421
Distancia de entrada (Inlet)	Separación frontal del flujo	5c	Permite estabilizar el flujo antes de interactuar con el alerón
Distancia de salida (Outlet)	Desarrollo de la estela turbulenta	10c – 15c	Evita alteraciones en la salida del flujo y mejora la precisión del drag
Distancia superior	Separación superior del dominio	5c	Reduce efectos de bloqueo aerodinámico
Distancia inferior	Separación inferior del dominio	5c	Mantiene estabilidad en la distribución de presión
Distancias laterales (análisis 3D)	Separación lateral respecto al alerón	3c – 5c	Minimiza interferencias laterales del dominio
Tipo de dominio	Túnel de viento virtual	No aplica	Simulación aerodinámica externa
Tipo de análisis	Flujo externo	No aplica	Evaluación aerodinámica del alerón
Condición de entrada	Velocidad uniforme del aire	No aplica	Simulación del flujo incidente
Condición de salida	Presión atmosférica	No aplica	Permite evacuación estable del flujo
Condiciones atmosféricas	Altitud elevada	No aplica	Ajuste de densidad y presión del aire

La existencia de los vórtices de punta de ala forma parte de uno de los principales fenómenos aerodinámicos asociados a las alas de sección finita, que son los resultados de la diferencia de presión entre el intradós y el extradós del perfil. De acuerdo con Toosi et al. (2024), la existencia de unos vórtices de punta de ala produce un fenómeno de downwash que modifica el ángulo de ataque que experimenta el ala y modifica la distribución de presiones sobre el ala incrementando el arrastre inducido (induced drag). Así mismo, diversos estudios indican que se utilizan elementos como los endplates o winglets para mitigar el efecto de los vórtices de punta y el arrastre inducido; permitiendo así controlar la mezcla de los flujos entre las zonas de alta presión y de baja presión del ala (Toosi et al., 2024).

Por esta razón, por criterio experto el modelo para el alerón dentro del dominio computacional se extendió lateralmente de borde a borde dentro del entorno de simulación, con el objetivo de representar un comportamiento aerodinámico lo más próximo al de un ala de longitud teóricamente infinita. De este modo, se reduce los efectos de los vórtices de punta sobre los resultados

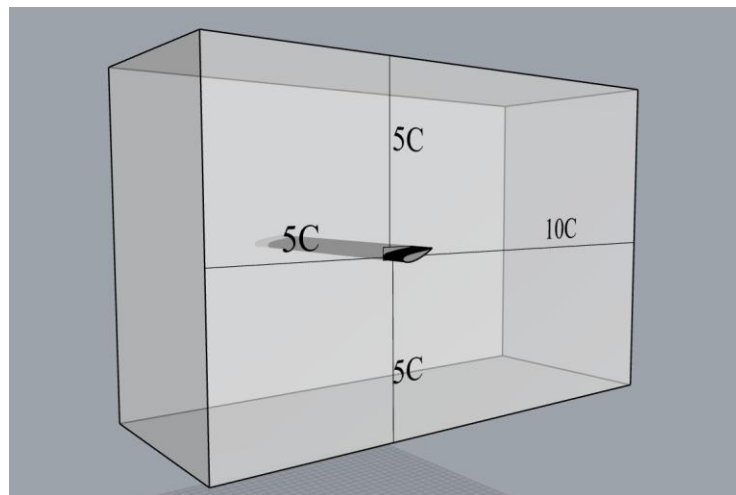


Figura 32 Modelo del alerón dentro del dominio de extremo a extremo

Fuente: Autoría propia.

obtenidos para cuantificar el downforce y el drag generado por el perfil NACA 4421.

3.3.2.2 Propiedades del material y condiciones del flujo

La selección del material no tiene como finalidad replicar con exactitud las propiedades constructivas del caso de estudio original, sino establecer condiciones homogéneas de simulación que permitieran evaluar el comportamiento aerodinámico. Para el material del alerón se asimila fibra de carbono (CFRP) el cual fue construido a partir de un modelo equivalente isotrópico, tomando como punto de partida las propiedades del material encontradas en la biblioteca de Autodesk CFD y modificando sus parámetros físicos posteriormente.

Así, fue posible representar valores de densidad, conductividad térmica y calor específico de un modo compatible con los materiales compuestos que suelen usarse en componentes aerodinámicos de automoción. Cabe mencionar que la simulación que se ha desarrollado, corresponde a un CFD de tipo aerodinámico, y no a un FEA por elementos finitos, por lo que las propiedades mecánicas específicas del material, no constituyen la variable de estudio más destacada.

Un estudio realizado por Han et al. (2016) reportan densidades cercanas a $1.7\text{--}1.8\text{ g/cm}^3$, capacidades caloríficas alrededor de $700\text{--}950\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y conductividades térmicas variables dependiendo de la orientación y tipo de fibra. Con base en estos rangos, los valores configurados en Autodesk CFD se justifican como una aproximación isotrópica equivalente para representar un alerón fabricado en CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

Tabla 13 Propiedades para el material equivalente tipo CFRP

Propiedades para el material equivalente tipo CFRP

Propiedad	Valor recomendado CFRP	Media
-----------	------------------------	-------

Conductivity	0.6 – 1.0 W/cm·K	0.8 W/cm-K
Density	1.55 – 1.65 g/cm ³	1.60 g/cm ³
Specific Heat	0.75 – 1.0 J/g·K	0.80 J/g-K
Emissivity	0.8 – 0.9	0.85
Electrical Resistivity	1E-03 a 1E-02 ohm-cm	0.005 ohm-cm
Wall Roughness	0 cm o muy pequeña	0

Fuente: (Han et al., 2016)

La entrada del flujo fue determinada a 30 m/s (110,4 km/h) en función de las condiciones reales de funcionamiento de los coches de rally en la provincia de Tungurahua. Registros de etapas del Rally F.F.F. 2024 muestran velocidades promedio de hasta aproximadamente 95 km/h en distintas etapas o tramos cronometrados, de donde se puede deducir que velocidades de hasta aproximadamente los 100 km/h, son condiciones realistas para la realización del análisis aerodinámico de coches tipo rally en un escenario de campeonato. Por otro lado, el reglamento de rally de la FEDAK establece que la velocidad promedio máxima en los segmentos o tramos cronometrados no puede ser superior a 160 km/h. (eWRC-results, 2024).

Tabla 14 Velocidades encontradas en los tramos del Rally F.F.F.

Velocidades encontradas en los tramos del Rally F.F.F.

Tramo / Referencia	Velocidad promedio (km/h)	Velocidad (m/s)
Registro 1	95 km/h	26.4 m/s
Registro 2	106 km/h	29.4 m/s
Registro 3	108 km/h	30.0 m/s

Registro 4	114 km/h	31.7 m/s
Registro 5	129 km/h	35.8 m/s
Media aritmética	110.4 km/h	30.5 m/s

Fuente: (eWRC-results, 2024).

Las características propias del fluido se adaptaron a la realidad que representa la provincia de Tungurahua, teniendo en cuenta que se sitúa a una altitud de aproximadamente 2600 m s.n.m. que viene dado por la ciudad de Ambato. Dado que la presión atmosférica disminuye en zonas elevadas, se utilizó una densidad del aire inferior a la estándar a nivel del mar, lo que permite obtener una representación más adecuada del comportamiento aerodinámico del flujo alrededor del alerón bajo condiciones reales de funcionamiento del vehículo en rally.

Tabla 15 Propiedades del fluido

Propiedades del fluido

Parámetro	Valor
Density	0.93 kg/m ³
Viscosity	1.81 x 10 ⁻⁵ Pa·s
Conductivity	0.00026 W/cm-K
Specific heat	1.005 J/g-K
Compressibility	1.4
Wall roughness	0

La condición de contorno de entrada fue configurada a partir de un perfil de velocidad uniforme, se define el parámetro Type a Velocity y utilizando unidades en metros por segundo (m/s) con lo que pretendemos representar la velocidad del flujo de aire que incide sobre el alerón. El análisis quedó establecido en estado permanente (Steady State), se asumió que las variables del flujo no

variaban con respecto al tiempo, lo que es suficiente para el cálculo de los coeficientes de arrastre y downforce. El outlet (condición de salida) se configuro con el parámetro de presión a 0Pa. Al definir el outlet en 0Pa, se está definiendo que el flujo sale del dominio hacia un ambiente “libre, lo que nos permite que el solver pueda calcular esas variaciones de presión que se producen alrededor del alerón.

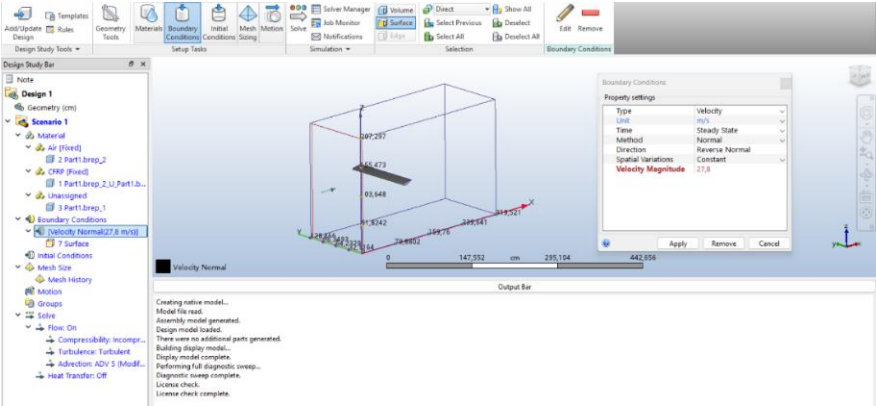


Figura 33 Condiciones de contorno

Fuente: Autoría propia.

3.3.2.3 Configuración del mallado y solver

El mallado se realizó mediante el refinamiento por capas prismáticas sobre las superficies del alerón con el propósito de captar con mayor precisión tanto la capa límite aerodinámica como el flujo hasta el umbral del Gurney flap. Igualmente, se aplicó una gradación progresiva entre capas donde fuera necesario para mejorar la transición del mallado del dominio y para poder representar adecuadamente fenómenos como la separación de flujo, la distribución de presión, o la disminución de vórtices alrededor del perfil NACA y del Gurney flap.

Tabla 16 Configuración del mallado

Configuración del mallado

Parámetro	Valor recomendado
-----------	-------------------

Enable wall layer	Activado
Enable wall layer blending	Activado
Number of layers	6
Layer factor	0.25
Layer gradation	1.20

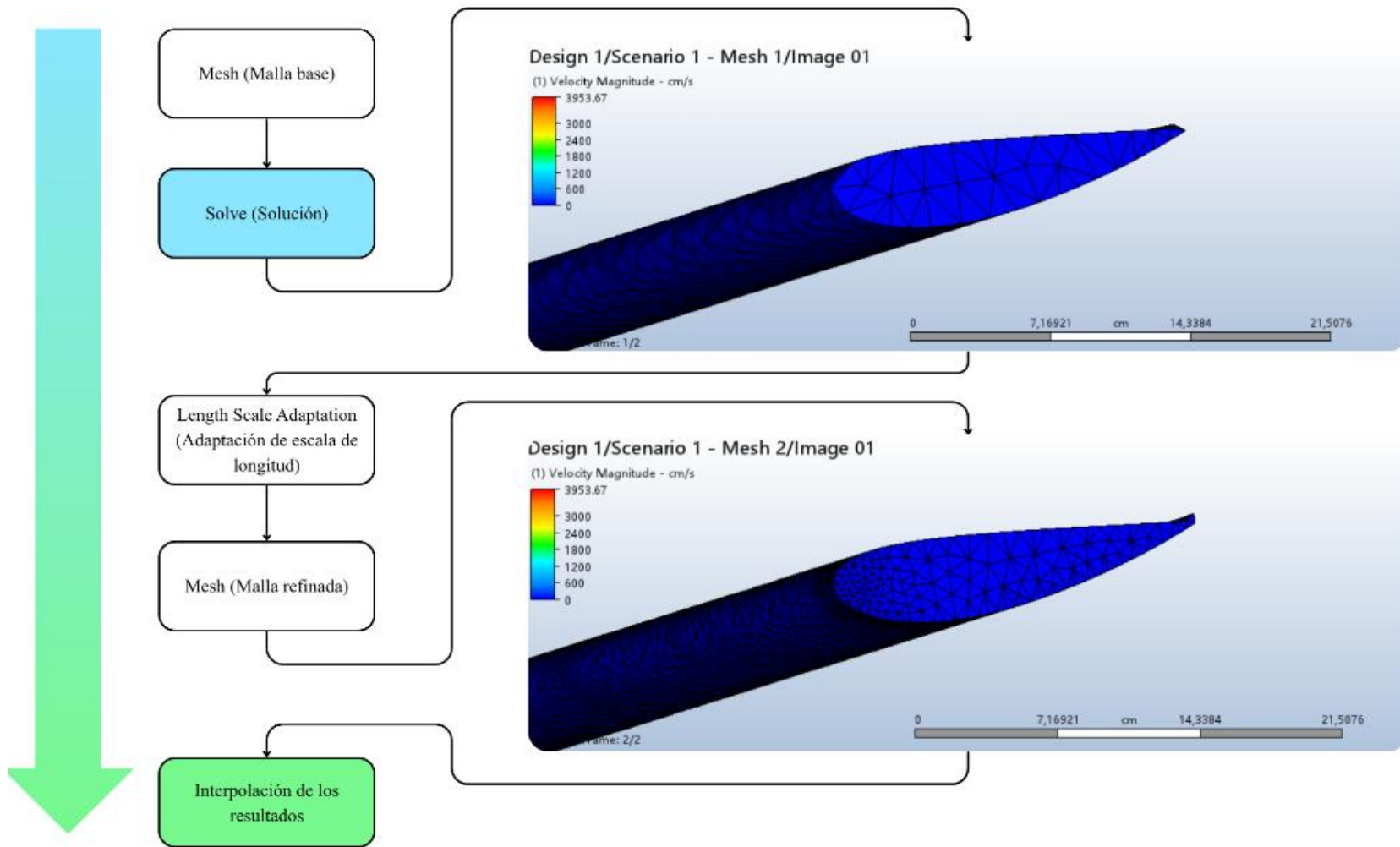


Figura 34 Proceso de refinamiento de malla

Fuente: Adaptado de Autodesk (2025).

El proceso de refinado de malla en Autodesk CFD se basa en una metodología iterativa de refinado progresivo de la malla (Length Scale Adaptation): se introduce primero una malla base sobre el dominio computacional y a partir de ahí se resuelve el flujo una vez. A partir de los resultados de la solución del flujo, el software identifica automáticamente los lugares donde existen los mayores gradientes de velocidad, presión o turbulencia, de manera que se realiza un refinado de la malla, localizado en las regiones críticas. Este proceso permite que solo se incremente la resolución en las regiones donde el comportamiento del flujo parece ser más complicado desde el punto de vista aerodinámico, lo que reduce el coste computacional del análisis.

El solver fue ajustado bajo condiciones de flujo incompresible y estacionario, siendo la velocidad de entrada de 30.5 m/s, igual a la velocidad media registrada en vehículos de rally en la provincia de Tungurahua. Considerando que el número Mach del flujo es menor que 0.3, fueron despreciados los efectos de compresibilidad del aire. La transferencia de calor y la presión hidrostática fueron desactivadas, dado que el estudio se basó solamente en el comportamiento aerodinámico externo del dispositivo, así como en la evaluación de downforce y de la resistencia aerodinámica.

3.3.2.4 Recolección de datos

Tabla 17 Recolección de las fuerzas obtenidas en la simulación CFD

Recolección de las fuerzas obtenidas en la simulación CFD

ID	Configuración de Malla	Solver	Resultados
Escenario			
S1-M1	Wall Layer: Number of layers: 6 Layer factor: 0,50 Layer gradation: 1,25 Advanced Meshing Controls: Resolution factor: 1.1 Edge growth rate: 1,08 Minimum points on edge: 10 Points on longest edge: 20 Surface limiting aspect ratio: 12 Volume growth rate: 1,35	Control: Iterations to Run: 100 Physics: Flow: Yes Compressibility: Incompressible Adaptation: Cycles to run: 5 Save cycles: Yes	Total area, 5529.76, cm ² TOTAL FX, 35.7565, Newton TOTAL FZ, -89.348, Newton
S1-M2			Total area: 5529.76, Newton cm ² TOTAL FX: 32.4062, Newton TOTAL FZ: -96.7493, Newton
S1-M3			Total area: 5529.76, cm ² TOTAL FX: 24.2821, Newton TOTAL FZ: -55.639, Newton
S1-M4			Total area: 5510.95, cm ² TOTAL FX: 49.1693, Newton TOTAL FZ: -86.2107, Newton
S1-M5			Total area: 5510.95, cm ² TOTAL FX: 49.3541, Newton TOTAL FZ: -86.2487, Newton

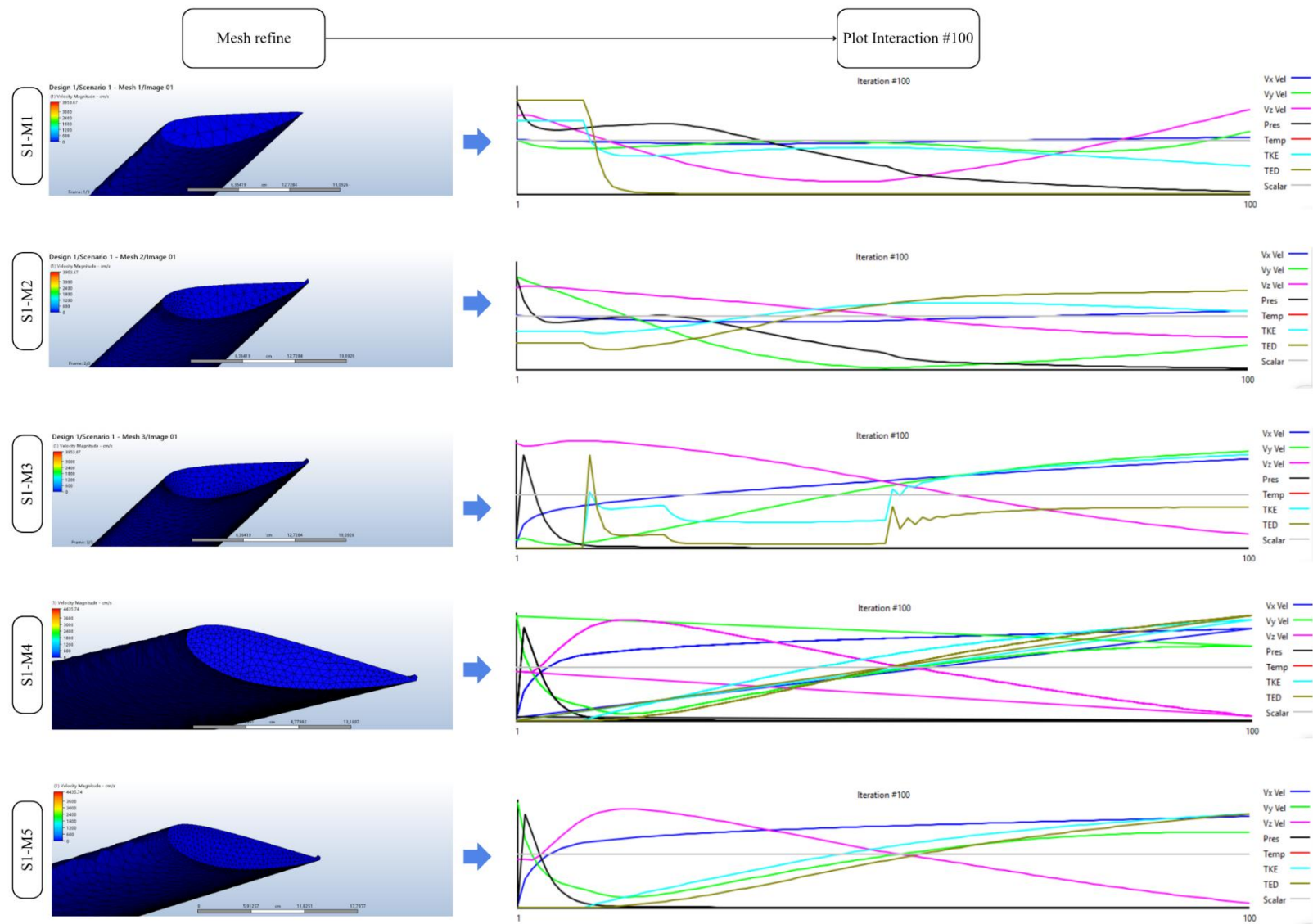


Figura 35 Grafica de resultados en base al refinamiento de la malla

Fuente: Autoría Propia.

3.3.2.5 Resultados de la configuración final

Para esta fase final el proceso de refinamiento de malla se llevó a cabo de forma incremental a partir de distintos niveles de discretización de la configuración de la malla para analizar su estabilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos en la simulación CFD. En este análisis se compararon los valores de las fuerzas generadas en cada refinamiento, identificando el punto en el cual los resultados de una malla frente a otra se hacían mínimas. Así, se tomó por configuración final la malla S1-M5 que generaliza valores convergentes y posee diferencias poco significativas frente a la del refinamiento superior.

Esto evidencia que el estudio de la configuración morfológica se encuentra estrechamente relacionado con el proceso de refinamiento de malla dentro de la simulación CFD, ya que la precisión con la que se discretiza la geometría influye directamente en la capacidad del solver para representar adecuadamente los resultados.

Tabla 18 Datos de la simulación en la malla S1-M5

Datos de la simulación en la malla S1-M5

Parámetro	Valor
Área total (cm ²)	5510.95 cm ²
Área total (m ²)	0.551095 m ²
(FX) (Drag)	49.3541 N
(FZ) (Downforce)	-86.2487 N
Velocidad	30.5 m/s
Densidad del aire	0.93 kg/m ³

Tabla 19 Resultados de los coeficientes de arrastre y coeficiente de sustentación

Resultados de los coeficientes de arrastre y coeficiente de sustentación

Coeficiente	Resultado
(C _D)	0.207
(C _L)	-0.362

Los coeficientes aerodinámicos que se obtuvieron corresponden a un rango un coeficiente de arrastre de $C_D=0.207$ y un coeficiente de sustentación de $C_L=-0.362$ que resulta concorde para aplicaciones automovilísticas del tipo rally y para perfiles aerodinámicos invertidos. Según Shinde et al. (2021) menciona que los spoilers eficientes en automóviles deben generar downforce mientras que se controla el coeficiente de arrastre, ya que existe un compromiso aerodinámico evidente entre más downforce y el incremento de la resistencia al avance. También indica que los perfiles NACA aplicados en el alerón trasero generan coeficientes de sustentación negativa (conocidos como low-Cl) por la diferencia de presión entre la cara de presión y de succión del perfil, condición que se requería para aumentar el agarre y la estabilidad del vehículo a altas velocidades.

En este sentido, el valor de $C_L=-0.362$ representa el downforce que se genera, y el coeficiente de $C_D=0.207$ indica la resistencia aerodinámica moderada y útil para aplicaciones en rally, el criterio experto apoya estos valores mencionándolos como coherentes para maximizar la estabilidad del vehículo sin escatimar demasiado por el comportamiento aerodinámico. La influencia de la morfología del alerón trasero en el coeficiente de sustentación (C_L), así como del coeficiente de arrastre (C_D), representa una de las variables más esenciales del análisis aerodinámico del alerón trasero, dado que la geometría del perfil afecta directamente al comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo. La curvatura del perfil, el ángulo de ataque, las dimensiones del alerón e incluso elementos como el Gurney flap modifican la distribución de presiones y la formación de vórtices, lo que influye, tanto en la producción de downforce como en el drag. De este modo, el análisis de los coeficientes aerodinámicos permite medir de forma objetiva el comportamiento del alerón.

3.4 Fase de evaluación

La fase de evaluación forma parte de la fase de síntesis metodológica que se contempla dentro de la metodología del proceso de diseño, la cual establece de qué forma se pueden sistematizar los resultados obtenidos mediante las técnicas de análisis funcional, descomposición morfológica, y simulación CFD en una serie de criterios aplicables al desarrollo del objeto. De acuerdo con Tjalve (1979) el diseño del producto debe ser tratado siguiendo un proceso sistemático donde la configuración formal, que es considerada para el diseño, debe haber sido previamente obtenida a partir de las funciones y los requerimientos técnicos del sistema, estableciendo así un vínculo directo entre forma, estructura y función (Tjalve, 1979).

Dentro de esta forma de entender el diseño del producto, los resultados obtenidos mediante análisis funcional, descomposición morfológica y simulación CFD son interpretados para establecer lineamientos aplicables al desarrollo del objeto. En este contexto, puede ser entendido desde la posibilidad de ver cómo cada una de las variaciones podrá impactar en el comportamiento aerodinámico del alerón trasero en condiciones de altitud elevada.

3.4.1 Síntesis de resultados

Los resultados de la síntesis son el proceso de interpretación de la información que hemos obtenido a partir de la combinación de análisis CFD, estudio morfológico y refinamiento de malla del alerón trasero. En esta etapa se registra los parámetros del coeficiente de sustentación (C_L) y del coeficiente de arrastre (C_D), que permitirá identificar adecuadamente la influencia aerodinámica de la configuración seleccionada. Los resultados obtenidos permitieron establecer además relaciones en función de la geometría del perfil, proporciones y continuidad superficial permitiendo entender la capacidad que tiene el alerón para generar carga aerodinámica descendente en condiciones de altitud elevada.

Tabla 20 Síntesis de resultados: Relación entre geometría y comportamiento aerodinámico

Síntesis de resultados: Relación entre geometría y comportamiento aerodinámico

Elemento geométrico analizado	Resultado observado	Interpretación	Implicación en el diseño
Curvatura del perfil NACA serie 44	Coefficiente de sustentación ($C_L = -0.362$) y coeficiente de arrastre ($C_D 0.207$)	La geometría invertida favorece la generación de downforce mediante diferencia de presiones	Mejora la adherencia y estabilidad
Espesor del perfil	Mayor capacidad de carga aerodinámica, pero aumento del drag	Los perfiles más gruesos generan mayor presión diferencial y resistencia aerodinámica	Existe un compromiso entre downforce y drag
Perfil NACA 4421	Mejor compatibilidad geométrica con el alerón original (Caso de estudio)	Presentan un comportamiento más estable y mayor capacidad de carga	Constituye una configuración estable dentro de su función principal
Gurney flap integrado	Control del flujo en el borde de salida	Favorece la generación de downforce y modifica la estela	Influye en el comportamiento aerodinámico del objeto
Continuidad superficial G2/G3	Hay una transición suave y la curvatura es constante	Se traduce en reflejos orgánicos que no muestran distorsiones	Minimiza las micro-perturbaciones en la superficie
Refinamiento de malla CFD	Resultados convergentes en el refinamiento de malla	Mayor precisión en la representación del flujo y las fuerzas	Permite validar técnicamente la configuración seleccionada

De acuerdo con Ali et al. (2021) en su investigación “Numerical investigation of aerodynamic parameters across NACA6415 airfoil” señala que sobre perfiles NACA prioriza el estudio de los coeficientes aerodinámicos ya que permiten cuantificar generación de sustentación y resistencia aerodinámica del perfil. Estos coeficientes son utilizados para llevar a cabo comparaciones de los diferentes parámetros geométricos y condiciones de flujo.

Así mismo, trabajos de aerodinámica sobre perfiles NACA también indican que variables tipo distribución de presión, estructuras vorticiales o turbulencia, suelen ser utilizadas como elementos de ayuda en la interpretación del flujo, mientras que los coeficientes de sustentación y arrastre son la definición más global que se puede concebir para el comportamiento aerodinámico de los perfiles (Effendy et al., 2019).

Como resultado en relación a la densidad del aire se puede asumir que el perfil NACA 4421 presenta resultados estables en la generación de las fuerzas aerodinámicas asociadas al alerón. En este sentido, el diseño debe preservar o mejorar esos resultados mediante configuraciones morfológicas complementarias.

3.4.2 Árbol de funciones y medios

El árbol de funciones y medios constituye una herramienta metodológica que se utiliza para fragmentar el problema general de diseño en funciones concretas y en los mecanismos precisos a emplear para satisfacerlas. Según Cross (2002), esta técnica permite estructurar lógicamente el proceso proyectual al identificar las metas funcionales de la extensión del sistema y la correspondencia de estas con las posibles soluciones. Esta técnica se aplica con los fines de transformar los resultados obtenidos a través de las simulaciones CFD a requerimientos funcionales concretos, siendo así posible construir una relación entre el comportamiento aerodinámico del alerón y los medios geométricos y formales.

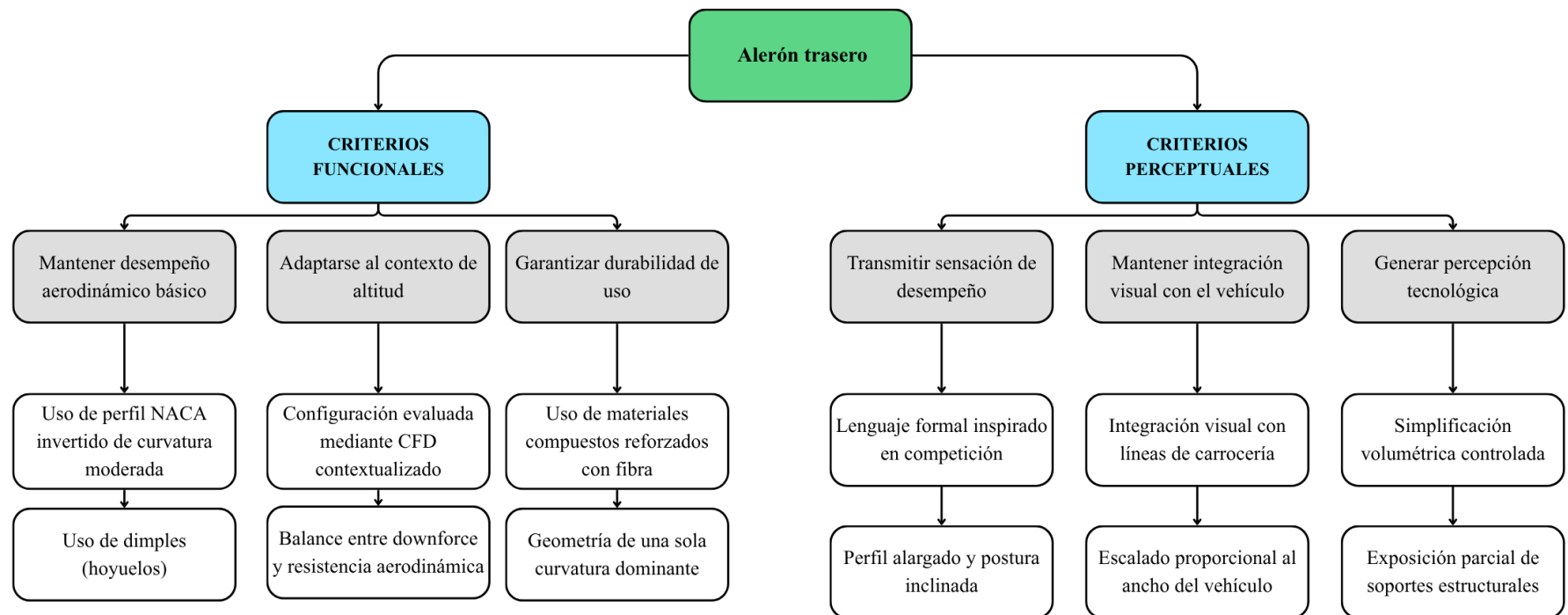


Figura 36 *Árbol de funciones y medios*

Fuente: Autoría propia.

Tabla 21 Criterios morfológicos

Función	Resultado CFD	Criterio morfológico derivado
Generar downforce	Mayor coeficiente de sustentación (C_L)	Uso de dimples (Hoyuelos)
Mantener continuidad geométrica	Flujo uniforme	Superficies continuas G2/G3
Mejorar comportamiento del borde de salida	Incremento de diferencia de presiones	Incorporación de Gurney flap integrado en el borde de salida
Adaptarse a altitud	Reducción aerodinámica	Incremento moderado de área efectiva
Integración visual	Coherencia formal	Geometría compacta y proporcional

El árbol de funciones y medios desarrollado anteriormente y los criterios morfológicos identificados permiten establecer una relación entre las funciones exigidas para el comportamiento aerodinámico y los recursos formales propuestos para la realización de dichas funciones.

La descomposición funcional permitió la identificación de las necesidades vinculadas al comportamiento aerodinámico, condiciones de altitud, integración estructural y a la interpretación del desempeño, mientras que los medios de los que se partía orientaron las decisiones de configuración asociadas al perfil aerodinámico, a la continuidad de la superficie, a los sistemas de fijación o a los elementos adicionales como endplates o Gurney flap. Por lo expuesto, tales criterios suponen una primera línea de actuación para la elaboración de un alerón trasero de una sola pieza, integrado directamente a la carrocería del vehículo, con una configuración que busca, de forma equilibrada, dar respuesta a los requerimientos funcionales, proyectuales y de interpretación en la actualidad del automovilismo en circunstancias de altitud elevada.

3.5 Fase de propuesta

La fase de propuesta representa la formalización y la definición técnica de todas las pautas recabadas durante la elaboración del análisis funcional, la descomposición morfológica y la simulación CFD. El objetivo es consolidar criterios de configuración de un alerón trasero orientada a condiciones de altitud elevada en el contexto del automovilismo tipo rally. La propuesta integra aspectos objetivos y perceptuales, de tal forma que estos tengan una relación entre la continuidad geométrica e integración formal con la carrocería del vehículo con la finalidad de dar como resultado una respuesta ajustada a los principios del diseño industrial y al comportamiento aerodinámico.

3.5.1 Conceptualización

La propuesta plantea el desarrollo de una configuración formal que combine la función del alerón y la integración visual con la carrocería del mismo, utilizando como base algunos principios de continuidad geométrica y lenguaje formal de los automóviles de competición para estructurar una forma que responde a dicha configuración. Para este apartado se empleó un moodboard de referentes para conceptualizar las ideas objetuales adquiridas en la revisión de antecedentes investigativos. Esto permiten clarificar las ideas para complementarlas hacia los criterios perceptuales que el objeto comunica y cumple dentro de su entorno.

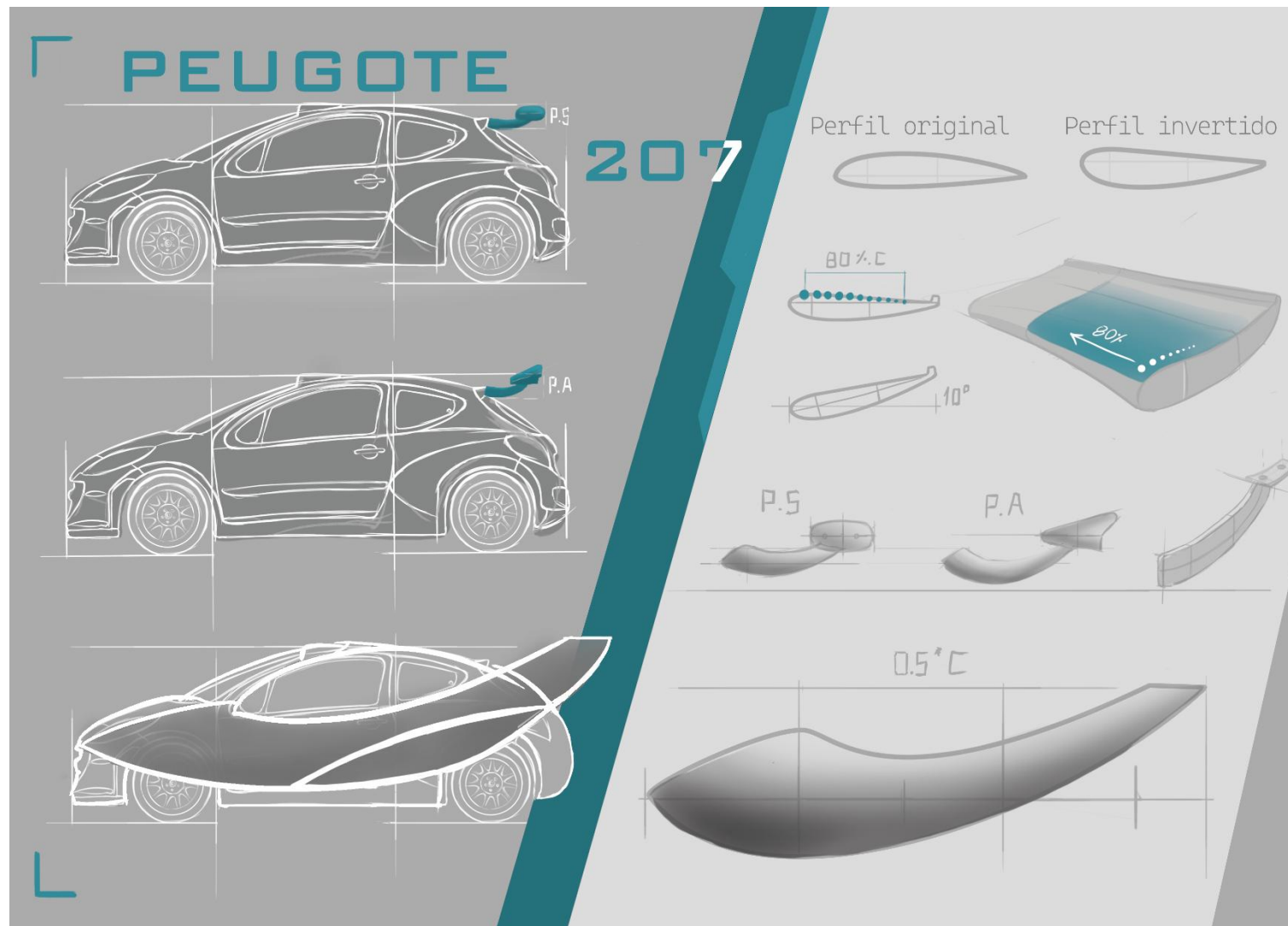


Figura 37 Conceptualización de la propuesta

Fuente: Autoría propia.

3.5.2 Configuración morfológica seleccionada

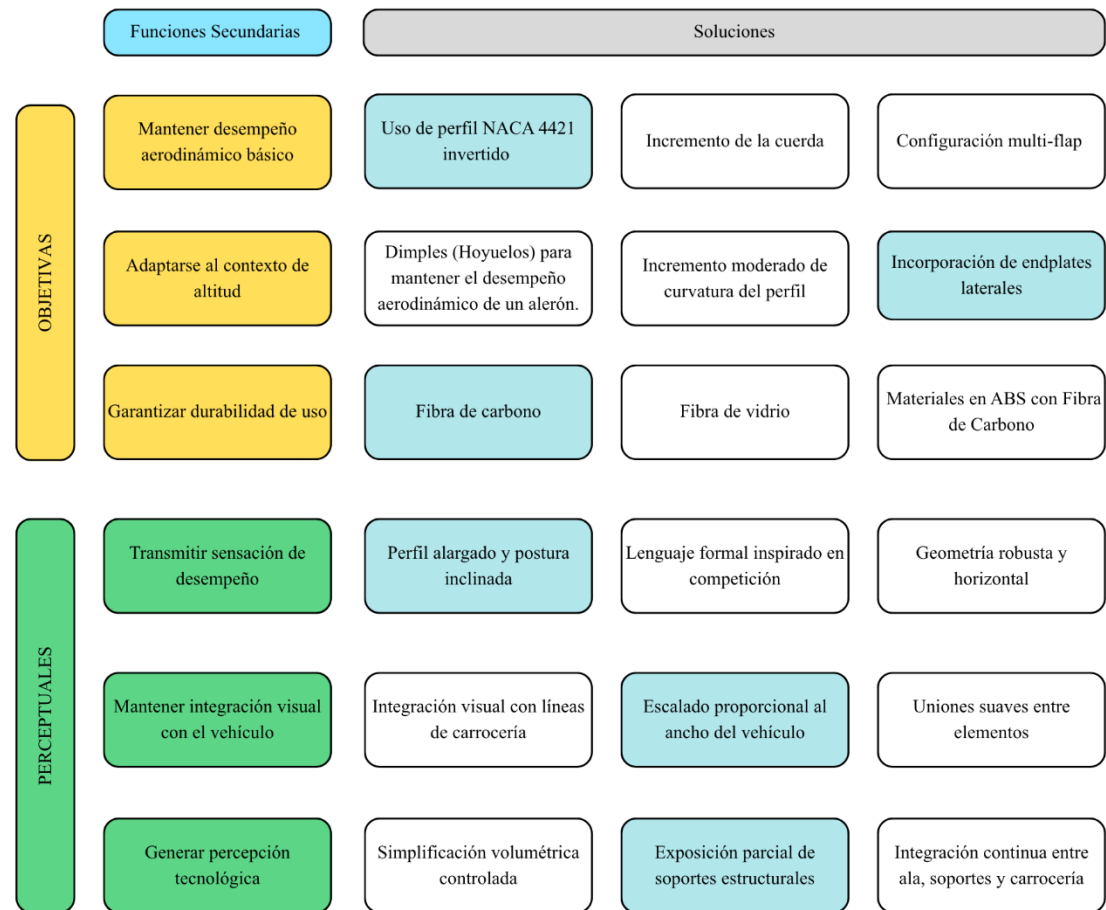


Figura 38 Diagrama morfológico

Fuente: Autoría propia.

3.5.3 Desarrollo de la propuesta

La propuesta parte de la elección del perfil aerodinámico NACA 4421 como base para el desarrollo conceptual de la propuesta, su elección se fundamenta en los resultados de simulación CFD, donde el perfil aerodinámico se evaluó bajo condiciones de elevada altitud. A partir de este perfil base se presentan configuraciones morfológicas para el alerón trasero, considerando endplates, gurney flap y ángulo de ataque, soportes, transición de la superficie y su integración formal:

a) Endplates

Dentro de la morfología del alerón trasero y satisfaciendo la necesidad de regular el comportamiento del flujo de aire en las zonas más extremas del perfil, se encuentra la incorporación de endplates. Según Ung et al. (2022) en su estudio “ Investigation into the Aerodynamic Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Endplate Design” han demostrado que la geometría de estas configuraciones de los endplates tiene una influencia directa sobre la estabilidad del flujo, sobre la cantidad de pérdidas inducidas y sobre la eficiencia aerodinámica general del sistema alar. Por lo que, el análisis crítico de la parametrización de los endplates es una variable importante del concepto del alerón, entendiendo que pequeñas configuraciones geométricas en los endplates pueden cambiar la distribución de presiones y la estructura vorticial asociadas al perfil, hecho demostrado en el estudio que se analizó, ya que distintas configuraciones lograron variar la evolución de los vórtices y la misma eficiencia aerodinámica general del sistema.

La selección de un diseño de endplate asimétrico se fundamenta en su capacidad superior para gestionar flujos de aire complejos y variables, característicos de las etapas de rally donde el vehículo experimenta constantes cambios en el ángulo de ataque y derrapes controlados. Según Ung et al. (2022),

esta configuración no solo mejora la distribución de presión a lo largo de la envergadura del perfil aerodinámico al actuar como una barrera física contra el flujo transversal, sino que también es altamente eficiente en regímenes de velocidad relativa baja, logrando una mejora en el coeficiente de potencia de hasta el 1.88%. La relación del espesor de este elemento es $0.03c$. Al asignar un área mayor hacia las zonas de flujo más turbulento, este diseño optimiza la uniformidad de presión en el borde de ataque y fragmenta los vórtices de punta en estructuras

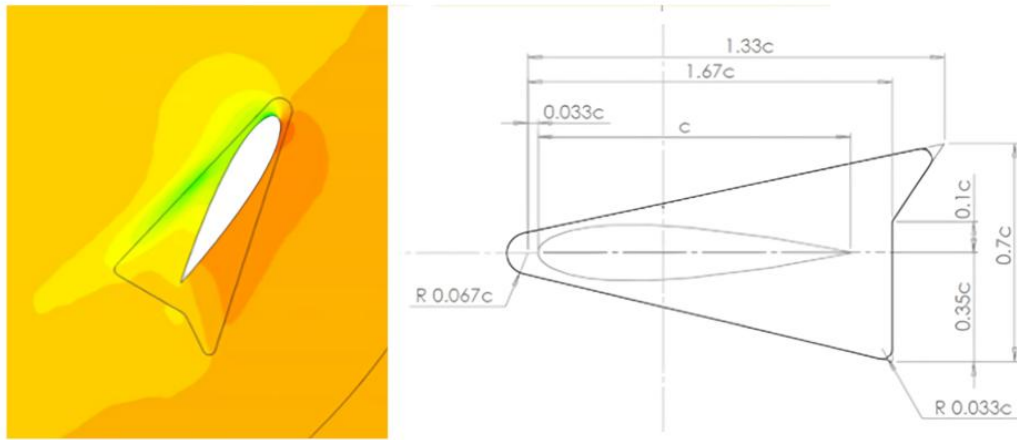


Figura 39 Distribución de la presión alrededor del borde de salida en la configuración endplate asimétrico

Fuente: (Ung et al., 2022).

menores, minimizando el arrastre inducido sin comprometer la estabilidad necesaria para mantener una carga aerodinámica constante en condiciones extremas.

b) Gurney Flap

La utilización de un Gurney flap representa una de las mejores soluciones de control de flujo pasivo existentes para mejorar el comportamiento aerodinámico. De acuerdo con Arifin et al. (2022) su objetivo consiste principalmente en aumentar la presión en la zona superior del perfil, por un lado, y, por el otro, mejorar la adherencia del flujo en la cara inferior del mismo, lo que permite inducir allí una carga aerodinámica (downforce) muy superior y, así,

disminuir el deslizamiento del auto en situaciones de frenado y giro extremas. Esta herramienta es fundamental para maximizar la relación sustentación-resistencia, haciendo que el aire se mantenga adherido al perfil por más tiempo y estabilizando la estela turbulenta en el borde de salida.

Según (Arifin et al., 2022) en el estudio “Aerodynamic Characteristics of Ahmed Body with Inverted Airfoil Eppler 423 and Gurney Flap on Fastback Car” se menciona la mejor parametrización para configurar el gurney flap, fijando una altura del gurney flap de 4 mm, que corresponderá al 2% de la longitud de la cuerda. Dicho elemento se implementará perpendicularmente a la línea de la cuerda en el borde de salida, configuración que, siguiendo la evidencia técnica, contribuye a una mejora de la relación C_L/C_D superior al 25.35% al maximizar la diferencia de presión entre las caras superior e inferior del ala. Esta altura del 2% es la que garantiza un máximo incremento de la succión (downforce) antes de que el incremento de la resistencia aerodinámica anule en términos de rendimiento del vehículo en condiciones de alta velocidad.

c) Dimples y ángulo de ataque

La configuración morfológica del alerón no sólo depende de la geometría general del perfil, también varía en función del comportamiento del flujo sobre la superficie del ala y el ángulo de ataque. Un estudio realizado por Shinde et al. (2021) ha mostrado que las modificaciones del ángulo de ataque y las características superficiales del perfil también influyen en el downforce, el drag y el flujo producido tras el alerón. También se ha observado que la calibración requiere un compromiso entre la carga aerodinámica y el drag, evitando configuraciones que incrementen excesivamente el drag o generen una separación del flujo no deseable.

El estudio analizado evaluó distintas configuraciones aerodinámicas a través de variaciones en la dimensión de los dimples superficiales, así como por la

variación del ángulo de ataque del perfil. En cuanto a la micro texturización de la superficie, los resultados recogidos mostraban que los dimples de 5 mm constituyeron la configuración más óptima al permitir reducir el coeficiente de arrastre (drag) e incrementar el downforce así como reducir la formación de wake al resultar más eficientes que configuraciones de mayor tamaño, las cuales producían extensas tasas de turbulencias y pérdidas aerodinámicas mucho más grandes (Shinde et al., 2021). De manera similar, el estudio también evaluó diferentes ángulos de ataque de 0°, 10°, 15° y 20° mostrando que si bien 20° producía el downforce más elevado, la carga de resistencias era bastante notoria, al llegar a la conclusión que 10° representa la carga de downforce más equilibrada en comparación con la carga del drag, evidenciando la presencia de un mejor comportamiento del flujo en torno al perfil (Shinde et al., 2021).

d) Sistema de sujeción

El sistema de sujeción del alerón se estableció de manera conceptual como parte de un conjunto en el que se busca alcanzar la integración formal, la cual permite visualizar el conjunto como un sistema aerodinámico coherente dentro del ámbito automotriz. Con el apoyo del criterio experto la parametrización del soporte tipo pedestal se establece a partir de relaciones proporcionales relacionadas con la geometría general del alerón, en donde la envergadura y la cuerda del perfil son la base de su relación. Esta parametrización permitió establecer dimensiones coherentes para altura, espesor y separación de los soportes, garantizando una coherencia formal adecuada entre el soporte del elemento aerodinámico y el sistema soporte.

Tabla 22 Parametrización del sistema de sujeción

Parámetro	Descripción	Relación paramétrica	Valor obtenido
------------------	--------------------	---------------------------------	---------------------------

Altura del soporte (H)	Distancia entre la cara superior y la cara inferior del alerón	$H=0.35C$ a $0.60C$	90 mm
Espesor del cuerpo principal	Espesor de la pletina	$E=C \times 0.0022$	5 mm
Longitud de apoyo sobre el perfil	Zona de contacto entre el soporte y el alerón	$L_p=0.20C$ a $0.35C$	50 mm
Separación entre soportes (S)	Distancia entre ambos soportes del pedestal	$L = C - (2 \times 0.55C)$	672 mm
Longitud de la base de fijación del soporte sobre la carrocería	Distancia de la carrocería al centro de apoyo del alerón	$L= 1.3 \times C$	230 mm

3.5.4 Representación final de la propuesta

La configuración final de la propuesta se establece como la síntesis de un proceso de diseño que logra equilibrar criterios perceptuales y objetivos. Bajo la perspectiva de Cross (2002), en esta etapa se comienza desde un planteamiento en torno a problemas mal definidos hasta la estrategia para su resolución formando así un diseño actúa como un puente entre el criterio perceptual y objetivo. De tal manera que el alerón queda despojado de ser una mera forma y pasa a ser un arquetipo que es capaz de satisfacer las necesidades perceptuales y objetivas.

Con ello, la propuesta añade un perfil aerodinámico analizado en condiciones de alta altitud, en función de la relación existente entre forma y generación de carga aerodinámica. Los criterios morfológicos del conjunto final incluyen un perfil principal NACA 4421, endplates asimétricos laterales, gurney flap y una superficie texturizada con dimples (hoyuelos) parametrizados para la generación de carga aerodinámica y conseguir una identidad formal asociada al lenguaje tecnológico y competitivo que le corresponde al Rally.

3.5.4.1 Especificaciones de la parametrización: Dimples

La implementación de dimples de 5 mm de profundidad opera como un sistema de corrección cuya función es evitar que se genere un desajuste del flujo laminar justo cuando entra en contacto con el perfil. Al provocar una turbulencia controlada logra que la forma y el aire puedan, sin que se produzcan rupturas abruptas, mantener la funcionalidad operativa del alerón aun en condiciones de ángulos de ataque elevados, los cuales en una superficie lisa provocarían la pérdida completa de sustentación. Según Shinde et al. (2021), la creación de esas pequeñas hendiduras que generan una turbulencia controlada que obliga al flujo a "abrazar" la superficie un tiempo mayor. Este fenómeno es lo que se denomina generación de micro-vórtices, que permite el retraso en el desprendimiento de la capa límite y aunque se utilizan ángulos de ataque agresivos, el perfil no entra en pérdida aerodinámica.

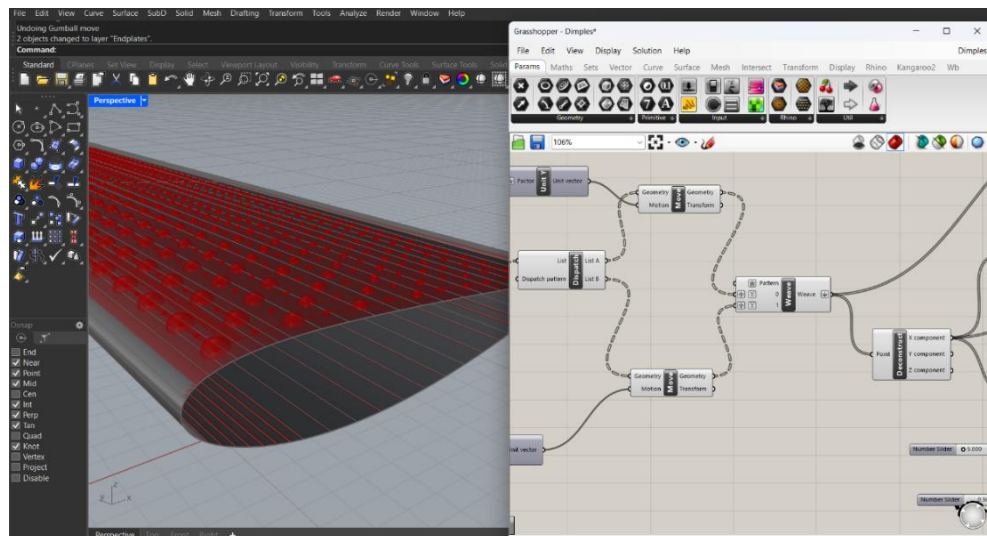


Figura 40 Implementación de dimples (Hoyuelos)

Fuente: Autoría propia.

El proceso de creación de los dimples se llevó a cabo mediante un modelado paramétrico en la herramienta Grasshopper, dentro del programa Rhinoceros. Primero, se realizó la descomposición de la superficie del perfil

NACA 4421 en dominios UV, generando una distribución de puntos que tomó como base una longitud de 200 mm. Siguiendo la literatura de Shinde et al. (2021) sobre microvórtices, la parametrización requirió una configuración en offset, donde el patrón se rige por una regla de equidistancia basada en el diámetro (D), respetando una separación de 2D en sentido transversal y 1,5D en sentido vertical. Además, para lograr la estabilidad del flujo y gestionar los desajustes en las zonas de transición crítica, la distribución se limitó al 80 % de la superficie del borde.

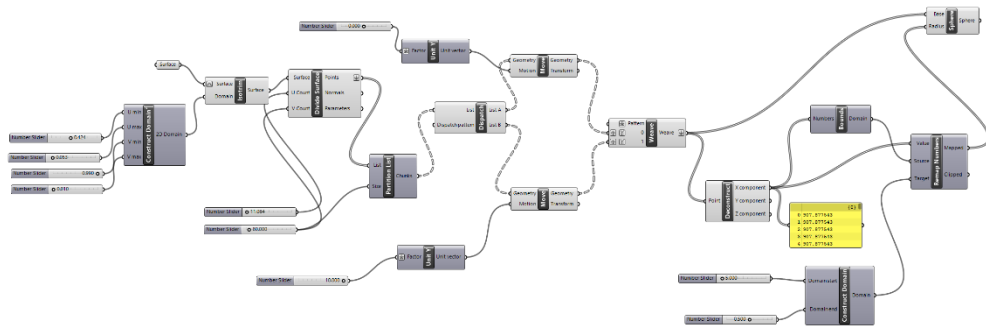


Figura 41 Árbol de nodos para la parametrización Dimples (Hoyuelos)

Fuente: Autoría propia. Enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1YFI91WaGabVwAkgnrB8PhimnKGrJERA/view?usp=sharing>

Como se observa en el árbol de nodos de la Figura 41 primero se delimita una región de la superficie mediante Isotrim y Divide Surface, utilizando luego los componentes Partition List, Dispatch y Move para desfasar lateralmente las filas de puntos en el eje local. Esta operación genera una distribución alterna u offset optimizada mediante Weave. Finalmente, tras extraer la posición longitudinal de los centros con Deconstruct, los componentes Bounds y Remap Numbers modulan un gradiente que escala proporcionalmente los radios de las esferas (Sphere), logrando una micro-morfología fluida y totalmente paramétrica. Este modelo se puede escalar y adaptar a cualquier otro tipo de superficie geométrica basta con cambiar el set de surface por la que se requiera parametrizar.

3.5.4.2 Visualización de la propuesta



Figura 42 Visualización de la propuesta

Fuente: Autoría propia.

3.5.4.3 Integración de la propuesta



Figura 43 Integración de la propuesta

Fuente: Autoría propia.

3.6 Verificación de pregunta de investigación

Los resultados generados a partir de la Fase de simulación utilizando el software Autodesk CFD, específicamente de la malla convergente S1-M5, responden positivamente a la pregunta de investigación al demostrar que la configuración morfológica del alerón trasero estructurada a partir de perfiles NACA y del criterio de continuidad geométrica, repercute sobre el comportamiento aerodinámico para condiciones de baja densidad atmosférica propias de las altitudes elevadas. En el entorno de trabajo, una densidad atmosférica definida por $\rho=0.93 \text{ kg/m}^3$, y una velocidad de entrada de $V=30.5 \text{ m/s}$, un perfil invertido NACA 4421 presenta un coeficiente de sustentación $C_L=-0.362$ y un coeficiente de arrastre $C_D=0.207$, demostrando una estabilidad aerodinámica equilibrada entre la generación de carga vertical (downforce) y la resistencia de avance.

La evaluación computacional del perfil base permitió la obtención de un punto de referencia muy útil para el desarrollo de la propuesta preliminar, corroborando que la geometría seleccionada posee un comportamiento aceptable en relación con las condiciones aerodinámicas propias del contexto de estudio. Esa evaluación inicial permitió que la propuesta morfológica añadiera otros criterios complementarios como los endplates, el gurney flap y las configuraciones de dimples (hoyuelos) orientadas a favorecer la aerodinámica del alerón. Estos criterios fueron seleccionados mediante la revisión y extrapolación de antecedentes especializados que documentan su influencia favorable en la estabilidad aerodinámica, el control de los vórtices y la mejora del flujo en la superficie del alerón.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Al finalizar el presente capítulo y en relación con los objetivos planteados en el proyecto de investigación, se concluye lo siguiente:

- Para identificar la configuración morfológica del alerón trasero desde una perspectiva tanto objetiva como perceptual, se tuvo que comprender al componente como una estructura sistémica compuesta a partir de subsistemas interrelacionados, entre los que se encontraban el plano principal, los endplates, los elementos estructurales y el gurney flap como elementos que no actuaban de manera aislada, sino como un conjunto de las variables morfológicas responsables de modificar el comportamiento del objeto. De los análisis teórico y referencial se llegó a la conclusión de que la forma exponía una serie de relaciones que para el objeto no estaban exclusivamente a merced de criterios estéticos, sino que respondían a una relación basada en el equilibrio entre exigencias aerodinámicas, coherencia formal y adaptación contextual.
- Mediante el simulador de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a través del software Autodesk CFD, se estimó la configuración morfológica sobre el comportamiento de las fuerzas aerodinámicas que experimentaba el objeto en una situación atmosférica contextualizada. Para configurar las variables de entorno a partir de las características de la región: altitud de aproximadamente 2600 m s.n.m., baja densidad del aire de 0.93 kg/m^3 , se logró hacer una simulación más cercana al comportamiento del alerón a la velocidad de competencia de 30.5 m/s. El procedimiento iterativo de refinamiento progresivo de malla (Length Scale Adaptation) resultó ser una etapa crucial; la selección de la malla convergente final (S1-M5) hizo posible tomar los resultados entorno a los más convergentes, que de forma objetiva y fiable se traspasaron a un coeficiente de arrastre (C_D) de 0.207 y

un coeficiente de sustentación (C_L) de -0.362. Estos valores numéricos demostraron la existencia de un comportamiento aerodinámico equilibrado, donde la forma era capaz de proporcionar downforce para la adherencia en altura sin inducir una resistencia excesiva.

- A través de la implementación de las herramientas metodológicas de árbol de funciones y medios, se consolidó una propuesta preliminar que integra criterios tanto objetivos como perceptuales para un componente aerodinámico coherente a la carrocería del vehículo. Los recursos formales derivados del comportamiento analizado determinaron que se debía mantener o mejorar la función principal del componente, se demostró que la configuración morfológica basada en el perfil invertido NACA 4421 presenta un comportamiento aerodinámico estable y eficiente bajo las condiciones atmosféricas de gran altitud de esta manera el diseño respondía a: un perfil principal NACA 4421 invertido; la alteración con un Gurney flap integrado del 2% en el borde de salida a fin de maximizar la diferencia de presiones. Asimismo, la micro-morfología de los dimples (hoyuelos) de 5 mm parametrizados en Grasshopper al 80% de la superficie. Estos criterios constituyen una base metodológica y proyectual que permite su replicación en investigaciones futuras.

4.2 Recomendaciones

- Dado que el alcance de esta investigación queda delimitado al establecimiento de lineamientos de configuración morfológica y no a la optimización interactiva final de un producto comercial, la validación computacional numérica de la interacción global de los elementos combinados queda fuera de estos objetivos delimitados, quedando considerada como una línea de trabajo de desarrollo e investigación futura. Se recomienda que los procesos de simulación computacional vayan acompañados de métodos de validación experimental, como pruebas físicas o evaluaciones dinámicas en pista, ya que ello permite cruzar los resultados digitales con situaciones reales de funcionamiento.

- Se recomienda extender el estudio relacionado con el sistema de soporte del alerón, dado que este elemento se convierte en un componente clave para la integración estructural, funcional y visual del conjunto aerodinámico con el vehículo. En futuras investigaciones se podrían detallar temas relacionados con geometría, puntos de anclaje, resistencia estructural, distribución de cargas y continuidad formal entre el alerón y la carrocería, por el fin de producir soluciones que mejoren, entre otros aspectos, la estabilidad y la capacidad aerodinámica, además de la coherencia morfológica del componente dentro del lenguaje visual del vehículo de competición.
- Resulta pertinente extender el alcance de la investigación hacia el estudio de la aerodinámica del vehículo en su conjunto, haciendo hincapié en la interacción del alerón trasero con otros cuerpos tales como el difusor, el splitter frontal, el fondo plano o la geometría de la carrocería, de tal manera que el futuro estudio pueda valorar mejor la manera en la que la interacción de los subsistemas afecta a la aerodinámica del vehículo de competición.
- Es importante considerar que el desarrollo de un alerón no debe limitarse a los parámetros técnicos, centrados en la carga aerodinámica o en la resistencia a la tracción, sino que debe tener un balance de lo perceptivo y lo objetual, en cuanto dos aspectos que inciden en la coherencia formal de la configuración del vehículo. Por ello, se sugiere una buena relación entre funcionalidad y visualidad de una propuesta; de tal forma que los distintos componentes se integren a la estructura final del vehículo, pero sin caer en las visiones llenas de componentes que no acaban de ser coherentes con el modo formal del vehículo.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias bibliográficas

Albornoz Zamora, E. J., Guzmán, M. d. C., Sidel Almache, K. G., Chuga
Guamán, J. G., González Villanueva, J. L., Herrera Miranda, J. P.,

Zambrano Sanguinetti, L. C., Cañizales Jota, A. L., Vera, L. M., Márquez de González, A. H., González Noriega, R. V., Cruz Tamayo, K. E., Luna Álvarez, H. E., Macias Merizalde, A. M., Brice Hernández, D. E., & Arteaga Delgado, R. (2023). *Metodología de la investigación*. <https://doi.org/https://doi.org/10.26820/978-9942-622-59-4>

Alexander, C. (1964). *I I t • NOTES ON THE SYNTHESIS OF FORM*. . Cambridge, MA: Harvard University Press.

Ali, R., Akhtar, S., Farhan, M., & Alam, F. (2021). Numerical investigation of aerodynamic parameters across NaCa6415 airfoil. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3047–3053. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.059>

Arifin, Z., Suyitno, Tjahjana, D. D. D. P., Juwana, W. E., Rachmanto, R. A., Brillianto, C. H., Ubaidillah, Prasetyo, S. D., Muhammad, A. F., & Rosli, M. A. M. (2022). Aerodynamic Characteristics of Ahmed Body with Inverted Airfoil Eppler 423 and Gurney Flap on Fastback Car. *Automotive Experiences*, 5(3), 355–370. <https://doi.org/10.31603/ae.7067>

Asimow, M. (1962). *Introduction to Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Byron, A., & Murillo Vega, S. (2022). *ANÁLISIS AERODINÁMICO Y MANUFACTURA ADITIVA DE ALERONES DE COMPETENCIA MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL*.

Chuquín Narváez, S. Fernando. (2022). “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN EN FIBRA DE CARBONO DEL ALERÓN DELANTERO APLICADO AL VEHÍCULO PROTOTIPO FÓRMULA SAE DE LA CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ*.” <https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16056>

Cross, N. (2002). *Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos*.

Doig, G. (2014). Transonic and supersonic ground effect aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 69, 1–28. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2014.02.002>

- Effendy, M., Muchlisin, D., & Yani, J. A. (2019). Studi Eksperimental dan Simulasi Numerik Karakteristik Aerodinamika Airfoil NACA 4412. *ROTASI*, 21(3), 147–154. <https://doi.org/10.14710/ROTASI.21.3.147-154>
- Fajardo, J. I., Villa, M. N., Pozo, J. A., & Urgilés, D. R. (2019). *Caracterización de las propiedades tensiles*. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.381>
- Golmirzaee, N., & Wood, D. H. (2024). Some effects of domain size and boundary conditions on the accuracy of airfoil simulations. *Advances in Aerodynamics*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00163-z>
- Guendaoui, S., El Akkad, A., El Khalfi, A., Vlase, S., & Marin, M. (2025). NURBS Morphing Optimization of Drag and Lift in a Coupe-Class Vehicle Using Symmetry-Plane Comparison of Aerodynamic Performance. *Symmetry*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/sym17091571>
- Han, B., Sun, S., Ding, S., Zhang, L., Dong, S., & Yu, X. (2016). Nano Carbon Material-Filled Cementitious Composites: Fabrication, Properties, and Application. *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering*, 153–181. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-326-3.00008-7>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación*.
- Hurtado de Barrera, Jacqueline. (2007). *Metodología de la Investigación: guía para la comprensión holística de la ciencia*.
- Karaki, A., Abu Sirreya, M., Zalloum, M., & Amro, H. (2025). Enhancing vehicle performance through the application of airfoils as spoilers with movable trailing edge. *F1000Research*, 14, 469. <https://doi.org/10.12688/f1000research.160307.1>
- Kyei, S. M. (2014). *Composite Car Rear Spoiler*.
- Löbach, B. (1981). *Diseño industrial: Bases para la configuración de los productos industriales*.

- Manzini, E. (2015). *Design, When Everybody Designs*.
- Mendia Blázquez, J. (2023). *Diseño del alerón delantero de un Formula 1 2022*.
- Metar, M. (2021). Aerodynamic Analysis of Spoiler at Varying Speeds and Angles. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(11), 526–535.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.38843>
- Miralles, S. (2019). “*Diseño y análisis de un alerón trasero para un vehículo de competición utilizando material compuesto con fibras naturales.*”
- Muñoz, P., & Coronel, J. L. (2013). *Continuidad en superficies espaciales para diseño industrial*.
- Padilla Yun, O. (n.d.). *DISEÑO Y ANALISIS DE UN ALERÓN TRASERO DE F1 Memoria y Anexos*.
- Piegl, L., & Tiller, W. (1997). *The NURBS Book*.
- Qiu, Z., & Zhang, H. (2023). Aerodynamics-based design of the rear wing of a sports car. *Applied and Computational Engineering*, 11(1), 310–317.
<https://doi.org/10.54254/2755-2721/11/20230245>
- Shinde, Y., Patel, H., & Shendge, S. (2021). Dimples Effects on a Spoilers Aerodynamics. In *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* (Vol. 9). www.ijraset.com
- Tjalve, Eskild. (1979). *A Short course in industrial design*. Newnes-Butterworths.
- Toosi, S., Peplinski, A., Schlatter, P., & Vinuesa, R. (2024). The impact of finite span and wing-tip vortices on a turbulent NACA0012 wing. *Journal of Fluid Mechanics*, 997. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.667>
- Ung, S. K., Chong, W. T., Mat, S., Ng, J. H., Kok, Y. H., & Wong, K. H. (2022). Investigation into the Aerodynamic Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Endplate Design. *Energies*, 15(19).
<https://doi.org/10.3390/en15196925>

Valencia, M. (2005). *Morfogénesis del objeto de uso : la forma como hecho social de convivencia*. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Airfoil Tools. (2026). Obtenido de NACA 4421:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4421-il>

Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica*. Episteme.

Autodesk. (10 de diciembre de 2025). Obtenido de Herramienta Zebra:
<https://www.autodesk.com/es/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/Zebra-Tool-showing-weird-curves-in-Fusion-360.html>

Autodesk. (28 de octubre de 2025). Obtenido de Results change significantly with different meshes:
<https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Results-change-significantly-with-different-meshes.html>

Autodesk. (2026). Obtenido de Autodesk CFD: Software de simulación computacional de fluidos.:
https://www.autodesk.com/products/cfd/overview?utm_source=chatgpt.com

Carburando. (10 de agosto de 2023). *TC2000: Gustavo Estrada explicó cómo será la aerodinámica de las SUV*. Obtenido de
<https://www.carburando.com/notas/tc2000-gustavo-estrada-explico-como-sera-la-aerodinamica-de-las-suv>

EOS. (2026). Obtenido de Drones: Mayor rendimiento en el aire mediante la fabricación aditiva.: <https://www.eos.info/es/industrias/aviacion>

eWRC-results. (23 de marzo de 2024). *Rally F.F.F. 2024*. Obtenido de
<https://ewrc-results.com/event/88523-rally-fff-2024/entry/3988988>

Fagnan, R. (19 de febrero de 2019). *Motorsport.com*. Obtenido de Regreso al pasado: así se introdujeron los alerones en la Fórmula 1:
<https://es.motorsport.com/fl/news/aniversario-primeros-alerones-formula1->

1000966/1643872/#:~:text=Cuando%20el%20piloto%20pisaba%20un,su%20posici%C3%B3n%20de%20carga%20aerodin%C3%A1mica.

Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo. (2026). *Reglamento General de Trepada de Montaña 2026 – 2028*. Ambato: FEDAK.

Gareth_Paterson. (2 de julio de 2018). *Rhinoceros forums*. Obtenido de NACA series 4 aerofoil generator: <https://discourse.mcneel.com/t/naca-series-4-aerofoil-generator/67173>

Garrettmotion. (15 de agosto de 2019). Obtenido de <https://www.garrettmotion.com/news/newsroom/article/how-to-turbocharge-at-elevation-counteracting-lower-air-density/>

Hillbank Motor Corporation. (20 de noviembre de 2025). Obtenido de What Is a Gurney Flap? Guide to Its Role and Applications: https://www.hillbankusa.com/blog/what-is-a-gurney-flap?utm_source=chatgpt.com

INSST. (2012). Obtenido de Aplicación de resina de poliéster mediante laminado manual: exposición a estireno: <https://www.insst.es/stp/basequim/009-aplicacion-de-resina-de-poliester-mediante-laminado-manual-exposicion-a-estireno-2012>

Justin. (15 de agosto de 2022). *Rhinoceros Forums*. Obtenido de Understanding G0, G2 & G3 In Relation to Curvature Combs/Continuity: https://discourse.mcneel.com/t/understanding-g0-g2-g3-in-relation-to-curvature-combs-continuity/146065?utm_source=chatgpt.com

Kanal, S. (02 de junio de 2025). *Raceteq*. Obtenido de How does a rear wing work and what makes the Formula 2 rear wing unique?: <https://www.raceteq.com/articles/2025/06/how-does-a-rear-wing-work-and-what-makes-the-formula-2-rear-wing-unique>

Karaki, A. A. (2025). Enhancing vehicle performance through the application of airfoils as spoilers with movable trailing edge. *F1000Research*.

Liang, F., & Zhang, L. (2018). Effects of altitude on power performance of commercial vehicles. *Open Access Library Journal*.

Lubri-Press. (2026). Obtenido de TC2000 SUV: <https://lubri-press.com/tc2000-suv/>

Manzini, E. (2015). *Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation*. Cambridge, MA: MIT Press.

Motorheads. (20 de junio de 2024). *Motorheads*. Obtenido de Here's Why Porsche Uses The Swan Neck Rear Wing On Its GT Models: https://www.motorheads.com/features/here-s-why-porsche-uses-the-swan-neck-rear-wing-on-its-gt-models-ar6594/?utm_source=chatgpt.com

Neway 3D. (2026). Obtenido de Prototipado para Aeroespacial y Aviación: <https://www.neway3dp.com/es/solutions/aerospace-and-aviation>

Nguyen, V. (20 de febrero de 2025). *Yanko Design*. Obtenido de Unveiling speed: The art and critique of 2025 Formula 1 liveries: <https://www.yankodesign.com/2025/02/20/unveiling-speed-the-art-and-critique-of-2025-formula-1-liveries/>

Onshape. (19 de marzo de 2026). *Onshape*. Obtenido de Modelado de superficies: https://cad.onshape.com/help/es/Content/PartStudio/surface_modeling.htm

Quiminet. (21 de agosto de 2020). Obtenido de Procesos de fabricación de materiales de Fibra de Vidrio: https://www.quiminet.com/articulos/procesos-de-fabricacion-de-materiales-de-fibra-de-vidrio-4468448.htm?utm_source=chatgpt.com

Rhino 8 Documentation. (2026). Obtenido de Curvature graph: <https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/en-us/commands/curvature.htm#CurvatureGraph>

Rowland, S. (31 de mayo de 2017). *Car Throttle*. Obtenido de The Science Behind Somersault Crashes: Why Aero Is Dangerous: https://www.carthrottle.com/news/science-behind-somersault-crashes-dangerous-aero?utm_source=chatgpt.com

TAC. (2025). Obtenido de <https://tac.ec/all-event/rally-f-f-f-2025/>

Tungurahua Automóvil Club . (2025). Obtenido de <https://tac.ec/all-event/rally-f-f-2025/>

WRCWings. (2018). Obtenido de Aerodynamics of WRC cars sideways: endplates and vertical fins:
<https://www.wrcwings.tech/2018/08/08/aerodynamics-of-wrc-cars-sideways/>

WRCWings. (04 de marzo de 2019). Obtenido de Impact of altitude on the aerodynamics of WRC cars:
<https://www.wrcwings.tech/2019/03/04/impact-of-altitude-on-the-aerodynamics-of-wrc-cars/>

WRCWings. (20 de febrero de 2023). Obtenido de How a Rally1 car's rear wing is designed?: <https://www.wrcwings.tech/2023/02/20/how-a-rally1-cars-rear-wing-is-designed/>

Red Hidrometeorológica de Tungurahua. (2025). Informe anual de variables climáticas, presión atmosférica y regímenes de humedad en la región central del Ecuador. Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua.

Escuela de Rally. (2023). Principios de dinámica vehicular, estabilidad y puesta a punto de apéndices aerodinámicos en superficies cambiantes de alta montaña. Editorial Motorsport Latinoamericana.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2025). Anuario Meteorológico N° 62-2025: Registros de presión atmosférica y densidad del aire en la estación Ambato-Izamba. INAMHI.

Anexos

Anexo 1. Modelo de instrumento

GUÍA DE ENTREVISTA

- **Lugar:** _____
- **Fecha:** ____ / ____ / ____
- **Hora:** _____
- **Nombre del entrevistado:** _____

Tema: Entender los Parámetros de Simulación Computacional (CFD) para el desarrollo de las simulaciones en CFD. ESPECIALISTA EN CFD

Objetivo: Validar mediante el juicio de expertos los parámetros técnicos y criterios de simulación CFD que orienten la construcción del dominio virtual, asegurando que los resultados no tengan errores debidos a una mala configuración del software.

Dimensión: Comportamiento aerodinámico

- ¿Qué valores o rangos indicarían un diseño aerodinámicamente eficiente?
- Más allá del coeficiente de sustentación (CL) y arrastre (CD), ¿qué otras propiedades deseadas (ej. estabilidad del centro de presión, sensibilidad al

cabeceo) considera usted fundamentales para un alerón de competición no homologado?

- ¿Cómo definiría el balance ideal entre la generación de carga y la penalización de peso estructural en un diseño orientado a la eficiencia?

Dimensión: Condiciones de simulación

¿Qué condiciones de frontera son indispensables en la simulación de un alerón?

¿Cómo se determinan las condiciones reales del entorno (ej. velocidad, densidad del aire)?

¿Qué errores son comunes al definir estas condiciones?

Al realizar simulaciones CFD para alta altitud, ¿qué modelos de turbulencia (ej. k-omega SST, Spalart-Allmaras) ofrecen mayor precisión al predecir el comportamiento de un perfil alar en aire de baja densidad?

Dimensión: Mallado y dominio

¿Qué criterios se usan para definir el dominio computacional?

(Opcional) ¿Cómo influye el refinamiento de la malla en la precisión de resultados?

Dimensión: Configuración geométrica

¿Qué variables geométricas influyen más en el rendimiento del alerón?

¿Qué tipo de perfiles son más eficientes en aplicaciones de vehículos de Rally?

Dimensión: Continuidad y calidad superficial

¿Cómo afecta la calidad de la superficie a los resultados aerodinámicos (G_2 , G_3) en este tipo de estudios?

Dimensión: Evaluación de resultados

¿De que manera la selección del material influye en los resultados de simulación?

¿Qué estrategias recomienda para optimizar un diseño aerodinámico?

GUIA DE ENTRVISTA

- **Lugar:** _____
- **Fecha:** ____ / ____ / ____
- **Hora:** _____
- **Nombre del entrevistado:** _____

Tema: Parámetros empíricos para la integración de sistemas aerodinámicos en categorías no homologadas.

Objetivo: Saber qué criterios se consideran fallidas o inviables desde la experiencia técnica a la aplicación de un alerón trasero en vehículos de rally.

Dimensión: Criterios de Diseño

¿Qué toman en cuenta primero al diseñar o modificar un alerón?

¿Cuáles son las variaciones del alerón trasero más comunes?

¿Qué cosas hacen descartar una configuración de alerón?

Dimensión: Configuración Formal

¿Hay elementos que siempre se repiten en los alerones que mejor funcionan?

¿Qué cambios en la forma del alerón son los más habituales?

¿Qué tipos de alerones usan más en autos de rally no homologados?

¿Qué tipo de configuración suele dar mejor estabilidad en rectas y curvas?

Dimensión: Integración con el vehículo

Cuando instalan un alerón más grande o potente, ¿en qué partes del vehículo prefieren sujetarlo para que quede firme y funcione bien?

Cuando el alerón es más exigente o pesado, ¿qué tipo de refuerzos suelen añadir para que no se dañe la carrocería?

Dimensión: Materiales y fabricación

¿Cuál es el material más utilizado y por qué?

¿Cuál es el tipo de soporte más utilizado y por qué?

Dimensión: Pruebas de entorno

En lugares como zonas de montaña o altura, ¿han tenido que hacer cambios en el tamaño o forma del alerón para que funcione mejor?

¿Cuál es el error más común al modificar un alerón?

Ficha de Observación

1. Datos Generales

- **Caso de estudio:** Alerón trasero (Vehículo Peugeot 207 1600 cc, categoría T3)
- **Lugar de observación:** _____
- **Fecha:** ____ / ____ / ____
- **Hora:** _____
- **Observador:** _____

Objetivo: Identificación y registro de las características geométricas y estructurales del alerón trasero en el caso de estudio “(Peugeot 207 1600 cc categoría T3)”.

2. Tipo de Observación: Observación directa, no participante, de carácter abierto.

5. Aspectos a Observar

5.1 Configuración Formal

- Forma general del alerón (recta, curva, compuesta, etc.)
- Proporciones y dimensiones aparentes
- Relación visual con la carrocería

Observaciones: _____

5.2 Disposición y Ubicación

- Posición respecto a la parte trasera del vehículo
- Altura y orientación
- Integración o separación con la estructura del automóvil

Observaciones: _____

5.3 Relación Estética y Funcional

- Coherencia visual con el diseño del vehículo
- Sensación de funcionalidad (deportivo, aerodinámico, decorativo)
- Impacto visual general

Observaciones: _____

6. Registro Gráfico

Firma del Observador: _____

Anexo 2. Evidencia fotográfica



