

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS
AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO
HÍBRIDO BIPLAZA”**

FELIPE HERNÁN MUÑOZ MUÑOZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. CHRISTOPHER COOPER V.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. MAURICIO OSSES A.

NOVIEMBRE – 2019

Agradecimientos

Hay muchas personas a quienes les agradezco el haber llegado a este punto. Primero que todo, está mi familia, mi pilar fundamental, quienes desde que tengo memoria han hecho todo para que yo esté bien. Mi mamá, mi abuelo, mi abuela y mi hermano, quienes siempre han estado a mi lado entregándome su cariño y apoyo incondicional, lo cual me da la fortaleza para poder enfrentar cualquier desafío que se me presentara. Teniendo a ellos respaldándome, siento que nada es imposible.

Agradezco a Rodrigo Rojas Veas, por brindarme oportunidades laborales para poder aprender a ejercer mi carrera realizando prácticas profesionales y por darme las primeras luces de lo que es el mundo laboral.

Agradezco a Lina Campos, dueña de la casa donde viví durante casi toda mi estadía en la universidad. Durante ese tiempo, fue como una abuela más para mí, el cariño que le tomé después de todo este tiempo es inmenso. Agradezco sus consejos de vida, su apoyo en cuanto a materia académica y que siempre haya estado pendiente de mi bienestar. Agradezco que me haya hecho ver las buenas y malas decisiones que tomé y poder aprender de ellas, son grandes detalles que marcan grandes diferencias y dice mucho de su calidad como persona. Agradezco, además, a su familia, que me abrió sus puertas amablemente en aquellos momentos en que yo no tenía a nadie cerca. Entre ellos, agradezco a María Angélica Campos, Hernán Moyano y Loreto Moyano.

Agradezco al equipo USM Zero, quienes me brindaron la oportunidad de trabajar con ellos. Fueron días largos, trabajos hasta la madrugada, pero siempre en un ambiente agradable, de mucho compañerismo y apoyo. Los problemas siempre decantaban en una solución cuando se trabajaba en equipo y eso es lo que más destaco de este grupo, la unión de amistad que se formaba más allá del vínculo académico. Especialmente, agradezco a Alejandro, Luciano y Jorge, con quienes compartí más durante esta experiencia y con quienes trabajé para solucionar de la mejor manera los requerimientos y problemas que surgían en el camino. Su buena voluntad y su disposición para escuchar, trabajar y proponer nuevas ideas será siempre algo a destacar en cuanto a lo que se refiere a trabajo en equipo, además del buen recibimiento que me dieron cuando recién había entrado al equipo.

Agradezco a mi profesor guía, Christopher Cooper, por aceptar el desafío propuesto por USM Zero junto a mí y trabajar en conjunto durante el largo proceso que correspondió a esta memoria, por guiarme a la búsqueda de soluciones y proponerme desafíos, los cuales me permitieron ampliar mi mundo de conocimientos en un área de la ingeniería mecánica que no había explorado en profundidad.

En general, agradezco a todos mis compañeros que alguna vez caminaron a mi lado. El grato ambiente que se formaba en los largos días de estudio, el hecho de tenderme una mano en tiempo difíciles e incluso las juntas que hacíamos por el mero hecho de divertirnos, serán

siempre un grato recuerdo para mí. Cada uno de ustedes forman parte de este título. Aprendí mucho de/con ustedes y estoy seguro de que ustedes también aprendieron mucho de mí. Gracias a todos.

Resumen

La presente memoria trata del desarrollo de la estructura soporte (chasis) de un vehículo híbrido de dos plazas y tres ruedas, que está destinado a participar en una carrera de categoría mundial, y de su comportamiento aerodinámico en base a condiciones externas establecidas. Los responsables de este vehículo forman parte de un grupo de estudiantes llamado USM Zero.

En el desarrollo del trabajo, se aplica una metodología de diseño enfocada en las soluciones eficientes, a fin de optimizar la geometría de la estructura y obtener resultados satisfactorios luego de que se somete a cargas definidas.

A través de un largo proceso iterativo, se logra un modelo conceptual del chasis que debe pasar por una serie de pruebas de análisis estático. Gracias a las herramientas computacionales disponibles hoy en día, se puede predecir eficazmente el comportamiento de la estructura y cómo reacciona a distintos casos de solicitaciones mecánicas, lo cual permite tomar la decisión de materializar el diseño propuesto con la seguridad de que se comportará apropiadamente en base a los requerimientos y condiciones establecidas tanto por la organización de la carrera como personales.

Luego, se toma un diseño propuesto de USM Zero para el carenado y se analiza su comportamiento aerodinámico, aplicando como condiciones de borde las características para las cuales el vehículo ha sido diseñado, mediante simulación computacional. Se evalúan sus coeficientes de arrastre, levante y tendencia al volcamiento en base a ciertas condiciones de viento cruzado.

Finalmente, se sintetizan y analizan los resultados, dejando propuestas de mejora futuras para las venideras generaciones de estudiantes que se aventuren a la continuación del desarrollo del vehículo solar que formó parte de este trabajo.

Abstract

This thesis is about the development of a chassis of a three-roller two-seated hybrid vehicle which is intended to participate in a world class race, and its aerodynamic performance based on external predefined conditions. The people involved in this project are part of a group of students called USM Zero.

In this, a design methodology is applied based on efficient solutions in order to optimize the geometry of the structure, making sure that acceptable results are obtained after the element is loaded.

Through a long iterative process, a conceptual model of the chassis is obtained and must be studied using a static analysis. Thanks to nowadays computational tools, a confident prediction of the reaction of the structure to different scenarios of stress can be made, which makes possible to take appropriate decisions and let the chassis be manufactured without any concern about its performance, based on the personal and imposed requirements by the organization of the race.

Then, a proposed design of the exterior geometry of the vehicle (fairing) is taken to apply an aerodynamic study using the boundary conditions which the vehicle has been designed for. Drag and lift coefficients and the rollover tendency are evaluated in predefined scenarios of cross wind.

Finally, results are synthesized and analyzed in order to provide feedback and improvement proposals for the upcoming generations of students who will accept the challenge to develop a hybrid two-seated vehicle and attempt to modify the structure/fairing to make its performance even better.

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	4
Abstract.....	5
1. Introducción.....	13
1.1. Objetivos.....	14
1.1.1. Objetivo General.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. Contexto	16
2.1. 2011 – Primera Versión.....	18
2.2. 2012 – Segunda Versión.....	18
2.3. 2014 – Tercera Versión	19
2.4. 2016 – Cuarta Versión.....	21
2.5. 2018 – Quinta Versión.....	23
2.6. USM Zero	24
2.7. El desafío	26
3. Marco Teórico	28
3.1. Teoría.....	29
3.1.1. Impacto de la aerodinámica en la forma del vehículo	29
3.1.2. Chasis de un vehículo	37
3.1.3. Carenado de un vehículo	38
3.1.4. Resistencia estática y criterios de falla	39
3.1.5. Conceptos básicos de energía	44
3.1.6. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	48
3.2. Estado del Arte	50
3.2.1. Vehículos solares en el mundo	50
3.2.2. Inicios de la electromovilidad en Chile	58
3.2.3. Diseño de vehículos solares en Chile	60
3.2.4. Aerodinámica en vehículos	63
4. Metodología.....	65

4.1. Criterios de diseño	66
4.1.1. Dimensiones del vehículo.....	66
4.1.2. Habitáculo del ocupante	66
4.1.3. Exigencias.....	66
4.1.4. Sugerencias.....	67
4.1.5. Criterios de diseño propios.....	69
4.2. Metodología de diseño	69
4.2.1. Reconocimiento de una necesidad.....	70
4.3. Análisis estático.....	72
4.3.1. Concepto de chasis	74
4.3.2. Creación del entorno de estudio	77
4.3.3. Simulación estática.....	80
4.4. Análisis aerodinámico	83
5. Resultados.....	99
5.1. Resultados del análisis estático.....	100
5.1.1. Caso 1. Toda la carga en solo un nodo superior.....	100
5.1.2. Caso 2. Toda la carga en un solo nodo inferior.....	101
5.1.3. Caso 3. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco trasera.....	103
5.1.4. Caso 4. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco delantera.....	104
5.1.5. Caso 5. Carga distribuida a lo largo de uno de los arcos superiores.	105
5.1.6. Caso 6. Carga distribuida en ambos arcos superiores.	107
5.1.7. Caso 7. Carga distribuida en toda la parte superior de la estructura.	108
5.1.8. Caso 8. Impacto lateral.	110
5.1.9. Caso 9. Impacto frontal.	111
5.1.10. Resultado general	113
5.2. Resultados del análisis aerodinámico.....	113
5.2.1. Resultados de los coeficientes de arrastre y levante.....	113
5.2.2. Perfiles de velocidad y presión.....	114
5.2.3. Resultados del umbral de vuelco	119
6. Conclusiones.....	121

7. Referencias 125

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Recorrido de la primera versión de la Carrera Solar Atacama.	18
Ilustración 2. Recorrido de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama.	19
Ilustración 3. Recorrido de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama.	20
Ilustración 4. Recorrido de la cuarta versión de la Carrera Solar Atacama.	21
Ilustración 5. Recorrido de la quinta versión de la carrera solar atacama.	22
Ilustración 6. Recorrido de la sexta versión de la Carrera Solar Atacama.....	23
Ilustración 7. Modelo CAD del chasis sobredimensionado.	26
Ilustración 8. Gráfico del aumento de la velocidad con respecto a los años. Fuente: J. Katz, Race Car Aerodynamics - Designing for Speed, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.....	32
Ilustración 9. Gráfico que muestra los resultados del experimento empírico que se hizo para determinar el comportamiento de la curva de arrastre y resistencia a la rodadura. Fuente: J. Katz, Race Car Aerodynamics - Designing for Speed, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.	33
Ilustración 10. Gráfica de la teoría de falla de Mohr-Coulomb frágil para estados de esfuerzo plano. S_t y S_c representan los esfuerzos últimos en tensión y en compresión, respectivamente. Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 8va Ed.	42
Ilustración 11. Datos de la fractura biaxial de hierro fundido gris comparados con varios criterios de falla. Fuente: Dowling N. E., Mechanical Behavior of Materiales, 2nd Ed., 1999.	43
Ilustración 12. Diagrama de flujo para la selección te teorías de falla. Fuente: https://teoriadefalla.wordpress.com	44
Ilustración 13. Promedio anual de la radiación horizontal diaria de Chile. Fuente: www.nrel.gov	47
Ilustración 14. La Dinámica de Fluidos Computacional está compuesta por tres tipos de ciencias.....	49
Ilustración 15. Diseño CAD de un vehículo solar monoplaza.	56
Ilustración 16. Diseño propuesto simplificado para el chasis, presente en las bases de la carrera. Fuente: http://www.carrerasolar.com	68
Ilustración 17. Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones entre sus etapas.....	70
Ilustración 18. Las características, limitaciones y especificaciones del objeto a diseñar son los factores necesarios para lograr un diseño que cumpla con los requerimientos.	71
Ilustración 19. Barra horizontal.	79
Ilustración 20. Nuevo sistema de coordenadas luego de la rotación en torno al eje z.....	92
Ilustración 21. Vista lateral del vehículo mostrando su fuerza vertical (peso).....	92
Ilustración 22. Distancia lateral desde el centro de gravedad CG al eje de volcamiento (rollover axis).	94
Ilustración 23. Vectores de velocidad axial y transversal del vehículo en movimiento.	98

Índice de imágenes

Imagen 1. Copa de la Carrera Solar 2018. Abajo están adheridas las placas con los nombres de los ganadores anteriores.....	17
Imagen 2. Vehículo monoplaza de tres ruedas que participó en la carrera Desafío Cero. ...	24
Imagen 3. Vehículo monoplaza de tres ruedas que participó en la carrera Desafío Cero. ...	25
Imagen 4. Vehículo biplaza (izquierda) y monoplaza (derecha) que participaron en la carrera Desafío Cero.	25
Imagen 5. Prototipo funcional del vehículo híbrido.	27
Imagen 6. 1993 Marlboro Penske PC22 Indy Car, auto que ganó la Indy 500 en 1993.	29
Imagen 7. 1916 Peugeot, ganador de la Indy 500 de aquel año.	30
Imagen 8. Granja de paneles fotovoltaicos.....	48
Imagen 9. Sun-Mobile.	51
Imagen 10. Modelo del vehículo vintage de 1912.....	52
Imagen 11. Bluebird.	53
Imagen 12. Vehículo solar desarrollado en Israel.	53
Imagen 13. Vehículo solar de carreras de Hans Tholstrup y Larry Perkins.	54
Imagen 14. Vehículo Solar Sunrunner.	55
Imagen 15. Venturi Astrolab, un vehículo solar comercial capaz de llegar a los 120 [km/h].	55
Imagen 16. Sunraycer. Ganador de la primera versión de la World Solar Challenge en 1987, Australia. Fuente: http://www.aurorasolarcar.com	56
Imagen 17. Honda Dream. Vehículo solar ganador del World Solar Challenge en 1996, celebrado en Australia. Fuente: http://www.aurorasolarcar.com	57
Imagen 18. ELF. Desarrollado por Organic Transit, empresa estadounidense. Monta baterías y un panel fotovoltaico en su techo. Fuente: https://electrek.co	57
Imagen 19. Competencia Fórmula i, 2004.	58
Imagen 20. Prototipo USM 2006.....	59
Imagen 21. Competencia 2013, Desafío Cero. Fuente: www.larutasolar.com	60
Imagen 22. Boceto del concepto de chasis, producto de una lluvia de ideas con el equipo de USM Zero.	75
Imagen 23. Primer acercamiento del diseño del chasis.	76
Imagen 24. Diseño final del chasis. Antes de llegar a este modelo, se pasó por una larga etapa iterativa.	77
Imagen 25. Una gran cantidad de elementos lineales (barras) componen la estructura de una grúa.	78
Imagen 26. Chasis del vehículo seccionado en elementos lineales.	80
Imagen 27. Vista frontal del chasis, en Maestranza Lourdes.	82
Imagen 28. Vista lateral del chasis, en Maestranza Lourdes.....	83
Imagen 29. Modelo tridimensional del carenado del vehículo.....	85
Imagen 30. Vista lateral del volumen de control que envuelve a la geometría del vehículo.	86

Imagen 31. Vista isométrica del volumen de control que envuelve a la geometría del vehículo.	86
Imagen 32. El mallado realizado en el volumen de control y en la geometría del vehículo.	87
Imagen 33. Vehículo CAD con puertas, sin cubierta de ruedas.	89
Imagen 34. Vehículo CAD sin puertas, con cubierta de ruedas.	89
Imagen 35. Vehículo CAD con puertas y con cubierta de ruedas.	90
Imagen 36. Vista frontal del volumen de control que contiene al vehículo. Se puede ver que el vehículo está girado a su derecha en un ángulo definido.	97
Imagen 37. Resultados de la simulación para el Caso 1.	101
Imagen 38. Resultados de la simulación para el Caso 2.	102
Imagen 39. Resultados de la simulación para el Caso 3.	103
Imagen 40. Resultados de la simulación para el Caso 4.	105
Imagen 41. Resultados de la simulación para el Caso 5.	106
Imagen 42. Resultados de la simulación para el Caso 6.	108
Imagen 43. Resultados de la simulación para el Caso 7.	109
Imagen 44. Resultados de la simulación para el Caso 8.	111
Imagen 45. Resultados de la simulación para el Caso 9.	112

Índice de Tablas

Tabla 1. Ganadores de la primera versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría. ..	18
Tabla 2. Ganadores de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría. .	19
Tabla 3. Ganadores de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría. ...	20
Tabla 4.. Ganadores de la cuarta versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría. ...	22
Tabla 5. Ejemplos de coeficientes de arrastre y levante para distintas geometrías. Fuente: J. Katz, Race Car Aerodynamics - Designing for Speed, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.	34
Tabla 6. Ventajas y desventajas de la energía solar.	46
Tabla 7. Algunas memorias relacionadas al desarrollo de vehículos solares en Chile.	63
Tabla 8. Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36. Fuente: http://www.acerosotero.cl	72
Tabla 9. Comparación del tiempo de análisis para los distintos tipos de modelos de cálculo.	79
Tabla 10. Información del mallado arrojada por ANSYS.	87
Tabla 11. Magnitudes del viento cruzada y los respectivos ángulos que resultan del triángulo de la Ilustración 21.	98
Tabla 12. Resultados entregados por Inventor del análisis estático.	113
Tabla 13. Resultados de los coeficientes de arrastre y levante, así como las magnitudes de sus fuerzas, datos entregados por Fluent.	114
Tabla 14. Resultados del análisis de estabilidad lateral del vehículo para distintas condiciones de viento cruzado.	120

1. Introducción

El presente trabajo se enmarca en un evento mundial, concretamente en una carrera de vehículos impulsados principalmente por energía solar: la Carrera Solar Atacama. Dicho evento es organizado por La Ruta Solar, una ONG chilena sin fines de lucro que busca innovar en experiencias que promuevan la cultura solar como forma de energía sustentable.

Al ser un evento de carácter mundial, es común ver distintas organizaciones estudiantiles provenientes de distintas partes del mundo arribar para formar parte de la competencia, incluso fuera de las fronteras de América Latina.

Estas organizaciones desarrollan vehículos con las prestaciones y características solicitadas por el evento de manera integral, siendo necesario un trabajo riguroso a fin de crear un vehículo competitivo. Es por esto que los cálculos se hacen estrictamente necesarios si lo que se busca es aumentar las capacidades de desempeño del vehículo, tales como los que se abordan en el presente trabajo: un análisis estático que permita verificar la integridad estructural del chasis de un vehículo, optimizando el uso de materiales y el espacio interior disponible; y un análisis aerodinámico que revele el comportamiento del vehículo en movimiento y que, a su vez, permita incorporar mejoras para aumentar aún más el desempeño del vehículo en la carrera.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Diseñar un chasis lo suficientemente resistente, pero a la vez liviano y que optimice los espacios, a fin de construir un vehículo lo más ligero posible y, seguidamente, analizar su comportamiento aerodinámico y proponer mejoras con respecto a esto último.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Hacer un análisis estructural del prototipo funcional del chasis confeccionado anteriormente por USM Zero: un chasis sobredimensionado y evaluar opciones de mejora.
- Rediseñar un chasis para un vehículo híbrido biplaza de tres ruedas impulsado por energía solar y mecánica (tracción humana mediante pedales) cumpliendo con los requerimientos de los organizadores de la carrera y las consideraciones obtenidas del punto anterior, de modo que todos los componentes del vehículo queden correctamente fijados.

- Hacer un análisis estructural del chasis rediseñado para asegurar la seguridad de los ocupantes. Por requerimiento, debe ser capaz de soportar hasta cuatro veces su propio peso.
- Aplicar las correcciones correspondientes obtenidas del análisis estructural, confeccionar los planos y enviarlos a una maestranza para permitir su fabricación.
- Analizar el comportamiento aerodinámico del carenado propuesto por USM Zero para el chasis mediante software de elementos finitos.
- Aplicar correcciones que permitan obtener un mejor desempeño del vehículo ante condiciones de alta velocidad, especialmente coeficiente de arrastre, levante.
- Evaluar resultados finales y proponer mejoras a largo plazo para futuros eventos.

2. Contexto

La Ruta Solar comprende desafíos que van principalmente apuntados a estudiantes de colegios y universidades. La primera carrera se llevó a cabo el 2011 e invitaba a los participantes a diseñar, construir y conducir vehículos solares.

Es la primera carrera de vehículos solares de América Latina y se realiza en el desierto más árido del mundo, el Desierto de Atacama, que cuenta con los niveles más altos de radiación acompañado de un impresionante paisaje.

El lanzamiento oficial de la primera carrera en América Latina fue realizado en octubre de 2009, en un evento denominado el Salón del Automóvil, liderado por Leandro Valencia, director de la ONG La Ruta Solar.



Imagen 1. Copa de la Carrera Solar 2018. Abajo están adheridas las placas con los nombres de los ganadores anteriores.

La carrera ha contado con diversas versiones después de su fundación. Precisamente, se ha llevado a cabo los años 2011, 2012, 2014, 2016 y 2018 y entre los ganadores se encuentran tanto equipos chilenos como extranjeros.

2.1. 2011 – Primera Versión

La primera vez que se corrió esta carrera fue el año 2011, en un circuito cuyo recorrido total era de 1060 [km].



Ilustración 1. Recorrido de la primera versión de la Carrera Solar Atacama.

Categoría	Equipo Ganador
Evolución	Antakari – U. La Serena y Minera Los Pelambres
Híbrida	Los Andes Mining Parts Team

Tabla 1. Ganadores de la primera versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría.

2.2. 2012 – Segunda Versión

La segunda edición de esta carrera se llevó a cabo en un circuito diferente, esta vez de 1200 [km].

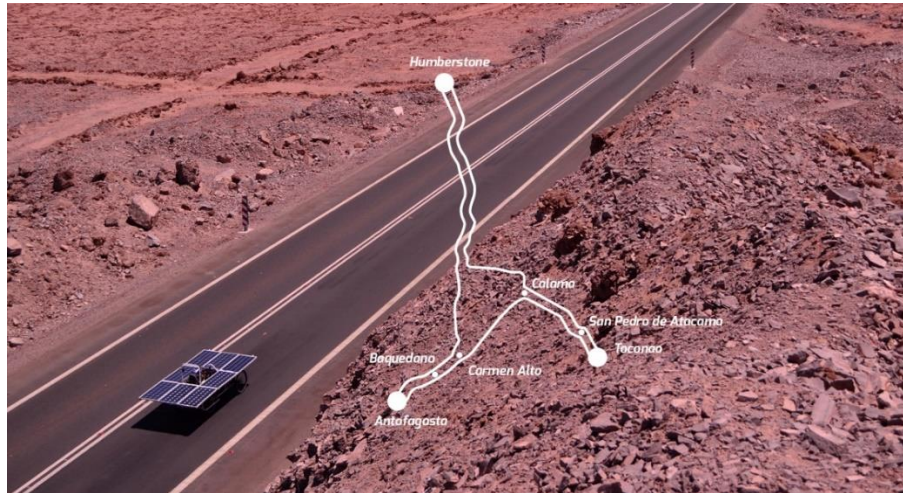


Ilustración 2. Recorrido de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama.

Categoría	Equipo Ganador
Evolución	Antakari – U. La Serena y Minera Los Pelambres
Híbrida	ACAPOMIL – Academia Politécnica Nacional

Tabla 2. Ganadores de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría.

2.3. 2014 – Tercera Versión

Para esta edición, se dejó un espacio de tiempo de dos años para la parte logística y el desarrollo de los vehículos desde la carrera anterior y el recorrido fue cambiado a uno de 1400 [km].

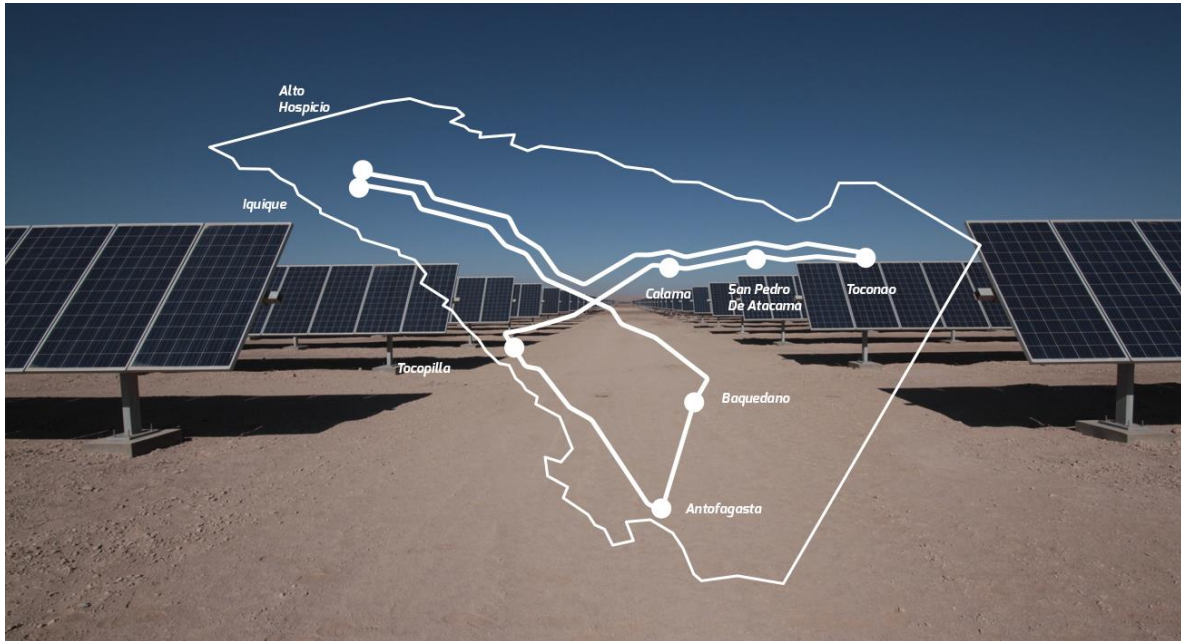


Ilustración 3. Recorrido de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama.

Categoría	Equipo Ganador
Evolución	Tokai – Japón
Híbrida	Geminis Eco Racing – Chile

Tabla 3. Ganadores de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría.

2.4. 2016 – Cuarta Versión

La cuarta edición de la carrera tuvo algunos cambios significativos. En primer lugar, la nueva ruta tuvo una extensión de 2300 [km], mucho mayor a la cifra de la carrera anterior. En segundo lugar, las categorías Evolución e Híbrida tuvieron rutas diferentes desde Iquique hasta Diego de Almagro. Y en tercer lugar, hubo un cambio en la normativa Híbrida en que se eliminaron los paneles solares en los autos, reemplazándolos por estaciones de carga solar externas.

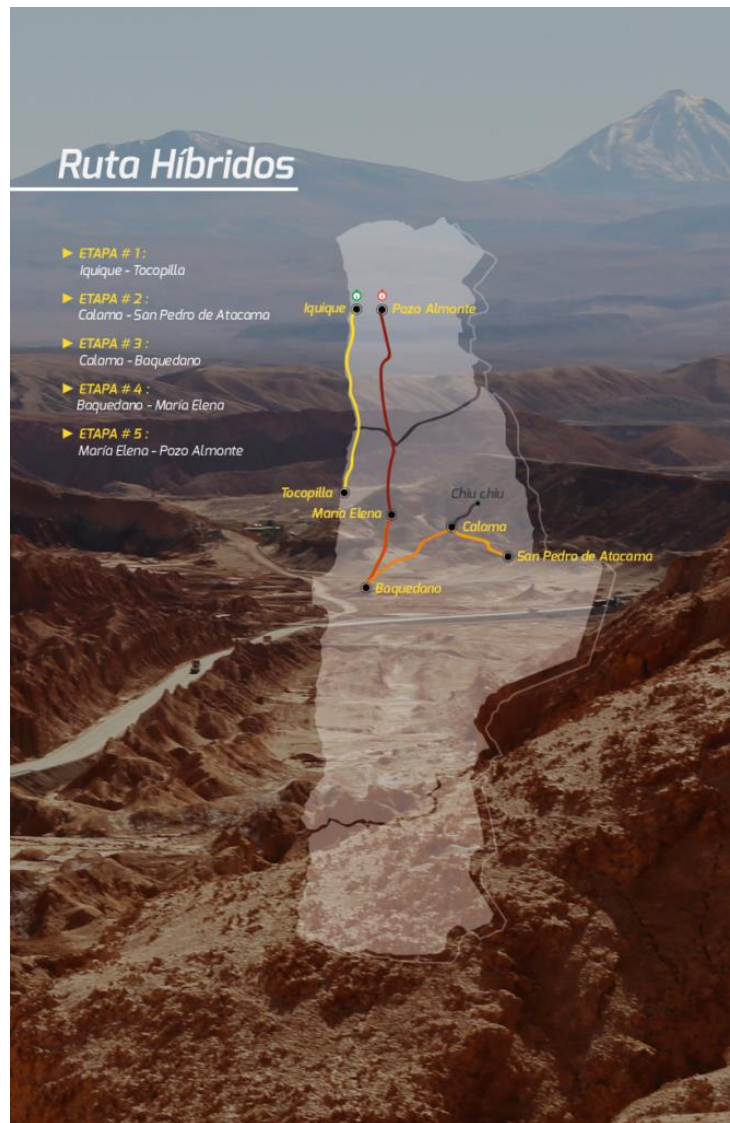


Ilustración 4. Recorrido de la cuarta versión de la Carrera Solar Atacama.



Ilustración 5. Recorrido de la quinta versión de la carrera solar atacama.

Categoría	Equipo Ganador
Evolución	Solar Ka Antü Newen – Universidad de Concepción
Híbrida	Equipo Bolivia

Tabla 4.. Ganadores de la cuarta versión de la Carrera Solar Atacama, según categoría.

2.5. 2018 – Quinta Versión

De forma llamativa, esta vez la carrera da inicio en Santiago y cruza todo el norte de Chile hasta llegar a Arica, abarcando un tramo de aproximadamente 2600 [km]. Es, hasta ahora, la carrera solar más larga y difícil realizada en el país. La categoría Evolución pasa a llamarse Solar y presenta una nueva variante: Cruiser (para más de un ocupante) que se suma a la, ahora llamada, CGE Challenger (para un ocupante). Por otro lado, la categoría Híbrida también se divide en dos subcategorías: la SQM Monoplaza (para un ocupante) y la Biplaza (para dos ocupantes).



Ilustración 6. Recorrido de la sexta versión de la Carrera Solar Atacama.

2.6. USM Zero

La carrera necesita de un vehículo, y es USM Zero la organización que acepta el desafío de desarrollarlo.

USM Zero es un equipo multidisciplinario de alumnos de diferentes carreras y sedes de la Universidad Técnica Federico Santa María, reunidos con la finalidad de generar innovación en torno a las energías renovables, principalmente por medio de la electromovilidad, integrando, desarrollando y validando componentes aptos para la aplicación de las tecnologías en las condiciones geográficas en se determinen.

El año 2013, USM Zero se coronó como ganador de Desafío Cero, una carrera realizada en el plano local por la ONG La Ruta Solar, que recorría Farellones, Valparaíso y Santiago y en la cual destacaba la presencia de distintos colegios y universidades del país.



Imagen 2. Vehículo monoplaza de tres ruedas que participó en la carrera Desafío Cero.



Imagen 3. Vehículo monoplaza de tres ruedas que participó en la carrera Desafío Cero.



Imagen 4. Vehículo biplaza (izquierda) y monoplaza (derecha) que participaron en la carrera Desafío Cero.

2.7. El desafío

El problema es planteado como un desafío. Todo inicia con la solicitud, por parte del equipo de USM Zero, para rediseñar un chasis de un vehículo híbrido biplaza de tres ruedas a partir de otro diseño de chasis, previamente confeccionado por ellos, el cual está sobredimensionado.

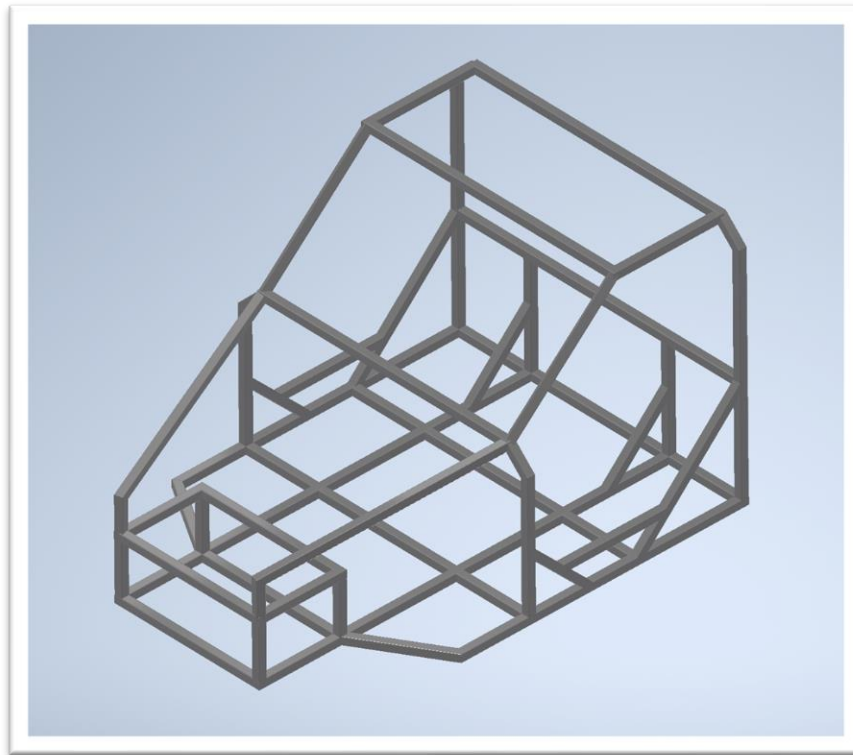


Ilustración 7. Modelo CAD del chasis sobredimensionado.



Imagen 5. Prototipo funcional del vehículo híbrido.

Este chasis formó parte del modelo funcional del vehículo, es decir, sobre el cual se probaron otros componentes tanto mecánicos como eléctricos. Básicamente su función era soportar dichos componentes para evaluar su desempeño, lo que significa que no había un estudio riguroso de ingeniería en su diseño, de ahí el que estuviera sobredimensionado. Su masa es de aproximadamente 84 [kg] y lo que se pretende es reducirla la mayor cantidad dentro de lo posible.

La necesidad de cambiar el diseño del chasis nace desde su razón de ser: correr y ganar una carrera. Esto significa que se busca es optimizar el uso de la energía y para ello, el vehículo debe ser lo más ligero posible para que el motor requiera de menos trabajo para moverlo, de forma que se vuelva más eficiente y rápido.

Por otro lado, y para hacer del vehículo aún más eficiente, lo que se busca es hacer un estudio aerodinámico de su carenado, que pueda validar un buen comportamiento del vehículo bajo las condiciones en las que se moverá garantizando un óptimo uso de la energía que produce por medio de los pedales y de los paneles solares.

3. Marco Teórico

3.1. Teoría

3.1.1. Impacto de la aerodinámica en la forma del vehículo

Para explicar mejor este apartado, se presenta el siguiente ejemplo con dos vehículos de carreras.



Imagen 6. 1993 Marlboro Penske PC22 Indy Car, auto que ganó la Indy 500 en 1993.



Imagen 7. 1916 Peugeot, ganador de la Indy 500 de aquel año.

Ambos vehículos tienen un gran elemento en común: fueron diseñados y construidos para ganar la carrera más grande de la época, la Indy 500, celebrada anualmente en Indianápolis, estado de Indiana, Estados Unidos. El propósito de existir de ambos vehículos es totalmente en desmedro del hecho de que hayan sido desarrollados en espacios de tiempo bastante alejados. Sus formas geométricas son bastante diferentes entre sí y la razón de ello es la importancia que se le dio a los detalles de diseño en base al flujo de aire (*streamlining*) en el auto más moderno. No obstante, haciendo una observación del Peugeot de 1916, se puede ver que incluso al inicio del siglo la reducción del arrastre aerodinámico ya era una preocupación mayor.

El *streamlining*, entonces, se vuelve bastante importante si lo que se busca es mover al vehículo lo más fácilmente posible a través del aire (menor arrastre = mayor velocidad) pero la más grande diferencia en la apariencia del más reciente vehículo de carreras es el foco en usar su cuerpo y sus alerones para crear carga aerodinámica, o, dicho de otra manera, levante aerodinámico negativo.

Podría parecer que las cargas generadas por el movimiento del aire no son importantes, especialmente en el rango de velocidades encontradas por automóviles de uso urbano. Sin embargo, basta extender la mano afuera de una de las ventanas del vehículo mientras éste se mueve a alta velocidad para sentir la magnitud de las fuerzas ejercidas por el aire.

Para entender cómo las fuerzas aerodinámicas de gran magnitud son originadas, una típica sección transversal de un ala de avión se muestra como ejemplo. Asíumase que se mueve desde derecha a izquierda.

Pero como era de esperar, este levante no viene gratis. Cuando el ala genere levante, también creará *arrastre*, el cual corresponde a la fuerza que resiste el movimiento. El arrastre es,

usualmente, mucho más pequeño que el levante y puede ser reducido mediante el *streamlining* del vehículo (diseñando una superficie externa suave). Cualquier mejora que se le haga al arrastre del vehículo repercute en su desempeño, lo cual conlleva el ahorro de combustible, mayores velocidades, aceleraciones, etc. Es por esa razón que el arrastre es tan importante en la industria automovilística.

Es importante, además, nombrar a otra fuerza presente en un vehículo en movimiento. Esta fuerza es comúnmente ignorada por los conductores comunes y corrientes, pero aquellos que han experimentado muy altas velocidades han notado, con toda seguridad, que se vuelve más importante mantener la atención en que el vehículo se mueva en línea recta. Esta inestabilidad es normalmente causada por el levante, en el cual en vehículos de pasajeros será mayor en las ruedas traseras que en las frontales. La tercera fuerza de la que se habla es la *fuerza lateral* y es igualmente importante como el levante y el arrastre. Sin embargo, con vientos laterales relativamente bajos, esta fuerza suele perder relevancia frente a las otras dos. Cuando el vehículo se encuentra girando, es decir, tomando una curva, a esa fuerza lateral se le añade la componente de la fuerza centrífuga, lo que hace al vehículo mucho más inestable, de ahí que a mayores velocidades se busque una conducción en línea recta. En este caso, la fuerza lateral toma una importancia crucial en el análisis aerodinámico. El *umbral de vuelco* del vehículo es analizado al final de este trabajo.

Entonces, para un auto de carreras, lo que se busca es reducir su arrastre y levante o incluso generar levante negativo (carga aerodinámica). En diseño de autos de carreras, el arrastre es secundario. Es la creación de carga aerodinámica lo que va al frente en cuanto a prioridades debido a que aumenta la habilidad de los neumáticos a tomar curvas sin perder agarre.

Históricamente, el mayor salto en velocidad ocurrió el año 1972 con el primer uso eficiente de los alerones frontales y traseros.

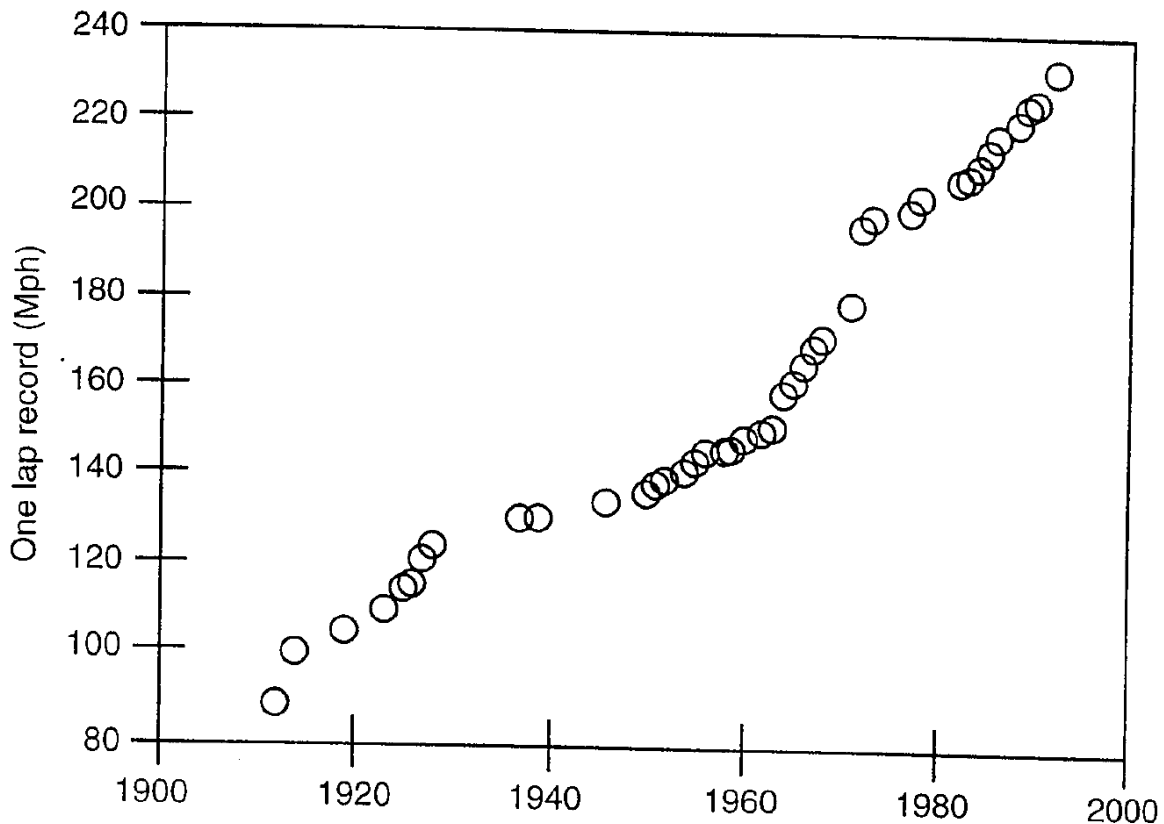


Ilustración 8. Gráfico del aumento de la velocidad con respecto a los años. Fuente: J. Katz, Race Car Aerodynamics - Designing for Speed, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.

Interesantemente, la fuerte influencia de la aerodinámica en autos de carreras fue inmediatamente reconocida por las organizaciones de carreras, y muchas de sus limitaciones con respecto a la velocidad estaban basadas en fijar condiciones de uso y tamaño de dispositivos aerodinámicos tales como alerones invertidos.

La idea básica de definir coeficientes adimensionales para el levante y el arrastre es que el valor de estos coeficientes será independiente de la velocidad y tendrá relación sólo con la forma geométrica del vehículo. Por ejemplo, un experimento realizado a un vehículo para representar sus fuerzas de arrastre producto del roce con el suelo y contra el aire a diferentes velocidades se presenta en el siguiente gráfico.

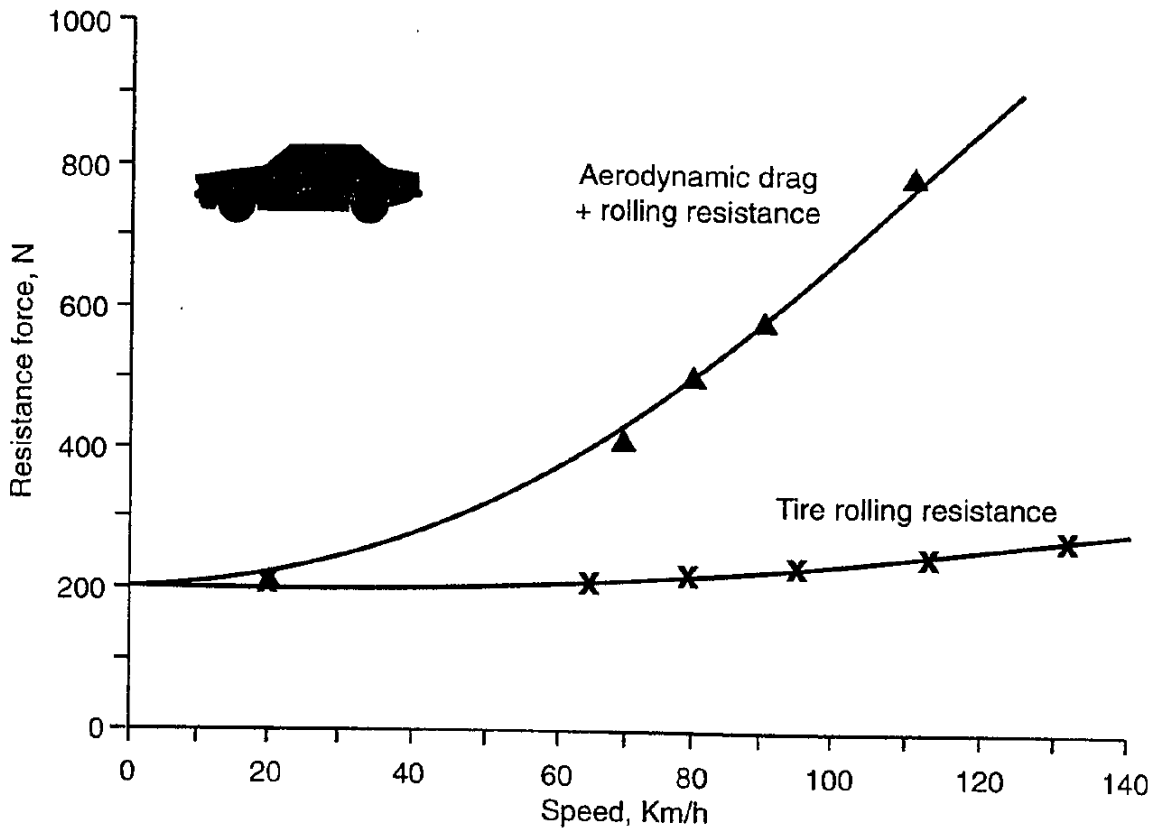


Ilustración 9. Gráfico que muestra los resultados del experimento empírico que se hizo para determinar el comportamiento de la curva de arrastre y resistencia a la rodadura. Fuente: J. Katz, *Race Car Aerodynamics - Designing for Speed*, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.

Se nota el importante efecto del arrastre aerodinámico y cómo incrementa de forma parabólica, lo que indica que la carga aerodinámica aumenta al cuadrado de la velocidad. Los triángulos del gráfico representan los datos medidos.

Se definen, entonces, los coeficientes de arrastre C_D y levante C_L .

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (2)$$

Donde,

ρ es la densidad del aire.

V_∞ es la velocidad del vehículo.

A es el área referencial que está en contacto directo con el aire que impacta al vehículo.

D es la fuerza de arrastre.

L es la fuerza de levante.

En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de coeficientes de levante y arrastre para distintos tipos de formas geométricas.

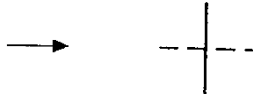
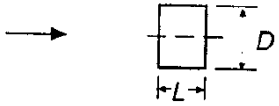
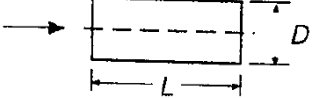
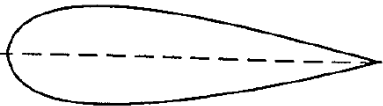



			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Tabla 5. Ejemplos de coeficientes de arrastre y levante para distintas geometrías. Fuente: J. Katz, *Race Car Aerodynamics - Designing for Speed*, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.

La gota es la forma geométrica más aerodinámica que existe, con un pequeñísimo coeficiente de arrastre de 0.04, mientras que un auto de carreras tipo Fórmula 1 tiene un elevado valor de 0.75, precio que debe pagar para lograr carga aerodinámica (un valor negativo de coeficiente de levante).

3.1.1.1. Incidencia del Número de Reynolds en las Fuerzas de Arrastre y Levante

El Número de Reynolds Re se define mediante:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (3)$$

Donde V y L son la velocidad característica del flujo y la longitud característica del sistema, respectivamente. La segunda forma de Re ilustra la razón de la viscosidad dinámica μ con respecto a la densidad ρ , la cual es llamada viscosidad cinemática.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

D (drag) y L (lift), como indican sus fórmulas, no son constantes y varían en función de la velocidad, la dirección del flujo, la posición del objeto, su tamaño, la densidad del fluido y, si aplica el caso de estudio, la viscosidad de este. Estas variables se relacionan entre sí mediante Re , por lo que D y L son funciones de Re .

3.1.1.2. Ecuaciones que describen un fluido

El flujo de aire sobre un vehículo obedece ciertas reglas básicas de la física, entre las cuales están la conservación de masa y momento. Ambas ecuaciones están representadas por las ecuaciones de Navier-Stokes para describir el movimiento de un fluido.

La primera ecuación dice que la masa del fluido se conserva. A menudo se le llama la ecuación de continuidad y está definida, en su forma simplificada, por

$$\dot{m}_1 = \rho_1 V_1 A_1 \quad (5)$$

$$\dot{m}_2 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (6)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (7)$$

Donde el flujo de densidad ρ_1 entra por un área A_1 a una velocidad V_1 y sale por un área A_2 , a una velocidad V_2 y con una densidad ρ_2 .

La segunda ecuación corresponde a la conservación de momento, que se expresa como sigue

$$\sum F = \frac{d}{dt}(mV) \quad (8)$$

Aquí, $\sum F$ representa la sumatoria de todas las fuerzas actuando, mientras que $\frac{d}{dt}$ corresponde a la derivada (cambio) en el tiempo. Si se aplica esta ecuación a un cierto volumen de fluido VF se tiene que

$$\frac{d}{dt} \iiint_{VF} \rho \cdot \mathbf{V} dV = \iiint_{SF} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_{VF} \rho \cdot \mathbf{f}_m dV \quad (9)$$

Donde:

$\boldsymbol{\tau}$ es el vector de fuerzas que el fluido ejerce sobre la superficie.

\mathbf{f}_m es el vector de fuerzas de volumen o másicas. Son fuerzas aplicadas a todo el volumen (gravedad e inercia).

Finalmente, para aplicar dicha ecuación a un volumen de control VC usando el Teorema del Transporte de Reynolds, se obtiene

$$\frac{d}{dt} \iiint_{VC} \rho \cdot \mathbf{v} dV + \iint_{SC} \rho \cdot \mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \iiint_{SC} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_{VC} \rho \cdot \mathbf{f}_m dV \quad (10)$$

Esta ecuación está representada vectorialmente y, por lo tanto, se van a tener tres ecuaciones escalares aplicadas cada una sobre un eje en el espacio.

Las ecuaciones planteadas anteriormente pueden describir el movimiento de un fluido cuando éste está sujeto a ciertas condiciones de borde. No todos los problemas pueden ser abordados sólo con esta información puesto que la mecánica de fluidos es un área bastante transversal que involucra variables de diversas ciencias con una gran cantidad de datos para el problema en específico, por lo que no deben ser consideradas como ecuaciones absolutas¹. Estas ecuaciones, incluso, dados ciertos problemas y condiciones de borde, no será posible obtener una solución analítica para ellas, por lo que se hace necesario aproximar una solución mediante métodos numéricos. Es ahí donde entra en juego la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

3.1.2. Chasis de un vehículo

El chasis corresponde a la estructura interna encargada de aportar sostén, rigidez y forma al vehículo en cuestión. Mediante una comparación simple, se puede decir que cumple la misma función que el esqueleto de los animales vertebrados. Se trata de un armazón, generalmente fabricado en hierro, aleaciones de acero o algún metal similar que ofrezca buenas prestaciones en términos de dureza, que integra y da soporte a todos y cada uno de los componentes mecánicos que forman parte del vehículo, desde los ejes hasta el sistema de suspensión de las ruedas, motor y carrocería.

El chasis de un vehículo tiene, además, otra función igual o más importante que guarda relación con la seguridad de las personas que viajan dentro de él. Y es que, además, de estar pensado para dar sujeción a los componentes mecánicos, debe cumplir la función de absorber de la mejor manera posible los impactos y evitar la deformación. De este modo, cuanto más rígido y resistente resulte, más seguros se sentirán los pasajeros, ya que menos probabilidades habrá de que el habitáculo sufra alguna contingencia en caso de accidente. Por lo anterior, el chasis se considera un elemento crucial en un automóvil, en el cual debe existir estudio e ingeniería aplicada para garantizar su correcto funcionamiento bajo condiciones desfavorables (colisiones).

3.1.3. Carenado de un vehículo

El carenado corresponde al revestimiento externo montado sobre el chasis del vehículo en cuestión. Diversos materiales pueden ser utilizados para su construcción, tales como fibra de vidrio, fibra de carbono, plástico u otros materiales como aleaciones de aluminio, etc. Su fin es principalmente aerodinámico, aunque también estético y funcional, como lo es la protección ante los fenómenos meteorológicos tanto de los componentes internos del vehículo como de los ocupantes.

3.1.4. Resistencia estática y criterios de falla

Idealmente, cuando se diseña cualquier elemento de máquina, el ingeniero debe tener a su disposición los resultados de una gran cantidad de pruebas de resistencia del material elegido mediante ensayos de laboratorio. Cuando estos datos están disponibles para propósitos de diseño, el ingeniero puede estar seguro de que está haciendo el mejor trabajo de ingeniería².

Una falla se describe como la pérdida de funcionalidad de una pieza mecánica, la cual puede ser producida por deformación permanente, agrietamiento o ruptura.

No existe una teoría universal de falla para un caso general de las propiedades del material y el estado de esfuerzo, sino que, en su lugar, existen hipótesis que han sido validadas a lo largo de los años que conducen a prácticas aceptadas en la actualidad. Dichas prácticas se aceptan como teorías.

El comportamiento del metal estructural se clasifica de manera típica como dúctil o frágil, aunque bajo condiciones especiales, un material considerado normalmente como dúctil puede fallar de una manera frágil. Normalmente, los materiales se clasifican como dúctiles cuando su deformación $\varepsilon_f \geq 0.05$ y cuando tienen una resistencia a la fluencia identificable que a menudo es la misma en compresión que en tensión. Por otro lado, los materiales frágiles, $\varepsilon_f \leq 0.05$, no presentan una resistencia a la fluencia identificable y típicamente se clasifican por resistencias últimas a la tensión y compresión. Las teorías generalmente aceptadas son:

- Materiales dúctiles (criterios de fluencia)
 - Esfuerzo Cortante Máximo
 - Energía de Distorsión
 - Mohr Coulomb Dúctil

- Materiales frágiles (criterios de fractura)
 - Esfuerzo Normal Máximo
 - Mohr Coulomb Frágil
 - Mohr Modificada

3.1.4.1. Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo

Esta teoría establece que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una pieza de ensayo a tensión del

mismo material cuando esa pieza comienza a fluir. Básicamente, se reduce a la siguiente ecuación:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{2n} \quad (11)$$

Donde

$\tau_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo cortante máximo.

S_y es el esfuerzo de fluencia de la pieza.

n es el factor de seguridad.

3.1.4.2. Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles

Esta teoría predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia de fluencia en tensión o en compresión del mismo material. Básicamente establece que

$$\left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right)^{1/2} \geq S_y \quad (12)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 representan los esfuerzos principales.

Esta teoría establece, además, que la resistencia a la fluencia cortante S_{sy} es

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (13)$$

La cual es de alrededor de 15% mayor que el valor $\frac{S_y}{2}$ predicho por la teoría del Esfuerzo Cortante Máximo.

3.1.4.3. Teoría del esfuerzo normal máximo para materiales frágiles

Esta teoría estipula que la falla ocurre cuando uno de los tres esfuerzos principales es igual o excede la resistencia.

$$\sigma_{\text{máx}} \geq \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (14)$$

3.1.4.4. Teoría de Mohr-Coulomb

En el caso de los materiales frágiles, se tienen en cuenta las resistencias últimas del material en tensión (S_{ut}) y en compresión (S_{uc}) en lugar de los esfuerzos de fluencia, como es el caso de los materiales dúctiles.

La ecuación de la línea de falla cuando $\sigma_1 > 0 > \sigma_3$ resulta ser

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = 1 \quad (15)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales, ordenados de forma que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

En los otros casos, la falla se dará cuando

$$\sigma_1 = S_{ut} \quad , \quad \text{cuando } \sigma_1 > \sigma_3 > 0 \quad (16)$$

$$\sigma_3 = -S_{uc} \quad , \quad \text{cuando } \sigma_1 > \sigma_3 > 0 \quad (17)$$

En el plano $\sigma_1 - \sigma_3$, la teoría de Mohr-Coulomb se representa gráficamente como

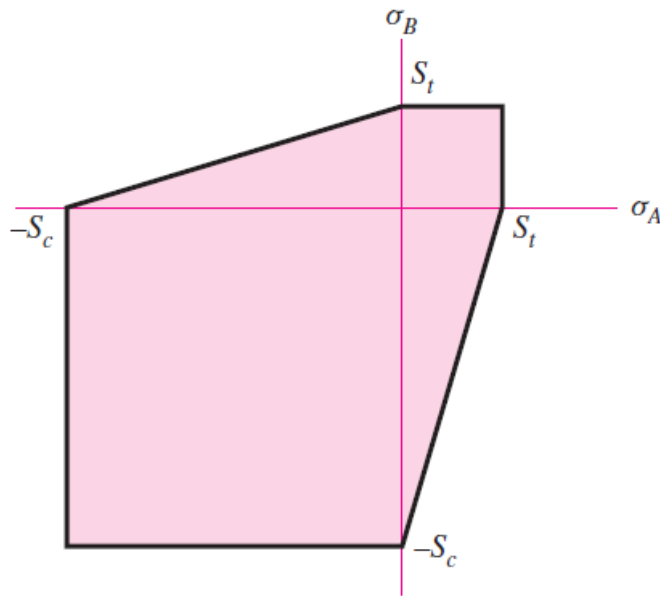


Ilustración 10. Gráfica de la teoría de falla de Mohr-Coulomb frágil para estados de esfuerzo plano. S_t y S_c representan los esfuerzos últimos en tensión y en compresión, respectivamente. Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 8va Ed.

En el caso de ecuaciones de diseño, la incorporación del factor de seguridad n divide todas las resistencias entre n . Así, la Ecuación 5 puede ser reescrita, en su formato de diseño, como

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = \frac{1}{n} \quad (18)$$

3.1.4.5. Teoría de Mohr modificada

El criterio, como su nombre lo indica, representa una modificación del criterio visto en el punto anterior. Se escribe matemáticamente mediante tres condiciones que deben cumplirse para que el punto solicitado resista.

$$\sigma_1 < S_{ut} \quad (19)$$

$$\sigma_3 > -S_{uc} \quad (20)$$

$$\sigma_1 \cdot \frac{S_{uc} - S_{ut}}{S_{uc} \cdot S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} < 1 \quad (21)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales, ordenados de forma que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. El factor de seguridad n , en este caso, se obtiene mediante

$$n = \min \left(\left| \frac{S_{ut}}{\sigma_1} \right|, \left| \frac{S_{uc}}{\sigma_3} \right|, \left| \frac{1}{\sigma_1 \cdot \frac{S_{uc} - S_{ut}}{S_{uc} \cdot S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}}} \right| \right) \quad (22)$$

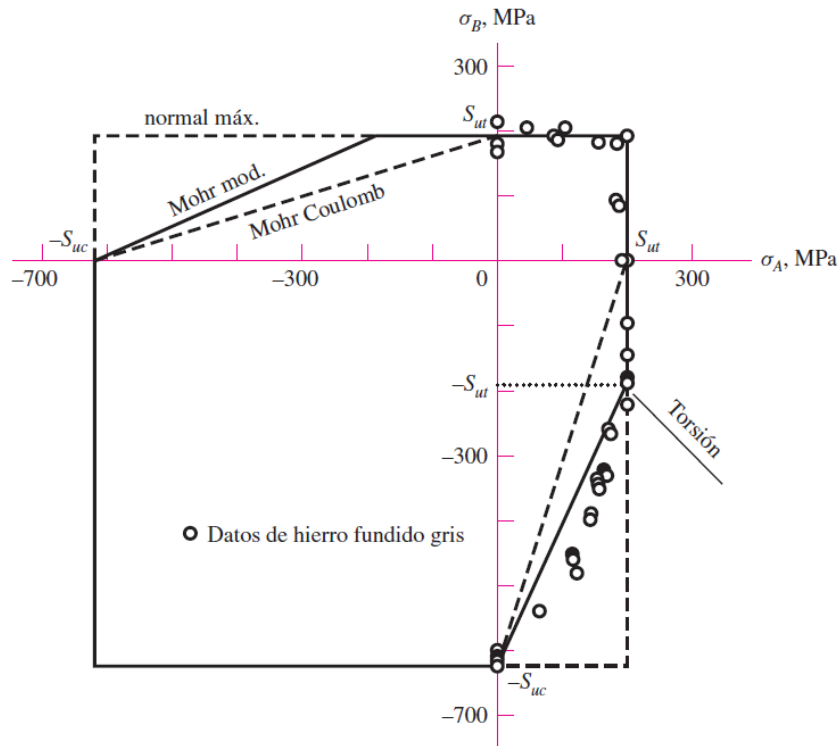


Ilustración 11. Datos de la fractura biaxial de hierro fundido gris comparados con varios criterios de falla. Fuente: Dowling N. E., *Mechanical Behavior of Materiales*, 2nd Ed., 1999.

3.1.4.6. Selección del criterio de falla

Para el comportamiento dúctil, el criterio recomendado es la energía de distorsión, aunque algunos diseñadores también aplican la teoría del esfuerzo cortante máximo debido a su simplicidad y naturaleza conservadora. En el caso raro que los esfuerzos de fluencia en tensión y en compresión sean diferentes, es decir, $S_{yt} \neq S_{yc}$, se emplea el método de Mohr-Coulomb dúctil.

En el caso de comportamiento frágil, la mejor teoría es la hipótesis de Mohr original, construida en base a ensayos de tensión, compresión y torsión, con un lugar geométrico de falla curva. La dificultad de aplicarla sin un computador obliga a los ingenieros a elegir modificaciones, Mohr-Coulomb o Mohr modificado. La Ilustración muestra un resumen en forma de diagrama de flujo para la selección de un procedimiento eficaz para analizar o predecir fallas por cargas estáticas de comportamiento frágil o dúctil.

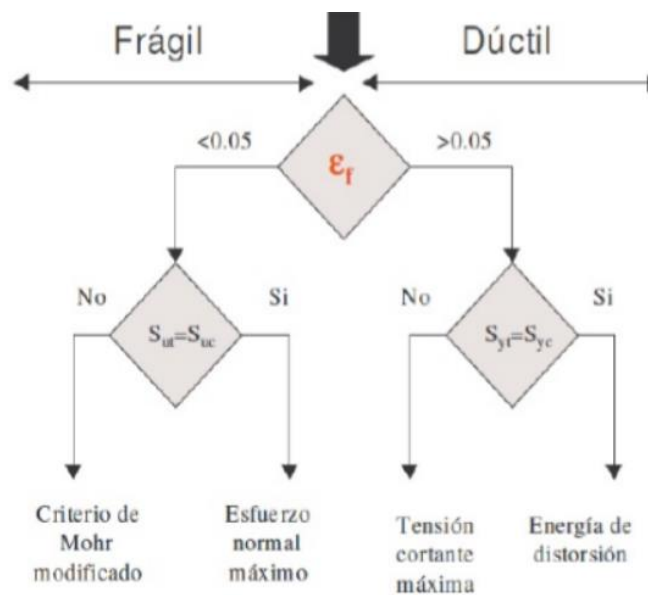


Ilustración 12. Diagrama de flujo para la selección de teorías de falla. Fuente: <https://teoriadefalla.wordpress.com>

3.1.5. Conceptos básicos de energía

Según su definición, la energía es la capacidad de la materia para producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc. La Primera Ley de la Termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir, solo transformar, lo cual determina que existan dos tipos de fuentes de transformación de energía.

1. **Energía renovable.** Aquella que se obtiene de fuentes naturales inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que poseen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre ellas, se encuentran la energía solar, eólica, geotérmica, etc.
2. **Energía no renovable.** Es la que se encuentra de forma limitada en la naturaleza y que, al ser utilizada en su totalidad, no puede volver a generarse. Es la que proviene principalmente de los combustibles fósiles.

El proyecto que convoca a USM Zero se centra en el uso de la energía solar, por lo que de aquí en adelante el enfoque es meramente dirigido hacia ella.

3.1.5.1. Energía solar

El sol es la principal fuente de energía³. La energía que proviene de él puede ser llamada energía solar, la cual llega a La Tierra en forma de ondas electromagnéticas después de experimentar considerables interacciones con la atmósfera. La energía de radiación emitida o reflejada por los constituyentes de la atmósfera es la responsable de la formación de la radiación atmosférica.

Esta energía puede ser aprovechada para producir calor, como es el caso de los colectores térmicos, o bien para producir electricidad por medio de celdas fotovoltaicas. Presenta una importante suma de ventajas con respecto a otros tipos de energías contaminantes, aunque no está libre de desventajas.

Ventajas	Desventajas
Inagotable	Muy sensible a los niveles de radiación, lo cual implica que sea una energía muy variable según el sector geográfico.
No contaminante	Se ve afectada por las condiciones meteorológicas.
Adaptable según la necesidad	Alta inversión inicial.
Silenciosa	Producen electricidad a baja escala, se necesitan grandes terrenos para producir grandes cantidades de electricidad.
Presencia mundial	

Tabla 6. Ventajas y desventajas de la energía solar.

3.1.5.2. Radiación solar

El Sol emite una radiación en forma continua en todas direcciones. Menos de una mil millonésima parte de esa energía choca contra la tierra⁴, lo cual es suficiente para mantenerla a una temperatura ideal para sostener la vida. La energía del sol se debe a la reacción continua de fusión durante la cual dos átomos de hidrógeno se funden para formar uno de helio, lo que hace que en esencia el Sol sea un reactor nuclear, con temperaturas tan elevadas como 40 millones de [K] en la región de su núcleo. La temperatura cae hasta alrededor de 5800 [K] en la región exterior del sol, llamada la zona de convección, como resultado de la disipación de dicha energía en forma de radiación.

Chile posee uno de los niveles más altos de radiación del mundo. La Ilustración 8 muestra el promedio anual de la de radiación horizontal diaria en el país.

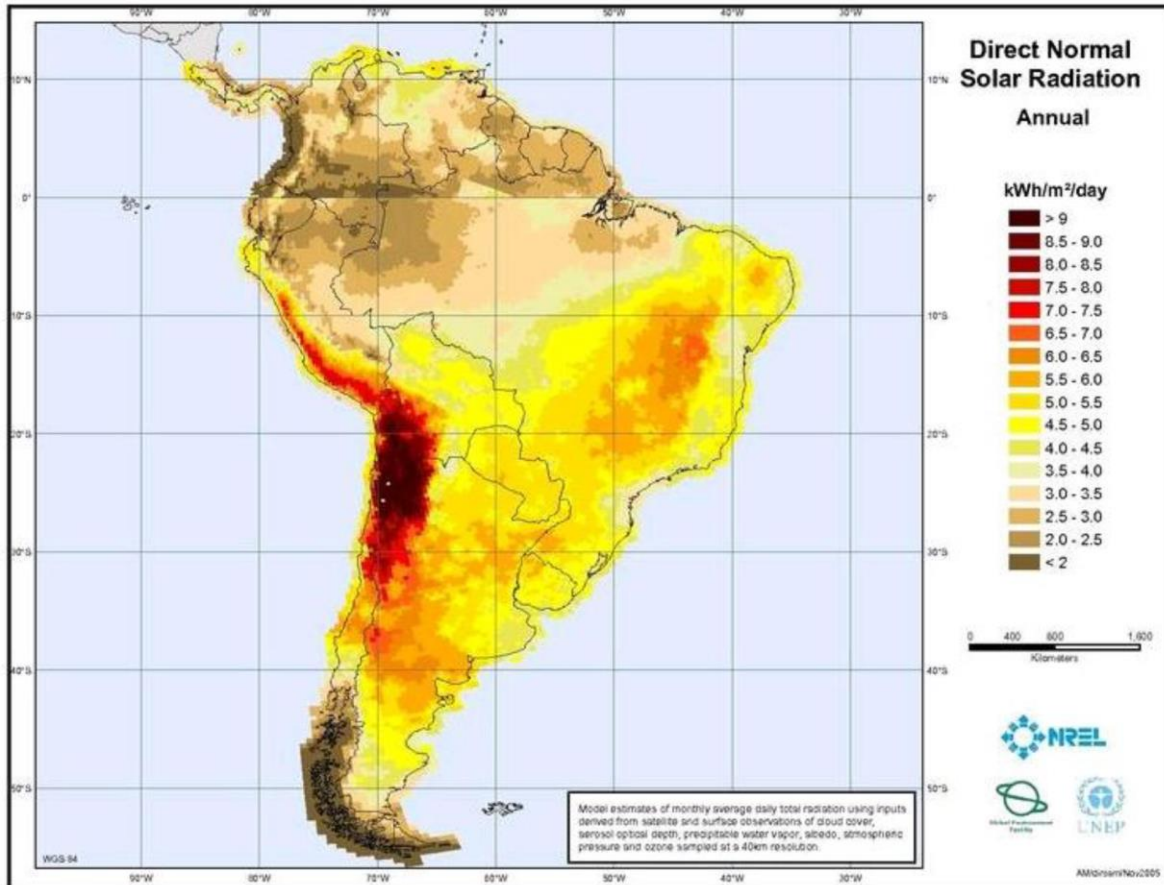


Ilustración 13. Promedio anual de la radiación horizontal diaria de Chile. Fuente: www.nrel.gov

Para ponerlo en perspectiva, con 8.5 [Kwh/m²día] se puede abastecer energéticamente un hogar promedio⁵.

La forma de aprovechar esta radiación y convertirla en electricidad es mediante paneles fotovoltaicos, los cuales transforman la radiación proveniente del sol en electricidad.



Imagen 8. Granja de paneles fotovoltaicos.

En el caso de un vehículo solar, es decir, que equipa paneles fotovoltaicos, cuando la luz impacta las células fotoeléctricas hechas de selenio (una sustancia no metálica con propiedades conductoras), se produce una corriente eléctrica que energiza un motor eléctrico. El motor transmite la energía a las ruedas de tracción permitiendo el movimiento del vehículo.

3.1.6. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Las herramientas analíticas deben ser simples de usar y deben, de forma rápida, predecir tendencias en el problema particular que está siendo investigado. La dificultad en aplicar esta lógica a la aerodinámica automotriz yace en la complejidad de las ecuaciones de la dinámica de fluidos. En desmedro del gran avance en las soluciones computacionales, una simulación detallada del, parcialmente separado, campo de flujo sobre un auto de carreras es difícil de realizar y requiere, hasta hoy en día, de mucho tiempo de preparación, lo que la vuelve cara. Por lo tanto, el uso de esta herramienta es limitado y solo las formas más simples (y menos costosas) de computación han sido usadas para estudiar problemas localizados, como la forma de los alerones para los autos de carreras. El beneficio principal de usar una herramienta computacional (una vez que el método ha sido validado) es la habilidad de mejorar y modificar la forma del vehículo antes de que sea construido.

Cuando se compara a otras formas de experimento, la computación tiene la ventaja de que genera resultados que pueden ser usados una y otra vez para estudiar nuevas partes del

problema. En experimentos, una vez que el modelo sale del túnel de viento, las nuevas preguntas no tendrán respuesta.

La dinámica de fluidos computacional puede ser definida como un conjunto de métodos numéricos aplicados para obtener una solución aproximada de problemas de dinámica de fluidos y transferencia de calor.

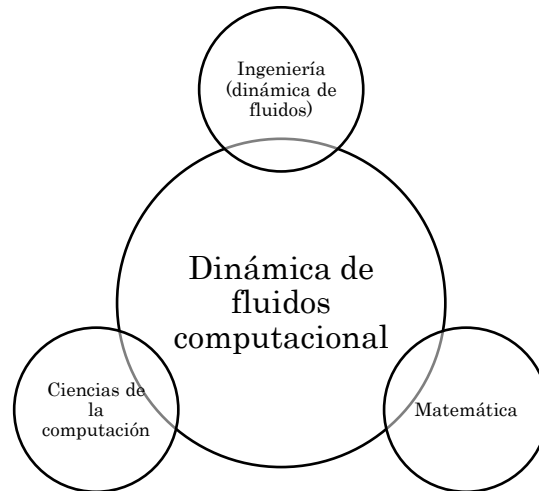


Ilustración 14. La Dinámica de Fluidos Computacional está compuesta por tres tipos de ciencias.

De acuerdo con esta definición, la dinámica de fluidos computacional no es una ciencia por sí misma, sino que una forma de aplicar métodos de una disciplina (análisis numérico) a otra (calor y transferencia de masa). En retrospectiva, no es solo integrar las disciplinas de mecánica de fluidos con matemática, sino que también las ciencias de la computación, como se muestra en la Ilustración 14.

3.1.6.1. Funcionamiento del código en CFD

Los códigos que rigen el CFD están estructurados alrededor de algoritmos numéricos. En orden de proveer un acceso fácil a su poder de resolución, los paquetes comerciales de CFD incluyen paneles de usuario con entradas para introducir parámetros y examinar resultados. Por lo tanto, todos los códigos contienen tres elementos principales:

1. **Pre-procesador.** Es usado para definir la geometría para el dominio computacional de interés y generar el mallado de los volúmenes de control para los cálculos. Generalmente, mientras más fina sea la malla (principalmente en las zonas de muchos cambios), más precisa será la solución. Esto último también conlleva un aumento del tiempo de cálculo y un aumento capacidad de hardware necesaria.

2. **Solucionador (Solver).** El *solver* es el encargado de realizar los cálculos usando la técnica de solución numérica elegida. Primero, las ecuaciones del flujo son integradas sobre los volúmenes de control, resultando en la conservación de las propiedades relevantes para cada volumen finito. Luego, esas ecuaciones integrales son discretizadas produciendo ecuaciones algebraicas a través de una conversión de las ecuaciones que describen el movimiento del fluido. Finalmente, se usa un método iterativo para resolver esas ecuaciones algebraicas, dando lugar a una solución.
3. **Post-procesador.** Provee una visualización de los resultados e incluye una capacidad para mostrar la geometría/mallado, crear campos de vectores y gráficos en 2D y 3D. Las partículas pueden ser seguidas a través de la simulación y el modelo puede ser manipulado, como por ejemplo cambiando su escala, rotándolo, etc. Todo en gráficos animados y en colores.

Existen varias decisiones antes de posicionar el problema en CFD. Algunas de ellas pueden ser si acaso el problema debe ser 2D o 3D, qué tipo de condiciones de borde se usarán, si es que es o no relevante calcular las variaciones de presión/temperatura basado en la densidad del flujo de aire, qué modelo de turbulencia se usará, etc. Los supuestos hechos deben ser reducidos a un nivel lo más simple posible, manteniendo las características más importantes del sistema a ser resuelto en orden de alcanzar una solución precisa. Luego de que esas decisiones han sido tomadas, la geometría y la malla pueden ser creadas. La malla debe ser tan fina como el problema lo requiera.

3.2. Estado del Arte

3.2.1. Vehículos solares en el mundo

En 1955, William G. Cobb de la General Motors Corp. (GM) mostró al público su “sun-mobile”, un prototipo de 15 pulgadas del primer auto del mundo que sería impulsado por energía solar en la exposición automotriz de General Motors Powerama en Chicago, Illinois. El auto de Cobbs introdujo por primera vez un campo de paneles fotovoltaicos en el vehículo mediante los cuales se energizaba⁶. Pero fue en 1962 cuando el vehículo en sí fue presentado al público.

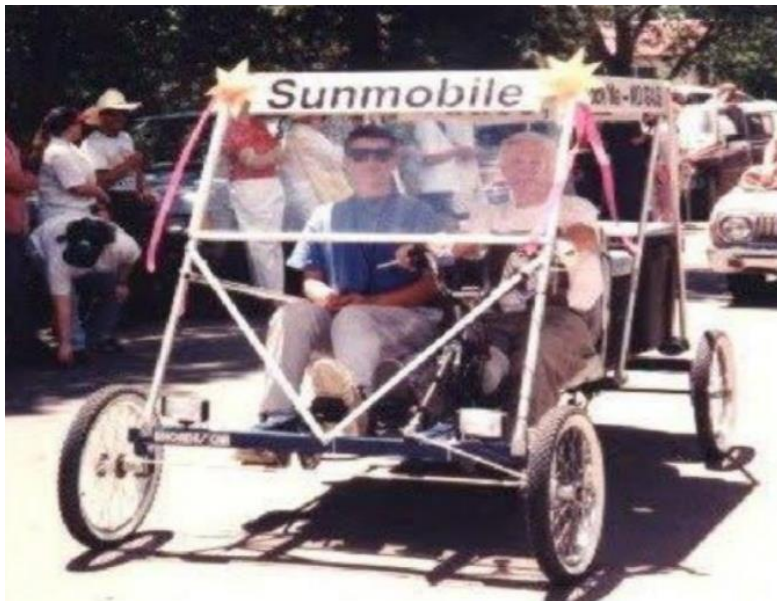


Imagen 9. Sun-Mobile.

Por otro lado, en el año 1958, una compañía norteamericana con sede en California llamada The International Rectifier Company había desarrollado un vehículo solar convirtiendo un vehículo *vintage* modelo de 1912, agregándole paneles fotovoltaicos. Sin embargo, dicho vehículo fue mostrado al público el año 1962.



Imagen 10. Modelo del vehículo vintage de 1912.

La tendencia de hacer vehículos “ecológicos” fue incrementando en el tiempo y, en 1977, el profesor Ed Passerini de la Universidad de Alabama construyó el Bluebird Solar Car, el cual era un prototipo a escala real de un vehículo solar. El Bluebird estaba diseñado para moverse gracias a los paneles fotovoltaicos sin el uso de una batería. Fue exhibido en Knoxville en 1982.



Imagen 11. Bluebird.

El interés por desarrollar este tipo de vehículos fue creciendo aún más y en los años siguientes aparecen nuevos prototipos. En 1980, en la Universidad Tel Aviv de Israel, Arye Braunstein y sus colegas crearon un vehículo solar que llevaba paneles fotovoltaicos y baterías. Fue capaz de generar un máximo de 400 [W] de potencia, llegar a una velocidad máxima de 65 [km/h] y recorrer un máximo de 80 [km], lo cual fue un gran logro para la época.



Imagen 12. Vehículo solar desarrollado en Israel.

Un hito importante se marca en 1981. Hans Tholstrup y Larry Perkins construyeron un auto solar de carreras y, en 1982, ambos se vuelven los primeros en cruzar un país en un auto solar, desde Perth hasta Sydney, Australia. Este vehículo incorporó más tecnología que los anteriores, dentro de la que se incluyen paneles fotovoltaicos de alta eficiencia, controladores electrónicos, telemetría inalámbrica, etc. Elementos que en tiempos pasados solo eran parte de futuras ideas.



Imagen 13. Vehículo solar de carreras de Hans Tholstrup y Larry Perkins.

La afición por las carreras llevó al desarrollo de más vehículos solares de competición. En 1984, Greg Johanson y Joel Davidson inventaron el auto solar de carreras Sunrunner. El Sunrunner no usaba baterías, solo paneles fotovoltaicos, y pudo lograr una velocidad de 66 [km/h] en el Desierto Mojave en California, EE.UU., rompiendo un récord para esta clase de vehículos.



Imagen 14. Vehículo Solar Sunrunner.

Y así, en el tiempo, siguieron apareciendo más vehículos solares destinados a las carreras. El interés siempre fue en crecimiento, tanto que ha llegado a convocar eventos mundiales como el de la Carrera Solar Atacama. El uso de un tipo de energía limpia como lo es la que proviene del sol es la principal motivación de los equipos para invertir en el desarrollo de estas máquinas. La atención se centró, además, en la forma aerodinámica del vehículo a modo de hacer más eficiente su movimiento. Aquel factor era determinante si lo que se buscaba era crear un vehículo rápido y eficiente.



Imagen 15. Venturi Astrolab, un vehículo solar comercial capaz de llegar a los 120 [km/h].

El interés por hacer de los vehículos solares más aerodinámicos fue en crecimiento. Dado que la velocidad es un factor muy importante en los autos⁷, lo que se buscó siempre fue desarrollar vehículos que se puedan mover con mayor facilidad. Todo decanta en diseños con formas suaves.

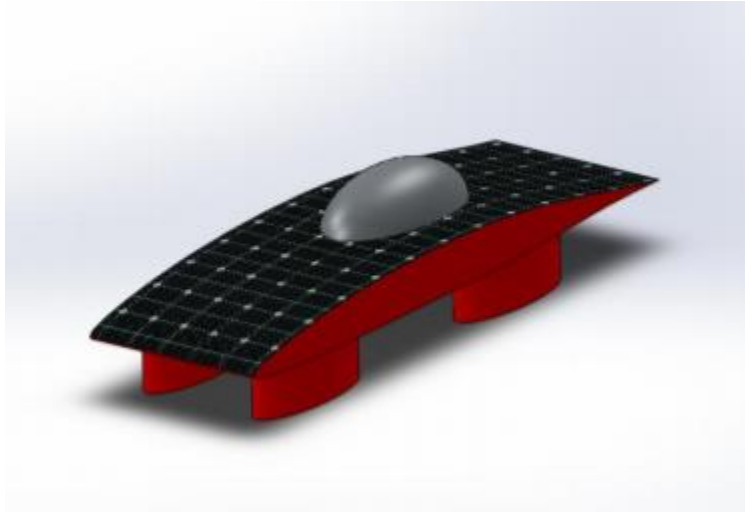


Ilustración 15. Diseño CAD de un vehículo solar monoplaça.

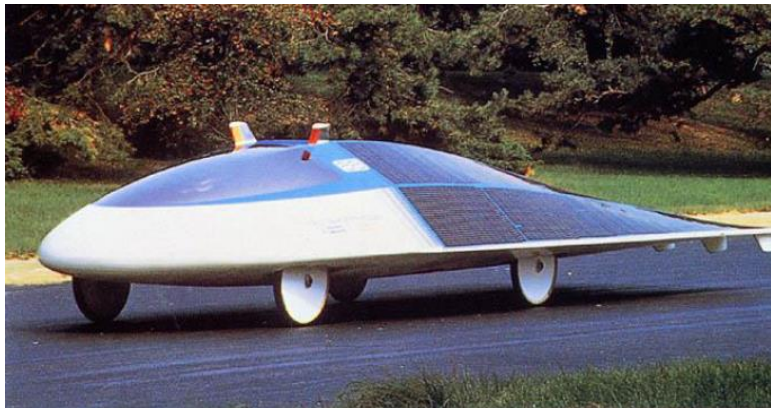


Imagen 16. Sunracer. Ganador de la primera versión de la World Solar Challenge en 1987, Australia. Fuente: <http://www.aurosolarcar.com>



Imagen 17. Honda Dream. Vehículo solar ganador del World Solar Challenge en 1996, celebrado en Australia. Fuente: <http://www.aurorasolarcar.com>

El diseño aerodinámico -que busca una geometría en forma de gota para el carenado del vehículo- también se hizo presente, con el tiempo, en modelos de tres ruedas, instalándose así y de manera permanente, la preocupación por este factor.



Imagen 18. ELF. Desarrollado por Organic Transit, empresa estadounidense. Monta baterías y un panel fotovoltaico en su techo. Fuente: <https://electrek.co>.

Se puede apreciar, haciendo una comparación de la geometría del vehículo de la Imagen 10 con el de la Imagen 16, que la geometría tiende a ser más *ovalada* y de *curvas suaves*, además de más cerrada impidiendo el ingreso de aire excesivo a la cabina. El fundamento físico detrás de esto se explica más adelante.

3.2.2. Inicios de la electromovilidad en Chile

La Fórmula i fue una competencia de vehículos eléctricos que se realizó entre los años 2001 y 2006. Esta competencia estaba enfocada en la comunidad universitaria, y generó gran interés en buscar energías alternativas para movilizarse. Esta iniciativa estableció las bases de lo que son las competencias de vehículos solares y eléctricos en Chile. La Universidad Técnica Federico Santa María se hizo presente en dicho evento con un prototipo de vehículo solar⁸.



Imagen 19. Competencia Fórmula i, 2004.



Imagen 20. Prototipo USM 2006.

Este tipo de eventos son los que impulsan en mayor medida el desarrollo de este tipo de vehículos en el país. Desafío Cero es una competencia que se inicia el año 2013. Esta competencia nace de la necesidad de suplir la competencia Fórmula i, la cual tuvo su última realización el año 2006. Desafío Cero, realizada por la ONG La Ruta Solar, buscó fomentar la investigación y desarrollo de vehículos eléctricos por medio del aprendizaje de cada equipo, pilar fundamental para establecer una conducta que apunta al uso eficiente de energías renovables.



Imagen 21. Competencia 2013, Desafío Cero. Fuente: www.larutasolar.com

Desafío Cero pasaría luego a llamarse Carrera Solar Atacama, evento que ha tenido diversas versiones divididas en categorías.

3.2.3. Diseño de vehículos solares en Chile

Si bien desde mucho antes que se vienen haciendo prototipos funcionales, la construcción de vehículos solares en Chile se remonta al año 2007. El primer vehículo solar en Chile fue desarrollado en la Universidad de Chile y su nombre fue Eolian. Fue el primer automóvil latinoamericano en competir en la World Solar Challenge el año 2007⁹, logrando terminar la carrera en el puesto número 14 de su categoría. Este vehículo marca un hito histórico en lo que respecta a la ingeniería en Chile, con sus 260 [kg] de masa total y su velocidad promedio de 50 [km/h], logrando terminar una de las carreras más desafiantes del planeta con la baja experiencia que había en ese entonces en el plano local, además de un financiamiento reducido.

Actualmente, las casas de estudio que tienen un espacio dedicado al desarrollo de vehículos solares son la Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad de Concepción, Universidad de La Serena y Universidad de Santiago de Chile.

En lo que respecta a investigación relacionada al diseño de vehículos solares, en la Universidad Técnica Federico Santa María se hizo una memoria el año 1994 relacionada a

los vehículos eléctricos, llamada “Estudio de la Energía Solar y Pre-Diseño de un Vehículo Solar accionada por la misma”¹⁰ lo que indica que el interés respecto a este tema viene de hace varios años.

Dentro de la historia que envuelve a este tema de investigación, se encuentran algunas memorias repartidas en distintas casas de estudio del país. La mayoría se concentra en la Universidad de Chile. La siguiente tabla resume las que son más relevantes con respecto a vehículos solares¹¹

Año	Universidad	Título
2008	Universidad de Chile	Desarrollo de estrategia para el uso óptimo de la energía en un vehículo solar
2008	Universidad de Chile	Diseño del habitáculo del auto solar Eolian
2011	Universidad de Chile	Diseño e implementación de sistemas de actuación electromecánica para vehículos terrestres autónomos
2012	Universidad de Chile	Optimización de un sistema fotovoltaico de un vehículo con tracción eléctrica
2012	Universidad de Chile	Modelamiento y caracterización de elementos elásticos y de amortiguación para la suspensión de un auto solar
2013	Universidad de Chile	Control óptimo de vehículos eléctricos con energía disponible restringida en ruta parcialmente conocida
2013	Universidad de Chile	Protean: chasis y transferencia tecnológica
2013	Universidad de Chile	Fibras vegetales utilizadas como refuerzo de compuestos FRP termoestables: desarrollo de carenado y panelería estructural
2013	Universidad de Chile	Aplicación de algoritmos evolutivos multi-objetivo al diseño de empaquetamientos de baterías

2013	Universidad de Chile	Sistema de encapsulamiento de celdas fotovoltaicas para aplicaciones móviles de tracción eléctrica
2013	Universidad de Chile	Diseño y Construcción de Suspensión Delantera de Auto Solar Eolian
1970	Universidad Técnica Federico Santa María	Aplicaciones de la energía solar en la propulsión de vehículos espaciales
1994	Universidad Técnica Federico Santa María	Estudio de la energía solar y prediseño de un vehículo accionado con la misma
2005	Universidad Técnica Federico Santa María	Utilización de la energía solar como recurso alternativo para la propulsión de un vehículo
2007	Universidad Técnica Federico Santa María	Diseño y construcción de tricicleta solar impulsada por motor DC con freno regenerativo
2012	Universidad Técnica Federico Santa María	Uso práctico de la energía solar: vehículos solares
2013	Universidad Técnica Federico Santa María	Diseño del sistema estructural de un auto solar para competencia
2013	Universidad Técnica Federico Santa María	Uso práctico de la energía solar vehículos solares
2014	Universidad Técnica Federico Santa María	Análisis estructural de componentes mecánicos para el automóvil solar Ergón
2015	Universidad Técnica Federico Santa María	Evaluación técnica del proceso de homologación para vehículos motorizados eléctricos, de 3 y 4 ruedas.
2005	Pontificia Universidad Católica de Chile	Análisis y evaluación del aumento en la autonomía de un vehículo eléctrico utilizando celdas fotovoltaicas y MMPT de alta tecnología
2012	Universidad de Concepción	Caracterización aerodinámica mediante método CFD del auto solar Antu Nekul

2012	Universidad de Concepción	Sistema de telemetría para el monitoreo fisiológico y ambiental de un piloto de auto solar
2013	Universidad de Concepción	Simulación estructural del chasis de un vehículo
2013	Universidad de Concepción	Análisis y desempeño de motor de flujo axial para tracción en auto solar

Tabla 7. Algunas memorias relacionadas al desarrollo de vehículos solares en Chile.

Si bien las universidades corresponden al órgano principal de investigación de la aplicación de la electro-movilidad en vehículos solares, existen instituciones y colegios que se encuentran trabajando para desarrollar sus propios prototipos. La evolución que ha tenido la “comunidad solar” durante la última década ha sido tremenda y ha impulsado la inserción de diversos actores de diferentes niveles de conocimiento en la creación y diseño de vehículos solares. Lo que hace unos años era una tarea bastante desafiante, pasó a ser, hoy en día, algo de uso común gracias a los avances de la tecnología y la estandarización de ella.

3.2.4. Aerodinámica en vehículos

El análisis aerodinámico de vehículos se ha venido haciendo, históricamente, mediante la utilización de túneles de viento y ensayos de pista, métodos que permiten obtener excelentes resultados. Sin embargo, los elevados costos de las instalaciones y las dificultades en la adquisición de datos hacen que, en muchos casos, su utilización sea prohibitiva¹². Debido a esto y con el constante mejoramiento de las capacidades computacionales y optimización de algoritmos de cálculo, la utilización de software se ha incrementado notablemente en los últimos años.

Si bien la mecánica computacional no es una disciplina nueva, gracias a las grandes mejoras experimentadas en el desarrollo de los computadores se ha hecho de la simulación numérica una herramienta indispensable en ingeniería. Uno de los campos donde la mecánica computacional ha revolucionado por completo la forma de trabajar es en la mecánica de fluidos. En la década del año 1990, la única forma de realizar simulaciones con resultados confiables era mediante el uso de los llamados *súper computadores*, las cuales estaban al alcance de muy poca gente. Las nuevas tecnologías, los avances en materia de procesamiento digital y la continua mejora de algoritmos de cálculo han hecho posible que estos mismos programas de simulación puedan, hoy en día, ser ejecutados en computadores personales de bajo costo. Este hecho también permitió la aparición de nuevos programas, expandiendo el

horizonte de posibilidades para quien desee desempeñar una simulación, teniendo así más alternativas.

4. Metodología

4.1. Criterios de diseño

El chasis que se espera diseñar tendrá que cumplir con ciertas condiciones previamente definidas por la organización del evento Carrera Solar Atacama 2018. Dichas condiciones engloban tanto el factor de seguridad del elemento como las distancias reglamentarias dentro de las cuales el chasis debe mantenerse.

A continuación, se presentan los criterios de diseño para el desarrollo del chasis de un vehículo híbrido biplaza.

4.1.1. Dimensiones del vehículo

1. El vehículo debe contar con un ancho de trocha mínimo de 900 [mm] y máximo de 1500 [mm]. Se entiende por ancho de trocha la distancia entre los centros de los neumáticos de las ruedas de un mismo eje.
2. La distancia mínima entre ejes debe ser de 1500 [mm].
3. El vehículo no puede medir más de 3.5 [m] de largo y 2.0 [m] de ancho.

4.1.2. Habitáculo del ocupante

1. Se debe velar por una estrategia de diseño que presente un chasis y carenado que brinden espacio adecuado para sus ocupantes en el habitáculo mientras se conduce y está detenido. Se deben asegurar que todos los componentes del vehículo en su estructura, de forma de evitar que ingresen al habitáculo en caso de colisión o volcamiento, pudiendo así lastimar a sus ocupantes.
2. El vehículo deberá estar equipado con barras antivuelco para prevenir el daño directo a la cabina del piloto y deformaciones graves en caso de colisión o volcamiento. Las barras primaria y secundaria constituyen el elemento básico de la estructura antivuelco del vehículo. Deben estar hechas de tubos de acero o perfiles de materiales distintos como aluminio, materiales compuestos, etc.
3. Se debe presentar una memoria de cálculo que respalde que la jaula antivuelco tiene suficiente resistencia como para proteger al piloto de una carga equivalente a cuatro veces el peso del vehículo.

4.1.3. Exigencias

1. La estructura deberá estar atornillada, soldada o estructuralmente incorporada al chasis del vehículo.
2. La línea que se extiende desde la parte superior de la barra primaria hasta la parte superior de la secundaria debe estar por encima del casco del piloto y pasajero cuando este se encuentre en su posición de conducción.
3. La parte superior de la barra antivuelco secundaria deberá ser superior a la parte superior del volante.
4. La barra secundaria debe cubrir totalmente el volante o mandos de dirección, mirada desde el frente del vehículo.
5. En caso de usar tubos de acero para la barra antivuelco deberán ser de mínimo 2 [pulgadas] de diámetro y pared gruesa. Ninguna parte de las barras antivuelco debe ser un obstáculo de entrada o salida del piloto u ocupar el espacio diseñado para el piloto.
6. Las barras secundarias y primarias deben ir firmemente unidas al chasis del vehículo.
7. La estructura del asiento debe ir anclada a la barra primaria.

4.1.4. Sugerencias

1. La barra primaria debe tener una resistencia suficiente para que el vehículo sea levantado o remolcado.
2. Las barras antivuelco deberán diseñarse y fabricarse de forma que cuando estén correctamente instaladas, minimicen el riesgo de lesiones del piloto. La responsabilidad de garantizar la resistencia necesaria es del equipo participante.
3. Las siguientes ilustraciones corresponden a diagramas referenciales de configuración básica de barras antivuelco.

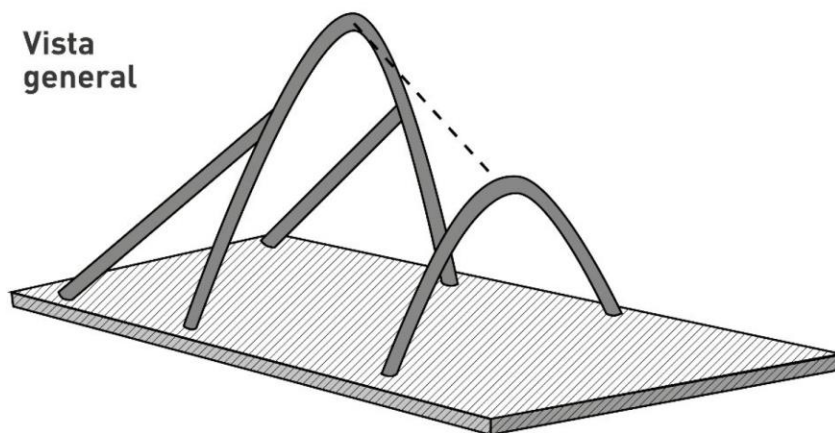
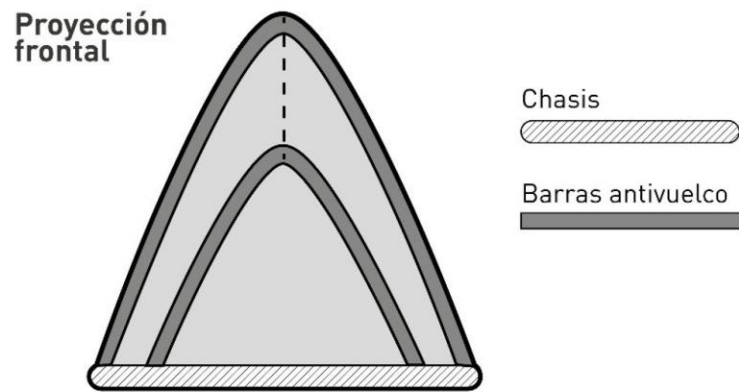
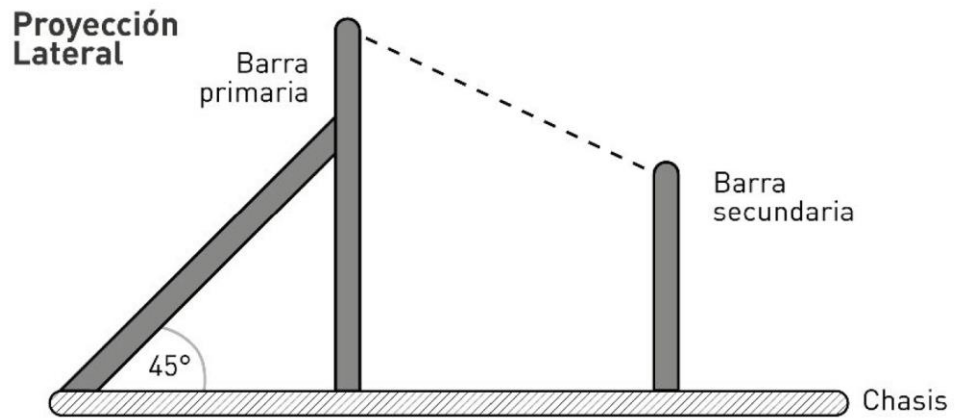


Ilustración 16. Diseño propuesto simplificado para el chasis, presente en las bases de la carrera. Fuente: <http://www.carrerasolar.com>

Una vez que se analizan las condiciones anteriores, se pueden plantear criterios que se complementen con las condiciones, lo cual permite definir el punto de inicio de la etapa de diseño y tener las primeras luces de lo que será, una vez terminado, un chasis seguro, confiable y optimizado para un vehículo que correrá en una carrera.

4.1.5. Criterios de diseño propios

1. El chasis debe ser lo más liviano posible. Por lo tanto, se debe velar por cumplir las condiciones reglamentarias de la carrera, pero sin sobredimensionar sus elementos.
2. Se deben optimizar los espacios interiores dejando holgura de movimiento para la comodidad de los ocupantes.
3. La velocidad máxima del vehículo será de 80 [km/h].

4.2. Metodología de diseño

El diseño mecánico es una tarea compleja y es necesario dividirlo en una serie de subtarear más simples¹³. La complejidad del tema requiere una secuencia en la que las ideas se presentan y se revisan.

En primer lugar, se aborda la naturaleza del diseño y, luego de eso, el diseño en la ingeniería mecánica en particular. Es un proceso altamente iterativo con muchas fases de ensayo y error, en el cual existen en los tiempos actuales muchas herramientas para ayudar al diseñador, entre las cuales está el internet (la riqueza de la información a un clic de distancia) y una gran cantidad de software de diseño.

En el caso particular, lo que se busca es un equilibrio entre la economía (materia prima y fabricación), la seguridad y el desempeño, lo cual implica que las decisiones son tomadas considerando dichos factores sumado a los criterios de diseño enumerados en el apartado anterior. La creatividad no está dejada de lado, por lo que también entra en juego la habilidad y la destreza para resolver un problema de manera diferente, eficaz y eficiente.

El proceso completo, de principio a fin, está representado por la Ilustración 14.

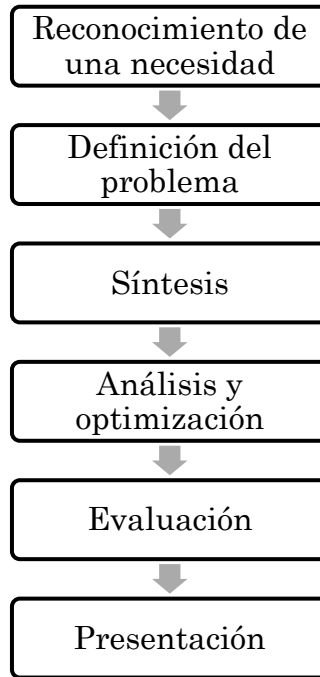


Ilustración 17. Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones entre sus etapas.

4.2.1. Reconocimiento de una necesidad

4.2.1.1. Definición del problema

Para definir correctamente el problema se deben tener claras todas las especificaciones y requerimientos necesarios para el desarrollo del chasis. Estas especificaciones representan las cantidades de entrada y salida, las características y dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar y todas las limitaciones sobre estas cantidades. Puntualmente, quedarán definidas por los criterios de diseño, puesto que ese apartado delimita las condiciones sobre las cuales se basa todo el trabajo. Puede considerarse al objeto que va a diseñarse como algo dentro de una caja negra, en donde deben especificarse sus características de entrada y salida.

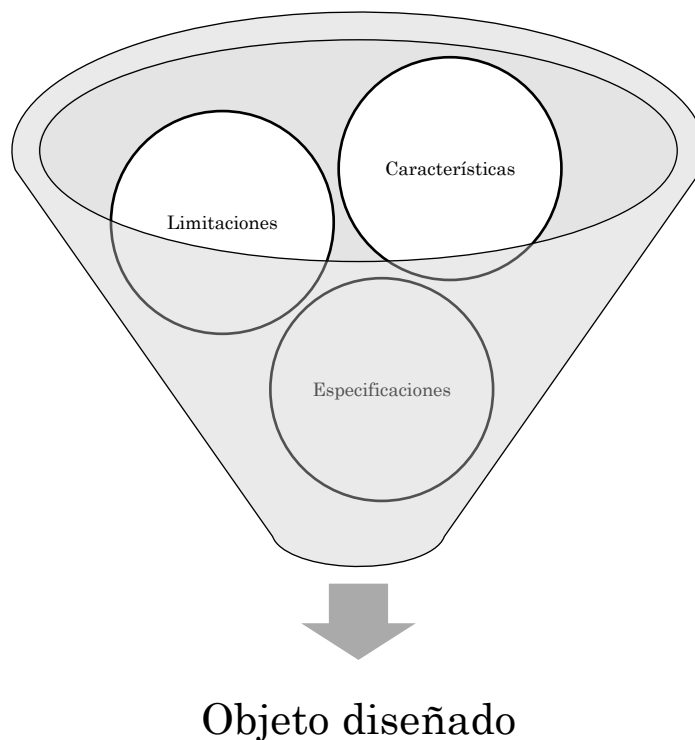


Ilustración 18. Las características, limitaciones y especificaciones del objeto a diseñar son los factores necesarios para lograr un diseño que cumpla con los requerimientos.

En este punto, los criterios de diseño dan las luces de lo que son parte de los requerimientos de entrada del nuevo chasis que se debe diseñar, pero además se debe especificar su proceso de manufactura, las posibles maestranzas que podrían fabricarlo, un lugar de almacenamiento para cuando esté terminado y el tiempo disponible para realizar el trabajo. Elegir el material del cual estará fabricado es una tarea que requiere evaluar la viabilidad económica y la capacidad del material para ser modificado por USM Zero para hacer posibles correcciones que decantan del proceso de ensamblaje de componentes.

Se tiene contemplado que la fabricación se llevará a cabo mediante la unión, con soldadura, de barras con perfil tubular y rectangular, de acuerdo con lo que se determine en el proceso de diseño. La maestranza encargada de su fabricación es Metalmecánica Lourdes, ubicada en Germán Riesco #2097, Cerro Placeres, Valparaíso. Se selecciona esta maestranza por su cercanía geográfica con la universidad y porque ellos manifiestan haber trabajado antes con otros proyectos de la institución educativa, lo cual demuestra que conocen el proceso mediante el cual se hacen los pagos por los servicios prestados y de tal forma existe una comunicación mucho más cercana y eficiente. Además, el hecho de que la instalación quede cerca de la universidad facilita el monitoreo constante de su proceso de fabricación a medida que avanza.

Los materiales que se barajan para formar parte del chasis son el aluminio y el acero. Por un lado, el aluminio es mucho más ligero que el acero (su densidad es aproximadamente 2.5 veces menor) pero, por otro lado, presenta un mayor valor comercial. Esta última característica hace que el aluminio sea rápidamente descartado para este caso puntual y, por consecuencia, se decida trabajar con acero.

Un acero lo suficientemente resistente para pasar la prueba de resistencia impuesta por la organización de la carrera es el acero ASTM A36. Este es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización. Comercialmente se presenta en barras, planchas y perfiles estructurales. Para los perfiles, se tienen las siguientes propiedades:

Densidad	7850 kg/m ³
Esfuerzo de fluencia	250 MPa
Resistencia a la tracción	400 MPa (mín.)
Elongación	20 % (mín.)

Tabla 8. Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36. Fuente: <http://www.acerosotero.cl>

Una vez que el chasis esté fabricado, será almacenado en la USM Sede José Miguel Carrera o, mientras haya disponibilidad, en el Laboratorio de Termofluidos de la USM Casa Central. El tiempo necesario para realizar tanto el diseño como la fabricación y montaje de componentes es de aproximadamente tres meses.

El desarrollo de las siguientes etapas del diseño (síntesis, análisis y optimización y evaluación) requieren de un proceso altamente iterativo en el cual se procede a través de varios pasos, se evalúan los resultados y luego se regresa a una fase inicial del procedimiento. De esta manera, es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizar y optimizarlos y regresar a la síntesis para ver qué efectos tienen sobre las partes restantes del sistema.

4.3. Análisis estático

El chasis es una estructura, y según lo que se pide desde la organización de la carrera, un análisis estático entregará un resultado válido.

Este tipo de análisis se realiza con el propósito de estimar el comportamiento de las piezas mecánicas bajo condiciones de operación específicas. En tiempos pasados, se realizaban mediante pruebas hechas sobre prototipos del producto, lo que acarreaba un notable aumento de tiempos de desarrollo de este, así como también un aumento a los costos asociados.

Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido contar con herramientas computacionales que permiten llevar a cabo dichas pruebas mediante simulaciones utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM).

El FEM es un método numérico con capacidad de resolver problemas complejos mediante modelos matemáticos que pueden ser representados por medio de ecuaciones diferenciales y series numéricas. En la actualidad, los sistemas CAD (Computer Aided Design – Diseño Asistido por Computador) poseen módulos lo suficientemente robustos como para realizar los análisis de acuerdo con lo descrito anteriormente. Entre los proveedores más grandes de este tipo de software, están¹⁴:

- ANSYS
- Autodesk
- Altair
- Aspen

El análisis estático en piezas mecánicas calcula los efectos de las cargas constantes sobre la estructura de la pieza mientras se ignoran los efectos de amortiguación comúnmente encontrados al aplicar cargas que varían en el tiempo, en cuyo caso el análisis no sería estático sino dinámico.

Sin embargo, el análisis estático puede incluir cargas de inercia constante como la gravedad, así como cargas que varíen en el tiempo pero que puedan ser aproximadas a un equivalente estático, como es el caso de las cargas producto del viento definidas mediante normas de construcción.

Algunos de los análisis estáticos más comunes son¹⁵:

1. **Análisis de Esfuerzos Lineales.** Este análisis le permite al ingeniero validar la calidad, el desempeño y la seguridad de una manera eficiente y precisa. En este análisis estático se calculan los esfuerzos y desplazamientos en geometría. Estos cálculos se hacen para determinar la respuesta de la pieza mecánica debido al efecto de las fuerzas, presiones, temperaturas y contacto entre otros componentes.
2. **Análisis de Deformaciones.** Igualmente, este análisis permite validar la calidad, el rendimiento y la seguridad de la pieza mecánica, basándose esta vez en los cambios que se presentan en la geometría de dicha pieza bajo las condiciones de carga establecidas.
3. **Análisis Térmico.** En este análisis se puede estudiar cómo responde la pieza a las variaciones de temperatura que ésta puede experimentar. Aquí toma importancia el coeficiente de expansión térmica del material, de lo cual dependerá si la pieza se deforma o no ante variaciones de temperatura definidas por las condiciones del proyecto.

Además, mediante los análisis estáticos se pueden determinar diferentes propiedades de los elementos analizados como la dureza, resistencia a la tracción, compresión, cortadura, pandeo y torsión.

Para el correcto desarrollo del análisis, se debe cumplir lo siguiente.

“El esfuerzo σ en la estructura, bajo fuerzas externas aplicadas, debe ser inferior a su esfuerzo de fluencia S_y para el material estructural elegido luego de haber aplicado un factor de seguridad k .”

$$\sigma \cdot k < S_y \quad (23)$$

Donde, en este caso, el valor de k es 4.

El chasis corresponde a parte de la seguridad pasiva del vehículo¹⁶ y debe ser capaz de resistir el impacto en caso de una colisión o volcamiento.

La solución del análisis entrega como resultado:

1. Campo de desplazamientos de la estructura en los puntos de cálculo.
2. Campo de deformación relativa.
3. Campo de distribución de los esfuerzos sobre la estructura.
4. Campo de distribución del factor de seguridad sobre la estructura.

Estos datos son, normalmente, suficientes para predecir el comportamiento de la estructura y dirigir la toma de decisiones para optimizar la forma geométrica del elemento con el objetivo de asegurar los principales criterios de resistencia.

El esfuerzo σ del que se habla, corresponde al esfuerzo normal máximo que entrega el software de diseño elegido en el punto de máxima sollicitación.

4.3.1. Concepto de chasis

Antes de hacer el análisis, se necesita obtener un diseño CAD de la estructura del chasis. Para ello, primero se debe tener una idea, a la que se llamará concepto de chasis. El concepto es una propuesta de diseño inicial, sujeta a muchas modificaciones futuras y representa el inicio del proceso iterativo, en el cual el chasis se irá modificando hasta satisfacer todas las necesidades que el proyecto requiere.

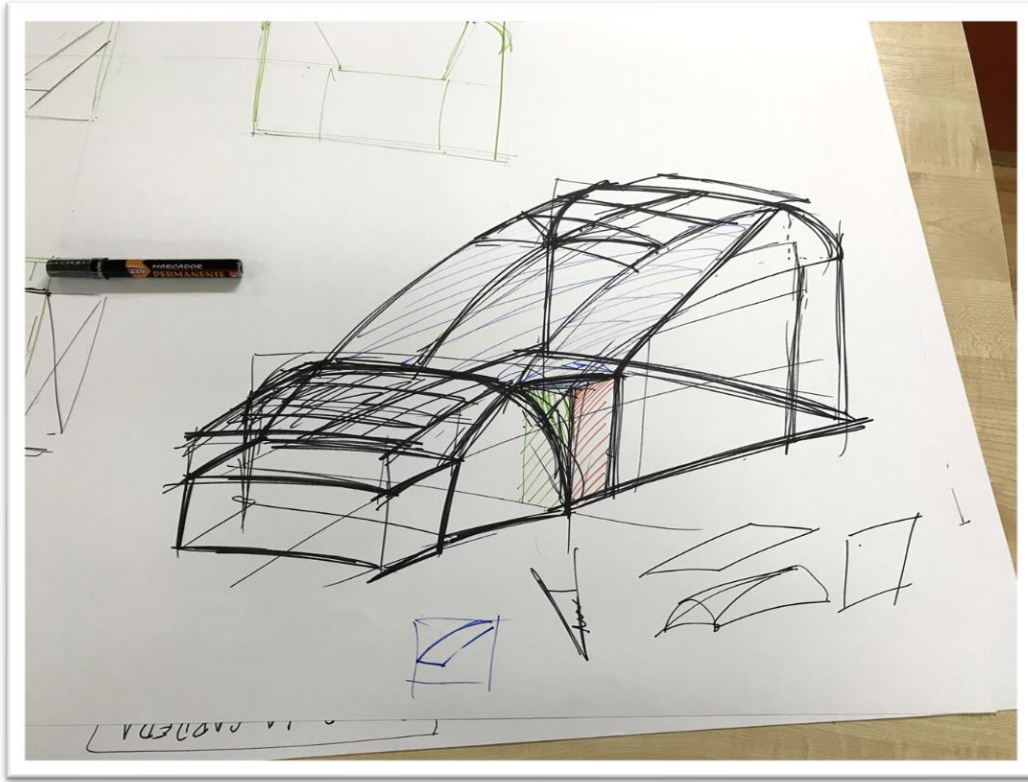


Imagen 22. Boceto del concepto de chasis, producto de una lluvia de ideas con el equipo de USM Zero.

El concepto considera:

- Espacio para que quepan dos personas de 1.80 [m] sentadas cómodamente.
- Barra antivuelco delantera y trasera.
- Espacio frontal diseñado para el almacenamiento de las baterías, y espacio suficiente para los anclajes de otras piezas.
- Medidas reglamentarias de la organización.

Para llevar el concepto desde el dibujo hasta un modelo CAD, se utiliza el software Autodesk Inventor Professional 2019. Este software permite, mediante sus librerías predefinidas, diseñar estructuras mediante la unión de perfiles comerciales, lo que ahorra mucho trabajo al diseñador.

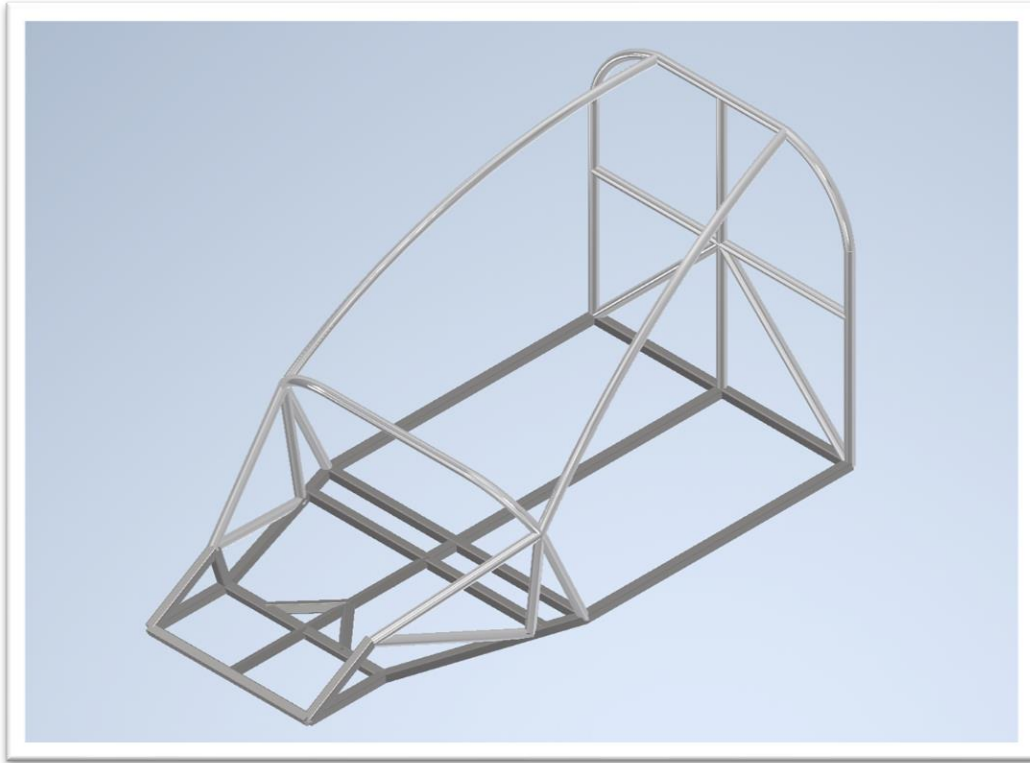


Imagen 23. Primer acercamiento del diseño del chasis.

El proceso de diseño tiene como uno de sus principales componentes la buena comunicación con el resto del equipo que participa en el proyecto. Esto es, encargados de las demás áreas mecánicas (adquisición de amortiguadores, frenos, sistemas de dirección, etc.), eléctrica, electrónica, gestión, etc. Si una de esas áreas hace cambios en sus componentes, repercutirá directamente el diseño del chasis puesto que éste es la base misma de todos los componentes.

En términos de programación de actividades, el equipo sólo cuenta con fechas estimadas de arribo de componentes importados y sólo algunos están disponibles para ser medidos directamente en el taller, por lo que el primer diseño de chasis que se realizó claramente no será permanente, pero da los primeros indicios de cómo será el definitivo.

Al final de todas las correcciones aplicadas en cuanto a las medidas, se llega a un diseño definitivo a priori, el cual primero debe ser testeado para ver si pasa la prueba de soportar su propio peso multiplicado por cuatro.

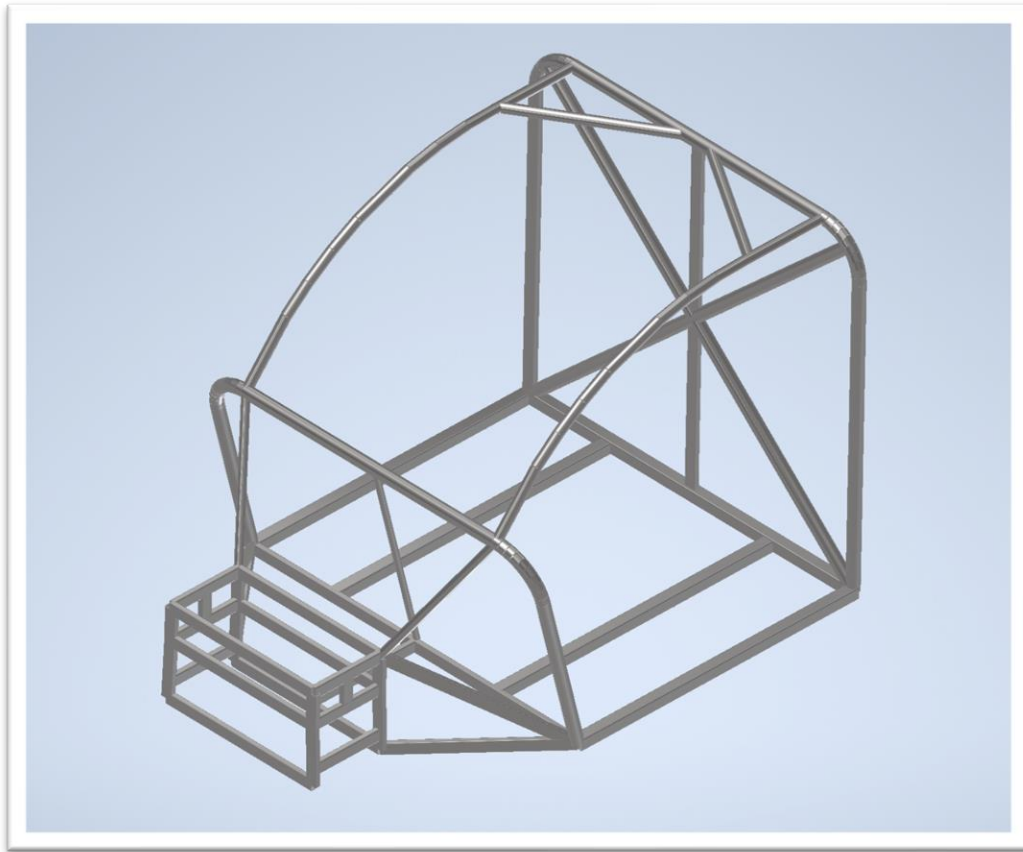


Imagen 24. Diseño final del chasis. Antes de llegar a este modelo, se pasó por una larga etapa iterativa.

El nuevo modelo tiene una masa aproximada de 58 [kg], un 31% menor que el primer chasis sobredimensionado de 84 [kg]. Ambos valores son entregados por el software tomando en cuenta las características del material.

4.3.2. Creación del entorno de estudio

Una vez desarrollado el modelo 3D del chasis, se puede empezar el análisis. Para este caso, y dado que el problema lo permite, se usa el módulo de Frame Analysis de Inventor.

Frame Analysis permite entender la integridad de las barras con perfiles definidos tomando en cuenta las deformaciones y esfuerzos cuando están sujetas a varias cargas y restricciones tomando en cuenta, además, las propiedades geométricas de las barras como lo son sus momentos inerciales. Particularmente, esta herramienta está desarrollada para proveer soporte al diseñador para identificar problemas de rendimiento y encontrar mejores alternativas de diseño.

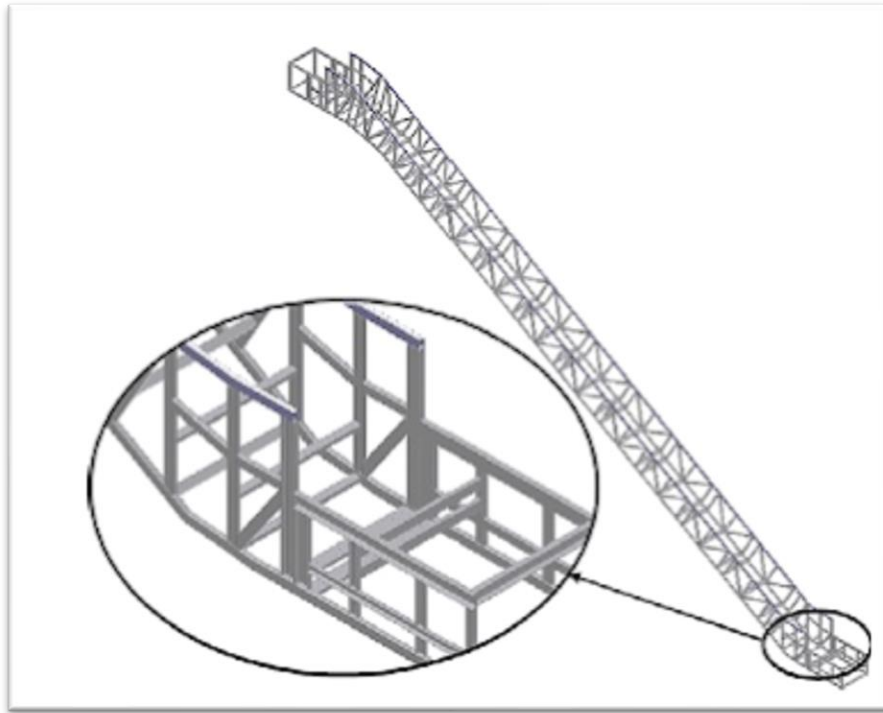


Imagen 25. Una gran cantidad de elementos lineales (barras) componen la estructura de una grúa.

Cada barra es considerada como un elemento lineal por lo que, para efectos de cálculo, las barras curvas deben aproximarse a pequeños elementos lineales. Esta tarea no representa un desafío para el diseñador ni tampoco una pérdida innecesaria de tiempo, puesto que Inventor permite separar este tipo de barras mediante sus funciones predefinidas de manera rápida y sencilla. Cada barra tiene seis grados de libertad (tres rotacionales y tres de desplazamiento) y se unen unas a otras mediante nodos.

El método de obtener el factor de seguridad es mediante la teoría de falla del esfuerzo normal máximo. La razón de ello es que el software ha probado entregar resultados favorables cuando se analizan estructuras con elementos lineales (barras) para predecir condiciones de falla de acuerdo con la teoría dicha anteriormente.¹⁷

Para hacer un correcto análisis, se debe seguir el siguiente flujo de trabajo.¹⁸

1. Poner expectativas. Estimar el comportamiento físico usando un modelo conceptual.
2. Pre-Procesar. Introducir las variables físicas al modelo y definir el análisis a realizar.
3. Resolver el modelo matemático.
4. Post-Procesar. Exponer y evaluar los resultados.
5. Revisar expectativas. Comparar los resultados con el punto 1.
6. Concluir. Mejorar parámetros de entrada. ¿Los resultados calzan con las expectativas?
 - a. Si la respuesta es NO, se deben revisar y modificar los parámetros de entrada para mejorar los resultados. Las modificaciones podrían incluir eliminar

- barras no deseadas, cambiar las cargas o restricciones, cambiar el tipo de análisis, etc. En este punto, el refinamiento es un proceso iterativo.
- b. Si la respuesta es SÍ, el trabajo de análisis está concluido. Un resultado favorable significa que el diseño está refinado y mejorado.

Por otro lado, el diseñador puede estarse preguntando por qué hacer uso de esta herramienta de análisis de barras en vez de ejecutar un análisis clásico con elementos finitos de tamaño reducido, como se suele hacer con este y otro tipo de elementos mecánicos. La razón es simple: el análisis usando barras como elementos requiere menos tiempo de preparación al usar modelos cuyo tamaño es notablemente menor y que requieren menos tiempo de resolución para el computador. Esto puede ser demostrado con el siguiente ejemplo, que corresponde a una barra de 1000 [mm] que está fija en un extremo y está siendo sometida a una fuerza de 1000 [N] en el otro.



Ilustración 19. Barra horizontal.

Los resultados del análisis de esfuerzos con el método de elementos finitos y los del análisis de barras (Frame Analysis de Inventor) se resumen en la Tabla 8 (pueden variar de acuerdo a la capacidad de procesamiento del computador).

	Desplazamiento [mm]	Esfuerzo (máx.) [MPa]	Tiempo de malladoⁱ [s]	Número de elementos	Tiempo de análisis [s]
Elementos finitos	1.97	53.32	8	5780	6
Análisis de barras	1.949	51.46	1	10	1
Resultados teóricos	1.949	51.46	-	-	-

Tabla 9. Comparación del tiempo de análisis para los distintos tipos de modelos de cálculo.

Los resultados ilustran que una simple estructura, como una sola barra, puede tener un impacto significativo en los tamaños de modelos y tiempos de análisis. Por esta simple razón es que es una práctica normal analizar estructuras con secciones transversales uniformes

ⁱ El tamaño predeterminado de elementos fue de 0.1 en el caso del análisis de elementos finitos.

usando barras como elementos. Otra ventaja de usar barras como elementos es que no hay singularidades en los esfuerzos, es decir, concentraciones. Dichas concentraciones son la causa probable de esa pequeña diferencia de esfuerzos comparados con el valor teórico (menos del 5%).

El estudio de resistencia del chasis se subdivide en una serie de casos en los que podría localizarse el impacto. Para efectos de considerar el factor de seguridad, la fuerza F aplicada en el impacto es:

$$F = 58 \text{ [kg]} \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 4$$
$$= 2276 \text{ [N]}$$

En el ambiente de simulación de Inventor, se escoge Frame Analysis. Automáticamente se divide al chasis en elementos lineales (barras) y se definen los nodos desde donde se puede concentrar la carga, o bien, distribuirla. Las restricciones de sujeción estarán determinadas por cada caso particular.

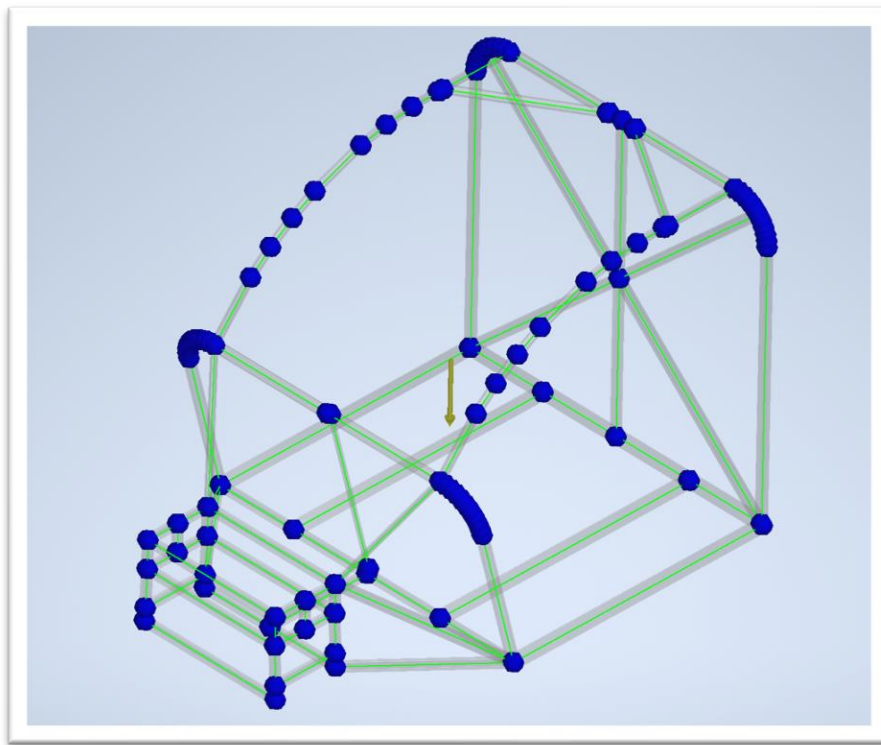


Imagen 26. Chasis del vehículo seccionado en elementos lineales.

4.3.3. Simulación estática

Con el fin de abarcar la mayor cantidad posible de escenarios, la simulación se divide en varios casos. La localización de las cargas se selecciona a partir de las zonas del chasis que impactarían al momento de producirse un volcamiento, siendo el valor que se aplica invariablemente cuatro veces la masa del vehículo, tal como solicita la organización de la carrera. Se considerará favorable el análisis si y sólo si en todos los casos el chasis muestra resistencia a las distintas sollicitaciones a las que se verá sometido.

Además, con el fin de hacer el análisis aún más amplio, se evalúan cargas aplicadas tanto a nodos como distribuida a lo largo de las barras. Los distintos tipos de análisis que se realizarán son:

1. Toda la carga aplicada a un nodo superior.
2. Toda la carga aplicada a un nodo inferior.
3. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco trasera.
4. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco delantera.
5. Carga distribuida a lo largo de uno de los arcos superiores antivuelco.
6. Carga distribuida en ambos arcos superiores.
7. Carga distribuida en toda la parte superior de la estructura.
8. Impacto lateral.
9. Impacto frontal.

Para estructuras de tipo armazón como lo es el chasis presentado, Frame Analysis de Inventor proporcionará un resultado válido para predecir su comportamiento.



Imagen 27. Vista frontal del chasis, en Maestranza Lourdes.

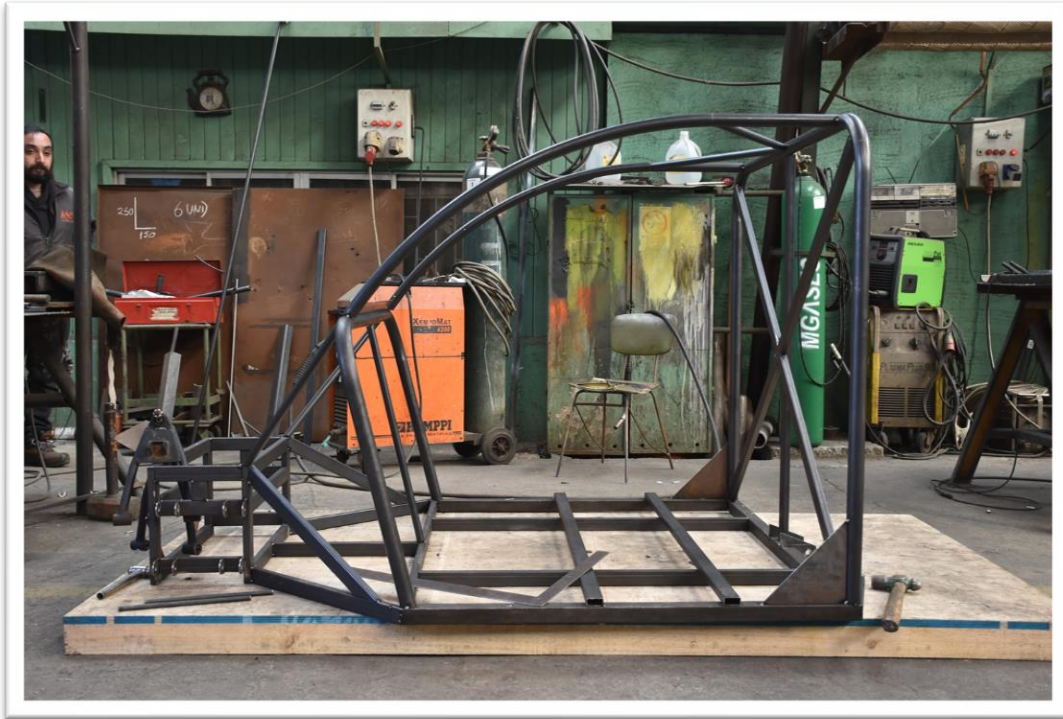
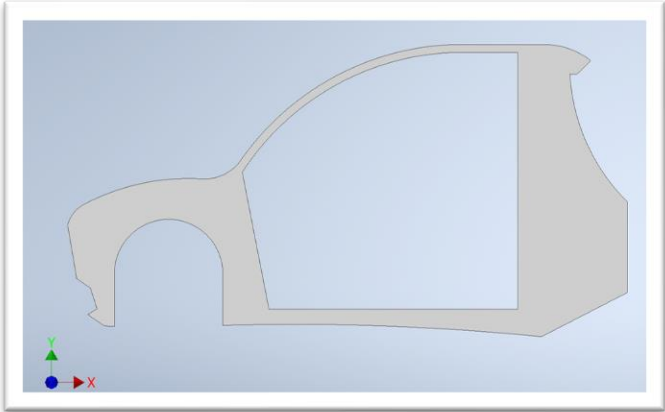
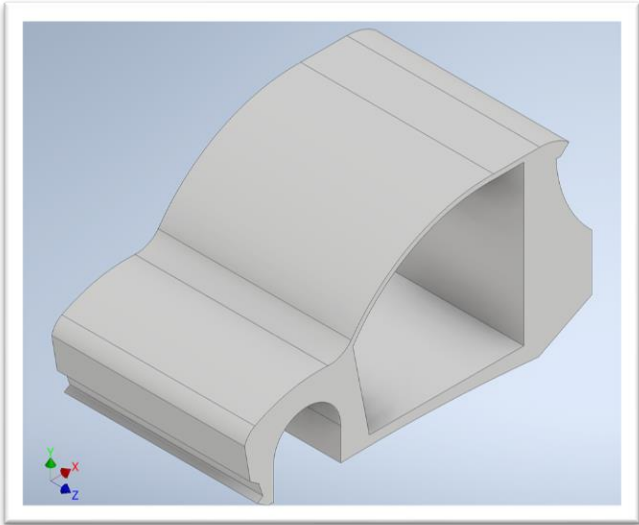


Imagen 28. Vista lateral del chasis, en Maestranza Lourdes.

4.4. Análisis aerodinámico

4.4.1.1. Preparación de la simulación

Para el desarrollo de la simulación computacional del flujo de aire sobre el vehículo se usa ANSYS Fluent, una potente herramienta de CFD que permite modelar el problema de forma simple, pero sin desmerecer sus condiciones de borde ni la validez de la solución. El modelo del carenado del vehículo es desarrollado en Inventor y, seguidamente, exportado al ambiente de simulación de ANSYS. La simulación será en tres dimensiones.



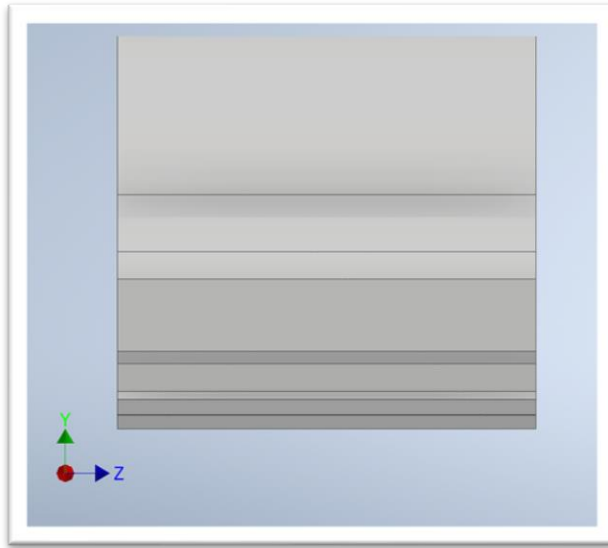


Imagen 29. Modelo tridimensional del carenado del vehículo.

El vehículo está pensado para funcionar sin puertas sólidas, sino que con una malla protectora que cubre la mitad de esta y sólo como una medida de seguridad adicional para los ocupantes. En la parte frontal, los espacios abiertos permiten que se posicionen las ruedas.

Lo que se pretende con la geometría del vehículo es generar carga aerodinámica (levante negativo) aunque eso signifique sacrificar el coeficiente de arrastre. Esto, porque el vehículo está pensado para correr una carrera y se requiere que esté lo más *fijo* al piso posible.

Luego de que la geometría del carenado está diseñada, se importa al módulo de Fluent en ANSYS. Ahí se genera un volumen de control, el cual es aproximadamente tres veces el largo del vehículo hacia atrás y uno hacia adelante.



Imagen 30. Vista lateral del volumen de control que envuelve a la geometría del vehículo.

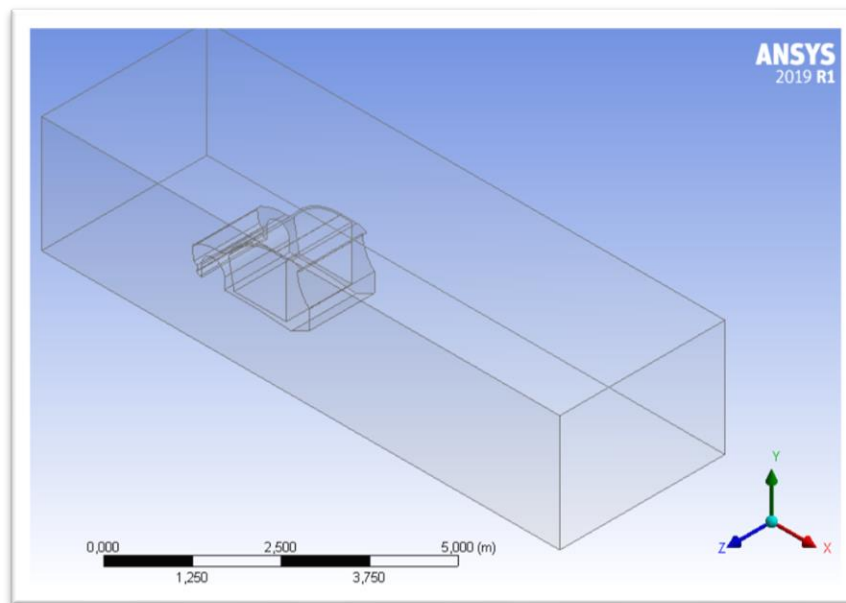


Imagen 31. Vista isométrica del volumen de control que envuelve a la geometría del vehículo.

4.4.1.2. Mallado

Se escoge un tamaño máximo de elemento de 0.1 [m], con funciones de inflación y de tamaño para las áreas menos y más importantes de la geometría del vehículo. Contando las paredes del volumen de control y al vehículo en sí, el mallado queda con los siguientes números

Nodos	129223
Elementos	717522

Tabla 10. Información del mallado arrojada por ANSYS.

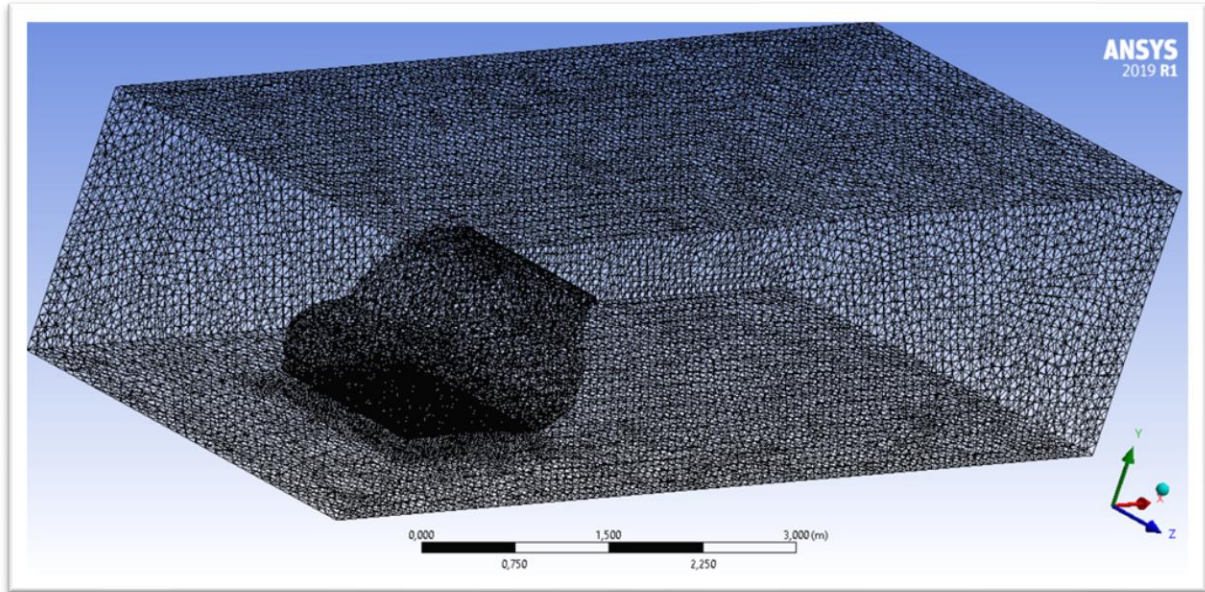


Imagen 32. El mallado realizado en el volumen de control y en la geometría del vehículo.

4.4.1.3. Condiciones de borde

El flujo puede considerarse:

1. **Estacionario o transiente.** Cuando la velocidad del fluido en cualquier punto no varía con el tiempo, se dice que el movimiento del fluido es estacionario. Es decir, todas las partículas que pasen por un punto del fluido lo harán con la misma velocidad en ese punto. En un flujo no estacionario (transiente) las velocidades son función del tiempo. Para este caso se considera flujo transiente, para tener en cuenta la variable del tiempo.
2. **Compresible o incompresible.** Por lo general puede considerarse que los líquidos fluyen de forma incompresible y la densidad de estos es constante, supuesto que se tendrá en cuenta en este caso.
3. **Viscoso o no viscoso.** La viscosidad en el movimiento de los fluidos es análoga al roce en el movimiento de los sólidos. La viscosidad introduce fuerzas tangenciales

entre las capas del fluido en movimiento relativo y se traduce en una disipación de energía mecánica. El modelo de viscosidad elegido es k-epsilon de dos ecuaciones.

El modelo de viscosidad de k-epsilon representa el más simple de los “modelos completos” de turbulencia de dos ecuaciones, en el cual la solución de dos ecuaciones de transporte separadas permite que la velocidad turbulenta y escalas de longitud sean determinadas independientemente. Este modelo es lo suficientemente robusto, económico y preciso para un gran espectro de flujos turbulentos, razón por la cual es muy popular en entornos industriales y simulaciones de transferencia de calor. Es un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo yace en consideraciones fenomenológicas y al empirismo.

En cuanto a la geometría del volumen del control, se le asigna a la parte frontal (de cara al frente del vehículo) la condición de entrada de velocidad (velocity-inlet) a la cual se le asigna una velocidad de 80 [km/h] mientras que, a la parte trasera, se le asigna la condición de salida de presión (pressure-outlet) a 0 [Pa]. Tanto las paredes del volumen de control, como el piso y el techo y la superficie del vehículo, son consideradas paredes (walls) para efectos de simulación.

4.4.1.4. Método de solución

En CFD, el algoritmo SIMPLE es ampliamente usado en procesos numéricos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes¹⁹. SIMPLE es el acrónimo, en inglés, para Semi-Implicit-Method for Pressure Linked Equations – Método Semi-Implícito para Ecuaciones Enlazadas de Presión. El algoritmo es iterativo y se basa en computar gradientes de velocidad y presión para finalmente corregirlos y aproximar una solución.

Antes de iniciar los cálculos se debe inicializar el proceso. Existen dos métodos de inicialización para los cálculos de Fluent, las cuales son la estándar y la híbrida. La inicialización híbrida está basada en la resolución de las ecuaciones de Laplace para determinar los parámetros de presión y velocidad mientras que todos los subsiguientes parámetros, como temperatura, turbulencia, fricciones, etc., han sido tomados como predefinidos. Por otro lado, la inicialización estándar le pide al usuario que ingrese cada valor para definir un ambiente apropiado y para aumentar la realidad de la simulación. Generalmente, la inicialización estándar se elige para ambientes controlados, mientras que la inicialización híbrida para con condiciones ambientales “normales”. En este caso, se escoge la inicialización estándar puesto que deben elegirse algunas variables de entrada, como la velocidad del viento.

Para la etapa de cálculo, se elige un tamaño de paso de tiempo de 0.05 [s], un número de pasos de tiempo de 400 y un máximo de 20 iteraciones por cada paso de tiempo, lo cual resulta en una simulación de 20 [s] de flujo.

La solución converge y entrega los resultados de coeficiente de arrastre, arrastre total, coeficiente de levante y levante total.ⁱⁱ

Para efectos de estudio, además, se debe hacer una comparación de los valores recién calculados con otros valores obtenidos de modificar la geometría del carenado. Las propuestas que se hacen para mejorar el desempeño aerodinámico son:

1. Usar puertas completas y sólidas.
2. Tapar el área de superficie donde van las ruedas.

Llevando dichas propuestas a un diseño CAD de manera simple pero efectiva, se presentan de la siguiente forma.

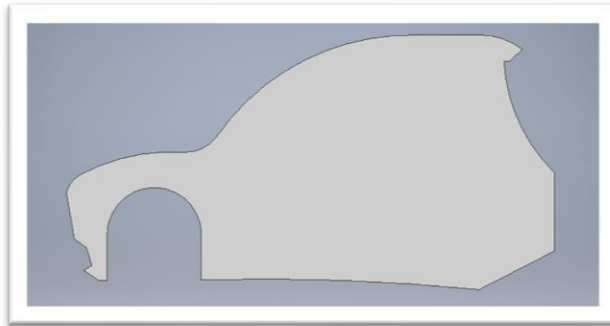


Imagen 33. Vehículo CAD con puertas, sin cubierta de ruedas.

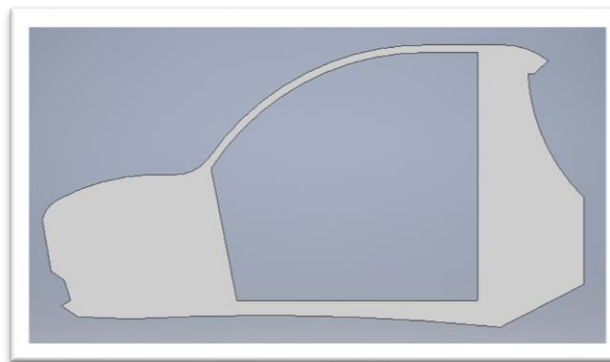


Imagen 34. Vehículo CAD sin puertas, con cubierta de ruedas.

ⁱⁱ Los resultados se muestran en la sección 5.2 de este informe.

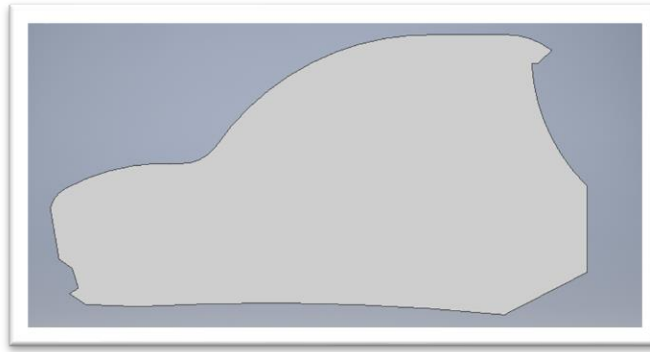


Imagen 35. Vehículo CAD con puertas y con cubierta de ruedas.

4.4.1.5. Estabilidad del vehículo en movimiento

En desmedro de la popularidad que han alcanzado los vehículos ecológicos de tres ruedas, es debido a su típico diseño delgado y liviano que tienen una gran complicación: no son estables en maniobras exigentes. Algunas mejoras han sido propuestas, como sistemas inclinables de ruedas y de suspensión, que se aplican dependiendo del fin del vehículo: uso urbano o uso competitivo. En esta parte, se cuantificará la estabilidad del vehículo de acuerdo con un modelo físico determinado y cuáles son las maniobras críticas que puede realizar.

La estabilidad lateral, que corresponde a la estabilidad del vehículo con respecto al eje perpendicular a su dirección de movimiento, se refiere a la tendencia del vehículo en movimiento a volver a su dirección original cuando es perturbada desde esa dirección, como es en el caso de las maniobras de giro. En general, los parámetros principales que pueden influenciar la estabilidad lateral de un vehículo son el tipo de neumáticos, magnitud de la carga normal, coeficiente de fricción del neumático/pavimento, vibraciones laterales y ángulos de deslizamiento lateral. Sin importar la causa que provoca inestabilidad lateral y cómo puede ser controlada, ésta puede tener una catastrófica consecuencia: el volcamiento.

Desde los tiempos de producción del primer automóvil, las fábricas automotrices han estado tratando de mejorar sus vehículos en orden de hacerlos más cómodos y seguros. Sin duda, una de las especificaciones más importantes de un vehículo con estas características es qué tan baja es su tendencia a volcarse cuando está girando o realizando maniobras exigentes. En general, el volcamiento ocurre cuando el conductor pierde el control de su vehículo. Es por las severas consecuencias que un volcamiento puede causar (daño permanente e incluso la muerte) es que ha ganado mucha atención por parte del público en general.

Para mejorar la estabilidad lateral de un vehículo y para prevenir su volcamiento, es esencial estudiar sus especificaciones para determinar el umbral de vuelco óptimo en un rango definido de condiciones. El Umbral de Aceleración Lateral (también llamado Factor Estático

de Estabilidad, SSF por sus siglas en inglés) es esencialmente dependiente de la geometría del vehículo, como se verá más adelante.

4.4.1.6. Umbral de vuelco

Para analizar el Umbral de Vuelco, el acercamiento usado en este estudio se deriva de una ecuación con momento nulo en el eje de vuelco. Dos sistemas de coordenadas son usados:

1. xy , que corresponde al sistema de coordenadas *original del vehículo*.
2. XY , que representa el sistema de coordenadas en el que se produce el volcamiento, siendo la componente Y la dirección que lo posiciona.

En el momento justo antes de que suceda el volcamiento, la fuerza normal de la rueda interna del radio de gira es cero, lo que significa que esa rueda está empezando a separarse del piso. Para empezar, es necesario encontrar el momento alrededor del eje de volcamiento. Ese momento M producido por el vector de fuerza \mathbf{F} sobre el vector unitario \mathbf{e} se define como

$$M = \mathbf{e}(\mathbf{r} \times \mathbf{F}) \quad (24)$$

Donde

\mathbf{e} es un vector unitario que define la dirección del eje de volcamiento (roll over axis).

\mathbf{r} es el vector de distancia entre el vector de fuerza \mathbf{F} y \mathbf{e} .

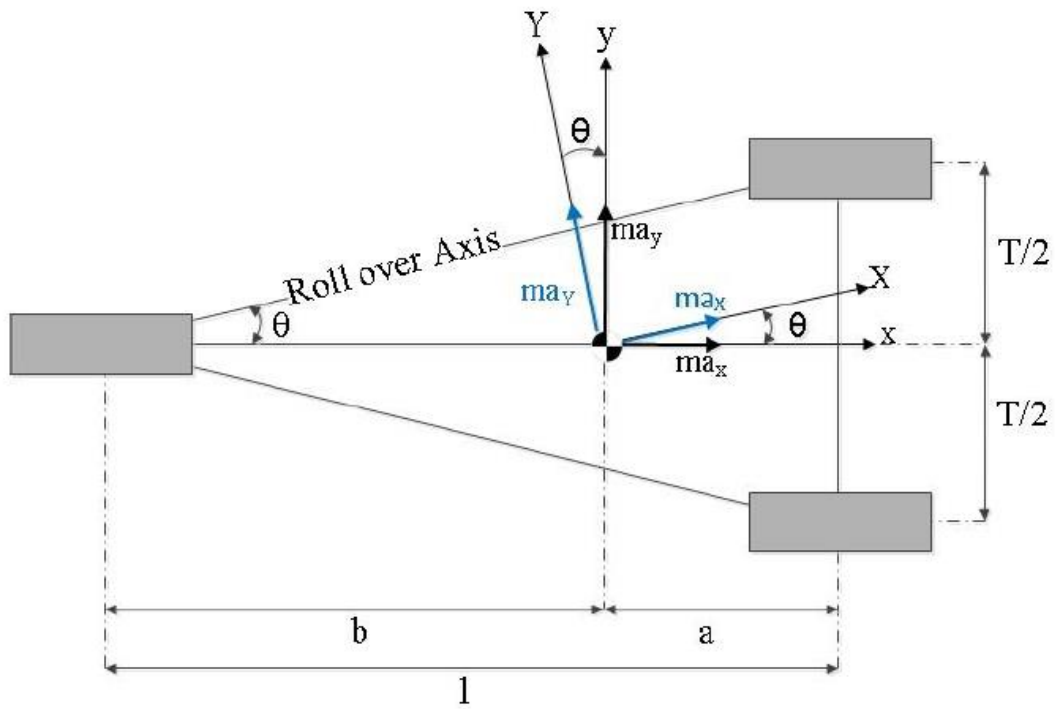


Ilustración 20. Nuevo sistema de coordenadas luego de la rotación en torno al eje z.

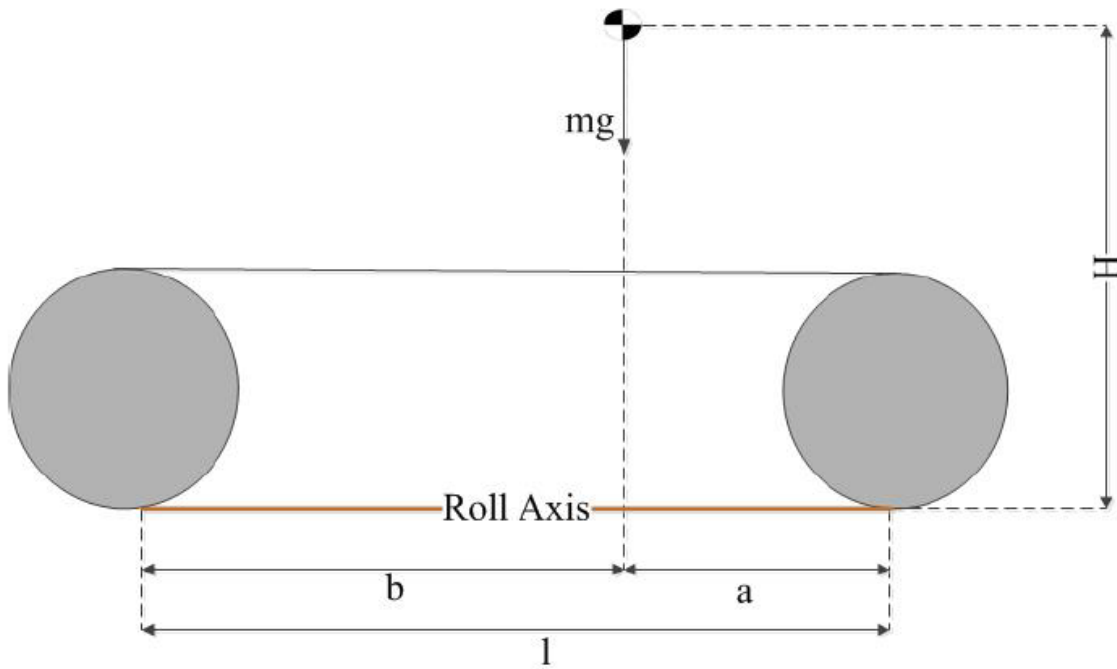


Ilustración 21. Vista lateral del vehículo mostrando su fuerza vertical (peso).

El vector \mathbf{F} es determinado en base al Principio de Inercia de D'Alembert como una fuerza actuando sobre una masa suspendida de forma paramétrica, de modo que queda expresada como:

$$\mathbf{e} = e_i \vec{i} + e_j \vec{j} + e_k \vec{k} \quad (25)$$

$$\mathbf{r} = r_i \vec{i} + r_j \vec{j} + r_k \vec{k} \quad (26)$$

$$\mathbf{F} = F_i \vec{i} + F_j \vec{j} + F_k \vec{k} \quad (27)$$

Entonces, la ecuación 24 puede ser expresada matricialmente como sigue

$$M = \begin{bmatrix} e_i & e_j & e_k \\ r_i & r_j & r_k \\ F_i & F_j & F_k \end{bmatrix} \quad (28)$$

En orden de hacer la ecuación de \mathbf{e} más simple, el nuevo sistema de coordenadas (que está ubicado en el centro de masa del vehículo) deberá ser paralelo al eje de volcamiento en orden de hacer que

$$\mathbf{e} = 1\vec{i} \quad (29)$$

Para hacer eso, el sistema de coordenadas debe ser rotado alrededor del eje z en un ángulo θ .

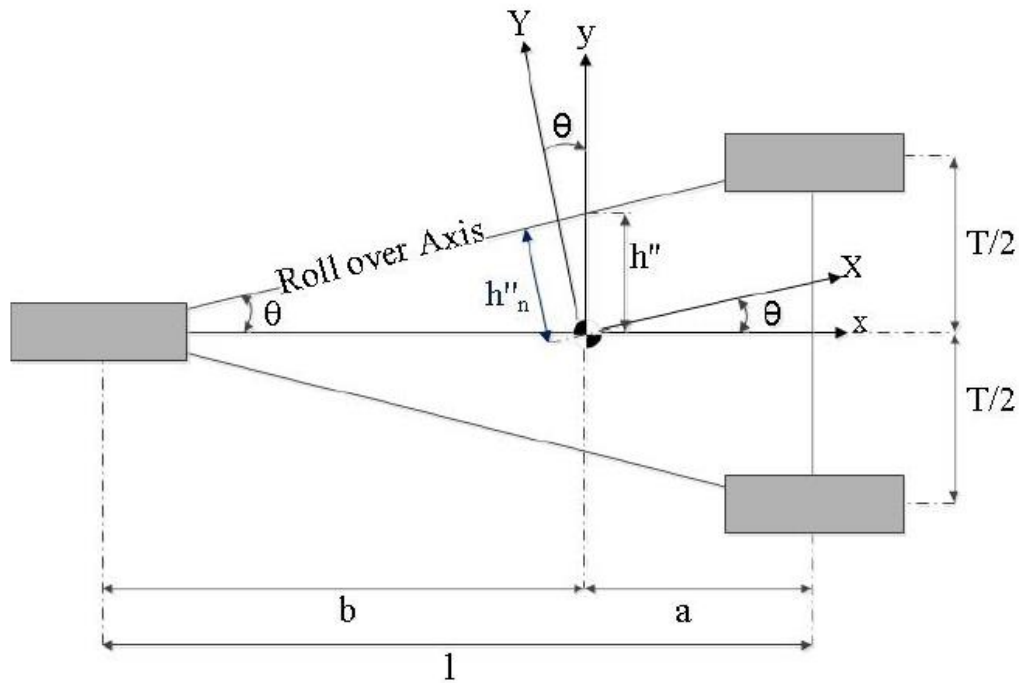


Ilustración 22. Distancia lateral desde el centro de gravedad CG al eje de volcamiento (rollover axis).

De acuerdo la Ilustración 22, el ángulo θ puede ser determinado por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{T}{2l}\right) \quad (30)$$

Y luego, en base al nuevo sistema de coordenadas, las fuerzas laterales y longitudinales: ma_x , ma_y y ma_z respectivamente, quedan definidas como:

$$ma_y = ma_y \cos(\theta) - ma_x \sin(\theta) \quad (31)$$

$$ma_x = ma_x \cos(\theta) - ma_y \sin(\theta) \quad (32)$$

Y

$$ma_z = mg \quad (33)$$

En este nuevo sistema de coordenadas, el eje de volcamiento es paralelo al eje X y perpendicular al eje Y. Para determinar el vector de distancia, la distancia lateral desde el centro de masa hacia el eje de volcamiento debe ser calculado.

Básicamente,

$$\frac{h''}{\frac{T}{2}} = \frac{b}{l} \rightarrow h'' = \frac{T \times b}{2l} \quad (34)$$

Mientras que,

$$h''_n = h'' \cos(\theta) \quad (35)$$

Sustituyendo la ecuación 34 en 35, se obtiene

$$h''_n = \frac{T \times b}{2l} \cos(\theta) \quad (36)$$

Entonces, el nuevo vector de distancia puede ser descrito como

$$\mathbf{r} = 0\vec{i} + h''_n\vec{j} + H\vec{k} \quad (37)$$

Y agregando la ecuación 36

$$\mathbf{r} = 0\vec{i} + \frac{T \times b}{2l} \cos(\theta)\vec{j} + H\vec{k} \quad (38)$$

Para encontrar el momento en el eje de volcamiento, reemplazando las ecuaciones 31, 32 y 38 en la ecuación 28 y considerando que $\mathbf{e} = 1\vec{i}$, el momento de volcamiento será

$$M_{\text{volcamiento}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T \times b}{2l} \cos(\theta) & H \\ ma_x \cos(\theta) + ma_y \sin(\theta) & ma_y \cos(\theta) + ma_x \sin(\theta) & mg \end{bmatrix} \quad (39)$$

Finalmente, cuando este momento es cero:

$$\frac{T \times b}{2l} \cos(\theta) (mg) - H(ma_y \cos(\theta) + ma_x \sin(\theta)) = 0 \quad (40)$$

a_y representa el Umbral de Vuelco (Factor Estático de Estabilidad, SSF) del vehículo y puede ser determinado despejándolo de la ecuación anterior, resultando en:

$$a_y = \frac{\frac{Tb}{2l} g \cos(\theta) + Ha_x \sin(\theta)}{H \cos(\theta)} \quad (41)$$

Esta ecuación muestra la magnitud del Umbral de Vuelco en $[m/s^2]$, considerando el caso que el vehículo no está tomando una curvatura y no tiene ángulo de volcamiento aplicado al cuerpo.

4.4.1.7. Efecto del viento lateral

En ciertas locaciones geográficas existe el llamado viento lateral o viento cruzado, que corresponde a aquel que impacta de manera perpendicular al eje en que se mueve el vehículo. Estos vientos, dependiendo de su magnitud, pueden significar un gran problema de estabilidad para vehículos de tres ruedas, por lo que se deben tomar en cuenta para finalizar el análisis aerodinámico.

Para este caso, se vuelve a recurrir a las capacidades de Fluent para obtener los valores de los momentos obtenidos en los ejes xy . Sin embargo, hay que recordar que el eje de volcamiento del vehículo no es con respecto a estos ejes, sino que a los nuevos ejes XY que se definieron anteriormente, por lo que se debe hacer una relación trigonométrica para hacer válido este fenómeno.

Con el fin de no complejizar innecesariamente el problema, la manera de simular un viento cruzado es girando al vehículo en un ángulo determinado de acuerdo con la magnitud del viento que se aplica. Esto con el fin de conservar la condición de borde de una sola entrada de velocidad en el volumen de control.

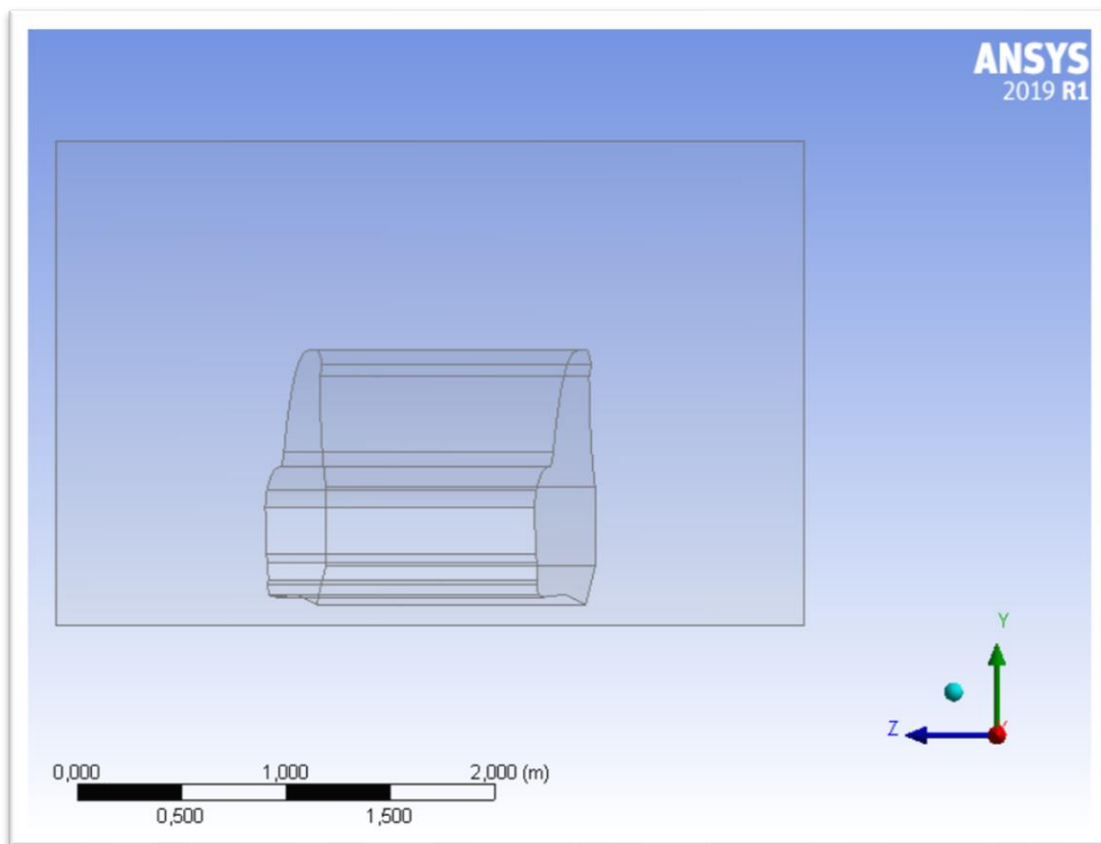


Imagen 36. Vista frontal del volumen de control que contiene al vehículo. Se puede ver que el vehículo está girado a su derecha en un ángulo definido.

Visión frontal del vehículo dentro del volumen de control. Está girado para considerar el efecto del viento cruzado. El ángulo de giro estará definido por el ángulo descrito por el siguiente triángulo:



Ilustración 23. Vectores de velocidad axial y transversal del vehículo en movimiento.

Los valores de viento cruzado que se simularán serán de 10, 20 y 30 [km/h]. Así, aplicando la geometría descrita anteriormente, se tiene que los ángulos de giro del vehículo son:

Viento cruzado [km/h]	Ángulo γ
10	7.13°
20	14.04°
30	20.56°

Tabla 11. Magnitudes del viento cruzada y los respectivos ángulos que resultan del triángulo de la Ilustración 21.

La velocidad total que se introduce en Fluent corresponde a la suma pitagórica del viento cruzado y los 80 [km/h] iniciales. Además, para obtener el radio crítico de giro r para la velocidad determinada, se debe despejar a de la siguiente ecuación de aceleración centrífuga

$$a_y = \frac{V^2}{r} = 1.88g \quad (42)$$

Donde V es la velocidad resultante de la suma pitagórica entre los vientos longitudinales y transversales y $1.88g$ corresponde al umbral de vuelco. Con lo anterior, ya se puede sintetizar un resultado.

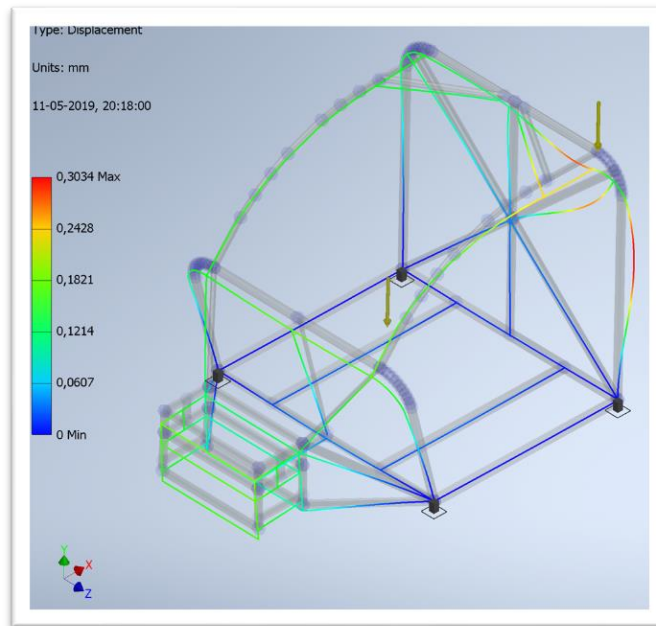
5. Resultados

5.1. Resultados del análisis estático

5.1.1. Caso 1. Toda la carga en solo un nodo superior.

En este caso, toda la carga está concentrada en una de las esquinas de la barra antivuelco trasera. La sujeción está en la parte inferior del chasis, es decir, como si estuviera fijo al piso.

Los resultados son los siguientes.



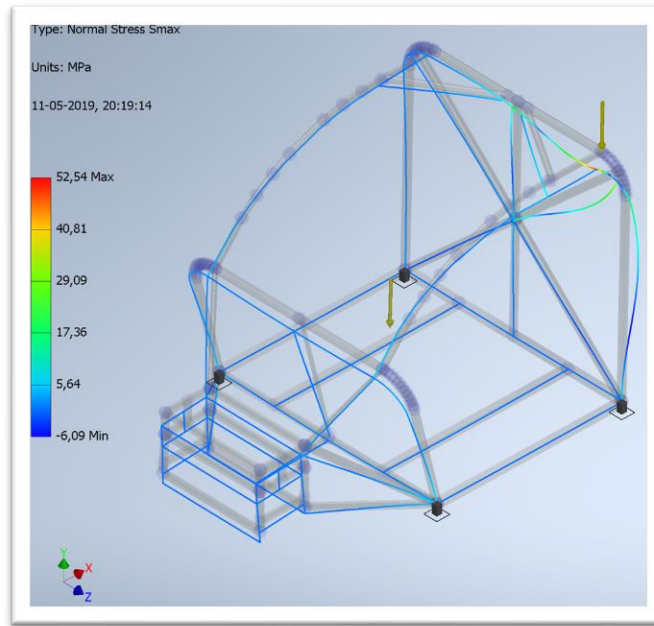


Imagen 37. Resultados de la simulación para el Caso 1.

Se aprecian resultados satisfactorios al verificar que el máximo esfuerzo es de 52.54 [MPa], muy lejos del límite plástico de 250 [MPa] y con una deformación máxima inferior a 1 [mm]. Esto quiere decir que las barras diseñadas están cumpliendo bien su función de distribuir la carga al resto del armazón, haciendo menos crítico el impacto.

5.1.2. Caso 2. Toda la carga en un solo nodo inferior.

Para este caso, toda la carga se concentra en una esquina de la barra antivuelco delantera, justo antes de entrar en la zona curva. Los resultados se muestran a continuación.

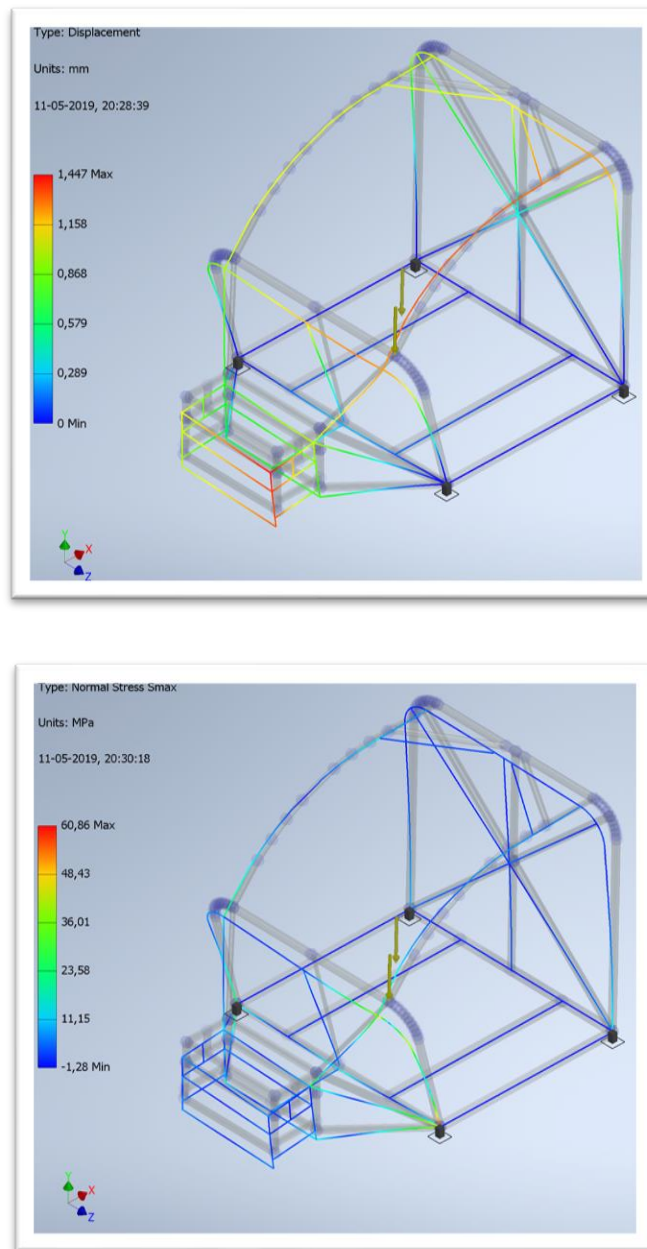


Imagen 38. Resultados de la simulación para el Caso 2.

Esta vez el esfuerzo es levemente mayor que en el caso anterior, alcanzando un valor de 60.86 [MPa] en el punto de máxima sollicitación. Asimismo, el desplazamiento máximo es de aproximadamente 1.5 [mm]. Sin embargo, sigue estando dentro de los márgenes de seguridad, por lo que se determina que el comportamiento es bueno ante esta situación.

5.1.3. Caso 3. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco trasera.

En este caso la carga no será puntual, sino que distribuida. El largo de la barra, sin contar las zonas curvas de las esquinas, es de 1000 [mm], lo cual conduce a una carga distribuida de 2.276 [N/mm] a lo largo de ella. Los resultados son los siguientes.

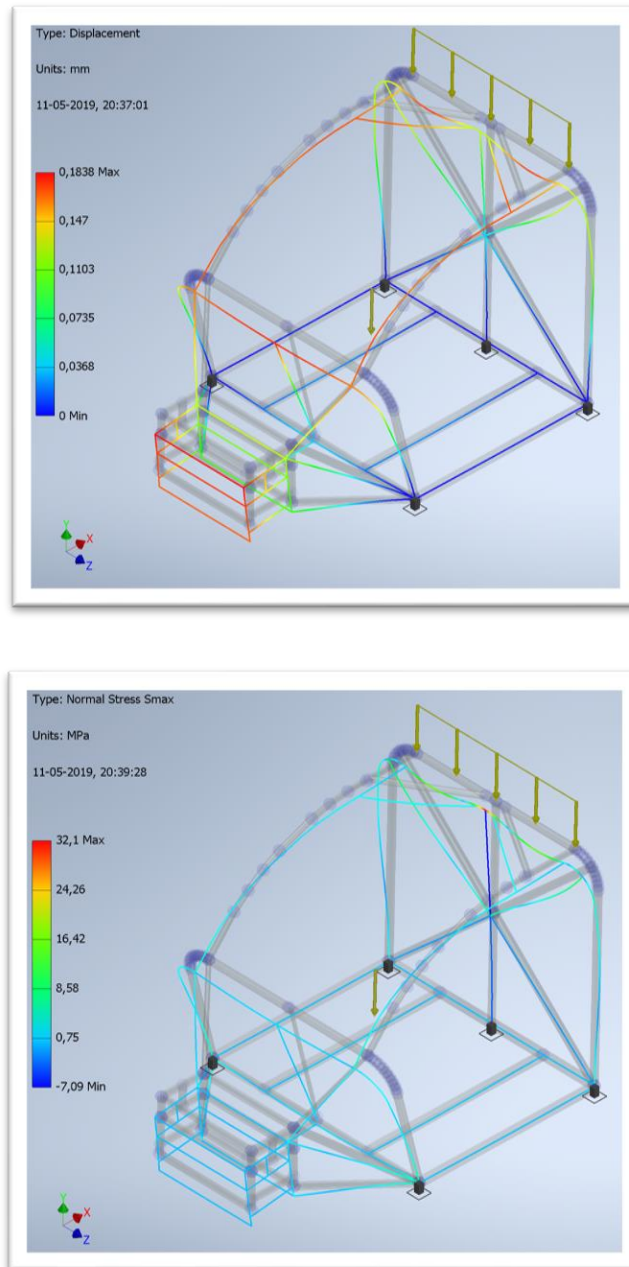
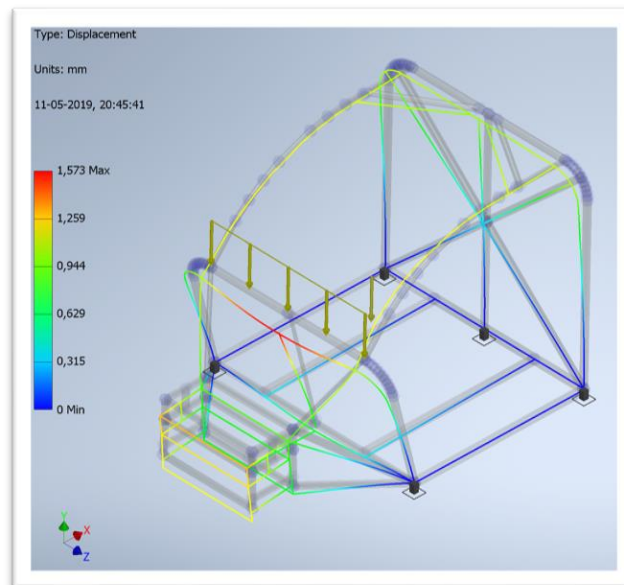


Imagen 39. Resultados de la simulación para el Caso 3.

La carga, al ser distribuida, es conducida a través de las barras a los elementos inferiores del chasis, provocando un desplazamiento -muy pequeño- en casi toda la estructura. El esfuerzo máximo es de 32.1 [MPa], lo cual no representa un peligro. Se puede ver que la barra central que conecta la base del chasis con la barra antivuelco está en compresión, mientras que las demás distribuyen la carga a lo largo de toda la estructura.

5.1.4. Caso 4. Carga distribuida a lo largo de la parte superior de la barra antivuelco delantera.

Similar al Caso 3, esta vez se aplica una carga uniformemente distribuida a lo largo de la barra antivuelco delantera, cuyo valor es de 2.276 [N/mm].



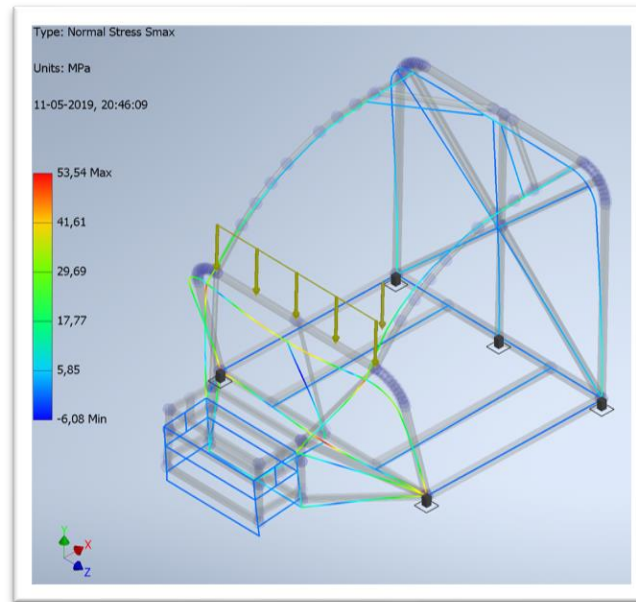


Imagen 40. Resultados de la simulación para el Caso 4.

Las barras, nuevamente, cumplen su función de distribuir la carga a lo largo de la estructura, lo que hace que la parte impactada no se resienta demasiado. Valor máximo de esfuerzo, 53.54 [MPa] y desplazamiento de aproximadamente 1.5 [mm], los cuales son valores seguros.

5.1.5. Caso 5. Carga distribuida a lo largo de uno de los arcos superiores.

Esta vez, la carga se distribuye en solo uno de los arcos que unen las barras antivuelco primaria y secundaria. Como se mencionó anteriormente, al ser esta una barra curva, fue aproximada mediante las funciones del software a una barra compuesta por segmentos lineales, a fin de permitir al programa hacer su análisis de manera certera. El largo del arco, una vez aproximado, es de 1437 [mm], lo cual significa que la carga estará distribuida a un valor de 1.59 [N/mm].

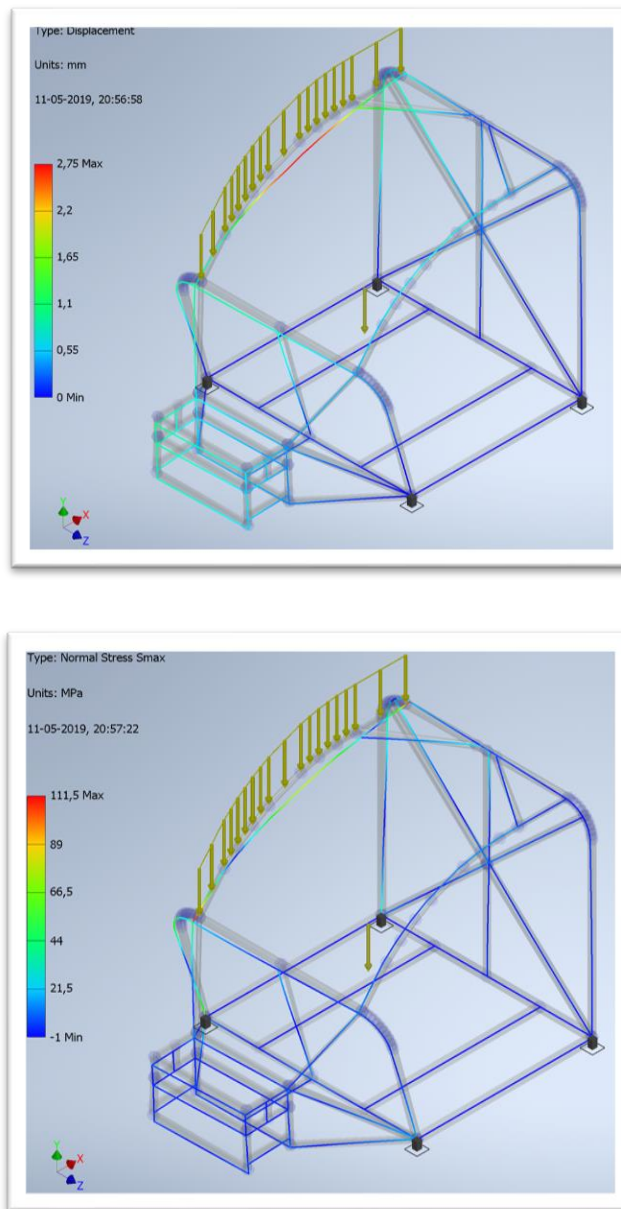
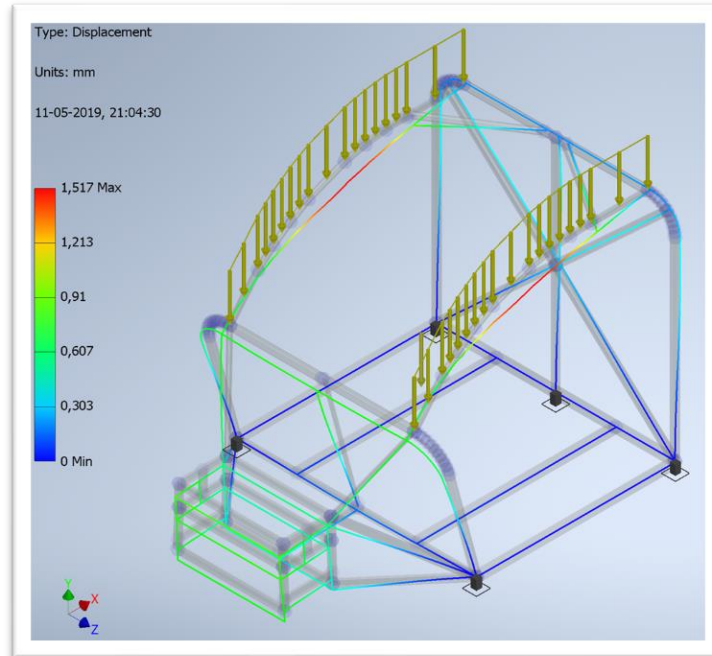


Imagen 41. Resultados de la simulación para el Caso 5.

Se puede ver fácilmente que el esfuerzo máximo es notablemente mayor que en todos los casos anteriores, así como también la deformación que sufre el arco. Se puede ver que los puntos más solicitados son los que unen los extremos del arco a las barras antivuelco respectivas. A pesar de ser valores bastante más elevados, siguen sin representar un peligro para los ocupantes del vehículo y sigue estando dentro del rango de esfuerzos permisibles (bajo el límite plástico).

5.1.6. Caso 6. Carga distribuida en ambos arcos superiores.

Esta vez, se espera que la sollicitación máxima se vea disminuida al repartir la carga en las dos barras a un valor de 0.8 [N/mm], produciendo además una deformación inferior al caso anterior.



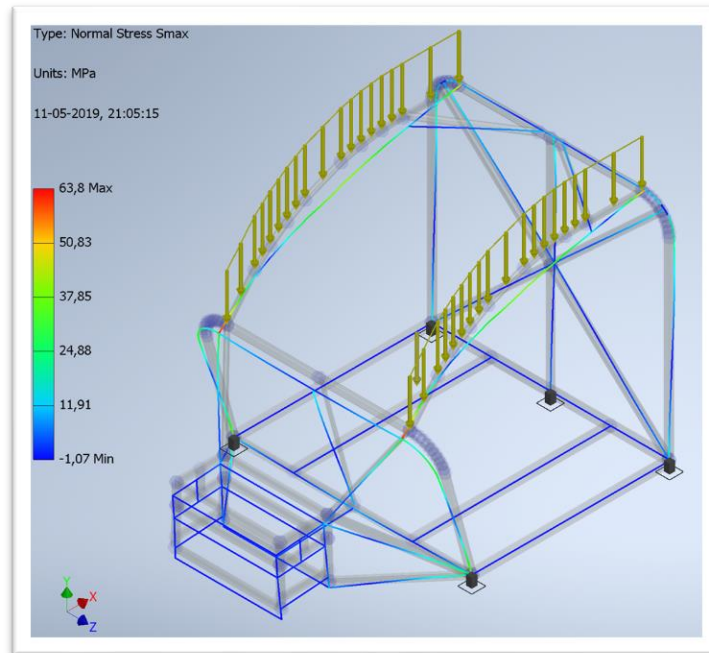


Imagen 42. Resultados de la simulación para el Caso 6.

Como era de esperar, la carga disminuye a 63.8 [MPa] y la deformación a aproximadamente 1.5 [mm]. Valores totalmente aceptables.

5.1.7. Caso 7. Carga distribuida en toda la parte superior de la estructura.

En este caso, la carga se distribuye tanto en los arcos como en las zonas superiores de las barras antivuelco. Considerando todas las longitudes, se tiene que la carga debe estar distribuida a una razón de 0.47 [N/mm].

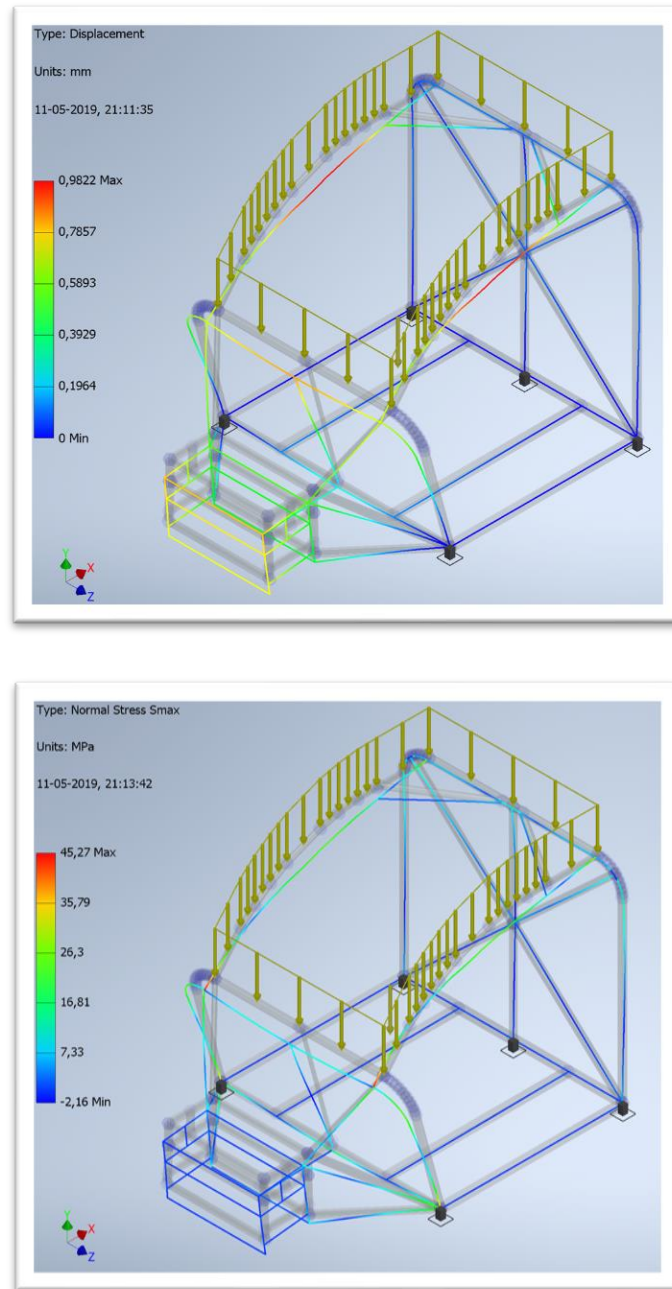
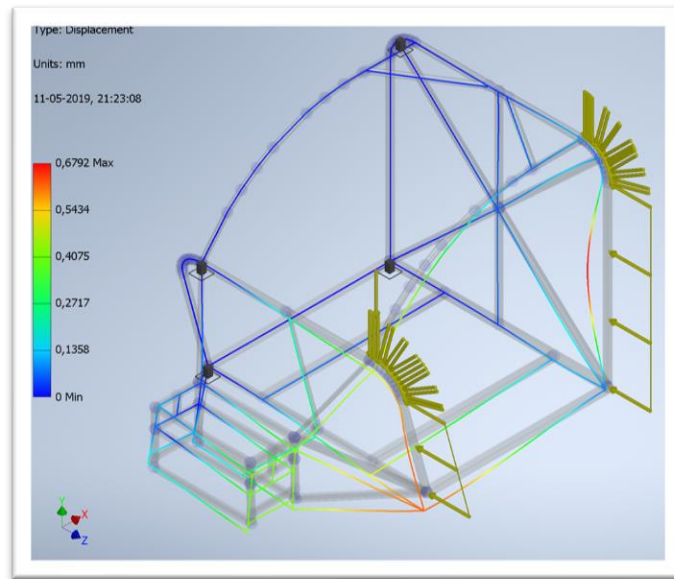


Imagen 43. Resultados de la simulación para el Caso 7.

El esfuerzo máximo disminuye aún más al distribuir la carga a las barras antivuelco. Los valores se siguen manteniendo en rangos aceptables.

5.1.8. Caso 8. Impacto lateral.

En este caso, se simulará que el chasis recibe un impacto lateral en uno de los lados de las barras antivuelco, considerando las zonas curvas de las esquinas, las cuales son aproximadas a elementos lineales. Para este caso, considerando las longitudes, se tiene que la carga es distribuida a una razón de 1.09 [N/mm]. Para este caso, el chasis se fija en el lado opuesto a la zona de impacto.



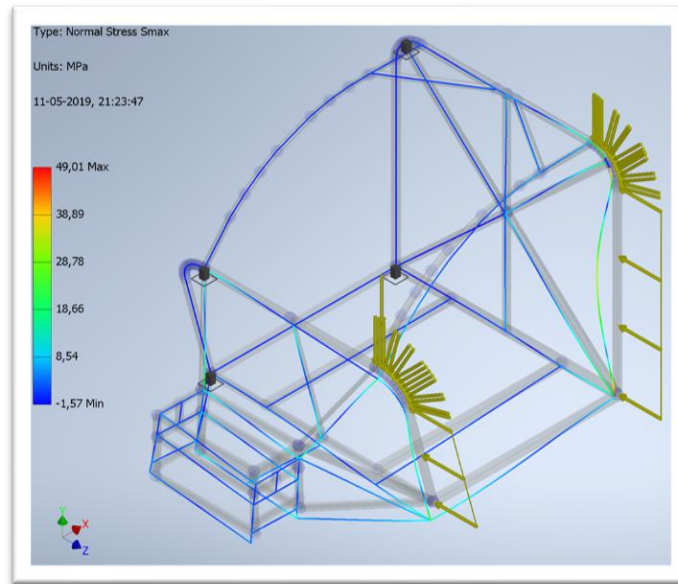


Imagen 44. Resultados de la simulación para el Caso 8.

En general, el impacto es bien resistido por la estructura. Como se ve, el esfuerzo máximo es de 49.01 [MPa] y la deformación máxima de menos de 1 [mm], por lo que se sigue cumpliendo con los estándares de resistencia requeridos.

5.1.9. Caso 9. Impacto frontal.

Dada la situación de que se produzca un choque frontal, se tiene que la carga estará distribuida a razón de 1.39 [N/mm].

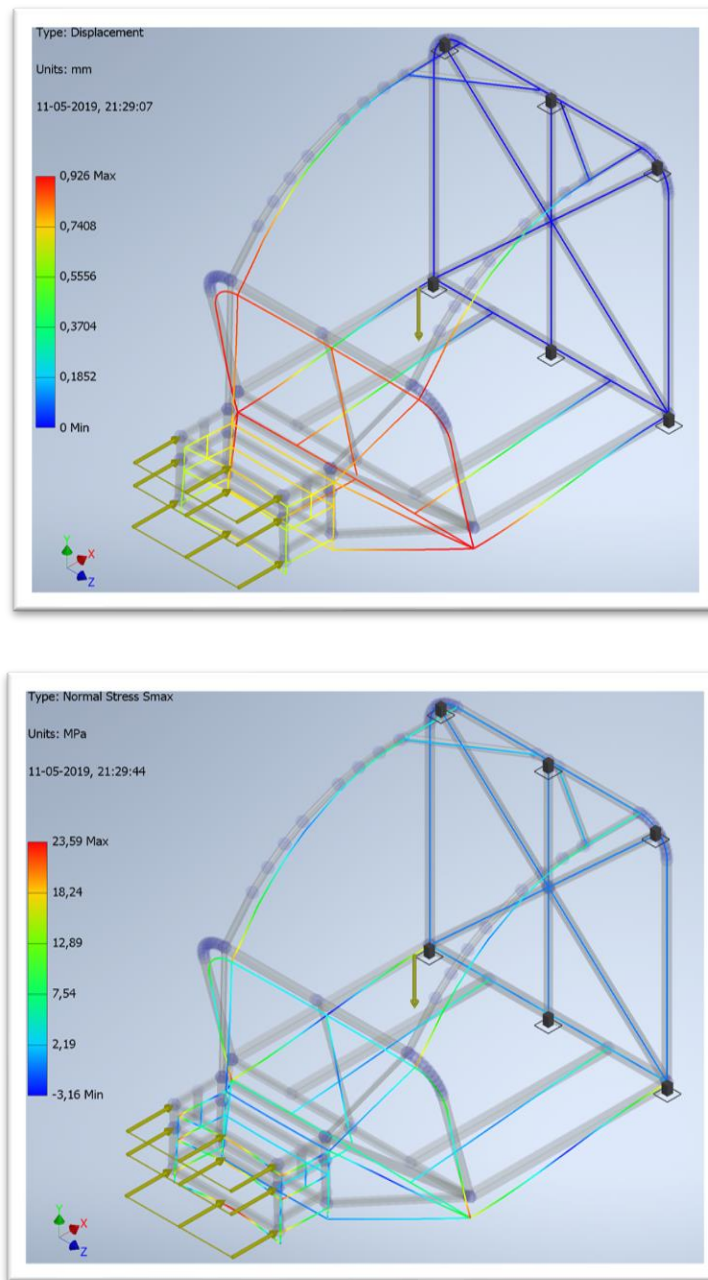


Imagen 45. Resultados de la simulación para el Caso 9.

Todas las barras que unen la parte frontal del chasis con las partes traseras cumplen de muy buena forma su labor de distribuir la carga del impacto hacia atrás, produciendo un valor muy bajo de esfuerzo máximo de 23.59 [MPa] y una deformación máxima de aproximadamente 1 [mm].

5.1.10. Resultado general

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos del análisis estático.

Caso	Esfuerzo normal máximo [MPa]	Desplazamiento máximo [mm]
1	52.54	0.3034
2	60.86	1.447
3	32.1	0.1838
4	53.54	1.573
5	111.5	2.75
6	63.8	1.517
7	45.27	0.9822
8	49.01	0.6792
9	23.59	0.926

Tabla 12. Resultados entregados por Inventor del análisis estático.

5.2. Resultados del análisis aerodinámico

5.2.1. Resultados de los coeficientes de arrastre y levante

Los resultados para los coeficientes de arrastre y levante que arroja Fluent para la geometría del vehículo, tomando en cuenta las puertas y el espacio abierto para las ruedas, son los siguientes:

Arrastre

Forces - Direction Vector (1 0 0)						
Zone	Forces (n) Pressure	Viscous	Total	Coefficients Pressure	Viscous	Total
vehicle_surface	602.06323	6.6925755	608.75581	1.2560416	0.013962243	1.2700038
Net	602.06323	6.6925755	608.75581	1.2560416	0.013962243	1.2700038

Levante

Forces - Direction Vector (0 1 0)						
Zone	Forces (n) Pressure	Viscous	Total	Coefficients Pressure	Viscous	Total
vehicle_surface	-195.21729	1.0361788	-194.18111	-0.4072679	0.002161706	-0.40510619
Net	-195.21729	1.0361788	-194.18111	-0.4072679	0.002161706	-0.40510619

Los resultados de las nuevas simulaciones, las cuales se llevaron a cabo usando las mismas condiciones de borde que la primera, pero con distintas geometrías para analizar la variación de los valores estudiados, se resumen en la siguiente tabla.


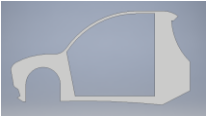
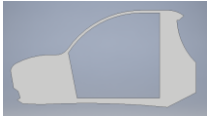

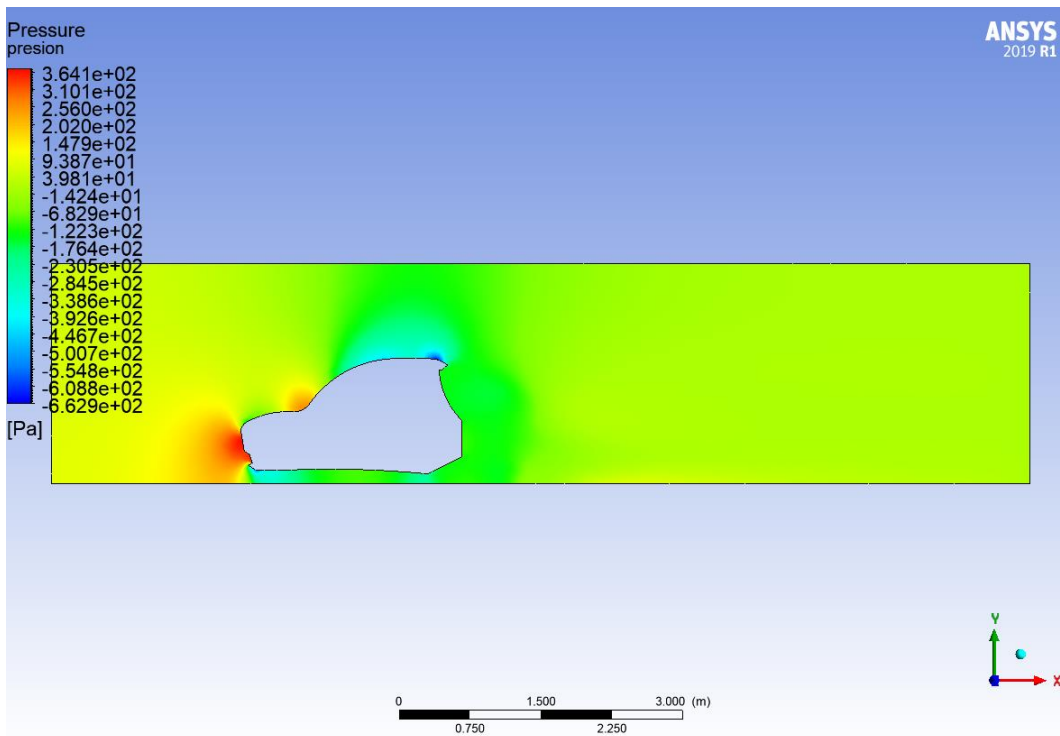
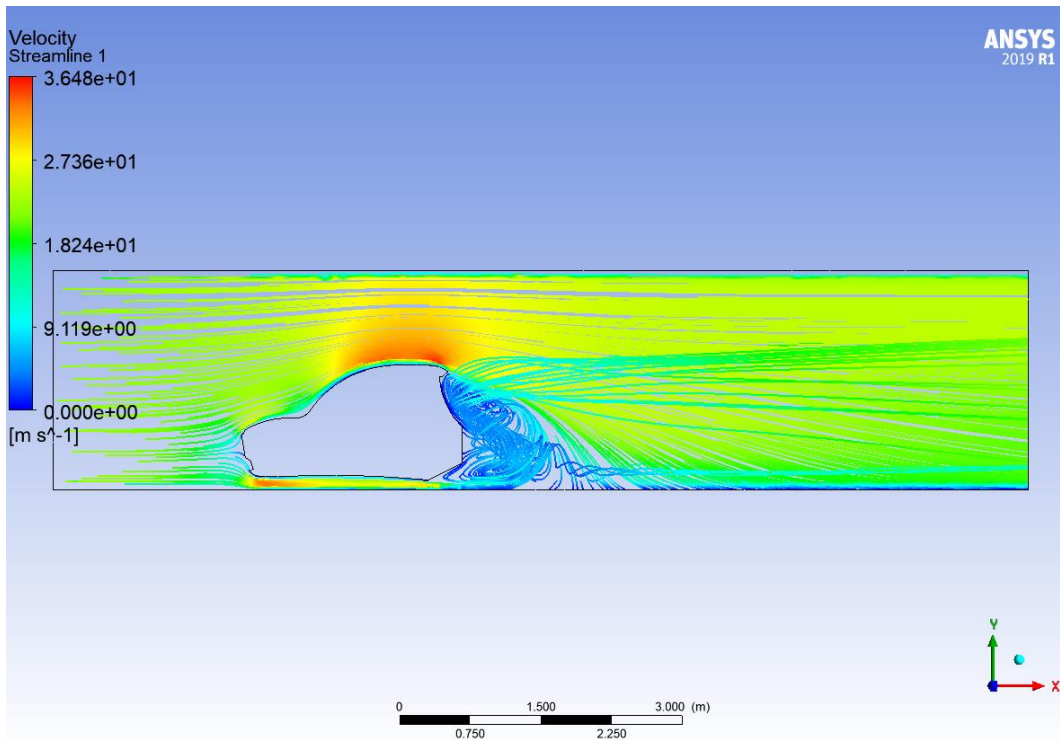
Geom.				
#	1	2	3	4
Drag Coef.	0.70357091	1.2700038	1.2348713	0.74480872
Drag Force	337.24558 N	608.75581 N	591.91591 N	357.01188 N
Lift Coef.	-0.40128345	-0.40510619 N	-0.72760567	-0.59777776
Lift Force	-192.18333 N	-194.18111 N	-348.7662 N	-286.535 N

Tabla 13. Resultados de los coeficientes de arrastre y levante, así como las magnitudes de sus fuerzas, datos entregados por Fluent.

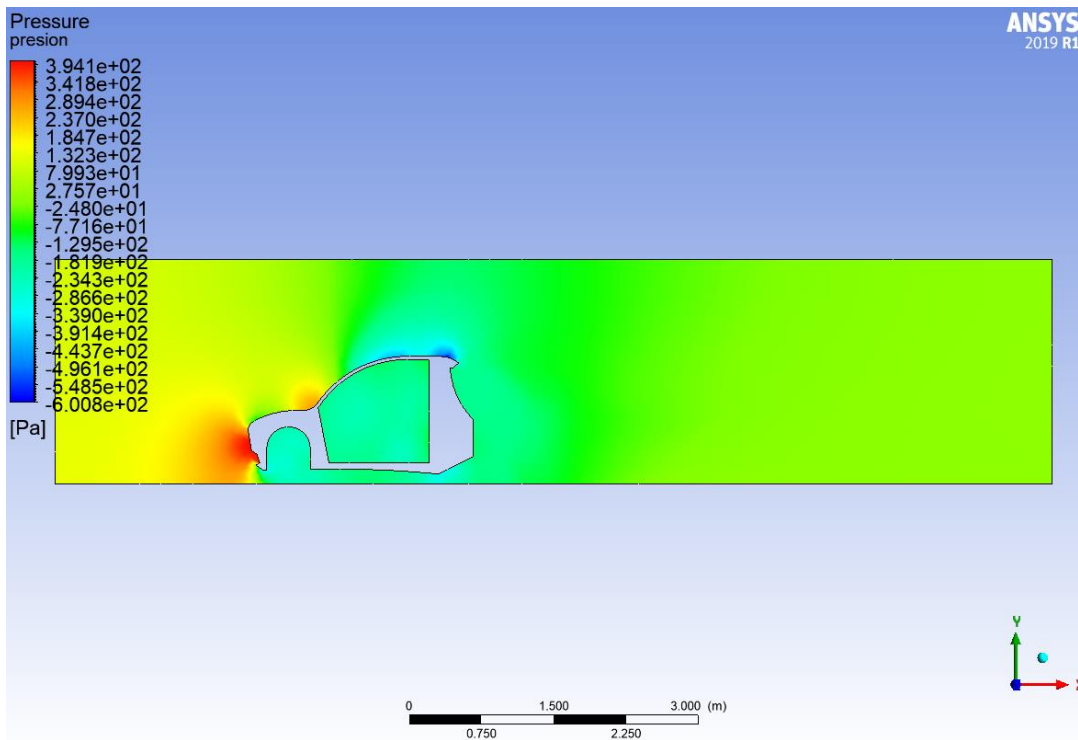
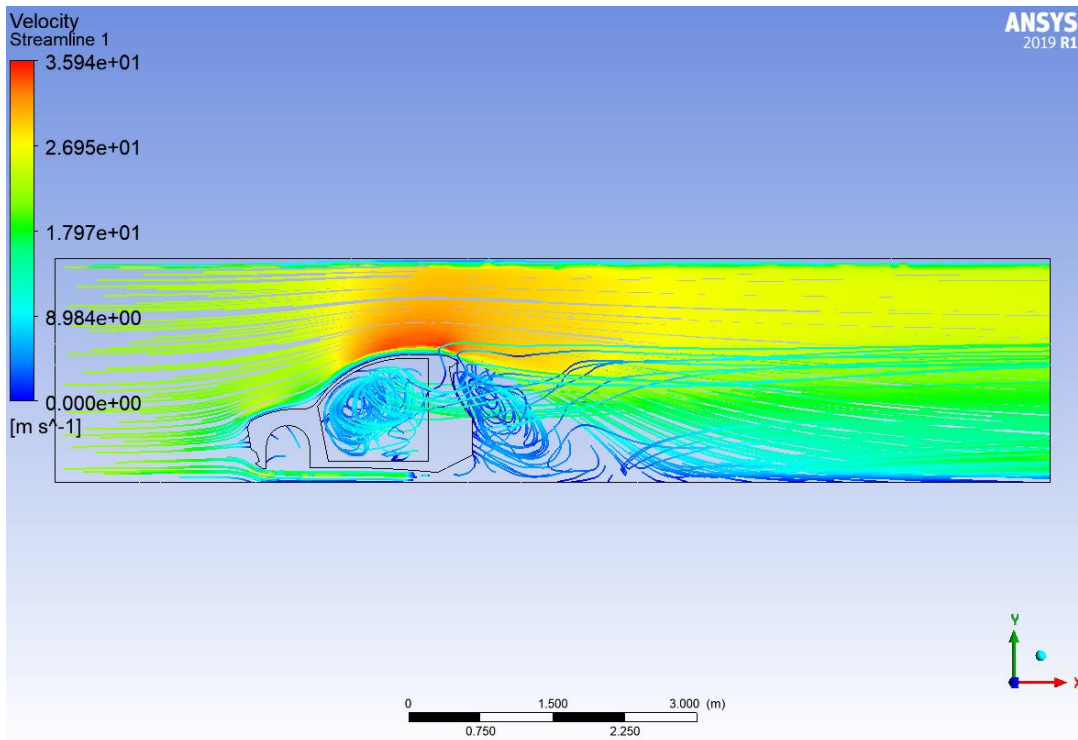
5.2.2. Perfiles de velocidad y presión

Un perfil de velocidad muestra las líneas de flujo alrededor del objeto en movimiento, mostrando su forma de distribución y el comportamiento del fluido bajo las condiciones establecidas. De esta forma se pueden identificar zonas en donde el fluido se comporta de forma laminar o turbulenta, algo que está condicionado fuertemente por la geometría del vehículo, como se verá a continuación.

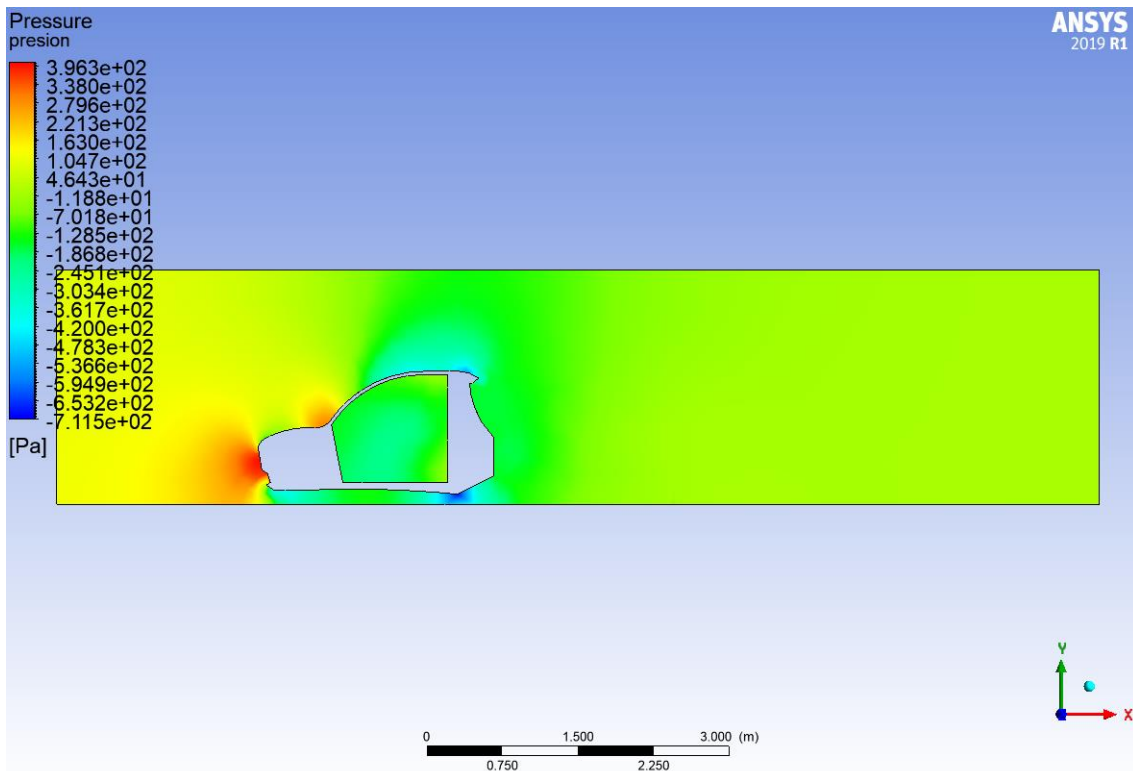
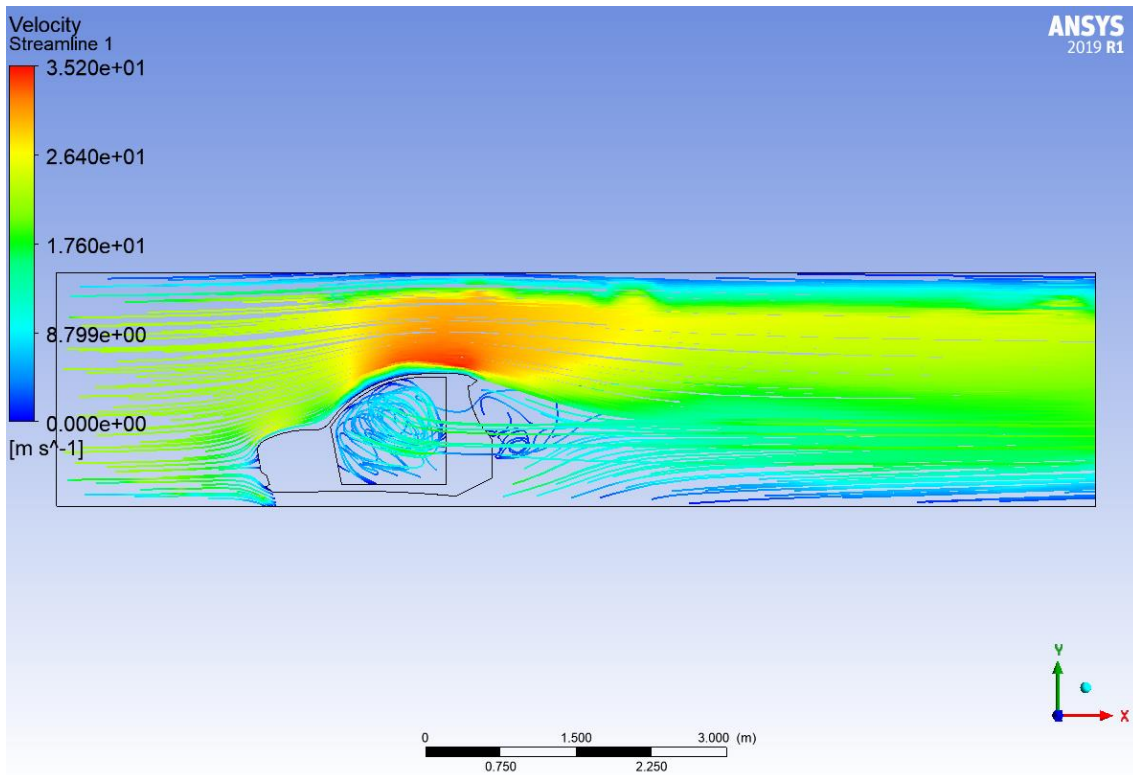
5.2.2.1. Caso 1.



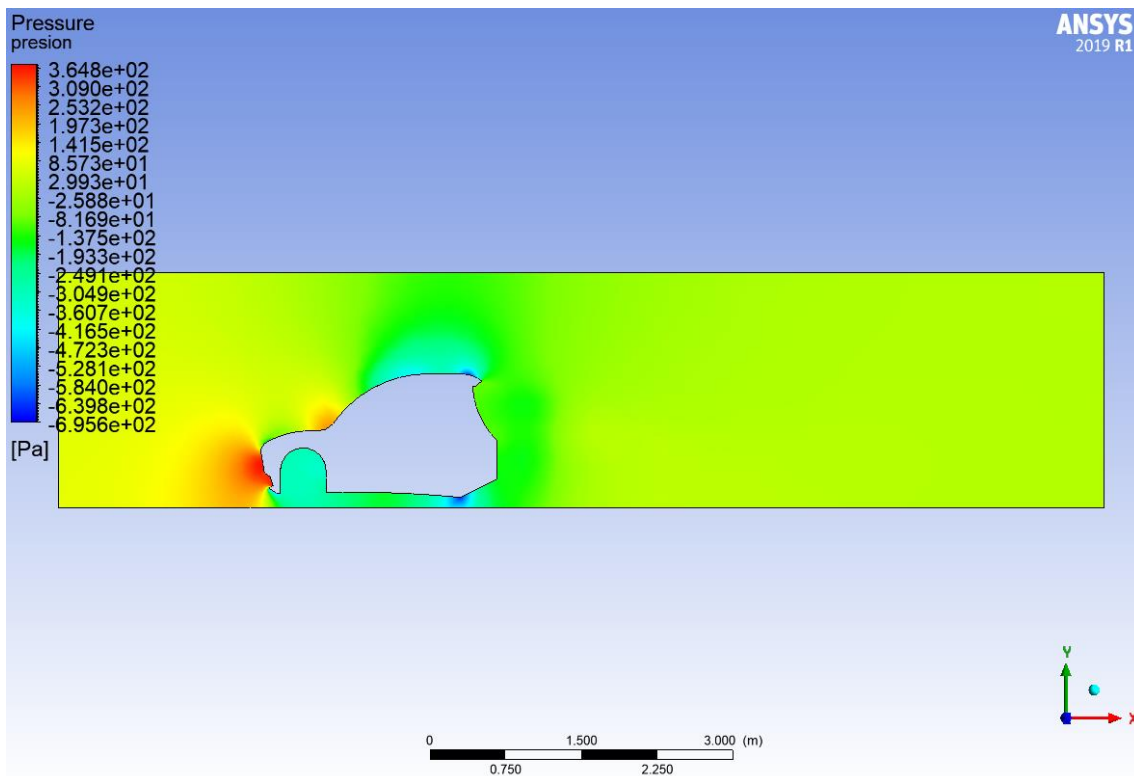
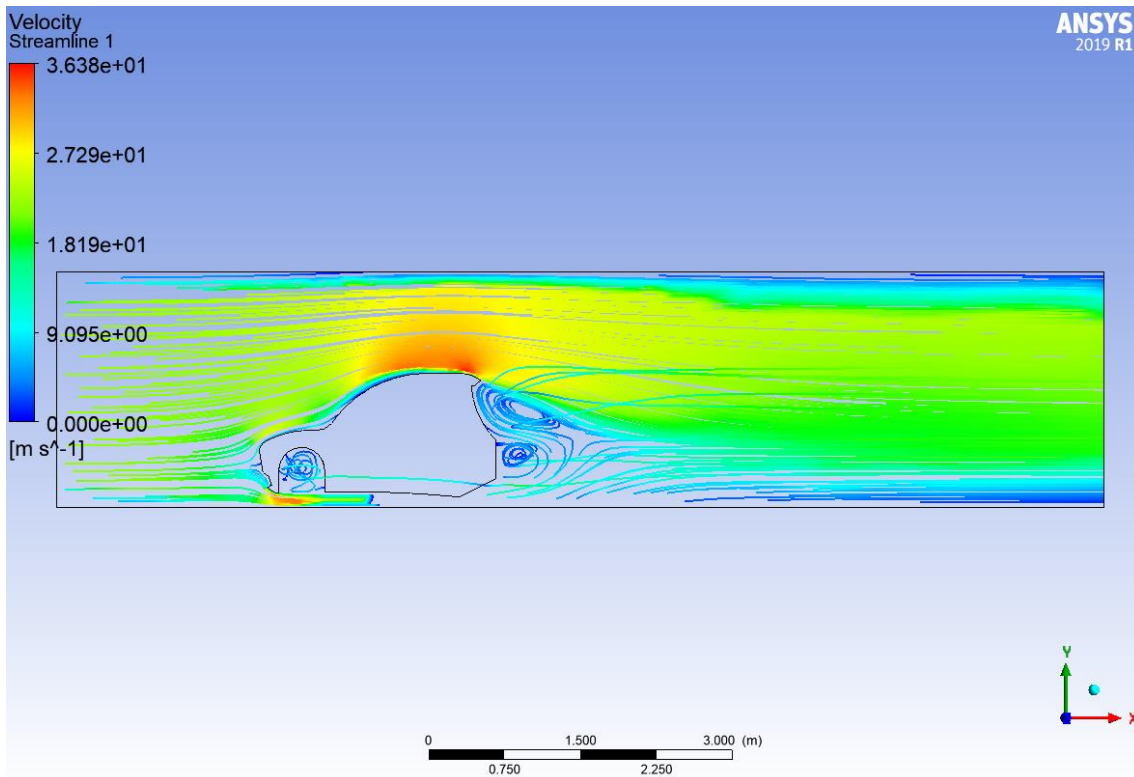
5.2.2.2. Caso 2.



5.2.2.3. Caso 3.



5.2.2.4. Caso 4.



5.2.2.5. Resultado general

La geometría del primer caso, al ser cerrada, permite lograr un mejor coeficiente de arrastre. Esta vendría siendo la geometría idónea del vehículo, en la que no se compromete el desempeño como sucede con los demás casos, en los que se puede ver que cuando el aire se entromete a la zona interior del vehículo, este genera flujos turbulentos que finalmente se traducen en un aumento de la fuerza de arrastre. El flujo turbulento, además, es generado al desprenderse de la zona trasera del vehículo. El *streamlining* en general, se cumple, al ser las líneas de flujo relativamente estables a lo largo del vehículo y desprenderse al final del mismo, provocando la transición laminar-turbulenta.

Además, es importante notar que las puertas son las que juegan el factor clave al momento de tomarlas en cuenta, dado que su presencia modifica radicalmente el valor del coeficiente de arrastre, teniendo en el caso más extremo una diferencia de 81% entre el valor que se obtiene con la geometría cerrada y con la geometría totalmente abierta.

Por otro lado, los valores del coeficiente de levante no suelen verse tan alterados como los de arrastre al variar los casos, incluso conservan el mismo valor si el vehículo tiene una geometría totalmente abierta o cerrada. Esto es debido a que la forma de lograr carga aerodinámica de manera más efectiva en vehículos terrestres es por medio de su inicio (parachoques frontal con *splitters*) o su fin (alergones). El vehículo cuenta con un pequeño alerón que se extiende en su parte superior trasera, lo cual permite que la carga esté siempre presente sin ser un valor muy grande.

Los campos de presiones muestran que, en general, los valores se mantienen bastante similares en los casos. Una zona de alta presión al frente, producida por el impacto directo del frente del vehículo con el aire, con zonas de baja presión atrás, producidas por la succión que se genera en el volumen inmediatamente atrás del vehículo en movimiento.

5.2.3. Resultados del umbral de vuelco

Umbral de vuelco del vehículo, tomando en cuenta sus características geométricas:

$$a_y = 1.88g \quad (43)$$

Resultados del análisis de estabilidad lateral:


	10 km/h	20 km/h	30 km/h
Velocidad transversal			
Velocidad total	80.62 km/h	82.46 km/h	85.44 km/h
Ángulo θ	22.17°	22.17°	22.17°
Momento en X	264.81631 Nm	301.02949 Nm	345.92649 Nm
Momento en Z	90.366705 Nm	25.697185 Nm	-104.84675 Nm
$M_x \cos(\theta)$ + $M_z \sin(\theta)$	279.3 Nm	288.5 Nm	280.8 Nm
Umbral de vuelco	1.88g	1.88g	1.88g
Radio crítico de giro	27.2 m	28.4 m	30.53 m

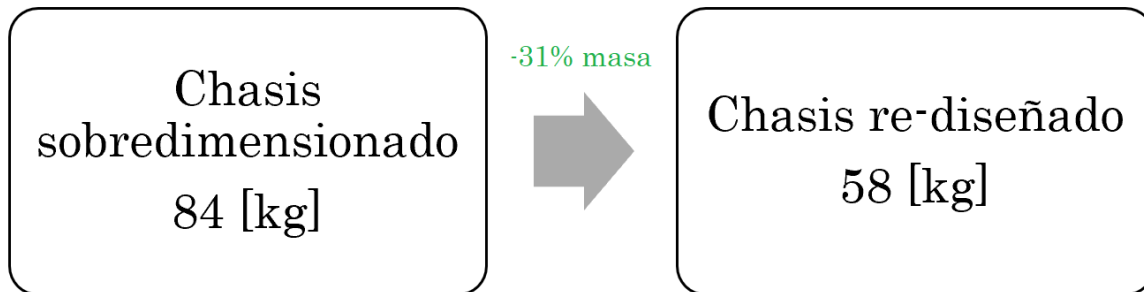
Tabla 14. Resultados del análisis de estabilidad lateral del vehículo para distintas condiciones de viento cruzado.

Como es de esperar, mientras más rápido es el viento lateral, más grande será el radio de giro crítico antes de que se produzca un volcamiento. Para ponerlo en perspectiva, la Piscina de la USM Casa Central, que corresponde a una piscina semi-olímpica, mide 25 [m] de largo. Es decir, el radio crítico de giro es un poco más largo que dicha piscina, lo cual no es poco. Si bien la simulación arroja resultados favorables, estos pueden cambiar drásticamente si las condiciones de entrada (velocidad del viento, geometría) son modificadas.

6. Conclusiones

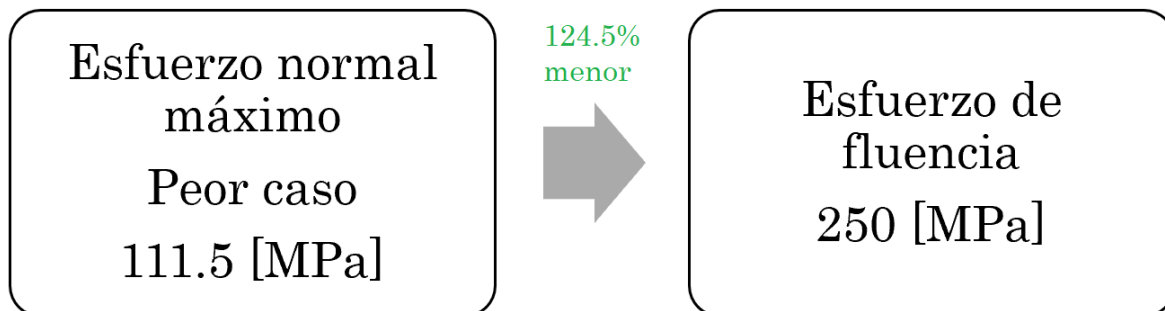
El análisis general efectuado al vehículo da como resultado valores aceptables en sus distintos apartados, los cuales son los esperados para garantizar un desempeño óptimo y seguro para los ocupantes.

Desde el chasis sobredimensionado, el vehículo pasó por un proceso de transformación en el cual, por medio de una metodología de diseño, se llegó a un modelo optimizado para reducir espacios y masa innecesaria que se traduciría en carga innecesaria para el vehículo.



Siendo la masa uno de los factores principales que condicionan el buen desempeño de vehículos que ocupan energías renovables de baja eficiencia, se logró el objetivo de rediseñar el chasis de forma eficaz y eficiente.

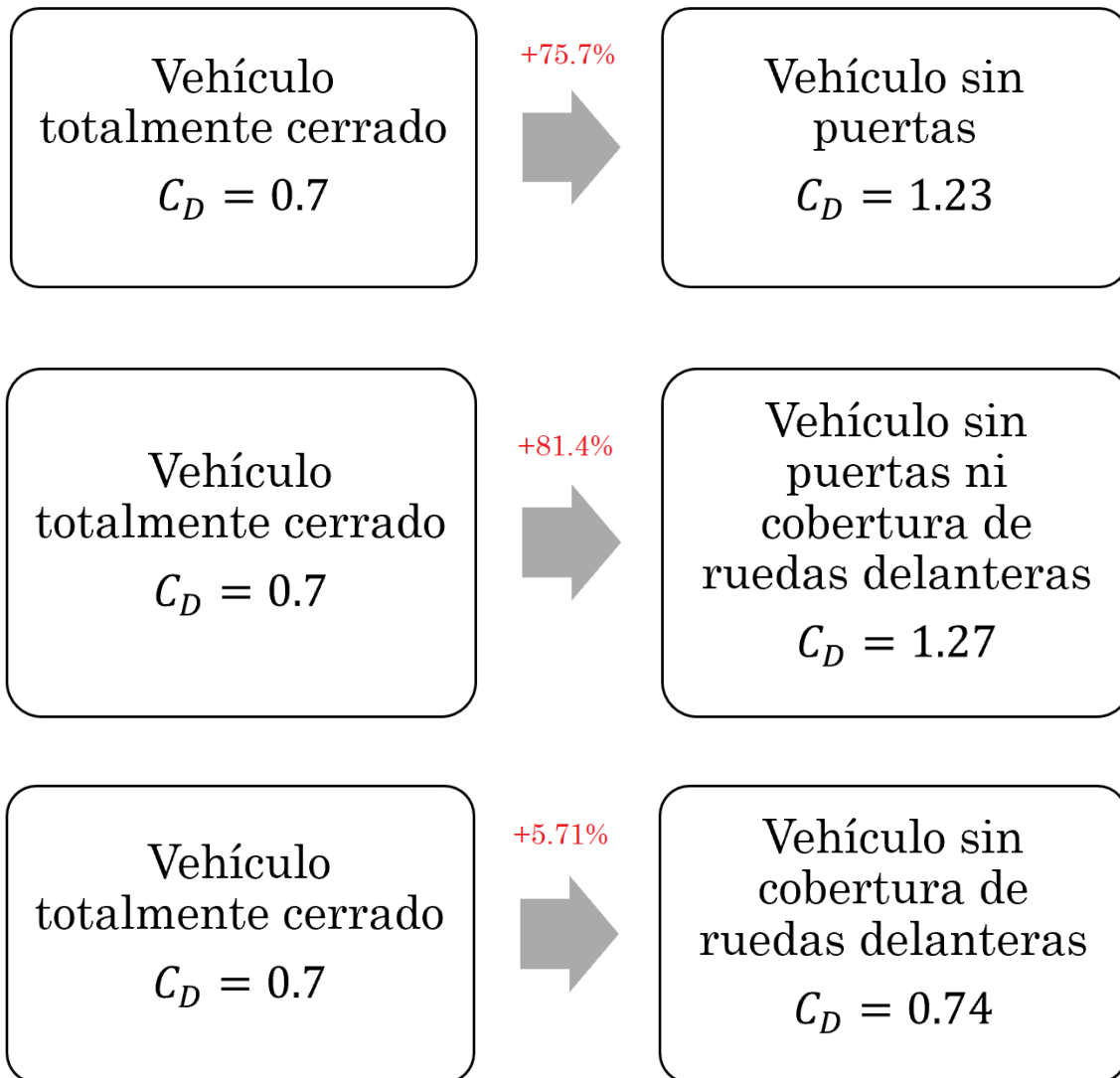
Por otro lado, el chasis pasó por una serie de pruebas que permitieron dilucidar su posible comportamiento ante situaciones extremas de volcamiento y choques laterales o frontales, dando como resultado valores aceptables y que permiten confiar en un diseño de ingeniería hecho a la medida.



El chasis, entonces, es seguro y cumple su objetivo propuesto de garantizar seguridad a los ocupantes ante situaciones extremas con las cargas que se consideraron relevantes.

El carenado que forma parte de la cobertura del vehículo tiene una geometría propuesta tal que generará carga aerodinámica además de la inevitable fuerza de arrastre, lo cual es algo que se desea para un vehículo que corre a una gran velocidad. Sin embargo, este vehículo

está pensado para ser construido sin puertas sólidas, sino que con mallas de seguridad en su lugar. Esto da paso al análisis aerodinámico para determinar las posibles consecuencias de desempeño que eso podría acarrear. Se determinó entonces que la presencia de puertas completas y sólidas condicionan el desempeño del vehículo en términos del coeficiente de arrastre.



De lo anterior se desprende lo siguiente. El vehículo tiene un gran impacto aerodinámico al no contar con puertas sólidas, por lo que se dejan las sugerencias correspondientes.

1. Contar con puertas sólidas. Su impacto en el arrastre es demasiado significativo.
2. Mejorar la geometría del vehículo para mejorar su coeficiente de arrastre. 0.7 es un valor alto que puede mejorar. Una forma de lograrlo es inclinando aún más el

parabrisas del vehículo a la derecha, de forma que quede el vehículo disminuya su altura y, por consiguiente, su área frontal que impacta con el aire. Eso, según la fórmula, mejoraría el coeficiente de arrastre.

3. En base a lo anterior, monitorear que el coeficiente de levante sea siempre negativo. Se debe buscar un equilibrio entre un coeficiente de arrastre -ojalá- no tan elevado mientras se conserve una carga aerodinámica.
4. Cubrir las ruedas delanteras. Esto garantiza que el flujo de aire no se entrometa en la zona interna del vehículo, generando arrastre, como se puede ver en los perfiles de velocidad presentados.
5. De mejorar el coeficiente de arrastre, añadir un alerón trasero más pronunciado o bien añadir *splitters* frontales que ayuden a la carga en la zona delantera del vehículo. La función del alerón es generar carga, por lo que debe aprovecharse lo más posible, para comprometer lo menos posibles al coeficiente de arrastre.

Con lo anterior, el desempeño del vehículo se puede mejorar. El proceso es continuo, por lo que siempre se le pueden estar haciendo mejoras en base a la metodología de análisis expuesta en este informe. Lo importante siempre será garantizar la seguridad y luego el rendimiento, así se podrán obtener resultados satisfactorios y llegar a modelos más avanzados a lo largo del tiempo.

7. Referencias

- ¹ Y. A. Cengel, “Mecánica de Fluidos - Fundamentos y Aplicación”, McGraw Hill.
- ² R.G. Budynas y J. K. Nisbett, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”, Octava Edición, McGraw Hill
- ³ Y.A. Cengel, “Transferencia de Calor y Masa - un enfoque práctico”, Tercera Edición, McGraw Hill
- ⁴ Y.A. Cengel, “Transferencia de Calor y Masa - un enfoque práctico”, Tercera Edición, McGraw Hill
- ⁵ Universidad de Chile, “Explorador Energía Solar”, Ministerio de Energía, 2014. [En línea], <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>
- ⁶ T. Pachal, A. K. Dewangan, “Electric Solar Vehicle – RayRacer”, Thesis, KIIT University, [En línea], https://www.researchgate.net/publication/301348644_Electric_Solar_Vehicle_-_RayRacer
- ⁷ H.Ozawa, S. Nishikawa and D. Higashida, “Development of Aerodynamics For a Solar Race Car”, JSAE Review, 19 ,1998, 343- 349
- ⁸ E. Soto, “Diseño y Construcción de Tricicleta Solar Impulsada por Motor DC con Freno Regenerativo”, Valparaíso, Chile, 2007.
- ⁹ Centro Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, [En línea], <http://centroenergia.cl/proyectos/proyectos-destacados/eolian-vehiculos-solares/>
- ¹⁰ Repositorio USM, repositorio.usm.cl
- ¹¹ S. Jiménez, “Diseño Integral de un Vehículo Híbrido Monoplaza de 3 Ruedas Impulsado con Energía Solar y Mecánica para Competición”, USM, 2014.
- ¹² J. Katz, “Race Car Aerodynamics – Designing for Speed”, 2nd Ed., Bentley Publishers, 1995.
- ¹³ R.G. Budynas y J. K. Nisbett, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”, Octava Edición, McGraw Hill
- ¹⁴ Top Suppliers of FEM, [Online], <https://www.thomasnet.com/articles/top-suppliers/finite-element-analysis-fea-companies/>

¹⁵ Grupo Carman, Blog de Ingeniería, <https://grupocarman.com/blog/>

¹⁶ Seguridad Vial, Fundación CEA (Comisionado Europeo del Automóvil), [En línea], <https://www.seguridad-vial.net/vehiculo/seguridad-pasiva/51-seguridad-pasiva>

¹⁷ W. Younes, Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2nd Ed, 2010.

¹⁸ Frame Analysis Inventor Documentation, Frame Analysis Overview, [Online], <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Inventor-Help/files/GUID-302B683F-8CAC-46A4-BD67-E39D4BAC0997-htm.html>

¹⁹ ANSYS Documentation, [Online], <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node1021.htm>