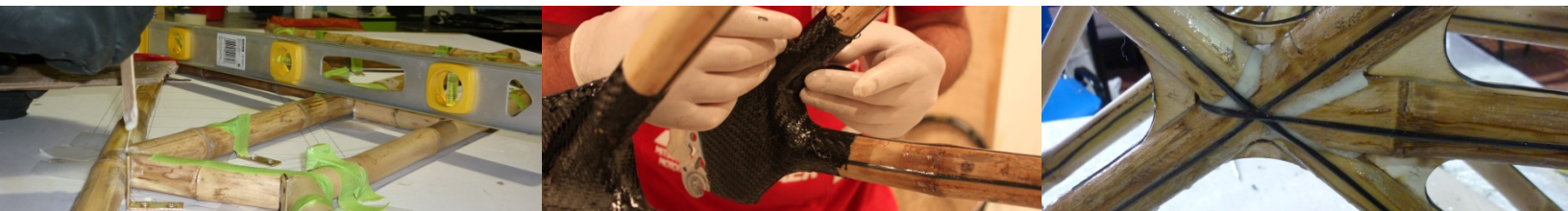
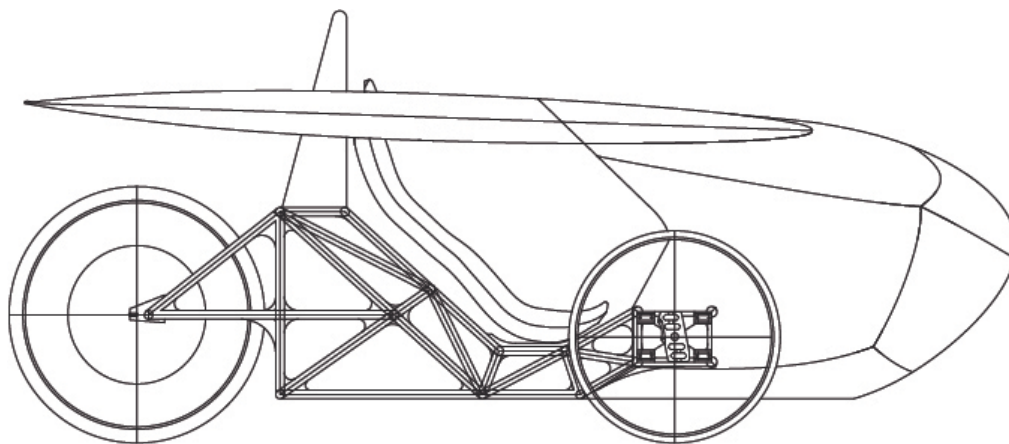


Velomóvil Solar PROTEAN.

Chasis y transferencia tecnológica.



Proyecto para optar a título profesional de diseño mención diseño industrial. Ignacio Anaiz Aceituno,
Carrera Diseño Industrial. FAU. Universidad de Chile.



UNIVERSIDAD DE CHILE

Contenido

Introducción.....	7
Capítulo 1.....	8
1. Presentación del proyecto.....	8
1.1. Título:.....	8
1.2. Línea de investigación:.....	8
1.3. Equipo de trabajo:.....	8
1.4. Contexto:.....	8
2. Resumen ejecutivo:.....	9
2.1. Descripción del proyecto experimental.....	9
2.2. Justificación.....	9
2.3. Objetivos.....	9
Capítulo 2.....	10
3. Aspectos teóricos.....	10
3.1. Definición y tipología de los vehículos estudiados:..	10
3.1.1. El Auto Solar:.....	10
3.1.2. Vehículos de tracción humana electro asistidos de alta eficiencia.....	13
3.2. Conceptos y tecnología aplicados al desarrollo del vehículo.....	14
3.2.1. Conceptos aerodinámicos aplicados al diseño del modelo.....	14
4.2.2. Tipos de chasis Ultraligeros en los vehículos estudiados.....	15
4.3. Materiales.....	16
4.3.2. Materiales compuestos avanzados.....	16
5. Antecedentes:.....	26
5.1. Participación en diseño y construcción de Eolian2 observaciones y análisis sobre la experiencia, para la trasferencia tecnológica al vehículo PROTEAN.....	26
5.2. Metodología de trabajo aplicada al diseño del vehículo Solar.....	27
5.3. Diseño del modelo conceptual, integración de los criterios de diseño:.....	28
5.4. Análisis del diseño y validación formal.....	30
5.5. Análisis en elementos finitos.....	31
5.6. Integración de elementos analizados, definición del modelo final para prototipado y estudio de factibilidad.....	32
5.7. Fabricación del prototipo Eolian 2.....	34
5.7.1. Observación de la experiencia en fabricación de pieles: 38	
5.7.2. Comentarios sobre la experiencia, oportunidad de diseño y transferencia tecnológica:.....	45
5.7.3. Oportunidad de Diseño:.....	45

Capítulo 3.....	46	Capítulo 4	76
6. Desarrollo del proyecto Velomovil Solar Protean.....	46	7. Planimetría.....	76
6.1. Presentacion del proyecto Velomovil solar PROTEAN.	46	Capítulo 5	77
6.2. Desarrollo de transferencia tecnologica aplicada al diseño del Velomovil Solar Protean.....	47	8. Bibliografía:.....	77
6.2.2. Definición de las soluciones mecánicas relacionadas principalmente a soporte de las ruedas y suspension.....	48	9. Publicaciones:.....	77
6.2.3. Análisis de postura del piloto:	50	10. Entrevistas a expertos:	77
6.2.4. Digitalización del modelo analítico físico enfocado.	53		
6.2.5. Aproximación formal y transferencia de conceptos formales de Eolian 2.	53		
6.2.6. Diseño paramétrico del chasis.	55		
6.2.8. Revisión de diseño:	59		
6.2.9. Diseño final del prototipo.....	60		
6.3. Fabricacion del prototipo, aplicación de materiales compuestos FRP en la construccion del chasis de Colihue. 62			
6.3.1. Uniones estructurales y laminados de refuerzo.	72		
6.4. Validacion y pruebas del prototipo experimental en la Carrera Solar Atacama 2012.	73		
6.5. Observaciones técnicas del chasis.....	74		

Tabla de ilustraciones:

Ilustración 1 modelo "sunmobile" de william cobb 1955.	10	Ilustración 20 Fibra de vidrio E bidireccional twill.	20
Ilustración 2 Vehículo eléctrico Baker de 1912 convertido solar en 1958.....	11	Ilustración 21 Fibra de vidrio S2 tejido tipo 6781.	20
Ilustración 3 Modelo de Alain Freeman 1979.	11	Ilustración 22 Kevlar en tejido twill.....	21
Ilustración 4 "Solar Trek"	11	Ilustración 23 Tejido hibrido de carbono/Kevlar.	21
Ilustración 5 TOKAI y NUNA6 en WSC 2011.	12	Ilustración 24 Fibra de carbono Plain weave.	22
Ilustración 6 Sunswift IV.	12	Ilustración 25 Mat de fibra de vidrio.....	23
Ilustración 7 Velomóvil go-one3.....	13	Ilustración 26 Masilla, matriz poliéster con carga de talco.....	23
Ilustración 8 Velomóvil electro asistido WAW.....	13	Ilustración 27 microballons fenólico y microballons vidrio.	24
Ilustración 9 Formula de resistencia aerodinámica.	14	Ilustración 28 Cotton flox.....	24
Ilustración 10 perfil NACA. Modelado en Inventor.	14	Ilustración 29 Vehículo solar Eolian 2.	26
Ilustración 11. Estructura de vehículo solar principia. Fuente: http://www.speedace.info/solar_car_anatomy.htm	15	Ilustración 30 Pruebas del prototipo Eolian 2.....	26
Ilustración 12 monocasco de carbón fuente: http://d-drivesportenglish.blogspot.com/2009/03/monocoque-chassis-pictures.html	15	Ilustración 31 modelo primario de postura del piloto. Fuente: Elaboración propia.	28
Ilustración 13 construcción semi monocasco vehículo solar. Fuente: http://www.speedace.info/solar_car_anatomy.html ...	16	Ilustración 32 Modelo 3d de chasis Eolian 2. Gabriel Rojas.....	29
Ilustración 14 Roving de carbón.	17	Ilustración 33 Chasis y piloto en posición.	29
Ilustración 15 Tipos de tejidos bidireccionales.	17	Ilustración 34 Chasis y piloto en posición.	31
Ilustración 16 Fibras unidireccionales de carbón.....	18	Ilustración 35 Suspensión delantera análisis elementos finitos. Javier Gonzáles.	32
Ilustración 17 Tejido multiaxial de carbón.....	18	Ilustración 36 Vista posterior modelo carenado corregido final.	32
Ilustración 18 Esquema de laminado multiaxial. Fuente Elaboración propia.	19	Ilustración 37 modelo final Eolian 2.....	33
Ilustración 19 Esquema de laminado simétrico de tejido bidireccional. Fuente Elaboración propia.....	19	Ilustración 38 modelo final de chasis con componentes. Manuel Rojas.	33
		Ilustración 39 vista suspensión trasera y motor Eolian 2. Manuel Rojas.....	33
		Ilustración 40 Suspensión delantera Eolian 2. Manuel Rojas	33
		Ilustración 41 Secciones de master en plancha de poliestireno expandido A.D fresadas en router CNC.....	34

Ilustración 42 Piezas cortadas y calibradas, listas para ensamble. Enaer.	35	Ilustración 65 esquema de equipo de trabajo en proyecto Protean. Fuente: elaboración propia.	46
Ilustración 43 master ensamblado.	35	Ilustración 66 esquema de interrogantes para el posicionamiento del piloto. Fuente: Elaboración propia.	47
Ilustración 44 Máster imprimado.	35	Ilustración 67 modelo de elementos básicos.	48
Ilustración 45 Master preparado para obtención de moldes.	35	Ilustración 68 Diseño de suspensión delantera Eolian2, Javier Gonzales.	49
Ilustración 46 aplicación gelcoat g29.	36	Ilustración 69 sistema de suspensión delantera Steintrike. Fuente: http://www.treehugger.com/bikes/modular-sporty-flexible-steintrikes-from-bike-revolution.html	49
Ilustración 47 laminado de moldes en fibra de vidrio mat.	36	Ilustración 70 definición de espacio para suspensión delantera. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 48 molde inferior Eolian2.	36	Ilustración 71 modelo analítico funcional, detalle de recorrido de altura. Fuente: elaboración propia.	50
Ilustración 49 aplicación gelcoat poliéster.	37	Ilustración 72 mecanismo de ajuste de longitud del modelo analítico funcional.	51
Ilustración 50 laminado carenado inferior Eolian 2.	37	Ilustración 73 ajuste de posición de eje motor según variables de visibilidad. Fuente: elaboración propia.	52
Ilustración 51 Aplicación de vacuum bagging.	37	Ilustración 74 revisión de ángulos de pedaleo y posicionamiento del piloto. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 52 Complicaciones en laminado de carenado inferior Eolian 2.	38	Ilustración 75 ajuste de medidas y ángulos de posición final de eje motor. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 53 laminado carenado superior con stringers posicionados.	39	Ilustración 76 análisis y verificación de ángulo de visibilidad en modelo 3d. Fuente Elaboración propia.	53
Ilustración 54 perforación de plancha divinicell en router CNC.	39	Ilustración 77 aproximación formal 1. Fuente: Elaboración propia.	53
Ilustración 55 posicionamiento de insertos en panel.	40	Ilustración 78 aproximación formal a diseño del vehículo PROTEAN. Fuente: elaboración propia.	54
Ilustración 56 panel de fibra de carbón curado.	40		
Ilustración 57 Armado chasis, refuerzo Roving.	41		
Ilustración 58 Detalle de Roving de vidrio en las juntas interiores.	41		
Ilustración 59 Estructura chasis pegada y curada.	42		
Ilustración 60 Laminado estructural de juntas del chasis.	42		
Ilustración 61 Aplicación de adhesivo y Roving.	43		
Ilustración 62 Pegado de chasis a carenado inferior.	43		
Ilustración 63 Radio de junta laminado en vidrio.	43		
Ilustración 64 estructura de Eolian 2 completa.	44		

Ilustración 79 concepto de perfil alar integrado al cuerpo del vehículo PROTEAN. Fuente: elaboración propia.	54
Ilustración 80 modelo conceptual de Velomóvil solar PROTEAN. Fuente. Elaboración propia, renderizado: Álvaro Hinojosa.	55
Ilustración 81 fotomontaje PROTEAN en desierto Atacama. Fuente Elaboración propia, renderizado Álvaro Hinojosa.....	55
Ilustración 82 modelo chasis de Colihue, para análisis de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.	56
Ilustración 83 resultado de análisis de simulación estática.	56
Ilustración 84 detalle de zonas con factor de seguridad menor a 2. Fuente: Reporte de solicitudes mecánicas, proyecto PROTEAN, ingeniero mecánico Pablo Domínguez.	56
Ilustración 85 análisis de esfuerzos en la estructura. Fuente reporte de solicitudes mecánicas, proyecto PROTEAN, ingeniero mecánico Pablo Domínguez.....	57
Ilustración 86 Esquema de simulación de choque. Fuente: Elaboración propia.	57
Ilustración 87 distribución de esfuerzos sobre la estructura. Fuente: reporte de solicitudes mecánicas, proyecto PROTEAN, ing. mec Pablo Domínguez.....	58
Ilustración 88 gráfico de desplazamiento en la estructura sometida a un choque equivalente. Fuente: reporte de solicitudes mecánicas , proyecto PROTEAN, ing mec Pablo Domínguez.	58
Ilustración 89 esquema de integración de componentes de transmisión. Fuente Elaboración propia.	59
Ilustración 90 ángulos de suspensión delantera. Fuente: Modificada de www.corvetteforums.com	59

Ilustración 91 Diseño final de la geometría del chasis experimental del vehículo Protean. Fuente: elaboración propia.....	60
Ilustración 92 diseño final carenado y chasis PROTEAN. Fuente: Elaboración propia.	61
Ilustración 93 modelo final de carenado. Fuente: elaboración propia.	61
Ilustración 94 sección plana del chasis.	62
Ilustración 95 selección de Colihue.....	62
Ilustración 96 secciones prensadas a matriz.....	63
Ilustración 97 Adhesivo 5 minutos con carga de Aerosil.	63
Ilustración 98 Aplicación de adhesivo.....	64
Ilustración 99 Armado de cara lateral del chasis.	64
Ilustración 100 Sección lateral plana del chasis.....	65
Ilustración 101 Posicionamiento de caras en matriz.	65
Ilustración 102 chasis armado.....	66
Ilustración 103 corte cartelas laser.	66
Ilustración 104 pegado cartelas.	66
Ilustración 105 aplicación Roving carbono.	67
Ilustración 106 amarre estructural CFRP.	67
Ilustración 107 radios en juntas de coligue.	67
Ilustración 108 chasis coligue con amarre estructural aplicado.	67
Ilustración 109 detalle de amarre de carbono.....	68
Ilustración 110 Insertos de terciado.	68
Ilustración 111 Panel estructural desmoldado.	69
Ilustración 112 Laminado de panel estructural.	69
Ilustración 113 Laminado interior de caja de suspensión.....	70
Ilustración 114 Laminado exterior caja de suspensión.....	70
Ilustración 115 Superficie de adhesión a caja de suspensión.	70

Ilustración 116 Corte de sección de chasis para unión de punteras.	71
Ilustración 117 Puntera y sección de contacto unidas con adhesivo estructural de alto rendimiento.	71
Ilustración 118 Pegado estructural de piezas de punteras al chasis.	71
Ilustración 119 punteras laminadas en fibra de carbono.	72
Ilustración 120 unión caja de suspensión.	72
Ilustración 121 unión caja de suspensión 2.	72
Ilustración 122 Velomóvil solar Protean en Humberstone.	73
Ilustración 123 Largada en Calama.	73
Ilustración 124 velomobil solar Protean cargando en punto de control.	74
Ilustración 125 sobre medida en apertura de la culata trasera por espaciador de piñón incorrecto.	74
Ilustración 126 Detalle de fractura en culata trasera.....	75
Ilustración 127 Detalle de integridad del amarre de fibra de carbón.	75

Introducción.

Esta investigación corresponde al desarrollo experimental de un vehículo de tracción humana asistido eléctrico con alimentación fotovoltaica ultraligero, la cual integra los conocimientos y experiencias adquiridas en la participación en diseño y construcción del vehículo solar Eolian 2 de 2011. En esta oportunidad el objetivo fundamental es diseñar, fabricar y probar un vehículo pensado desde la sustentabilidad y en el cual la transferencia tecnológica desde un vehículo de mayor escala y complejidad como Eolian 2 sea el modo de proyectar soluciones y conceptos innovadores dentro de esta clasificación de vehículo que se denomina Velomóvil Solar.

En un Chile que posee los niveles de radiación solar más altos del mundo, ubicados en el desierto de Atacama, se hace pertinente el desarrollo e innovación tecnológica en la energía solar, la cual puede dar pie a la formación de una nueva matriz energética donde las energías renovables jueguen un rol importante del desarrollo de nuestro país, conjunto a aquello, la importancia del diseño radica en el entendimiento de estas tecnologías para proponer nuevos productos que aporten a la calidad de vida de las personas en los distintos ámbitos de nuestro entorno artificial y natural, siendo consientes desde el proceso de diseño, de los impactos sociales y medioambientales que forman parte de la producción.

Tales antecedentes y potencial nacional motivan a desarrollar soluciones creativas y consecuentes en el desarrollo de la electro movilidad sustentable en nuestro país, en este marco

la propuesta se define como un proyecto de innovación y transferencia tecnológica en el área de transporte.

En cuanto al contexto del presente proyecto, se utiliza como plataforma de pruebas para el prototipo a desarrollar, la oportunidad de competir con un vehículo experimental en la “carrera solar atacama 2012” evento de convocatoria internacional a desarrollarse en el norte de nuestro país, comprendiendo un trayecto por el desierto de una extensión de 1350 km, en la categoría “la ruta solar” enfocada a vehículos híbridos de tracción humana y asistencia eléctrica fotovoltaica.

Comprendiendo las motivaciones fundamentales de este proyecto dedicado a la búsqueda experimental de soluciones de vehículos ligeros y sustentables, surge la propuesta de utilizar el coligue como material base para la estructura principal del vehículo (chasis), expandiendo el uso de este material a estructuras móviles y dotándolo de valor como alternativa a los materiales tradicionales como lo son el acero y aluminio, integrando a este desarrollo la tecnología en materiales compuestos avanzados, explorados y utilizados en el desarrollo del vehículo solar Eolian 2.

Capítulo 1.

1. Presentación del proyecto.

1.1. Título:

“Proyecto Velomóvil Solar Protean”

1.2. Línea de investigación:

Transferencia tecnológica de los vehículos solares de alta competencia al Diseño y manufactura de un Vehículo de tracción humana asistido solar sustentable.

1.3. Equipo de trabajo:

Autor: Ignacio Anaiz Aceituno

Contacto: dis.anaiz@gmail.com

Cel: 9.6232395

Profesor guía: Mauricio Tapia Reyes

Equipo de investigación y desarrollo:

Profesores Rodrigo Díaz, Pablo Domínguez.

Estudiantes: Patricia Campos Donoso, Álvaro Hinojosa, Andrés Quezada.

1.4. Contexto:

Informe de Proyecto de título, para optar al título profesional de diseño, mención diseño industrial. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

Diseño, Desarrollo y prototipado experimental de Velomóvil solar PROTEAN a competir en el evento “Carrera Solar Atacama 2012” (CSA) en la categoría “La ruta solar” (LRS).

2. Resumen ejecutivo:

2.1. Descripción del proyecto experimental.

Estudio y desarrollo de los conceptos de diseño, tecnologías y manufactura de vehículos solares de competencia para su aplicación en el diseño y prototipado experimental de un Velomóvil Solar, con énfasis en la innovación en materiales y procesos enfocados a la sustentabilidad. Específicamente en usabilidad del coligue como elementos básico de la estructura del vehículo, el cual debe cumplir a su vez las bases de la competencia Carrera Solar Atacama en la categoría La Ruta Solar para efecto de pruebas en competencia del prototipo experimental.

2.2. Justificación.

La pertinencia de esta área de estudio se enmarca en la oportunidad de desarrollar tecnología y conocimiento local en el diseño de soluciones sustentables, que se desenvuelvan en la actuales problemáticas de eficiencia energética en el área de transporte personal, Utilizando como medio la transferencia tecnológica de un vehículo Solar de alta competencia a un vehículo de tracción humana asistida de menor escala, lo cual permite formular soluciones innovadoras y aplicaciones experimentales con un presupuesto limitado.

2.3. Objetivos.

Objetivo general:

Generar una transferencia tecnológica desde los conceptos de diseño y manufactura del vehículo solar Eolian2 al desarrollo de un Velomóvil Solar sustentable de Colihue.

Objetivos específicos:

- Validar la aplicación del coligue como material estructural de vehículos ligeros.
- implementar la tecnología de materiales compuestos avanzados en la fabricación de estructuras de Colihue
- Aplicar los conceptos de diseño de los vehículos solares de alta competencia en el desarrollo de un nuevo concepto de velomobil solar.

Capítulo 2.

3. Aspectos teóricos.

Área de estudio:

“Conceptos de diseño y tecnología aplicada en Vehículos Solares y de tracción humana electro asistidos de alta eficiencia.”

3.1. Definición y tipología de los vehículos estudiados:

El área de estudio definida para la presente investigación, se enmarca en el estudio y desarrollo de los conceptos y tecnologías aplicados a dos tipologías de vehículos altamente eficientes energéticamente, de bajo consumo y libres de emisiones contaminantes.

3.1.1. El Auto Solar:

La historia del vehículo solar comienza con un desarrollo bastante peculiar, de un ingeniero de General Motors Company, William Cobb quien en el año 1955, hizo una demostración del primer modelo de vehículo solar a escala en la feria automotriz “General Motors Powerama” en Chicago, Illinois¹. El pequeño modelo del vehículo llamado

¹ <http://www.history.com/this-day-in-history/william-cobb-demonstrates-first-solar-powered-car>

“Sunmobile” era energizado por 12 celdas fotovoltaicas de selenio y traccionado por un pequeño motor eléctrico.

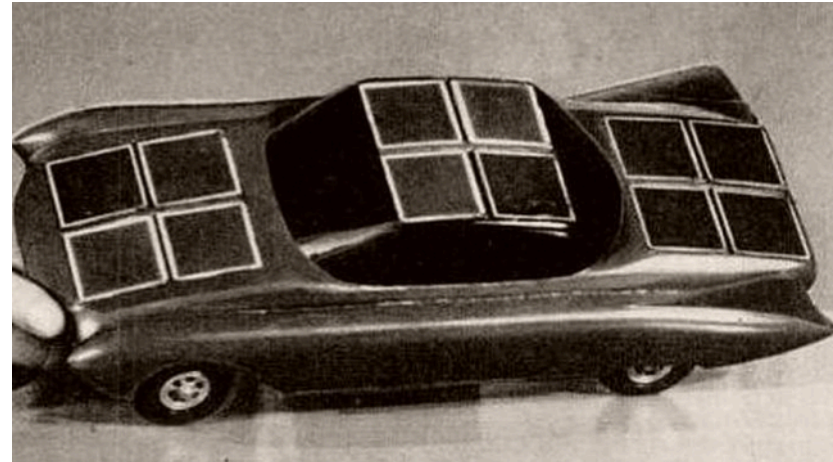


Ilustración 1 modelo "sunmobile" de William Cobb 1955.

Si bien la invención del vehículo solar se le atribuye a Cobb, fue la empresa “The International Rectifier Company” la cual construyó en 1958 el primer vehículo solar manejable por una persona y correspondía a la modificación de un antiguo auto Baker eléctrico de 1912 con la integración de 10,640 paneles solares individuales en el techo del vehículo. El cual fue presentado al público 4 años después en 1962.

Sin embargo, el concepto actual de vehículo solar se remite al desarrollo del inglés, Alain Freeman, quien construyó un modelo con aproximaciones mecánicas y aerodinámicas, similares a las utilizadas en los modelos actuales.



Ilustración 2 Vehículo eléctrico Baker de 1912 convertido solar en 1958.



Ilustración 3 Modelo de Alain Freeman 1979.

El desarrollo de los vehículos solares se ha ligado históricamente a investigaciones académicas de Universidades y privados para los cuales ha sido motivo y plataforma experimental de desarrollos tecnológicos avanzados en las áreas de la Electro movilidad sustentable. Sin duda el Hito que dio inicio a esta línea de desarrollo automotriz, corresponde a la carrera mundial de vehículos solares, World Solar Challenge en Australia, fundada en 1987 por Hans Tholstrup, Quien junto a Larry Perkins hicieron el primer viaje en un vehículo solar que cruzo el continente Australiano desde Perth a Sydney, en 1984 a bordo del “Solar trek”.



Ilustración 4 “Solar Trek”

Diversos modelos y tendencias de diseño han ido definiendo la forma del Auto Solar. Actualmente el desarrollo formal y tecnológico de estos ha llegado a alcanzar velocidades máximas de hasta 160 km/h y velocidad crucero de 90 a 100 km/h consumiendo 1000 watts, consumo inferior al de una tostadora eléctrica. Los vehículos que han logrado tal desempeño corresponden a los Holandeses de la Universidad de Delft, con los modelos NUNA y la Universidad japonesa de TOKAI, actual campeón en la carrera WSC 2011.



Ilustración 5 TOKAI y NUNA6 en WSC 2011.

El Record Guinness actual (2011) de velocidad en un vehículo solar sin baterías es de 88 km/h y el título lo posee el vehículo Australiano Sunswift IV.



Ilustración 6 Sunswift IV.

En Latinoamérica, La Universidad de Chile fue en 2006 la primera en desarrollar un vehículo solar de competencia, Eolian, competidor en la carrera WSC 2007. Actualmente el proyecto Eolian sigue en desarrollo y es precedente fundamental para el desarrollo de la presente investigación.

3.1.2. Vehículos de tracción humana electro asistidos de alta eficiencia.

La segunda tipología de vehículo estudiado corresponde a los denominados Velomóviles, vehículos de tracción humana diseñados para la velocidad y dotados de un cuerpo exterior que brinda al piloto protección climática y actúa principalmente como cobertor aerodinámico.



Ilustración 7 Velomóvil go-one3.

El desarrollo del Velomóvil se sitúa en la vanguardia de vehículos eficientes y ecológicos, sin embargo, existe escasa legislación vial respecto a su uso.

Las características principales del Velomóvil, provienen de la bicicleta recostada, la cual posee su desarrollo basado en la obtención de una posición de pedaleo más cómoda y aerodinámica que la bicicleta convencional, lo que las convierte en ideales para ciclismo como deporte de travesía, sin embargo el Velomobil agrega un concepto formal que le permite alta eficiencia energética y funcional, que al agregarle un pequeño motor eléctrico de asistencia y baterías ligeras lo acerca a las prestaciones de un vehículo eléctrico en cuanto a autonomía, pero a una fracción del consumo. Este es el concepto de Velomóvil electro asistido.



Ilustración 8 Velomóvil electro asistido WAW.

3.2. Conceptos y tecnología aplicados al desarrollo del vehículo.

3.2.1. Conceptos aerodinámicos aplicados al diseño del modelo.

El cuerpo exterior del vehículo es el encargado de cortar el viento y su forma afecta directamente eficiencia y gasto energético del mismo.

Los conceptos generales a considerar en el desarrollo del modelo del vehículo, son:

- Área frontal.
- Coeficiente aerodinámico del perfil.
- Velocidad.

En base a la fórmula de la resistencia aerodinámica, la resistencia aumenta con: el área del objeto, la velocidad al cuadrado y el factor más complejo el coeficiente de arrastre, que contempla numerosos factores, tales como la forma, textura, viscosidad, compresibilidad, etc.

$$R = \frac{1}{2} \rho C A v^2$$

Ilustración 9 Formula de resistencia aerodinámica.

El estudio de estos parámetros corresponde al área de ingeniería mecánica, sin embargo para la definición de la forma del vehículo, es importante tener en cuenta la reducción del área frontal al máximo permitido según los requerimientos formales definidos en el diseño, en cuanto al cálculo del

coeficiente aerodinámico del perfil de la forma, la tecnología de análisis de fluidos en elementos finitos, permite obtener datos del diseño 3d, para el desarrollo de la forma, este proceso de iteración es propia de la ingeniería y compromete el uso de conocimientos avanzados en mecánica de fluidos.

Para el uso simplificado de los conceptos aerodinámicos presentes en la forma de modelos de vehículos solares, existen bases de datos con formas de perfiles aerodinámicos estudiados y disponibles en la web. Ejemplo de ello es el perfil utilizado en el diseño de Eolian 2, el cual corresponde a un perfil NACA. (National Advisory Committee for Aeronautics).

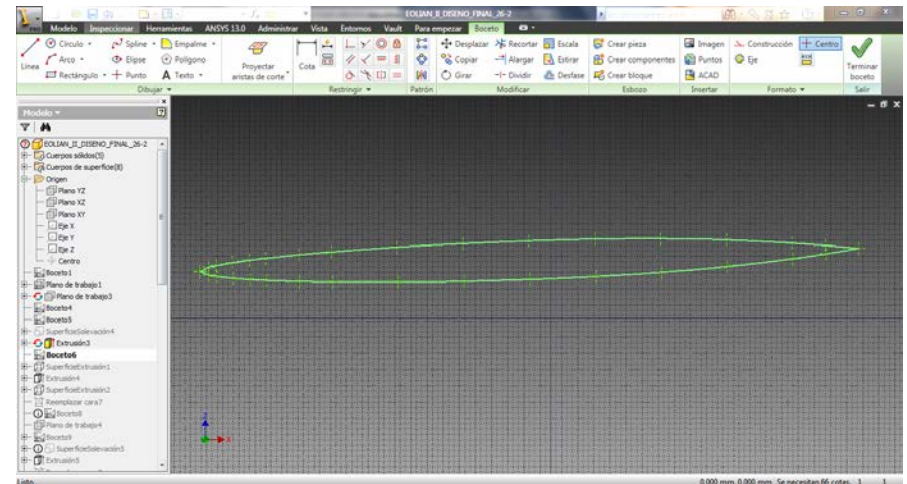


Ilustración 10 perfil NACA. Modelado en Inventor.

Los perfiles NACA, son formas aerodinámicas estudiadas y tabuladas, respecto a resistencia al viento, sustentación, roce, etc., sin embargo estos datos varían según el tipo de volumen que se genere con ellas. El perfil alar NACA elegido en Eolian 2, es simétrico sobre su eje central longitudinal, lo que permite el paso fluido del viento y a su vez al efectuar una inclinación negativa en su borde de ataque se puede medir la llamada downforce o fuerza que ejerce el viento sobre la superficie del auto hacia el piso, esto permite que a altas velocidades el vehículo tenga una mejor respuesta en maniobrabilidad y estabilidad.

4.2.2. Tipos de chasis Ultraligeros en los vehículos estudiados.

Los tipos de estructuras presentes en la fabricación de vehículos ultraligeros corresponden a los siguientes tipos de chasis:

- Spaceframe ligero: El chasis spaceframe corresponde a un tipo de estructura abierta tridimensional basada en la aplicación de la rigidez del triángulo, se conforma por tubería soldada y puede ser de diversas aleaciones de aluminios, o tubería delgada de acero al cromo molibdeno u otras aleaciones similares.²

² <http://www.merriam-webster.com/dictionary/space%20frame>

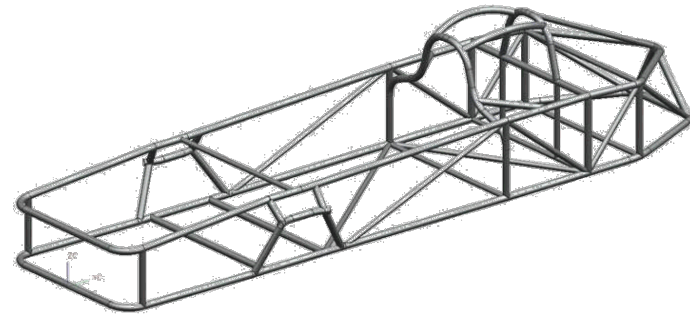


Ilustración 11. Estructura de vehículo solar principia. Fuente: http://www.speedace.info/solar_car_anatomy.htm

- Monocoque: quiere decir “una pieza” y existen de tipo de construcción en chapa metálica o fibra de carbón, la estructura del cuerpo es la que soporta los componentes del vehículo.



Ilustración 12 monocasco de carbón fuente: <http://drivesportenglish.blogspot.com/2009/03/monocoque-chassis-pictures.html>

- Semi monocoque: estructura unificada compuesta de panelería estructural en compuestos de carbón, la piel aporta estructura a la pieza pero no soporta componentes del vehículo.

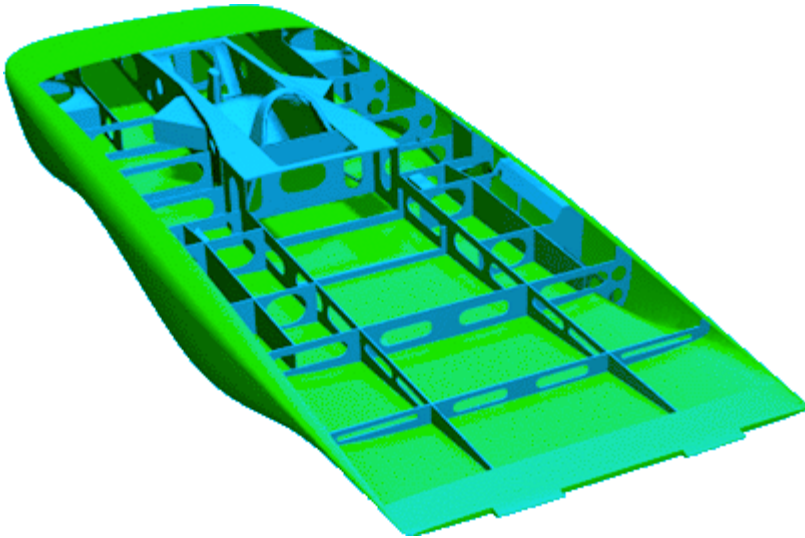


Ilustración 13 construcción semi monocasco vehículo solar. Fuente: http://www.speedace.info/solar_car_anatomy.html

4.3. Materiales.

4.3.2. Materiales compuestos avanzados.

Los materiales compuestos por definición, son la mezcla de 2 o más materiales que al combinarse mantienen las propiedades mecánicas principales de los componentes originales. Consisten principalmente en una matriz de polímero que se combinan con fibras de refuerzo de origen cerámico, metálico o poliméricos. Las fibras de refuerzo son las que se llevan las cargas estructurales mientras que la matriz es quien las une y distribuye los esfuerzos hacia estas. Existen 3 tipos de cargas y refuerzos, los de fibras continuas, fibras discontinuas y partículas. La primera es mayormente utilizada en refuerzos estructurales donde la dirección de los esfuerzos se identifican para luego posicionar las fibras en sentido de poder soportar tales cargas, las fibras discontinuas o mat, se utilizan principalmente para molduras, moldes o piezas que no requieran soportar cargas específicas mayores. Principalmente la resistencia de estas piezas, se basa en el espesor del material resultante, por lo que no son adecuadas cuando la aplicación posee como requerimiento el factor peso. Finalmente las cargas de partículas se utilizan para otorgar tixotropía a la matriz polimérica, y se utilizan principalmente como material de relleno, adhesivo o recubrimiento sellador (masillas)

- Refuerzos de fibras continuas:

Las fibras de refuerzo continuas son las que permiten el desempeño estructural de las piezas finales. Los filamentos provienen de distintas composiciones químicas y formas como se señalaba anteriormente, siendo estos los principales contribuidores a las propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia a impactos, rigidez, etc.) de la pieza de compuesto.

Formatos de los filamentos:

-Roving: conjunto de filamentos dispuestos en forma de cabo (cordón) enrollados en un riel o tubo. La denominación de material se clasifica por miles de filamentos por hebra (3K = 3000 filamentos por hebra).



Ilustración 14 Roving de carbón.

-Fibras tejidas: filamentos hilados bidireccionalmente en distintos tipos de matrices, los tipos más comunes de tejido son el twill y plain weave.

El tejido twill es más maniobrable y permite trabajar sobre formas orgánicas complejas, mientras que el plain es más apropiado para paneles y formas menos complejas.

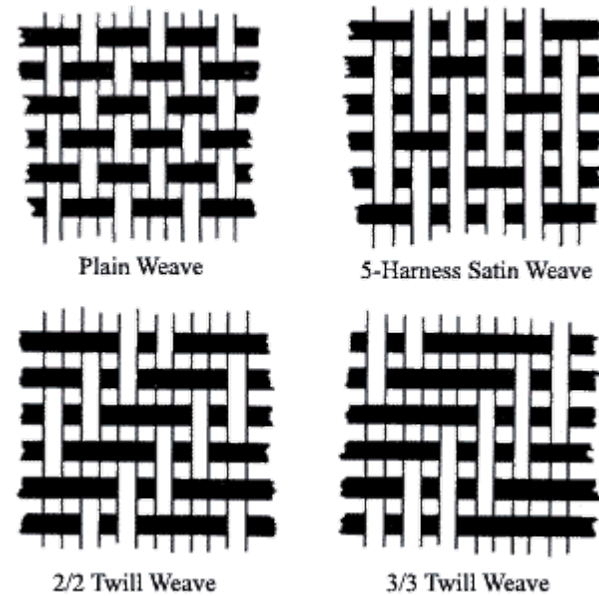


Ilustración 15 Tipos de tejidos bidireccionales.

- Fibras unidireccionales: conjunto de filamentos dispuestos en una sola dirección, unidos por una costura de vidrio, hilo o plástico. Se utiliza como refuerzo específico a cargas analizadas en las piezas de compuesto.

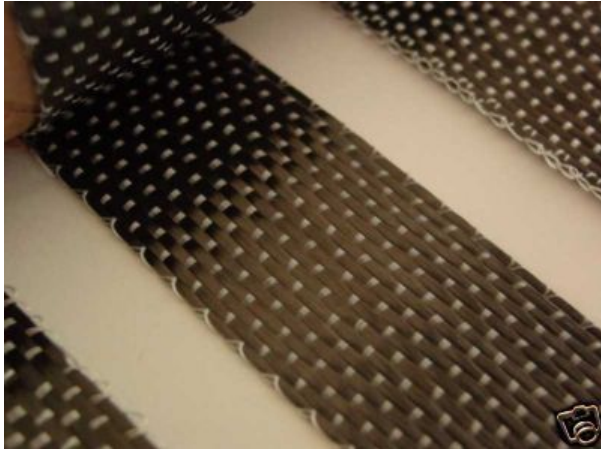


Ilustración 16 Fibras unidireccionales de carbón.

-Fibras multiaxiales: conjunto de tejidos unidireccionales dispuestos en capas con orientaciones combinadas.

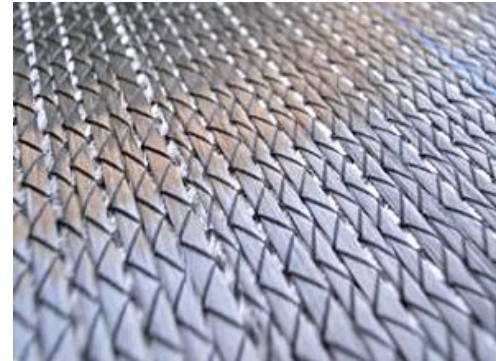


Ilustración 17 Tejido multiaxial de carbón.

La dirección de las fibras en las piezas de compuestos, varía según el análisis de esfuerzos y la aplicación de la pieza. Cuando se trata de pieles, se disponen los filamentos en múltiples direcciones para consolidar un material cuasi isotrópico, dado que soporta los esfuerzos en distintos ejes por igual, sin embargo siempre pueden quedar ejes específicos con una resistencia menor por la propia condición de direccionalidad de los filamentos.

Idealmente las piezas deben tener laminados simétricos, lo que quiere decir que la direccionalidad del tejido exterior debe ser idéntica al interior con un tejido intermedio dispuesto a 45° a modo de ejemplo.

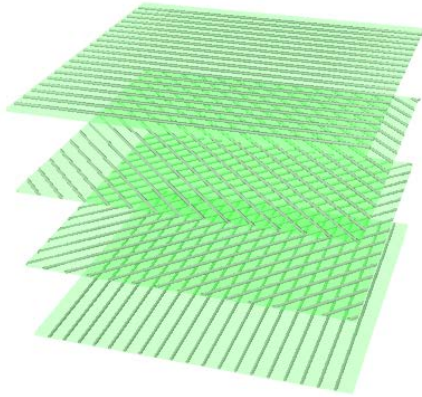


Ilustración 18 Esquema de laminado multiaxial. Fuente Elaboración propia.

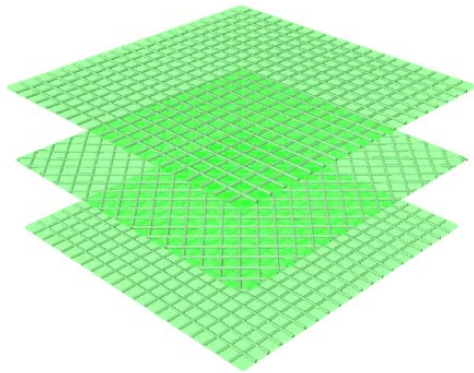


Ilustración 19 Esquema de laminado simétrico de tejido bidireccional. Fuente Elaboración propia.

- Tipos de fibras estudiadas:

- Fibra de vidrio:

La fibra de vidrio fue descubierta en 1893 y fue disponible comercialmente en 1936. Se hizo popular en los años 50 cuando los problemas de salud asociados a los asbestos se volvieron claramente aparentes. Dado similitudes entre la fibra de vidrio y las fibras de asbesto, la fibra de vidrio se convirtió en un remplazo efectivo del asbesto en muchas aplicaciones como aislante eléctrico térmico y sonoro, así también como refuerzo estructural. Hoy en día es la fibra dominante en la construcción de materiales compuestos, abarcando más de 90% de la demanda mundial. Principalmente por su buena relación peso-resistencia y se procesa por extrusión de vidrio fundido lo que permite venderla a bajo precio. Los diámetros de las fibras se producen en un rango de 5 a 25 micrones. Existen variados tipos de fibras de vidrio con denominaciones que definen sus posibles usos y aplicaciones:

Fibra de vidrio E: proviene de “eléctrico” lo que implica que se utiliza en aislación, es la más común en el mercado, de bajo costo y es principalmente utilizada como refuerzo estructural en la industria marina.



Ilustración 20 Fibra de vidrio E bidireccional twill.

Fibra de vidrio S y S2: la denominación “S” proviene de Strength (fuerza), lo que implica su utilización en refuerzos estructurales por sus propiedades mecánicas certificadas. Este tipo de fibras son de un rango de precio bastante elevado comparado con la fibra E y es usada en variadas aplicaciones dentro de las cuales se destaca el área aeroespacial.

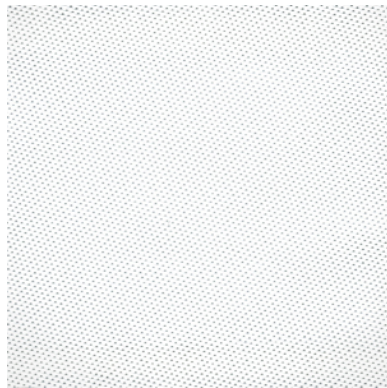


Ilustración 21 Fibra de vidrio S2 tejido tipo 6781.

Fibra de vidrio AR: resistente a ataques químicos alcalinos

Fibra de vidrio C o T: resistentes a ácido y corrosión

Fibra de vidrio A: es vidrio con más contenido alcalino similar al vidrio de ventana y es de menos costo que los anteriormente nombrados.

Existen diversos tipos de tejidos y se identifican principalmente por la flexibilidad que permiten en el trabajo de la forma, los tejidos comunes bidireccionales son bastante rígidos y no permiten formas complejas, sin embargo los tejidos como el 6781 (vidrio s2) o 7781 (vidrio E) poseen la flexibilidad en seco adecuada para adaptarse a casi cualquier tipo de diseño.

Generalmente cuando el precio del producto es un factor fundamental en el diseño de productos en materiales compuestos, la fibra de vidrio proporciona prestaciones altamente competitivas, siendo el material a utilizar como refuerzo estructural en estos casos.

- Aramida.

La aramida fue inventada por la compañía DuPont en 1960, bajo la marca registrada "Kevlar", como resultado de investigación en fibras de poliamidas (nylon). Fue introducido al mercado en 1970 como refuerzo de neumáticos y al igual que la fibra de vidrio como sustituto del asbesto. El nombre aramida proviene de la contracción de su descripción química, poliamida aromática (aromatic polyamide). La resistencia y módulo de la aramida son muy buenos y la densidad muy baja, tiene muy poca resistencia UV y la resistencia a compresión y corte es muy similar a la fibra de vidrio E. su valor fundamental proviene de la altísima resistencia a impactos, abrasión y calor (resiste sobre los 500°C).

La resistencia superior de la aramida proviene del denominado "mecanismo de fallo de consumo de energía" de sus fibras. Este mecanismo de absorción de energía la hace ideal para su uso en armaduras y blindajes y es ampliamente utilizada en la industria militar y balística en productos como chalecos antibala y cascos. Existen también otras aplicaciones importantes como material textil en trajes anti flama para pilotos de alto rendimiento y bomberos, refuerzo estructural en la zona inferior de los aviones (resistencia a impactos de piedras durante el despegue y aterrizaje) y vehículos de carrera, etc.

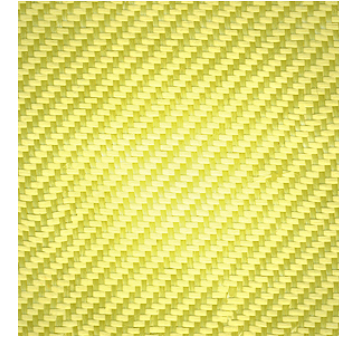


Ilustración 22 Kevlar en tejido twill.

Su uso estructural en general se determina cuando se anticipan impactos, corrosión y alta temperatura principalmente. A su vez este material se dobla muy bien y es compatible con otros tipos de fibra, es así como nacen Fibras híbridas como el carbono/Kevlar, donde se mezclan las características de rigidez y fuerza del carbono y la protección de impactos de la aramida.

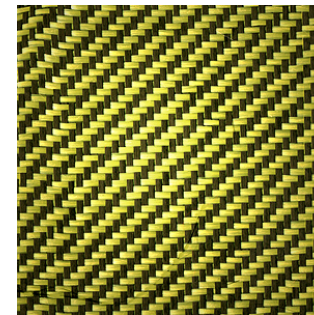


Ilustración 23 Tejido híbrido de carbono/Kevlar.

- fibra de Carbón

La fibra de carbón es la más fuerte y cara del Mercado en compuestos hoy en día, fue descubierta a principios de los 60 en el Reino Unido, por la “Royal aircraft establishment” en Farmborough, Hampshire.

El método más común de producir fibra de carbón es la oxidación y pirolisis de un precursor orgánico, filamentos de PAN (poliacrilonitrilo). Cuando el calor es el adecuado, los constituyentes no carbónicos de los filamentos se evaporan generando una fibra entre un 93 y 95% carbón. También se puede generar a base de fibras de rayón (celulosa).

El tamaño de los filamentos de carbón se mide en “K” o miles de filamentos, por ejemplo una tela 3k es de 3000 filamentos por hebra, 12k corresponde a 12000 filamentos por hebra, etc.

La fibra de carbón exhibe un excelente comportamiento de rigidez y fuerza comparada a las fibras anteriores, resiste altas temperaturas, es buen conductor térmico y pobre conductor eléctrico, respecto a la resistencia a impactos, se puede inferir que es bastante pobre y dependen de los métodos de fabricación.

Existen variados tipos de fibra de carbono disponibles en el mercado y es muy importante identificar estos para definir el apropiado al producto.

Se pueden separar según la definición de industrias Toray, líder en fabricación mundial de fibras de carbono, en denominación de tipo:

CF T: fibras de modulo estándar (hasta 4900 Mpa en seco) y alta resistencia. Estas fibras en compuesto pueden llegar a resistir 2550 Mpa bajo la norma ASTM 3039 (fibra modelo t700 12k 800grs/mt2). Fibras de modulo intermedio (hasta 6.370 Mpa en seco) en compuesto resisten hasta 3040 Mpa bajo la norma ASTM 3039 fibra modelo (t1000g)

CF M: fibras de alto modulo, su resistencia a tracción es similar a las de modulo estándar, sin embargo se utilizan en aplicaciones donde la rigidez del compuesto es lo fundamental.

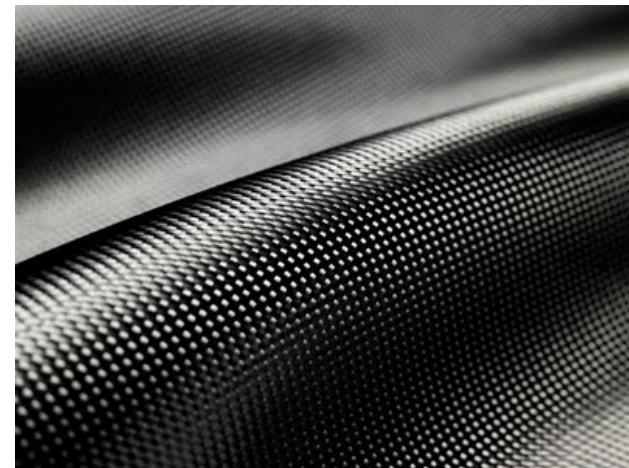


Ilustración 24 Fibra de carbono Plain weave.

- Refuerzo de fibras discontinuas MAT:

Este tipo de refuerzo corresponde a múltiples filamentos cortos dispuestos aleatoriamente y pegados entre si formando una especie de manto o tela, estos se impregnan posteriormente con químicos denominados “sizing” los cuales reducen la abrasión entre los filamentos y facilita la impregnación de resinas, actúa a su vez como agente “puente” para compatibilizar con una o varios tipos de resinas.

Este tipo de material se utiliza para dar capacidad estructural básica a la matriz polimérica, lo que para generar laminados rígidos se deba utilizar múltiples capas de este material, resultando laminados robustos y pesados, sin embargo sigue teniendo aspectos favorecedores frente a laminas de metal o madera, principalmente por una densidad menor de los filamentos de vidrio o carbón y resinas, y la ausencia de problemas respecto a resistencia química y humedad principalmente.



Ilustración 25 Mat de fibra de vidrio.

- Cargas de partículas:

Este tipo de cargas es muy importante en el trabajo de materiales compuestos, ya que la correcta identificación de sus funciones permite la fabricación de productos consistentes y de bajo peso.

-Talco industrial: es el mineral más blando de todos, de la categoría de los filosilicatos. Se utiliza en compuestos como material de relleno básico, en función de otorgar tixotropía adecuada a una matriz polimérica. Por ejemplo las masillas poliéster (masilla mágica), poseen una carga importante de talco, lo que la hace lijable y permite un soporte adecuado para la terminación superficial. Densidad 2.6 a 2.7 grs/cm³



Ilustración 26 Masilla, matriz poliéster con carga de talco.

-Microballons: corresponde a la denominación de micro esferas, su composición puede ser a base de silicio (micro esferas de vidrio) o de resina fenólica, también están disponibles en base de carbón sin embargo su precio es muy elevado.



Ilustración 27 microballons fenólico y microballons vidrio.

Poseen características de relleno apropiadas cuando se trata de ahorrar peso, ya que posee una densidad bastante menor al talco, existen en distintos gramajes que van desde los 0.22 grs/cm³ a los 0.46 grs/cm³. También se utiliza como base para terminación superficial y se suele mezclar con el talco en masillas livianas especiales de terminación. Cabe considerar que la manipulación de estos elementos, requiere de cuidados especiales, respecto a la mezcla con la matriz ya que al ser pequeñas esferas corren el riesgo de quebrarse microscópicamente, perdiendo parte de sus propiedades respecto a la densidad apropiada versus tixotropía deseada.

-Cottonflock (flox): Son micro filamentos de algodón, se utilizan principalmente como material de carga para la formulación de adhesivos estructurales de alto desempeño. Estos micro filamentos al mezclarse con la matriz forman una pasta que aplicada entre paneles o piezas de compuesto, forma pequeños enlaces entre los filamentos, lo que permite juntas fuertemente consolidadas.



Ilustración 28 Cotton flox.

Es de vital importancia, la protección de las vías respiratorias en la utilización de estos componentes, ya que son altamente volátiles y en el caso de los microballons de vidrio producen silicosis severa. Las mascarillas apropiadas corresponden a las de certificación niosh n95.

El identificar las aplicaciones y prestaciones de cada tipo de carga, permite decidir los correctos materiales del producto y a su vez tener una referencia de costo versus peso y función.

- Resinas:

En esta investigación se abarca el estudio de 2 tipos de resinas:

Epoxi: es una resina de dos componentes, buen comportamiento y resistencia mecánica y se utiliza en los laminados de piezas, paneles y moldes, su principal característica es el tiempo de uso o "potlife" que permite ser graduado según especificación al fabricante, dependiendo de la aplicación, (ej.: para piezas grandes se requiere un tiempo de uso largo) este tipo de resinas es de alto costo y es libre de solventes.

Poliéster: resina de 3 componentes, es altamente toxica y produce efectos exotérmicos violentos en trabajos de reacción rápida. Se utiliza ampliamente en náutica. Es más quebradiza que la Epoxi pero tiene un costo significativamente menor.

Tipos de construcción en materiales compuestos avanzados:

- Piel: el concepto de piel se utiliza para definir un laminado de compuesto, el cual no posee resistencia mecánica por sí mismo, dependiendo su composición puede ser más o menos flexible. Se puede aproximar al concepto de chapa utilizado en la industria metalmeccánica.

- Panel o Sándwich: es una estructura compuesta por dos o más capas de fibra laminadas a un núcleo separador, este núcleo le brinda la inercia necesaria para la aplicación que se determine, por el concepto de la fórmula de rigidez, elevando el espesor del núcleo la rigidez del panel se eleva al cubo.

Cabe destacar que la resistencia a impactos de los paneles es muy baja, dado que al ser un núcleo de espuma o honeycomb, es posible perforar el material fácilmente con un golpe puntual (por ejemplo clavar un punzón), sin embargo si se estudia su posicionamiento es posible utilizarlos como absorbedores de impactos.

- Estructura monocoque o monocasco: la palabra monocoque proviene del francés que significa "una caparazón" y se define como una estructura laminar auto portante unificado. Utiliza una piel exterior para soportar las cargas ejercidas sobre la estructura. Este tipo de estructura en el área metalmeccánica es ampliamente utilizada en los automóviles de hoy en día, mediante el uso de planchas de metal estampadas y soldadas entre si generando volúmenes estructurales cerrados. En compuestos se aplica esta tecnología en las bicicletas de fibra de carbono y los vehículos supe deportivos de alta gama. El costo de diseño y fabricación en compuestos es muy alto dado que actualmente requiere de muchos ensayos de prueba y error, al componerse de un material aniso trópico como la fibra de carbono. Sin embargo las tecnologías de simulación digital en esta área se están desarrollando ampliamente para reducir estos tiempos y costos.

5. Antecedentes:

5.1. Participación en diseño y construcción de Eolian2 observaciones y análisis sobre la experiencia, para la transferencia tecnológica al vehículo PROTEAN.

El desarrollo del proyecto Eolian 2, corresponde a una iniciativa de carácter académico, de la Universidad de Chile, en la cual se utiliza como plataforma de trabajo el desarrollo de un vehículo solar de competencia, concebido a partir de las bases de la carrera “Veolia World Solar Challenge 2011” en la categoría “Challenger” y “Atacama Solar challenge 2011” en la categoría “Desafío Solar”. El objetivo de la iniciativa corresponde a la investigación y aplicaciones prácticas de tecnologías y conceptos involucrados en los diversos sistemas que componen un vehículo solar, desde las múltiples disciplinas involucradas que abarcan el diseño conceptual, diseño mecánico, diseño eléctrico, monitoreo y optimización, prototipado y logística.

El equipo de trabajo interdisciplinario se compone de estudiantes y académicos de las carreras de diseño industrial e ingeniería, divididos en:

- Diseño y construcción: constituidos por estudiantes de Ing. mecánica, Ing. Eléctrica y diseño industrial.
- Logística: constituidos por presupuesto, planificación y gestión y comunicación.



Ilustración 29 Vehículo solar Eolian 2.



Ilustración 30 Pruebas del prototipo Eolian 2.

5.2. Metodología de trabajo aplicada al diseño del vehículo Solar.

El equipo de trabajo de “diseño y construcción” del vehículo solar Eolian2, en el cual se participa activamente, se compone principalmente por estudiantes de ingeniería eléctrica, mecánica y diseño industrial.

Durante el proceso de diseño se establece el modo de trabajo como interdisciplinario, integrando primariamente sub equipos de investigación paralelo en cada uno de los sistemas integrales del vehículo: chasis y habitáculo, carenado y aerodinámica, suspensión, dirección, celdas solares, baterías y motor. Definidas las áreas de investigación el equipo de diseñadores industriales trabaja en conjunto principalmente las áreas de habitáculo y chasis, carenado e integración sistémica.

El estudio de referentes y características formales respecto al desarrollo en las áreas anteriormente nombradas, da paso al desarrollo conceptual del vehículo en donde se diseñan y modelan paramétricamente los componentes básicos del auto solar.

Esta configuración formal se desprende de un estudio primario de variables modificables según el desarrollo del diseño y los tiempos definidos para tal.

Las variables desde el estudio competente al diseño industrial son:

- Estudio de usuarios y definición de tareas.

-**usuario primario:** piloto, quien debe manejar y decidir movimientos espontáneos en ruta, así como seguir las instrucciones del equipo de monitoreo del vehículo.

-**usuarios secundarios o asistentes:** se definen por las tareas de mantención del vehículo, tales como cambio de neumáticos, regulación de suspensión, revisión eléctrica y de electrónica, sistema de celdas y tracking, controlador y motor y asistencia al piloto en ruta.

- Levantamiento antropométrico de pilotos.

-**Medidas corporales:** Estatura, altura hombro, altura codo, ancho máximo cuerpo (hombros), anchura codos, anchura caderas, longitud nalga rodilla, longitud nalga poplíteo, altura total sentado, altura hombro sentado, altura codo sentado, longitud pie.

-**Alcances corporales:** alcance mínimo funcional brazo, alcance máximo funcional brazo, alcance brazo frontal, alcance funcional piernas.

- Modelamiento digital de usuario.

Con la información obtenida de las mediciones y análisis de usuarios se genera un modelo digital, basado en un estudio de percentiles (1 y 100) a utilizar en el diseño del habitáculo, el cual depende de los elementos que lo conforman, como asiento, mandos, manubrio y los aspectos reglamentarios definidos por la carrera. Con lo cual se define la postura inicial del piloto para el diseño del modelo conceptual paramétrico.

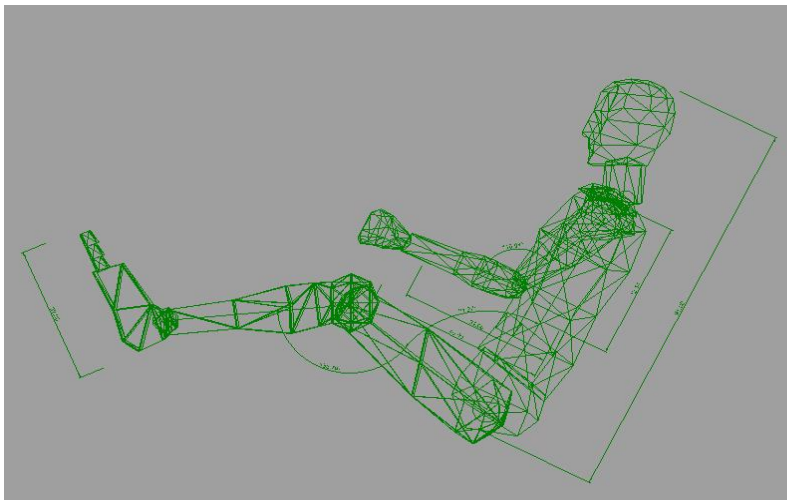


Ilustración 31 modelo primario de postura del piloto. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Diseño del modelo conceptual, integración de los criterios de diseño:

Esta etapa corresponde a la integración de los criterios de diseño, para la formulación y modelamiento del diseño conceptual integral del equipo de trabajo.

Los elementos que componen el diseño conceptual corresponden a:

- Carenado:

Cuerpo exterior del vehículo solar, sus funciones corresponden a brindar cobertura aerodinámica y climática al piloto, componentes eléctricos y mecánicos del vehículo. Así como también brindar soporte a las celdas solares.

Requerimientos formales para el desarrollo del carenado:

- Definición de área de superficie de celdas solares.
- Definición de espacio para habitáculo y posicionamiento del piloto.
- Definición de perfil aerodinámico del cuerpo principal.
- Definición de distancia entre ejes y estudio de radios de giro.
- Definición de perfiles aerodinámicos para cobertura de ruedas.
- Aproximación formal a la cúpula y cobertura del espacio del piloto.
- Estudio primario de tecnología y materiales a utilizar.

- Chasis y habitáculo:

En el diseño conceptual vehículo solar Eolian2, el chasis se diseña a partir de los requerimientos formales del carenado, dado que al tratarse de un vehículo completamente cerrado, el espacio interior define los límites formales y espaciales de la estructura.

En este caso el concepto estructural a utilizar se compone de paneles estructurales en materiales compuestos (sándwich composite), la disposición de la papelería se genera en base a la posición del piloto y los componentes mecánicos., siendo los puntos críticos los soportes de suspensión y baterías. El cálculo de los paneles corresponde al Ingeniero mecánico, el cual determina las dimensiones de espesor, direccionalidad de fibras y refuerzos específicos según los esfuerzos que se determinen en el análisis del diseño.

- Integración de componentes:

La integración del sistema de componentes eléctricos y mecánicos se hace como paso siguiente al modelamiento de la estructura base. Puntos importantes de esta etapa corresponden a la posibilidad de establecer el balance de peso del vehículo y se da inicio al desarrollo de cada uno de las partes y piezas del vehículo.

El posicionamiento del tren motriz, la suspensión y dirección del vehículo se desarrollan a partir de este modelo.

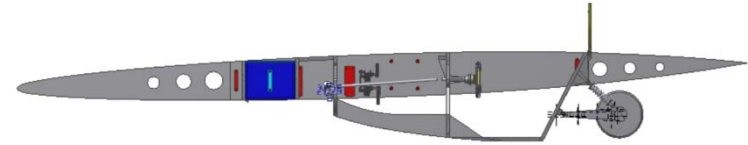


Ilustración 32 Modelo 3d de chasis Eolian 2. Gabriel Rojas.

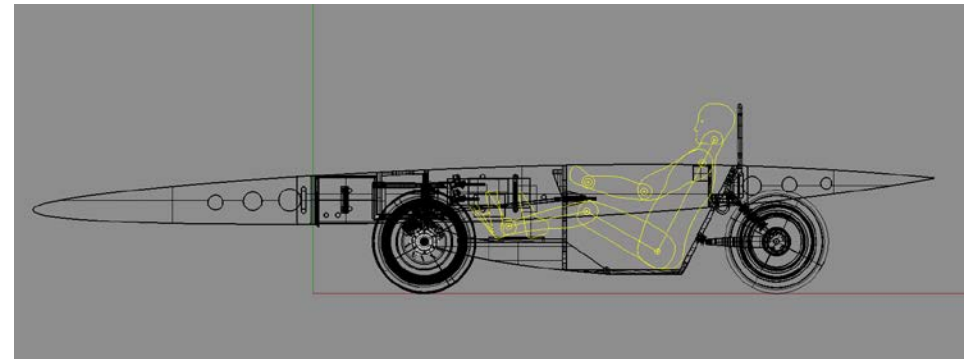


Ilustración 33 Chasis y piloto en posición.

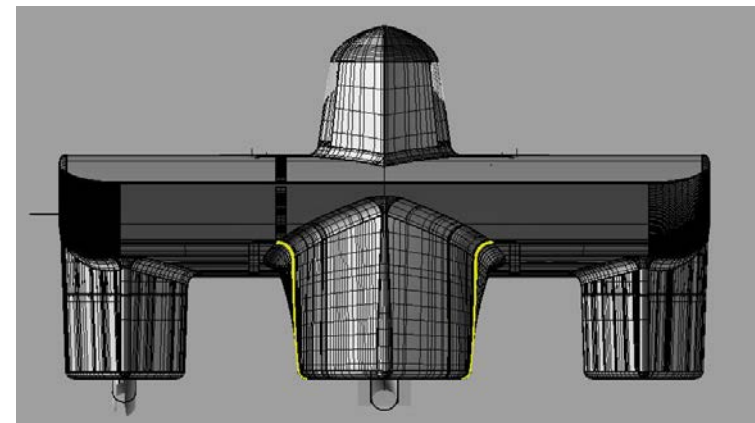
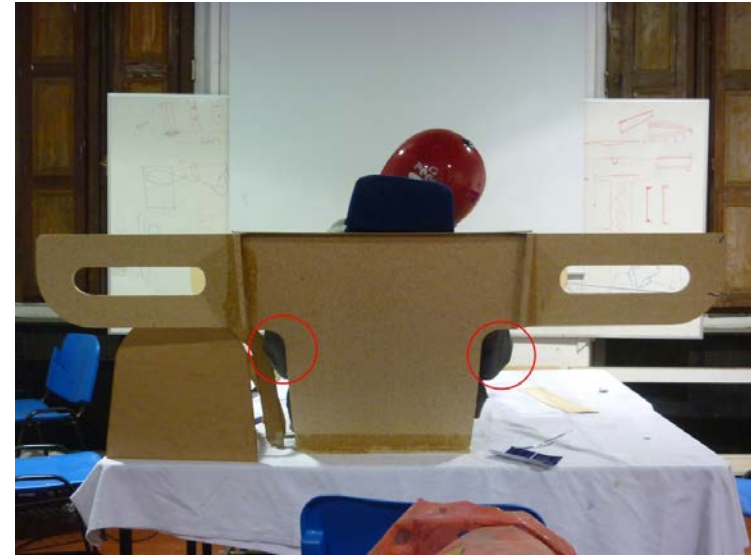
5.4. Análisis del diseño y validación formal.

Una vez determinado el modelo conceptual, los ajustes de diseño tanto del carenado como chasis, se desarrollan principalmente en detalles que se logren identificar en el modelo digital, revisada esta etapa se procede a la fabricación de un modelo físico analítico funcional. En el cual se hacen las pruebas relacionadas principalmente a los usuarios, primarios y secundarios.

Esta etapa define los parámetros de uso reales a reintegrar en el diseño del vehículo, para el desarrollo del modelo final para prototipado.



Figura xx. Modelo físico analítico funcional.



.Figura xx. Observaciones al carenado respecto a postura del piloto.

Simultáneamente se estudian los aspectos estructurales y de comportamiento aerodinámico del vehículo, así como pruebas eléctricas, tales como descarga de baterías, rendimiento real de celdas solares y cálculos específicos de rendimiento del motor.

5.5. Análisis en elementos finitos.

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos. Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que su ensamble representa el cuerpo original. La solución que se obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. Por ende, La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelar (a partir de las Leyes de la Elástica). Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento.³

³ <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/elementos-finitos-elementos-resorte-barra-y-viga/elementos-finitos-elementos-resorte-barra-y-viga.pdf>

El diseño del carenado se analiza mediante este método para obtener las variables de coeficiente aerodinámico del cuerpo, en orden de tener un estimado de la resistencia aerodinámica del modelo (área frontal x coef. aerodinámico), este estudio también sirve para identificar puntos de alta y baja presión en la superficie del modelo, la cual sirve para definir las entradas y salidas de aire para la ventilación interior del vehículo.

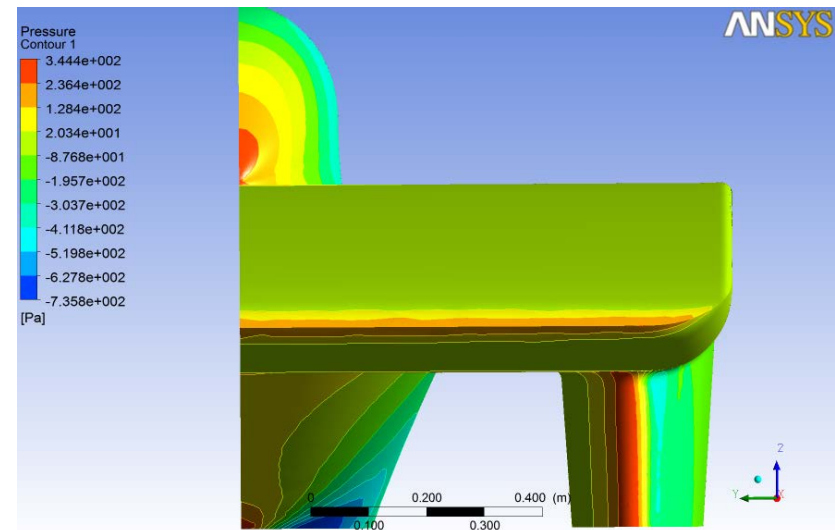


Ilustración 34 Chasis y piloto en posición.

El análisis de elementos finitos también se utiliza para el cálculo estructural de los componentes mecánicos y su comportamiento en la superación de baches y frenado. La visualización de los elementos integrales del modelo y los gráficos de factores de seguridad permiten identificar las zonas críticas o sobredimensionadas, para desarrollar el modelo en función de bajar peso, reforzar o identificar errores de concepto.

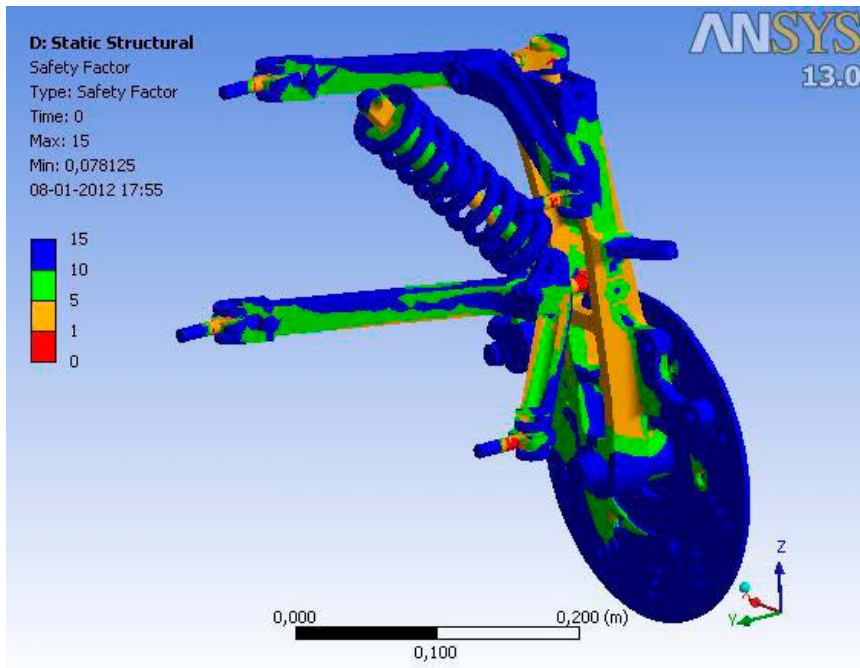


Ilustración 35 Suspensión delantera análisis elementos finitos. Javier Gonzáles.

5.6. Integración de elementos analizados, definición del modelo final para prototipado y estudio de factibilidad.

Finalmente estudiados y validados los componentes del vehículo se redefine el modelo final, el cual procederá a su etapa de fabricación del prototipo.

Parte fundamental del estudio previo al prototipado del vehículo corresponde al estudio de factibilidad, en donde se le da revisión exhaustiva a los aspectos técnicos de materiales y tecnologías a aplicar en la fabricación. Este estudio permite estimar el desarrollo de la planificación y recursos destinados a cada pieza del prototipo. Si bien el estudio de factibilidad es de carácter conclusivo, los elementos de integración de tecnología y materiales están presentes durante todo el desarrollo del modelo.

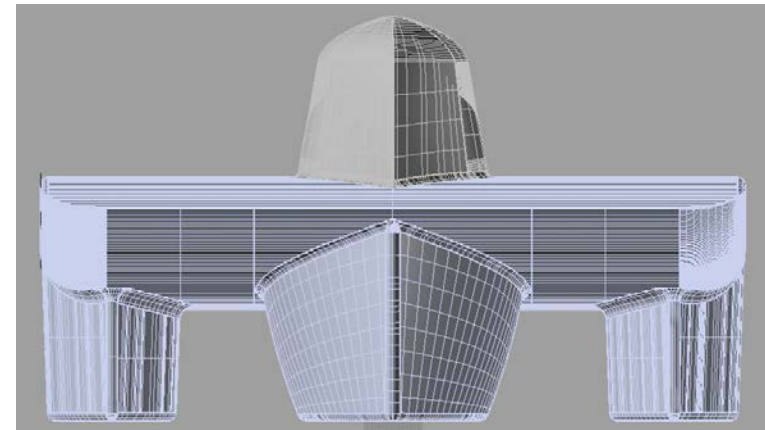


Ilustración 36 Vista posterior modelo carenado corregido final.



Ilustración 37 modelo final Eolian 2.

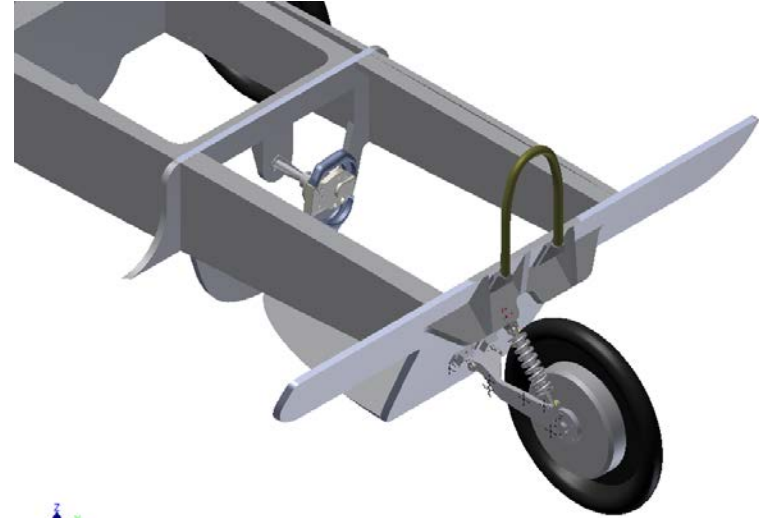


Ilustración 39 vista suspensión trasera y motor Eolian 2. Manuel Rojas



Ilustración 38 modelo final de chasis con componentes. Manuel Rojas.

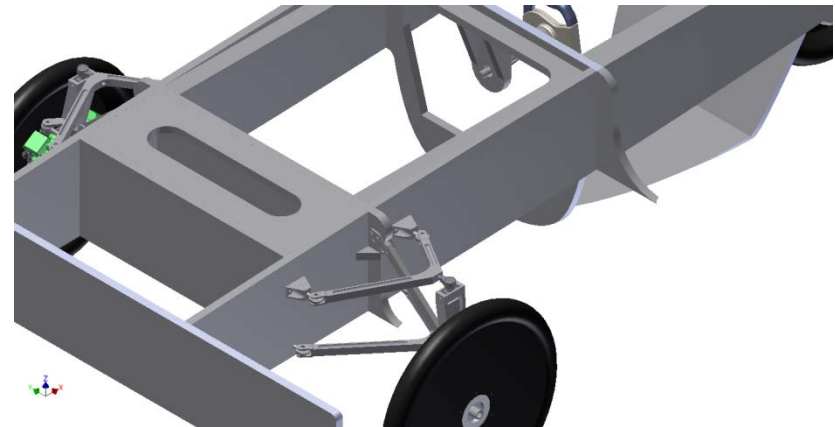


Ilustración 40 Suspensión delantera Eolian 2. Manuel Rojas

5.7. Fabricación del prototipo Eolian 2.

- Experiencia de fabricación en materiales compuestos avanzados en ENAER.

El trabajo de fabricación del prototipo Eolian 2 en la Empresa Nacional de Aeronáutica ENAER, corresponde al principal aprendizaje técnico avanzado en cuanto a la fabricación en materiales compuestos. Estos conocimientos adquiridos mediante la aplicación técnica en el proceso de fabricación del vehículo solar, forman parte medular del desarrollo del proyecto y amplía las fronteras del diseño en cuanto a posibilidad de aplicaciones y formas.

- Máster:

Pieza maestra, utilizada para dar la forma exterior del vehículo, consiste de un cuerpo sólido y cuadernas rígidas que demarcan la superficie y mantienen las medidas fundamentales de este. Su masa principal debe ser de un material que no sufra mayores distorsiones por efectos de la humedad y temperatura, y que a su vez sirva de soporte para los productos de terminación tales como masillas, resinas, primer y pinturas, la terminación superficial y la precisión dimensional son los criterios primarios a considerar en esta pieza.

El material escogido para el máster es poliestireno expandido de alta densidad (30 kg x mt³), dado principalmente por su estabilidad dimensional, fácil pegado (cola fría), resistencia térmica y mecánica apropiada, "difícilmente inflamable y auto

extinguible" (Norma DIN 4102). Si bien no soporta ataque de solventes, es sellable con productos al agua que permiten el soporte de solventes fuertes como poliéster, acrílico y poliuretano.

En cuanto al diseño del master, se debe tener en cuenta los límites de la tecnología a incorporar, en cuanto a banco de trabajo, herramientas disponibles y capacidades de la maquinaria.

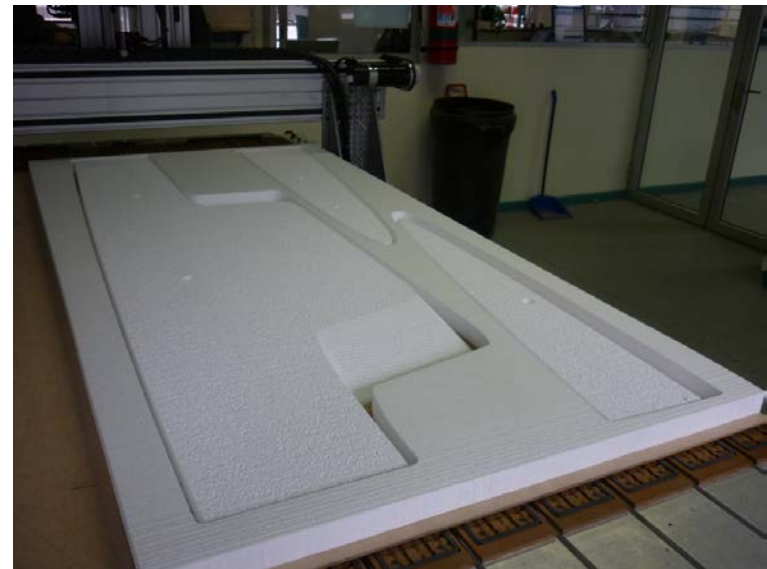


Ilustración 41 Secciones de master en plancha de poliestireno expandido A.D fresadas en router CNC.



Ilustración 42 Piezas cortadas y calibradas, listas para ensamble. Enaer.



Ilustración 44 Máster imprimado.



Ilustración 43 master ensamblado.



Ilustración 45 Master preparado para obtención de moldes.

- Moldes:

El desarrollo de los moldes está vinculado principalmente a las características formales de la pieza a copiar, tanto en lo técnico (retención, ángulos de salida etc.) como en aspectos de diseño de la pieza final, tales como despiece y estructura interior. Y finalmente la ergonomía en el trabajo de aplicación del laminado y fabricación de las piezas.



Ilustración 46 aplicación gelcoat g29.



Ilustración 47 laminado de moldes en fibra de vidrio mat.



Ilustración 48 molde inferior Eolian2.

- Piezas:

Para la fabricación de las piezas que conforman la estructura y cuerpo del vehículo se utilizan 2 secciones principales unidas posteriormente generando una estructura central de una pieza.

- Piel: estructura laminar de tejido de vidrio saturada en resina epóxica de alta resistencia mecánica, en plano actúa como membrana, mientras que en curvas se genera en efecto autoestructurante del laminado. Para el carenado inferior, la sección del habitáculo (gota) y la tapa ruedas, se diseñan con doble curvatura para lograr la rigidez necesaria. Para rigidizar las zonas de membrana se utilizan stringers (larguerillos) de espuma PVC de alta densidad.



Ilustración 49 aplicación gelcoat poliéster.



Ilustración 50 laminado carenado inferior Eolian 2.



Ilustración 51 Aplicación de vacuum bagging.

El laminado de la pieza del carenado inferior presenta variadas complicaciones, sobre todo respecto a la anteriormente nombrada ergonomía del trabajo de laminado, dada las dimensiones de la pieza y el método de aplicación del laminado.



Ilustración 52 Complicaciones en laminado de carenado inferior Eolian 2.

En este punto es muy importante definir los criterios según los que se evalúa el método de aplicación del laminado y la fabricación de piezas, ejemplo de ello fue la decisión de laminar de una sola vez el total de la superficie, por darle prioridad a la integridad estructural de la piel, sin embargo, este método dada las cavidades, extensión de la geometría

de la pieza y las condiciones impropias de posicionamiento del espacio de trabajo, hacen que el trabajo sea sumamente demandante, esto conllevó finalmente a que el laminado se extendiera al límite de las capacidades técnicas de las resinas utilizadas (potlife), lo cual generó un sobrepeso importante en la pieza final.

Para el prototipado del segundo vehículo, el esquema de trabajo se cambió radicalmente, dándole prioridad a los criterios de usabilidad del molde en la fabricación de la pieza, esto resultó en una pieza laminada por secciones, las cuales para efecto estructural no tuvieron complicaciones dadas las características de juntas virtualmente inexistentes que permite la tecnología de laminado manual. Y el peso del conjunto se redujo en aproximadamente 15 kg.

5.7.1. Observación de la experiencia en fabricación de pieles:

Respecto al diseño de la pieza del carenado superior, la cual tiene por función el soporte de las delicadas celdas solares, se puede concluir que el concepto estructural utilizado fue muy deficiente, principalmente por el tipo de construcción utilizada en cuando a la rigidez que requería el carenado para su manipulación. Este problema genera en uso una preocupación constante sobre el cuidado de la celda solar, dificultando las tareas de trabajo en el auto solar.



Ilustración 53 laminado carenado superior con stringers posicionados.

El concepto de stringers o larguerillos utilizados en el carenado inferior si tenía validez, dado que esta piel estaba dispuesta a ser parte integral del chasis del vehículo, sin embargo para el caso del carenado superior, solo estaba en contacto con la estructura principal estando éste montado sobre ella, otro problema acerca de los stringers fue su falta de integridad a lo ancho del carenado. Este error conceptual de diseño se genera por falta consolidación entre el diseño de la pieza del carenado superior en función del chasis y viceversa. Los refuerzos integrados posteriormente inevitablemente tuvieron que invadir las cuadernas del chasis.

Panel sándwich: estructura planar de alta rigidez, compuesta por capas de fibra de carbono de alto modulo y un núcleo inercial de espuma de alta resistencia a la compresión (divinicell PVC 80 kg/mt3). Este tipo de construcción es la utilizada en el chasis del vehículo.

El proceso comienza con la perforación de la plancha de espuma estructural divinicell con el layout de insertos diseñado y la matriz de agujeros, en router CNC. Estas perforaciones conducirán la resina entre capas, formando el efecto de “cama de clavos” el cual aumenta considerablemente la resistencia y rigidez del panel. Este proceso corresponde a un protocolo de ENAER y fue estudiado con probetas en laboratorio IDIEM.



Ilustración 54 perforación de plancha divinicell en router CNC.

Luego se procede a laminar sobre un mesón de aluminio (molde) las capas de fibra de carbono especificadas, para luego posar el panel sobre el laminado e incrustar aplicando como adhesivo una resina con carga de microballons los insertos de aluminio (soportes mecánicos). Los insertos de aluminio deben ser tratados con anterioridad a un proceso llamado anodizado crómico y luego impregnados con un promotor de adherencia.



Ilustración 55 posicionamiento de insertos en panel.

En un mesón aparte se hace un laminado pre impregnado (fibras impregnadas en una manga de polietileno, que luego

se utiliza como soporte temporal para la aplicación del laminado sobre el panel) de las capas superiores y se posicionan sobre el panel. Finalmente se procede a aplicar el proceso de vacío (vacuum bagging) y se someten a horno durante mínimo 8 horas a 25° para luego hacer un tratamiento de postcurado a alta temperatura (entre 40° y 80°).

Una vez curado el panel, se procede a cortar las piezas en Router CNC, manteniendo el eje de coordenadas del posicionamiento inicial del layout, la precisión de este procedimiento es de vital importancia para el calce posterior de las partes del chasis.

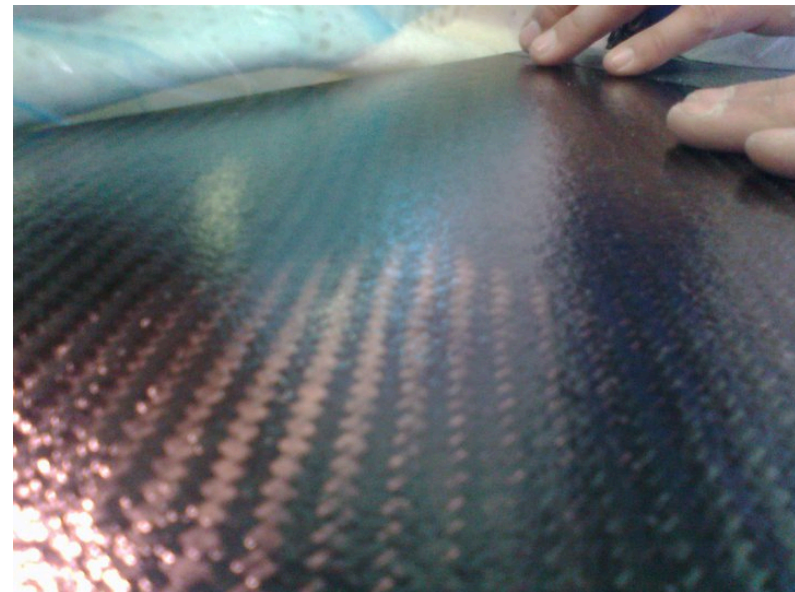


Ilustración 56 panel de fibra de carbón curado.

El procedimiento de armado corresponde al pegado estructural de las piezas de panelería de fibra de carbono.

La primera etapa consiste en el posicionamiento de una pieza maestra, sobre la cual se irán adhiriendo las piezas del chasis. El adhesivo estructural se compone de una mezcla de resina epoxi con carga de cottonflox al 20%, las zonas de contacto deben estar previamente lijadas o con la rugosidad del peelply (capa laminada al panel sobre el carbono que se retira al momento de armar dejando una superficie rugosa). Los cantos se acanalan y se integra a la unión un cabo de fibra de vidrio que actúa como un refuerzo estructural en cada junta⁴.



Ilustración 57 Armado chasis, refuerzo Roving.

Este procedimiento se repite para todas las juntas del chasis y luego para la unión al carenado.



Ilustración 58 Detalle de Roving de vidrio en las juntas interiores.

⁴ Este tipo de refuerzo da pie al concepto de amarre estructural perimetral que se aplica en el desarrollo del chasis del vehículo PROTEAN.



Ilustración 59 Estructura chasis pegada y curada.

Una vez pegada la estructura con el adhesivo estructural y el refuerzo de roving, se seca y se procede a generar las juntas estructurales en fibra de carbono del chasis. Para ello es fundamental generar con la misma resina con carga de cotton al 20% radios que permitan aplicar la fibra de carbono en los angulos de 90° sin quebrar la fibra.



Ilustración 60 Laminado estructural de juntas del chasis.

Una vez unidas y laminadas las cuadernas del chasis, se procede a pegar el chasis al carenado inferior, formando la estructura que haría corresponder a un chasis del tipo semi-monocasco⁵, dado que la Piel aporta estructura a la pieza final y posee stringers que la rigidizan.

⁵ <http://www.digitalaviationtraining.com/monocoque-structures.html>

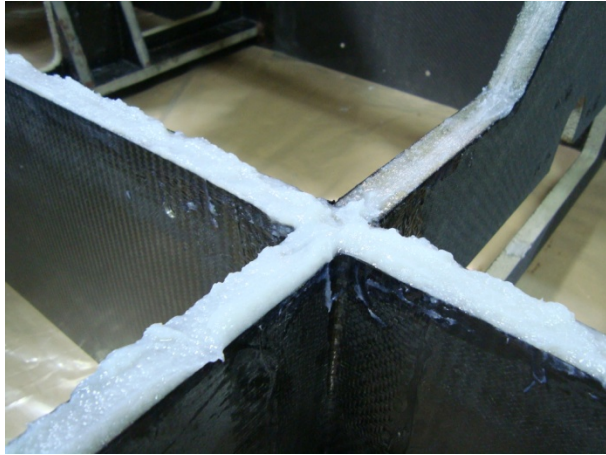


Ilustración 61 Aplicación de adhesivo y Roving.



Ilustración 62 Pegado de chasis a carenado inferior.



Ilustración 63 Radio de junta laminado en vidrio.

Finalmente la junta entre chasis y carenado inferior se refuerza con un laminado estructural esta vez en fibra de vidrio, dado que su elasticidad le permite absorber tensiones o cargas a las cuales se someten las piezas en uso, sin generar fracturas en la junta.

La estructura se somete a un postcurado final durante 6 horas a 60°C.



Ilustración 64 estructura de Eolian 2 completa.

5.7.2. Comentarios sobre la experiencia, oportunidad de diseño y transferencia tecnológica:

El proyecto Eolian 2, en cuanto a la formación profesional presenta una oportunidad de aprendizaje única en cuanto a los alcances de la disciplina del diseño interdisciplinario los cuales son base para el desarrollo de un método de trabajo, basado en la experiencia con el uso de materiales avanzados.

En cuanto al desarrollo del prototipo basado en el trabajo interdisciplinario de diseñadores industriales e ingenieros mecánicos y eléctricos en formación, la utilización de lenguajes y tecnologías comunes, presenta una dinámica de trabajo particular, donde las actuales tecnologías de modelamiento paramétrico cumplen una función radicalmente importante en el avance del proceso de diseño y son parte medular en la constitución de un método de trabajo fluido entre disciplinas. Sin embargo es siempre importante la realización de trabajo de modelamiento físico de los elementos componentes del diseño, en estos se descubren cosas que el modelo digital muchas veces parecen no ser de importancia. El ir y venir en el proceso de diseño es una práctica que enriquece el desarrollo del producto final.

La ampliación de los conceptos constructivos basados en la experiencia de fabricación Aeronáutica aplicadas al prototipo del vehículo solar Eolian 2, abre caminos al desarrollo de nuevas aplicaciones y procesos, en los cuales la innovación sea el paso siguiente al aprendizaje obtenido en el transcurso del proyecto. La aplicación de estos conocimientos dan base

al planteamiento de nuevos horizontes en cuanto al desarrollo de nuevos vehículos sustentables. Sin embargo la innovación tiene riesgos que en proyectos de esta escala comprometen una cantidad de recursos importantes tanto monetarios, como de disponibilidad de gente preparada bajo los mismos aleros de la experiencia.

5.7.3. Oportunidad de Diseño:

La carrera Solar Atacama de 2012 en la categoría La ruta Solar presenta bases técnicas en las cuales se identifica la oportunidad de desarrollar un vehículo como continuidad del desarrollo de la experiencia en Eolian 2, pero de menor escala y con un límite de presupuesto establecido. De esta forma surge la formación de un equipo de trabajo reducido que implemente conocimientos en un nuevo vehículo, con los componentes de innovación como directriz del desarrollo del diseño, volviendo también a mirar en las bases de la sustentabilidad, los principios para la toma de decisiones en este nuevo concepto de vehículo solar con tracción humana, denominado Velomovil Solar.

Capítulo 3

6. Desarrollo del proyecto Velomovil Solar Protean.

6.1. Presentación del proyecto Velomovil solar PROTEAN.

El equipo de trabajo, se integra por un equipo de estudiantes de diseño industrial e ingeniería eléctrica, y un equipo docente de las áreas de diseño, ergonomía, ingeniería mecánica y Fisiología.



Ilustración 65 esquema de equipo de trabajo en proyecto Protean. Fuente: elaboración propia.

El proyecto Protean nace a partir de la idea de implementar y transferir todo el conocimiento y la experiencia adquirida por el Equipo de Diseño de Eolian 2 al desarrollo de un Velomóvil solar para participar en el Desafío Solar Atacama 2012. Busca establecer definitivamente una continuidad del trabajo interdisciplinario realizado con la Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, para ocupar esta relación académica como punto inicial de desarrollo estudiantil para lograr participar en nuevas plataformas de proyectos enfocados a la investigación y desarrollo de las áreas que competen al Diseño Industrial.

Para estos efectos Protean acogió tres áreas de desarrollo:

- 1) Diseño Conceptual y transferencia de procesos para la confección de un Chasis de Colihue como elemento estructural en base a materiales compuestos.
- 2) Transferencia de procesos para la implementación de nuevos sistemas de laminados enfocados a fibras vegetales
- 3) Transferencia de tecnologías y procesos en el desarrollo de encapsulamiento de celdas fotovoltaicas para autos solares.

El presente desarrollo a describir en este informe corresponde al primer punto de desarrollo del vehículo Protean, Comenzando por el diseño de Concepto del vehículo hasta el diseño e implementación del chasis experimental de Colihue reforzado en materiales compuestos.

6.2. Desarrollo de transferencia tecnologica aplicada al diseño del Velomovil Solar Protean.

6.2.1 Desarrollo conceptual:

El diseño conceptual del vehiculo PROTEAN se genera a partir del estudio primario de las bases de la competencia, seguido del analisis de usuario en el desarrollo del ejercicio del pedaleo, para posteriormente formular el cuerpo y estructura primaria (chasis) del vehiculo, integrando los conceptos de diseño de vehiculos solares, desarrollado anteriormente en la etapa de antecedentes.

Las restricciones primarias correspondientes a la geometria del vehiculo son las siguientes:

- El vehiculo debe poseer a lo menos 3 ruedas en contacto continuo con el piso.
- El ancho de trocha minimo del vehiculo es de 1.2 mt (separacion entre ruedas a lo ancho del vehiculo)
- La separacion entre Ejes delantero y trasero debe tener un minimo de 1.5 mt
- La inclinacion del asiento del piloto debe ser de 27° idealmente.

Dichas restricciones se establecen como base para el desarrollo del modelo 3d primario. En cuanto al ultimo punto donde se hace referencia al angulo de inclinacion del asiento, se distingue que la referencia de las bases es mas bien una recomendación de diseño, sin embargo este punto sera definido según el estudio del usuario y las observaciones planteadas por el piloto y su entrenador.

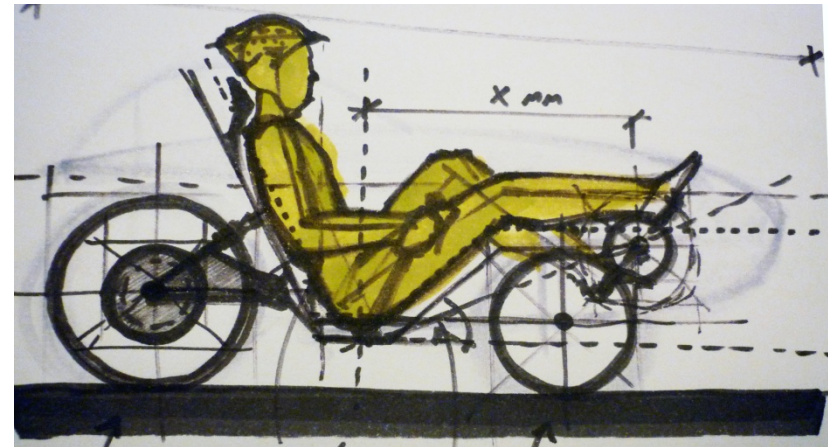


Ilustración 66 esquema de interrogantes para el posicionamiento del piloto. Fuente: Elaboración propia.

Establecidos estos parametros fundamentales se procede al desarrollo del posicionamiento del piloto, ante lo cual surgen las primeras interrogantes respecto a los angulos ideales de pedaleo y la integracion de las variables mecanicas relacionadas a las piezas de comprenden la transmision biomecanica del vehiculo. Estas interrogantes se plantean al piloto y el experto en fisiologia, quienes establecen que el

mejor modelo primario para dar pie al estudio concreto de la posición del piloto, es copiar lo más cercanamente la posición de pedaleo común del piloto en su Bicicleta de entrenamiento habitual.

Con estos datos levantados se procede a la actualización de datos del modelo 3d del piloto desarrollado en Eolian 2 y se establece la posición primaria sobre las ruedas, lo más baja posible, en orden de mantener desde el comienzo un centro de gravedad bajo como criterio de diseño.

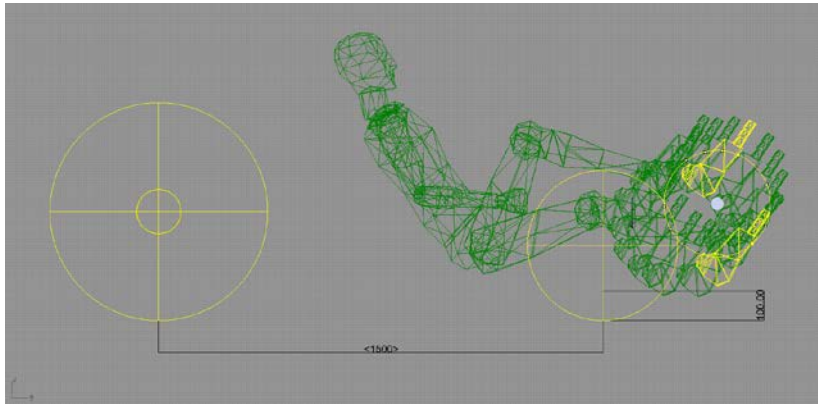


Ilustración 67 modelo de elementos básicos.

El paso siguiente corresponde a la integración de los elementos y conceptos estructurales sobre los cuales trabajar el desarrollo del vehículo.

Según la aplicación de los conceptos estudiados anteriormente e integrando la idea de configurar el chasis a partir de varas de colihue, se establece que el concepto

estructural constructivo compatible corresponde a un Spaceframe.

Una vez definido este concepto se trazan las primeras líneas de construcción considerando a su vez los siguientes puntos:

6.2.2. Definición de las soluciones mecánicas relacionadas principalmente a soporte de las ruedas y suspensión.

Los elementos mecánicos a integrar en el diseño del Velomovil, se desarrollan a partir de una transferencia directa de las soluciones implementadas en Eolian 2. Esta corresponde a un sistema de suspensión delantera de doble bandeja. Este sistema de suspensión permite la incorporación de piezas de bicicletas y deriva características de desempeño probadas en el vehículo Eolian.

La suspensión de un vehículo no solo tiene como función dar confort al piloto, sino que cumple la labor de minimizar las cargas que sufre el chasis debido a las irregularidades del camino y evitar que la rueda pierda contacto con el suelo para siempre mantener el control del vehículo.⁶

Sus componentes principales son:

- *Bandeja superior e inferior:* Su función es unir el King pin al chasis y determina la geometría de desplazamiento de la rueda sobre el camino.

⁶ Informe de suspensión delantera Eolian 2, Javier Gonzales. Enero 2012.

- *King pin:* Su función es dar soporte al eje, los caliper de freno y unir la dirección a la suspensión por medio del brazo de dirección, incluido en el King pin.
- *Amortiguador:* Su función es mantener la rueda en contacto con el piso y disminuir los impactos sobre el chasis debido a las irregularidades del piso.
- *Masa:* Sostiene a la rueda y el disco de freno. También debe alojar al rodamiento para que la rueda pueda girar.
- *Eje:* Une el King pin a la masa. En este eje gira el rodamiento.
- *Sistema de frenos:* A la altura de la suspensión el sistema se compone de un disco de freno, caliper y flexibles. El roce entre el caliper y el disco permite que el automóvil se detenga.

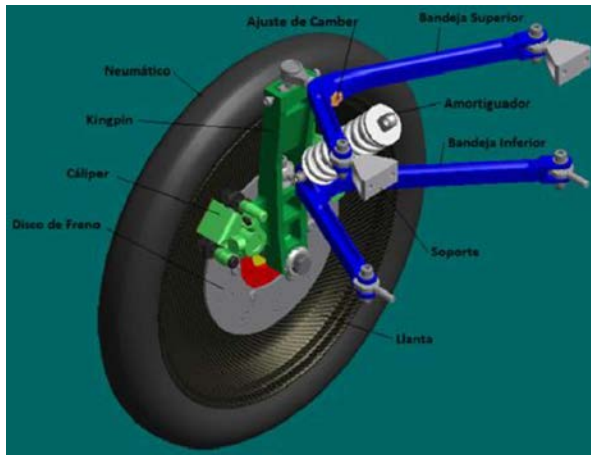


Ilustración 68 Diseño de suspensión delantera Eolian2, Javier Gonzales.

Un sistema de suspensión delantera similar al definido para la aplicación y diseño en el vehículo Protean corresponde al steintrikes



Ilustración 69 sistema de suspensión delantera Steintrike. Fuente: <http://www.treehugger.com/bikes/modular-sporty-flexible-steintrikes-from-bike-revolution.html>

Cabe destacar que por efecto del amplio ancho de trocha del vehículo se decide incorporar al chasis una caja de soporte de la suspensión, la cual a su vez puede servir para el acople de otros elementos de vehículo como el boom o mastil de pedaleo, las dimensiones de la caja se definen por la observación del posible posicionamiento del piloto y el espacio que generan sus piernas flectadas por sobre el eje de las

ruedas delanteras. Esto supone la primera modificación de la posición del piloto, elevando y adelantando su posición.

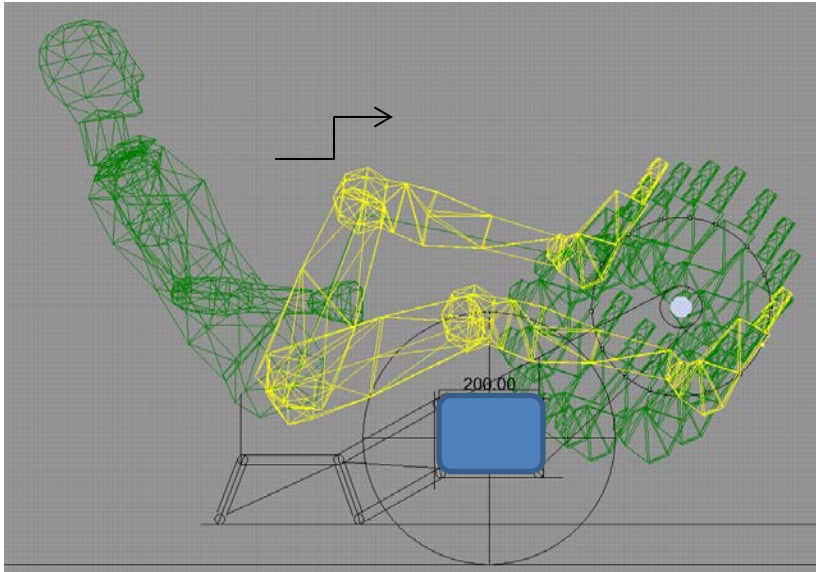


Ilustración 70 definición de espacio para suspensión delantera. Fuente: Elaboración propia.

Con estos conceptos integrados se puede generar el primer modelo digital que relaciona al usuario con los componentes y geometrías primarias dispuestas en la estructura principal.

En cuanto a la definición del soporte de la rueda trasera, al no tener directa relación con el piloto se deja abierta momentáneamente, con orden de dar prioridad al desarrollo del modelo del chasis en sus zonas más complejas.

6.2.3. Análisis de postura del piloto:

Con objetivo de medir el posicionamiento óptimo de la caja del eje motor de la transmisión. Se diseña un “Modelo analítico funcional”, el cual debe permitir un amplio manejo de las variables referidas al caso de estudio.

El correcto posicionamiento del eje de pedaleo, es fundamental para el correcto desempeño del ejercicio del piloto y es un factor clave para la definición del modelo del chasis y carenado del vehículo.



Ilustración 71 modelo analítico funcional, detalle de recorrido de altura. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 72 mecanismo de ajuste de longitud del modelo analítico funcional.

Una vez construido este elemento de análisis, se inicia el proceso de posicionamiento del piloto, el cual se define finalmente por una “ecualización” de los requerimientos de la postura.

La metodología de diseño aplicada para la definición del modelo es análisis en base a problemas.

Cabe destacar que este proceso presenta un nivel de complejidad mayor al ejercido con los pilotos de Eolian 2,

principalmente por sus condiciones dinámicas implicadas en el ejercicio del pedaleo.

La validación de la forma se establece analizando los factores principales respecto a biomecánica del piloto, como los ángulos de pedaleo y flexión de la pierna, este trabajo es analizado en las dependencias del laboratorio de fisiología en la facultad de medicina de la Universidad de Chile. De esta experiencia se rescatan principalmente dos criterios para el diseño del modelo:

- El ángulo extendido de la pierna debe estar entre los 16° a 18° grados de flexión.

- La altura de pedaleo debe ser lo más bajo posible para permitir la generación de un cobertor aerodinámico que no interfiera con la visión del piloto.

Los puntos límites de la geometría definida que interfieren en el posicionamiento óptimo del piloto, son ampliamente manejables en el modelo analítico físico funcional, lo que permite luego de una iteración y resolución de problemas llegar a la posición final que responde a los criterios de diseño que se van identificando en este análisis en base a problemas.



Ilustración 73 ajuste de posición de eje motor según variables de visibilidad.
Fuente: elaboración propia.

El esquema anterior retrata los problemas relacionados a la visibilidad del piloto, las flechas y el cuadro definen hacia donde se deben mover los elementos para la solución del problema identificado, esto junto a la visión del Fisiólogo, determinan el ajuste final de la posición de pedaleo.



Ilustración 74 revisión de ángulos de pedaleo y posicionamiento del piloto.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 75 ajuste de medidas y ángulos de posición final de eje motor.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.4. Digitalización del modelo analítico físico enfocado.

De vuelta al modelo 3d se determina la posición de la caja de eje motor y el ángulo de respaldo del piloto, midiendo y triangulando desde un punto crítico determinado de la estructura.

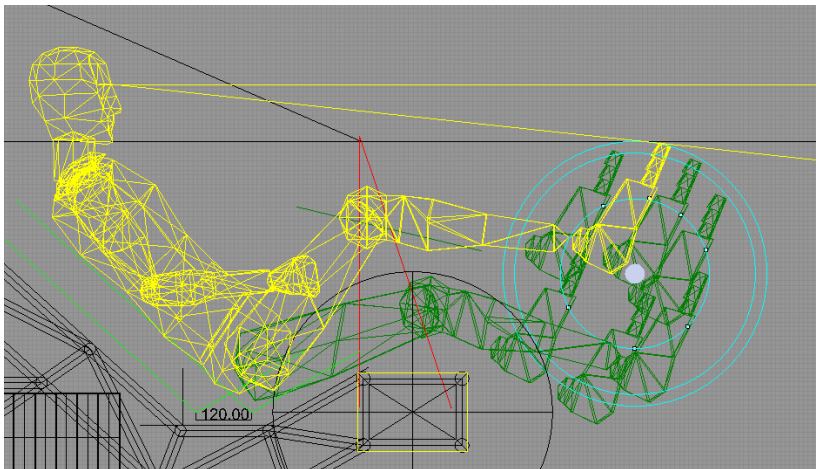


Ilustración 76 análisis y verificación de ángulo de visibilidad en modelo 3d.
Fuente Elaboración propia.

Definida de esta manera la postura del piloto se trazan las líneas de construcción del chasis. Para la obtención de un modelo paramétrico que pueda ser llevado a un análisis estructural en elementos finitos. Este desarrollo se lleva a cabo con ingeniero mecánico.

6.2.5. Aproximación formal y transferencia de conceptos formales de Eolian 2.

En base a los datos identificados para el desarrollo primario de la forma del vehículo, se comienzan a integrar los conceptos constructivos y formales del cuerpo y estructura del vehículo en los primeros bocetos que definen la línea formal del producto.

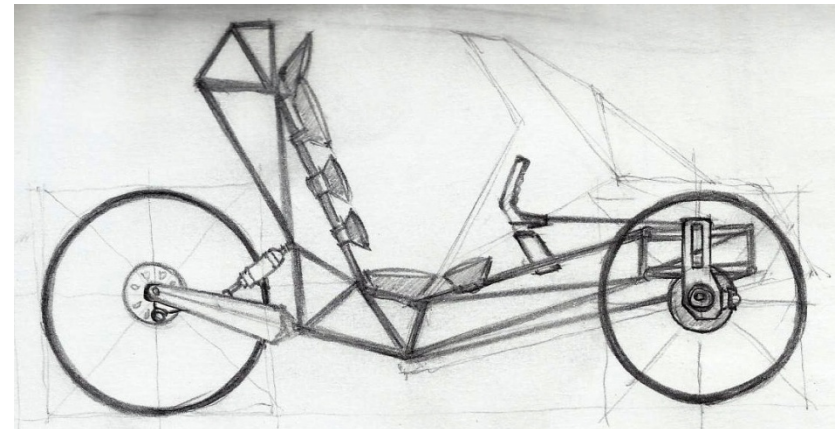


Ilustración 77 aproximación formal 1. Fuente: Elaboración propia.

Las aproximaciones formales contemplan por una parte el diseño del spaceframe de Colihue y la integración de los elementos de suspensión y habitáculo.

Una de las transferencias importantes incluidas en esta etapa de conceptualización corresponde a integrar la aerodinámica de los perfiles alares como soporte de las celdas solares, este

elemento presenta la oportunidad de diferenciar el modelo de los referentes actuales.

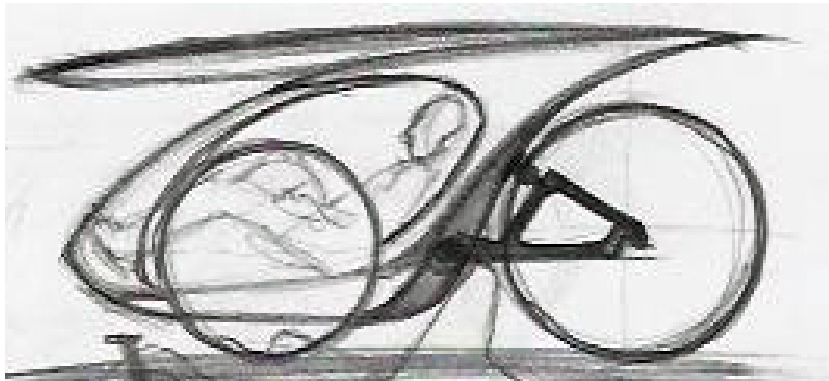


Ilustración 78 aproximación formal a diseño del vehículo PROTEAN. Fuente: elaboración propia.

Los primeros bocetos presentan el perfil alar y el soporte de celdas como techo del carenado, asimilándose a los modelos actuales que se han presentado tanto en la carrera solar Atacama en la categoría ruta solar de 2011 como en los referentes de velomóviles solares. Sin embargo es un primer punto de acercamiento al diseño del vehículo.

Luego de analizar la forma genérica y la posición del piloto, se establece que el perfil alar puede ser integrado al cuerpo aerodinámico central del vehículo, bajando de esta manera el centro de gravedad, mejorando la estabilidad y haciéndolo más estable con la presencia de vientos laterales. Así su forma comienza a asimilarse a la de un vehículo solar de competencia pero integrando un concepto de cuerpo de

carenado parcial considerando la temperatura a la que estará sometido el piloto en la carrera del desierto.

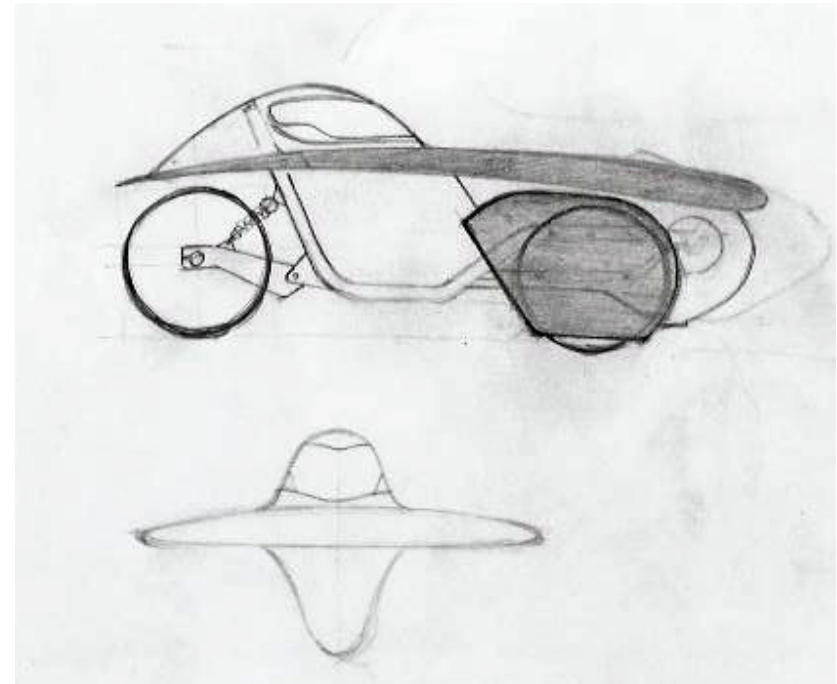


Ilustración 79 concepto de perfil alar integrado al cuerpo del vehículo PROTEAN. Fuente: elaboración propia.

Esta Última aproximación formal se plantea como línea de desarrollo para el cuerpo del auto. Los modelos se trabajan en modelo 3d generando el primer modelo conceptual integral del vehículo.

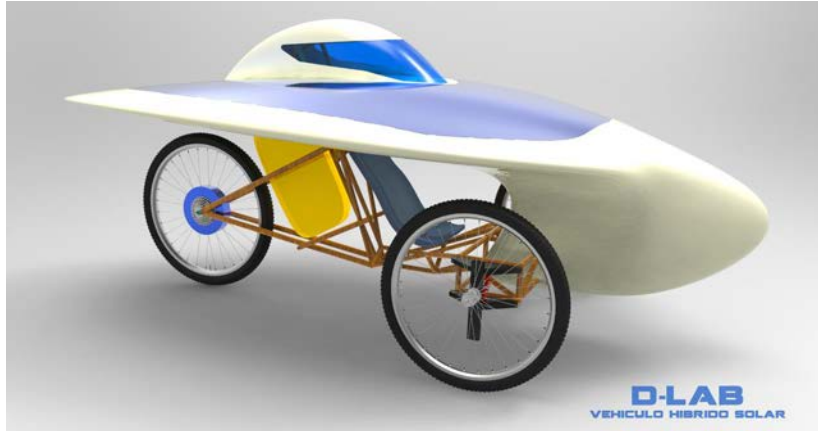


Ilustración 80 modelo conceptual de Velomóvil solar PROTEAN. Fuente. Elaboración propia, renderizado: Álvaro Hinojosa.



Ilustración 81 fotomontaje PROTEAN en desierto Atacama. Fuente Elaboración propia, renderizado Álvaro Hinojosa

6.2.6. Diseño paramétrico del chasis.

El análisis de elementos finitos, requiere principalmente el establecimiento de las propiedades del material a utilizar, como era de esperar el Colihue no se encuentra en las bases de datos de materiales disponibles, por lo que se requiere el análisis de literatura referida a las propiedades mecánicas del Colihue, las cuales luego de una investigación enfocada a la obtención de estos datos se determinan a continuación, cabe señalar que no todos los elementos necesarios para la tabulación del material fueron encontrados, para este efecto se decidió sustituir estos valores por los de materiales similares y de conocida menor resistencia que el Colihue (como por ejemplo el Bamboo) en orden de tener cierto margen positivo en cuanto al factor de seguridad virtual:

Condiciones generales del material:⁷

- Límite de tracción 1200 kgf/cm²
- Límite elástico 621 kgf/cm²
- Módulo de elasticidad 200000 kgf/cm²
- Resistencia al corte 75 kgf/cm²
- Resistencia a la flexión 350 kgf/cm²

⁷ Fuente: <http://www.swst.org/meetings/AM08/proceedings/WS-41.pdf>

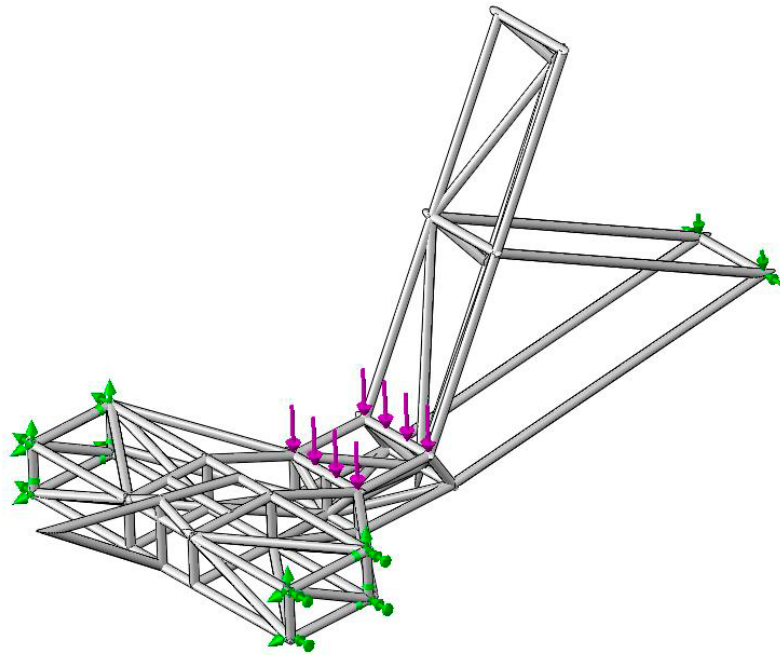


Ilustración 82 modelo chasis de Colihue, para análisis de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de borde:

Se considera como puntos de apoyo fijo los puntos de anclaje al tren delantero y móviles los traseros, además de las barras sometidas a una carga de 120 Kg por elemento, lo cual en conjunto es el triple de peso del piloto⁸. Ambas condiciones de borde se muestran en la figura anterior.

⁸ Reporte de solicitaciones mecánicas, proyecto PROTEAN, ingeniero mecánico Pablo Domínguez.

Resultados:

Luego de la simulación estática del sistema, los resultados se pueden ver en las figuras siguientes.

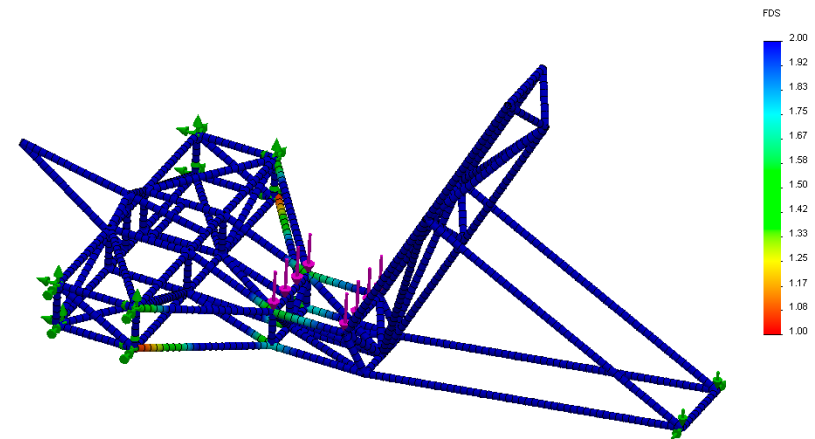


Ilustración 83 resultado de análisis de simulación estática.

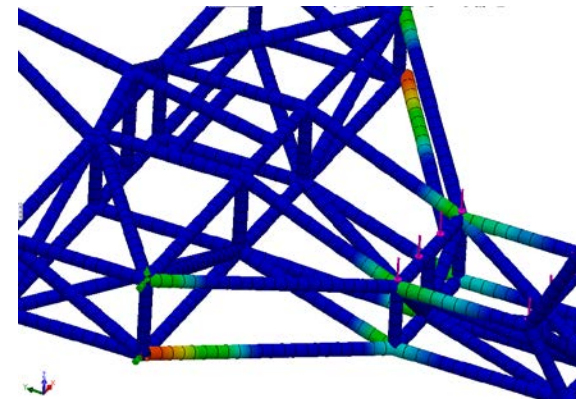


Ilustración 84 detalle de zonas con factor de seguridad menor a 2. Fuente: Reporte de solicitaciones mecánicas, proyecto PROTEAN, ingeniero mecánico Pablo Domínguez.

El análisis estático del chasis, da las pautas para el desarrollo del prototipo y demuestra teóricamente la aplicación del coligue como material apto para la elaboración de un chasis que cumpla las exigencias de la carrera solar Atacama 2012.

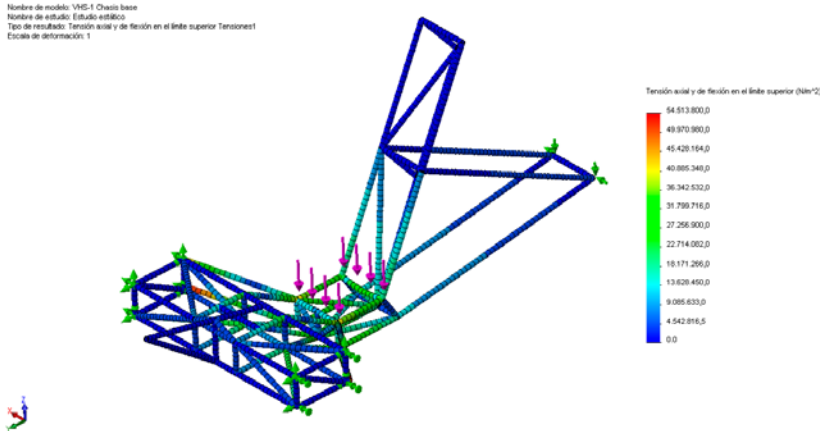


Ilustración 85 análisis de esfuerzos en la estructura. Fuente: reporte de solicitaciones mecánicas, proyecto PROTEAN, ingeniero mecánico Pablo Domínguez.

Para concluir el análisis de factibilidad de uso del Colihue como material para la fabricación del chasis del vehículo solar Protean, se debe hacer una simulación dinámica de un choque frontal, este análisis es reglamentario para clasificar en la categoría Ruta Solar de la CSA 2012.

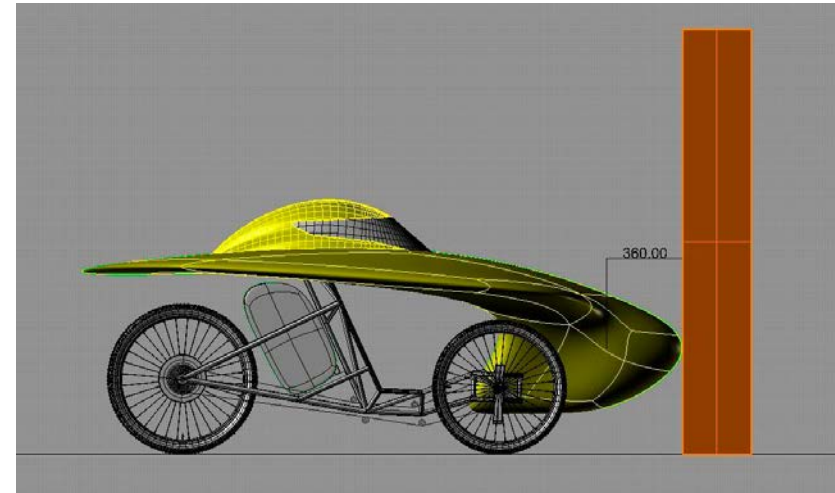


Ilustración 86 Esquema de simulación de choque. Fuente: Elaboración propia.

Para los cálculos se desarrollaron las ecuaciones de cinemática básica para poder determinar la fuerza generada en la colisión, Al desarrollar estas ecuaciones da una desaceleración de $a = 174 \text{ m/s}^2$. Al considerar un peso máximo de sistema (con piloto) de 130 kg, resulta una fuerza de colisión, $F = 22620 \text{ N}$ durante 0,0642 s.

Los resultados al realizar una simulación por elemento finito sobre la estructura y tomando las condiciones de verde descritas anteriormente más la utilización de los puntos de apoyo del cinturón del piloto como nudos de carga, da un factor de seguridad de 1,5.⁹

⁹ Reporte de solicitaciones mecánicas proyecto PROTEAN, Ingeniero Mecánico Pablo Domínguez.

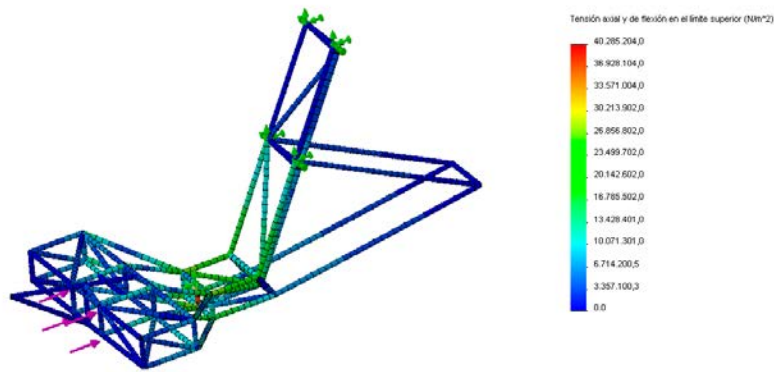


Ilustración 87 distribución de esfuerzos sobre la estructura. Fuente: reporte de solicitaciones mecánicas, proyecto PROTEAN, ing. mec Pablo Domínguez.

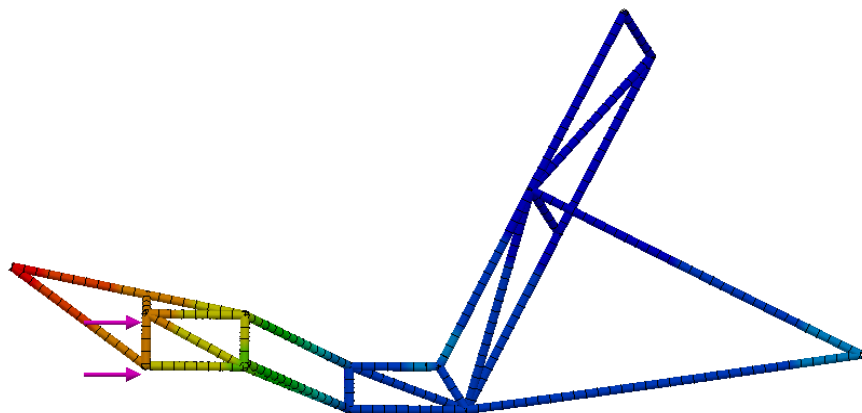


Ilustración 88 gráfico de desplazamiento en la estructura sometida a un choque equivalente. Fuente: reporte de solicitaciones mecánicas , proyecto PROTEAN, ing mec Pablo Domínguez.

6.2.7. Conclusiones del análisis de elementos finitos del chasis de Colihue:

En la vista lateral del gráfico de desplazamiento en la estructura sometida a un choque equivalente, se puede ver que la parte delantera se deforma en su punto máximo, aproximadamente 28mm.

Tanto el estudio estático, como el estudio de colisión equivalente aprueban el diseño y material propuesto por el equipo. En el caso del primero se tiene un factor de seguridad de 1,1 con una carga al triple de la que se va a utilizar y en trozos puntuales de la estructura (como se muestra en la figura xx), los que se pueden reforzar al momento de realizar las pruebas.

Al agregarle estructuras de refuerzo y sumarle el aporte que hace el chasis sobre el sistema completo, aumentará el margen de seguridad en ambas condiciones y en otras no estudiadas.¹⁰

El diseño conceptual de la modelo del chasis analizado en elementos finitos, valida la utilización del Colihue como material para la estructura principal del vehículo, sin embargo este modelo requiere de un análisis más acotado respecto a su factibilidad de producción y aplicación del concepto constructivo en Materiales compuestos. Este estudio

¹⁰ Reporte de solicitaciones mecánicas proyecto PROTEAN, Ingeniero Mecánico Pablo Domínguez.

corresponde al proceso de producción experimental del chasis de Colihue Reforzado en FRP.

6.2.8. Revisión de diseño:

Integración de componentes:

- Tracción:

El Velomovil Solar comprende dos sistemas de tracción complementarios, mecánico de tracción humana y motor eléctrico integrado a la rueda tractora (trasera) alimentado por energía fotovoltaica almacenada en baterías de Litio Fierro Fosfato.

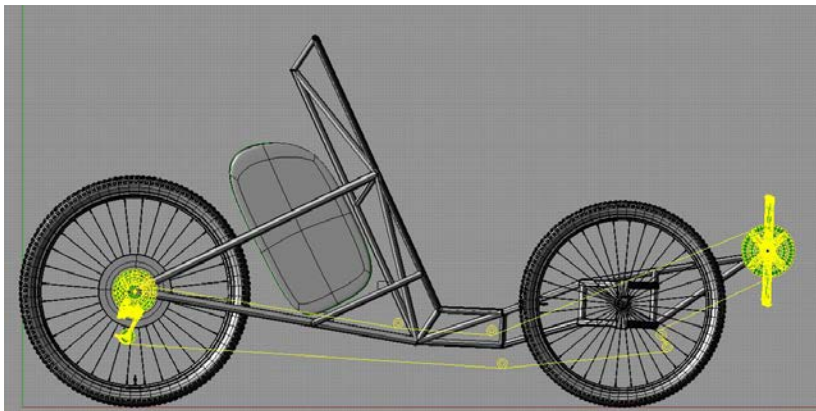


Ilustración 89 esquema de integración de componentes de transmisión. Fuente: Elaboración propia.

- Suspensión y dirección:

El sistema a implementar se define geoméricamente y se diseñan las piezas de la suspensión:

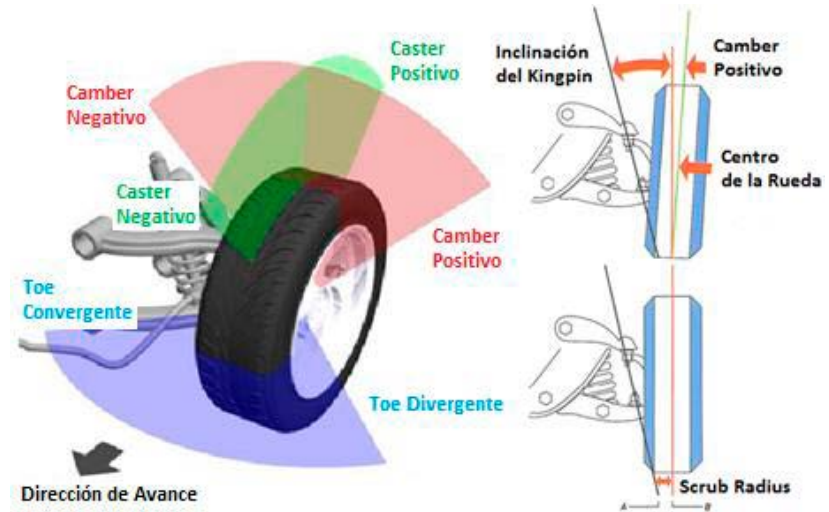


Ilustración 90 ángulos de suspensión delantera. Fuente: Modificada de www.corvetteforums.com

El Angulo de camber y la inclinación del King pin se mantienen en cero para no generar pérdidas energéticas, mientras que el caster se establece con un ángulo de -10° para mantener la estabilidad del vehículo. El soporte de la rueda trasera se define rígido, dado que el mayor peso y la posición del piloto están situados más cercanos al eje delantero.

La dirección corresponde a un sistema de brazos unidos a un pivote central, el cual se maneja directamente con mandos laterales.

6.2.9. Diseño final del prototipo.

Para la fabricación del chasis experimental se plantea como transferencia tecnológica la aplicación de los conceptos de fabricación en materiales compuestos avanzados.

El “concepto de amarre estructural en FRP” que se propone para la fabricación del chasis de colihue reforzado, deriva de la aplicación del roving de fibra de vidrio descrito anteriormente en la fabricación del chasis del vehículo Eolian 2. Este concepto responde principalmente a generar un lazo continuo que “amarra” la estructura por el interior de las juntas y por los radios adyacentes a ellas, generando un refuerzo lineal a través de toda la estructura de colihue.

El material a utilizar es roving de fibra de carbono, el cual tiene una altísima resistencia a la tracción, concepto básico por sobre el cual se genera esta nueva aplicación estructural a la construcción en colihue.

Para aplicar esta técnica constructiva experimental descrita es importante revisar la factibilidad de producción de la estructura simulada, ante lo cual se rediseña la estructura manteniendo las geometrías básicas del spaceframe original, pero simplificando su construcción.

El diseño final de la estructura del chasis en Colihue reforzado en CFRP (carbon fiber reinforced polymer) se simplifica a dos caras planares simétricas en su eje longitudinal espaciadas y unidas por secciones de colihue.

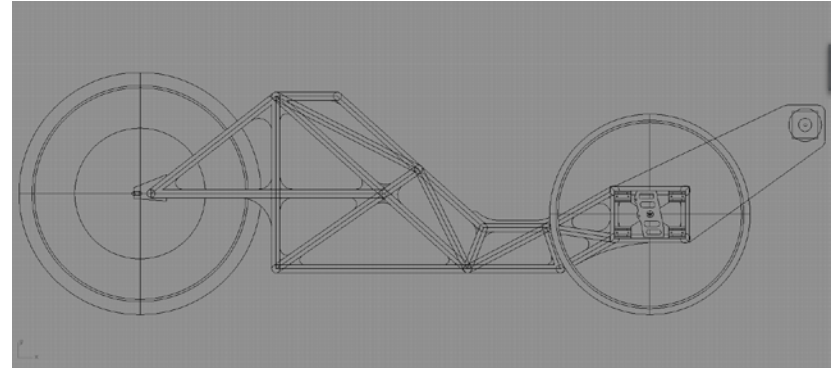


Ilustración 91 Diseño final de la geometría del chasis experimental del vehículo Protean. Fuente: elaboración propia.

Respecto al diseño del carenado, se mantuvieron los conceptos relacionados a la reducción del área frontal y se integró el perfil alar naca utilizado en Eolian 2 como geometría de soporte para las celdas solares, el desarrollo del diseño y construcción en fibras vegetales corresponde al trabajo de Patricia Campos Donoso.

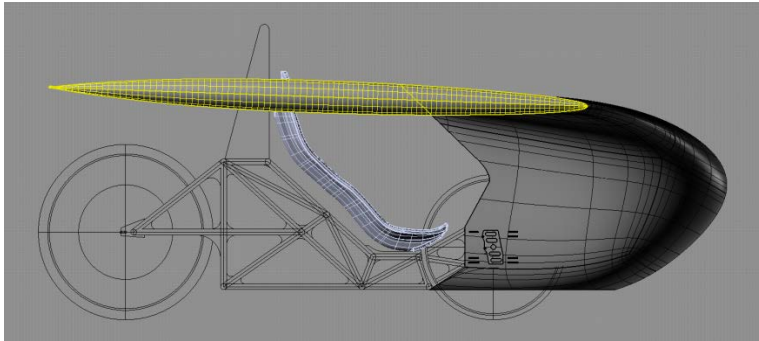


Ilustración 92 diseño final carenado y chasis PROTEAN. Fuente: Elaboración propia.

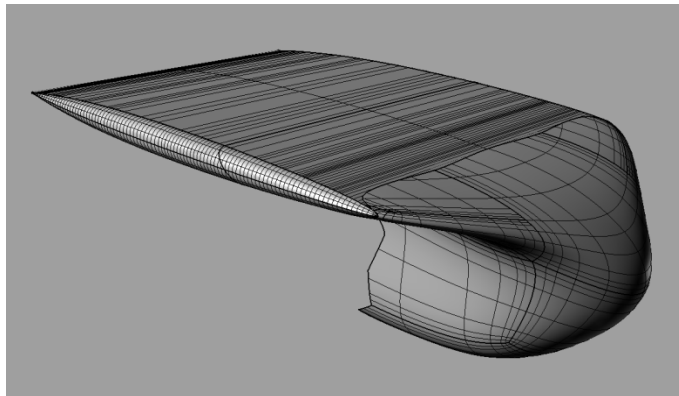


Ilustración 93 modelo final de carenado. Fuente: elaboración propia.

6.3. Fabricación del prototipo, aplicación de materiales compuestos FRP en la construcción del chasis de Colihue.

Inicialmente se prepara una matriz para fabricación de las caras planares prototipo del chasis. Sobre esta se trabajan las piezas de colihue de la estructura en orden de generar calces limpios.

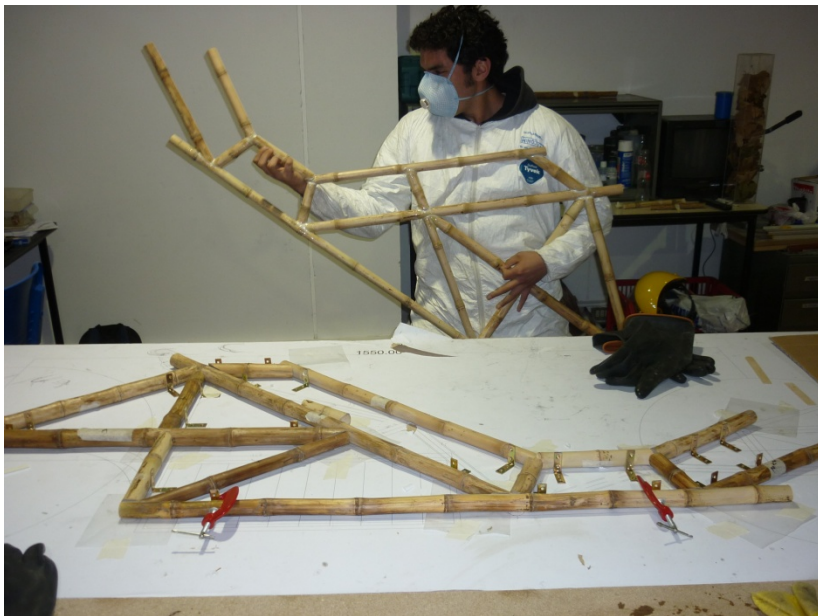


Ilustración 94 sección plana del chasis.

Los colihues se seleccionan con anterioridad buscando principalmente secciones que no tengan signos de putrefacción o polillas (pequeños orificios en la cutícula del colihue evidencian esta condición), que posean un diámetro de entre 25 y 28 mm y que estén lo más rectos posibles.



Ilustración 95 selección de Colihue.

Luego se seleccionan uno a uno las secciones del chasis para posteriormente prensarlos en la lamtriz y comenzar su corte y trabajo de calces. Las herramientas utilizadas en este proceso son ingleteadora manual, sierra y escofina gruesa para dar forma a los extremos de los colihues.

Cabe destacar que la precision en la construccion del chasis debe ser acotada al material utilizado, las varas de coligue varian en su diametro y los nudos son aleatorios, es por eso que el trabajo de selecci3n es de suma importancia en el logro de un chasis con una estabilidad dimensional aceptable. La superficie plana de la matriz permite que ambas caras posean catacteristicas dimensionales muy similares lo cual es clave para la posterior union de las caras del chasis.



Ilustración 96 secciones prensadas a matriz

Una vez dispuestas las piezas de colihue, comienza el proceso de pegado estructural, para ello se establece luego de una prueba a varias resinas epoxi, que el adhesivo ideal para la union de las piezas de colihue es el de tipo Epoxi de gelado rapido (adhesivo epoxico 5 minutos), aplicando los procedimientos de mescla con cargas minerales para reforzar la union y otorgar tixotropia a la mescla del adhesivo, se incorpora a esta una carga de Aerosil (similar al cottonflox).



Ilustración 97 Adhesivo 5 minutos con carga de Aerosil.

Para una correcta adhesión es de suma importancia desbastar la cutícula del colihue en las zonas de contacto, ya que esta capa es hidrofuga y antiadherente por naturaleza. Según recomendaciones del proveedor es bueno para la unión estructural, calentar levemente las piezas antes de aplicarse el adhesivo, esto genera que el pegamento penetre en las capas superiores del núcleo del colihue formando una unión más fuerte.

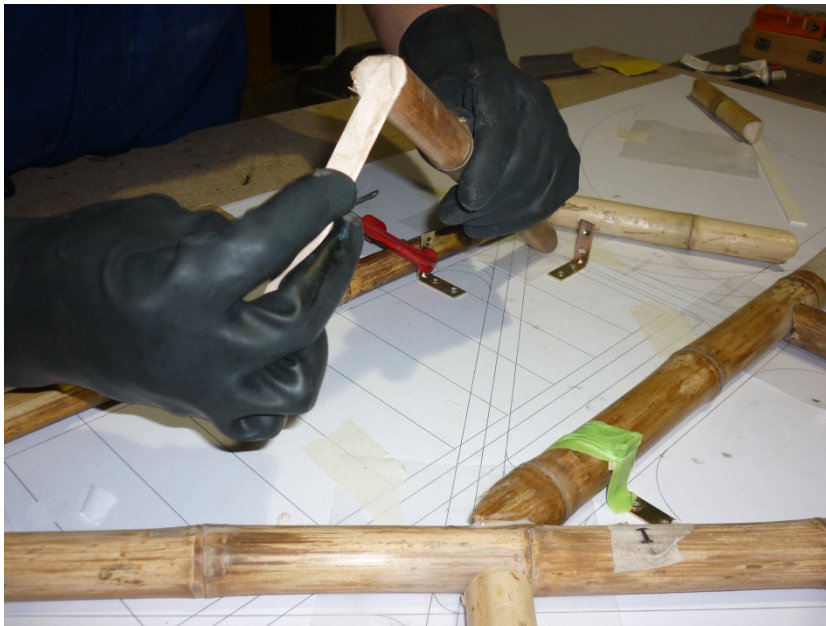


Ilustración 98 Aplicación de adhesivo.



Ilustración 99 Armado de cara lateral del chasis.

Luego de aplicado el adhesivo se deja curar, para luego desmoldar la pieza generando las dos secciones principales del chasis.

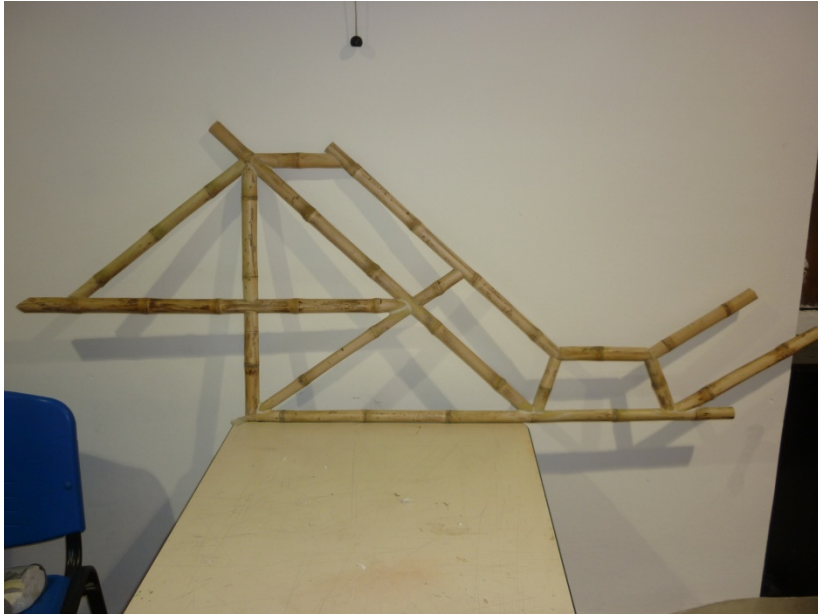


Ilustración 100 Sección lateral plana del chasis.

El proceso siguiente corresponde a limpiar los exedentes de resina en la superficie de las secciones y nuevamente desbastar la cutícula y adhesivos de cada sección intersectada de la estructura lateral, estos puntos se unirán con el uso de la matriz a la cual se le agregan espaciadores para mantener ambas caras separadas a una distancia de 200 mm medidas desde sus caras exteriores.



Ilustración 101 Posicionamiento de caras en matriz.



Ilustración 102 chasis armado.

Ambas secciones se unen utilizando la misma técnica de adhesión utilizada para su fabricación y se termina el proceso curando las resinas a una temperatura de 50° por 4 horas.

Una vez curado el chasis se procede a desmoldarlo y delimitar las líneas por donde se aplicará el refuerzo CFRP. Las líneas delimitadoras de la aplicación sirven como guía para el corte de la cutícula, este proceso se hace con un cepillo spauzer. Un punto importante para la construcción de este chasis es la identificación de los ángulos y radios interiores por donde pasa el cabo de fibra de carbono, como las juntas entre coligues generan ángulos demasiado agudos para una

aplicación efectiva del refuerzo, se disponen cartelas de terciado aeronáutico de cada vértice de la estructura. Estas cartelas son cortadas en láser y se aplican en la estructura con el mismo método de pegado estructural.

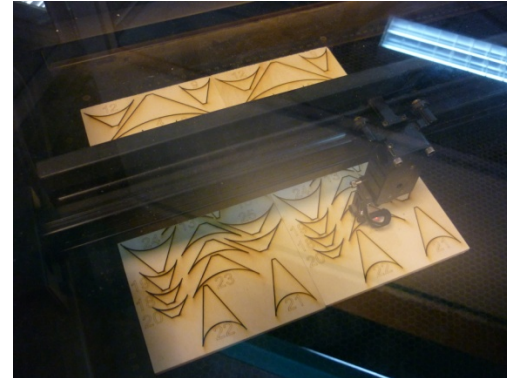


Ilustración 103 corte cartelas laser.



Ilustración 104 pegado cartelas.



Ilustración 105 aplicación Roving carbono.



Ilustración 107 radios en juntas de coligue.



Ilustración 106 amarre estructural CFRP.



Ilustración 108 chasis coligue con amarre estructural aplicado.

Finalmente la aplicación del refuerzo CFRP genera cuerdas de amarre integradas al coligue, amarrando con la estructura perimetralmente, generando así la estructura propuesta para la aplicación en el prototipo funcional del vehículo PROTEAN.



Ilustración 109 detalle de amarre de carbono.

Los elementos de suspensión y soporte del tren delantero se derivan directamente del tipo de construcción de la panelería estructural de compuesto desarrollado en Eolian 2. Utilizando un núcleo de divinicell, insertos de terciado y fibra de vidrio.

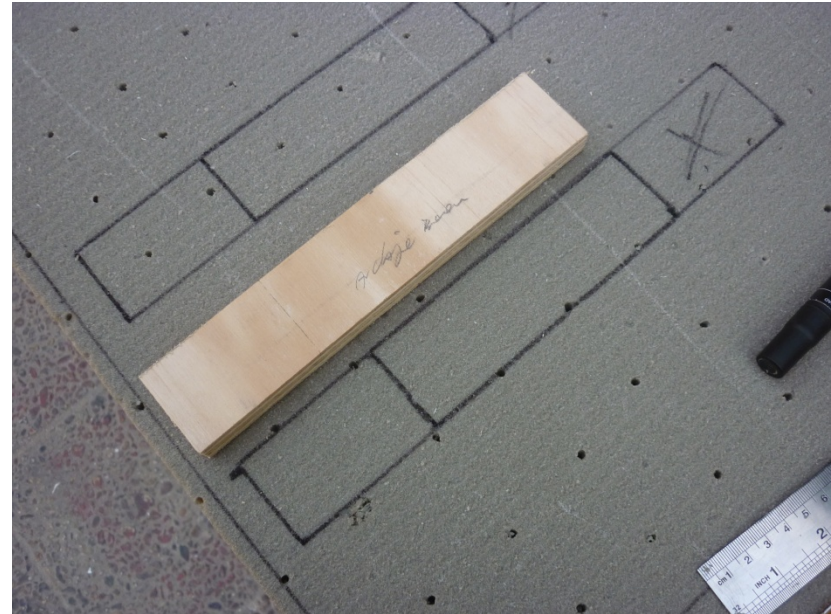


Ilustración 110 Insertos de terciado.

Los insertos son fresados manualmente en un layout definido para cortarse, una vez conformado el panel, con router manual.

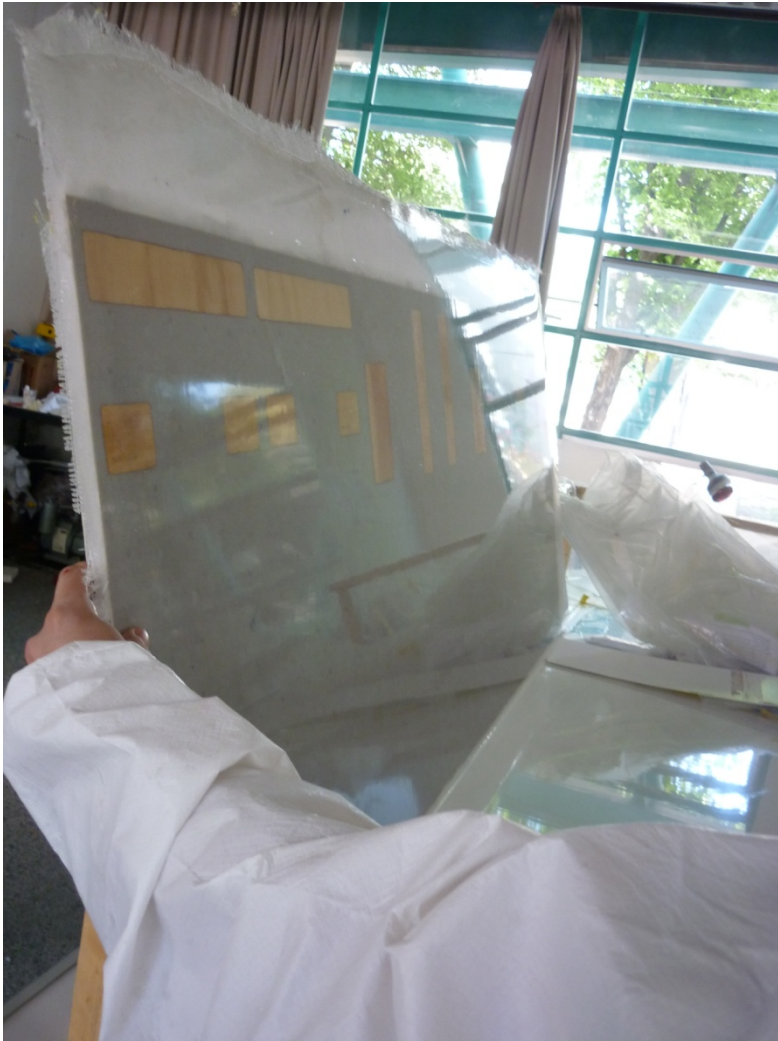


Ilustración 111 Panel estructural desmoldado.

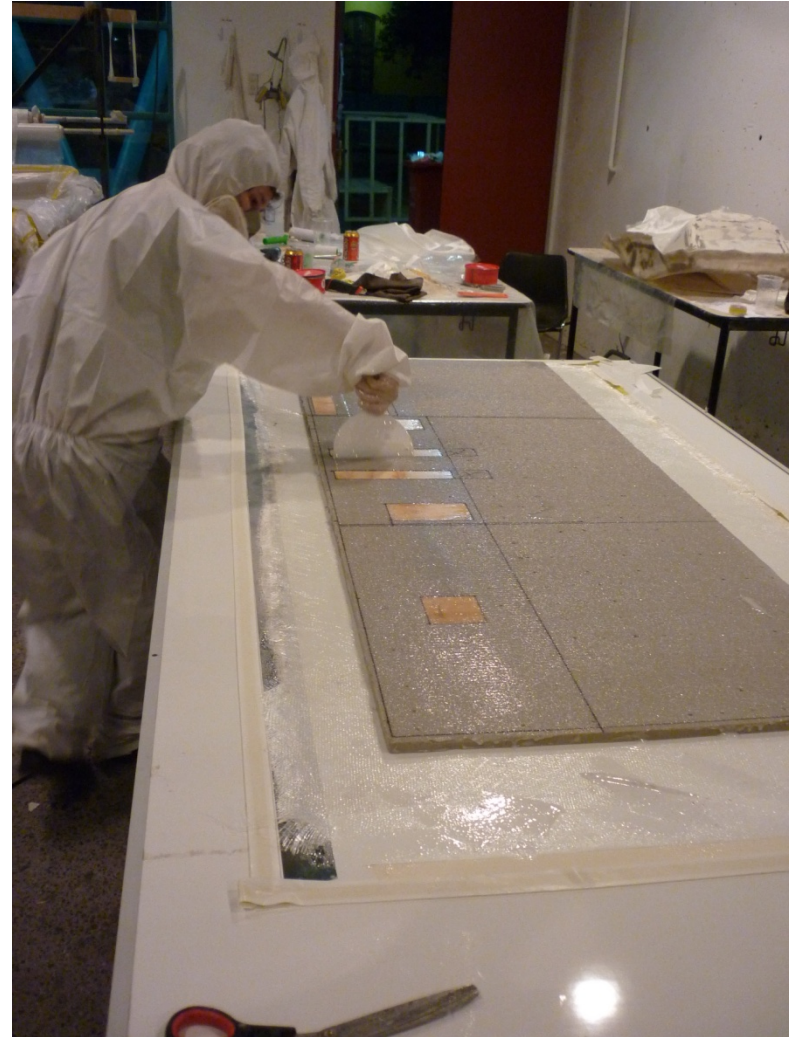


Ilustración 112 Laminado de panel estructural.

Finalmente se corta y arma la caja de suspensión o subchasis, luego esta se lamina aplicando las técnicas de laminado descritas en el proceso de construcción del chasis de Eolian 2.



Ilustración 113 Laminado interior de caja de suspensión.



Ilustración 114 Laminado exterior caja de suspensión.

Para la unión de esta sección del chasis a la estructura de colihue, se aplica un pegado estructural con un adhesivo de alta resistencia y se refuerza finalmente la unión con un laminado superficial de fibra de carbono.

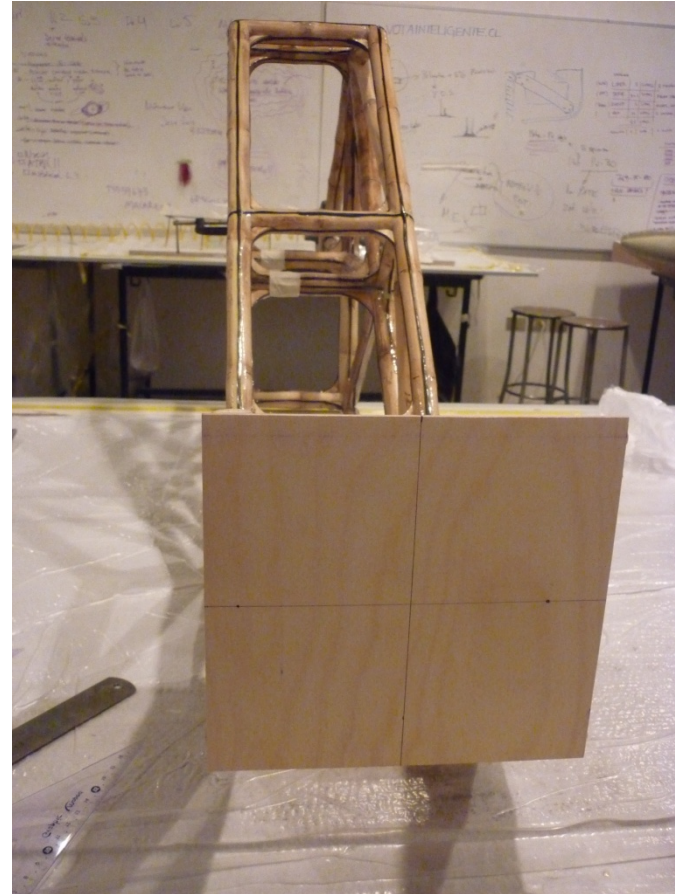


Ilustración 115 Superficie de adhesión a caja de suspensión.

El último paso de trabajo en el chasis de coligue reforzado, corresponde al posicionamiento de las punteras traseras, las cuales requieren de un corte preciso y limpio, el cual debe mantener un espaciado entre punteras de 142 mm, medida estándar de eje de bicicleta de Montaña.



Ilustración 116 Corte de sección de chasis para unión de punteras.



Ilustración 117 Puntera y sección de contacto unidas con adhesivo estructural de alto rendimiento.



Ilustración 118 Pegado estructural de piezas de punteras al chasis.

6.3.1. Uniones estructurales y laminados de refuerzo.

El ultimo paso en la fabricacion del chasis del vehiculo protean corresponde a la union estructural de las secciones de caja de suspension, punteras traseras y estructura de coligue, conformando finalmente un chasis hibrido spaceframe y de paneleria de compuesto. Esta union de conceptos estructurales, derivados de la experiencia en Eolian 2 forman finalmente la estructura del velomovil solar PROTEAN.



Ilustración 119 punteras laminadas en fibra de carbono.



Ilustración 120 unión caja de suspensión.



Ilustración 121 unión caja de suspensión 2.

6.4. Validación y pruebas del prototipo experimental en la Carrera Solar Atacama 2012.

- Pruebas técnicas.

El prototipo, pasa sin problemas las pruebas de frenado, maniobrabilidad e inspección estructural, destacando el concepto innovador y sustentable del vehículo.

Sin embargo presenta problemas en la dirección y el radio de giro no alcanza el mínimo indicado, sin embargo las pruebas de maniobrabilidad validan finalmente la prueba y se clasifica a la Carrera Solar Atacama. En la categoría Ruta Solar.



Ilustración 122 Velomóvil solar Protean en Humberstone.



Ilustración 123 Largada en Calama.

El rendimiento eléctrico y mecánico del vehículo presenta variados problemas, los cuales deben ser solucionados con límites de tiempo muy reducidos. Ejemplo de ello fue la rodadura de los insertos de una de las barras de la dirección de fibra de carbono, la cual fue sustituida por delgadas varas de coligue, al cual se le aplicó una tuerca como inserto para la sujeción de las rotulas que anclan el kingpin a las barras de dirección.

6.5. Observaciones técnicas del chasis.

En cuanto al rendimiento general del chasis se puede inferir que la estructura resiste sin problemas los esfuerzos mecánicos del tren motriz, sin embargo, no estuvo exento de problemas, las punteras traseras sufrieron un desprendimiento y delaminación que impedían el correcto soporte del motor, ante lo cual las fracturas y la pieza delaminada tuvo que ser reforzada con uniones mecánicas. Cabe destacar que al ser el chasis de coligie principalmente, las modificaciones y reparaciones requerían de escasa tecnología lo cual constituye un beneficio para la solución de problemas en corto tiempo.



Ilustración 124 velomovil solar Protean cargando en punto de control.

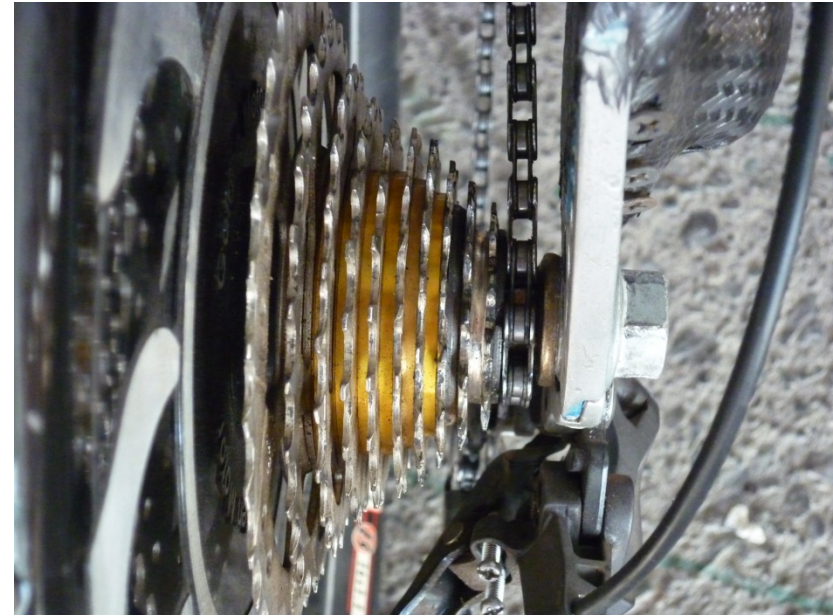


Ilustración 125 sobre medida en apertura de la culata trasera por espaciador de piñón incorrecto.

El Chasis, no permite variaciones sobre la cota milimétrica en el la culata (soporte de rueda trasera), por efecto de una emergencia en el espaciado correcto del piñón implementado, se fracturo el chasis en uno de los amarres estructurales interiores.



Ilustración 126 Detalle de fractura en culata trasera.

Los Amarres estructurales de carbón mantienen la estructura funcional temporalmente, incluso con la presencia de fracturas y delaminaciones de los espaciadores interiores.



Ilustración 127 Detalle de integridad del amarre de fibra de carbón.

Capítulo 4

7. Planimetría.

Capítulo 5

8. Bibliografía:

- Fuad-Luke, Alastair, "Design Activism: Beautiful Strangeness for a Sustainable World" (2009)
- Douglas R, Carroll, "The Winning Solar Car A Design Guide for Solar Race Car Teams" (2003)
- POVEDA, M.S. "Representación normalizada de piezas de material compuesto." (2007).
- Verganti, Roberto , "Design-Driven Innovation: Changing the Rules of Competition by Radically Innovating What Things Mean" (2009)

9. Publicaciones:

- Van De Walle, Frederik , "The Velomobile as a Vehicle for more Sustainable Transportation". Kungliga Tekniska högskolan, Estocolmo Suecia.
- Anaiz, Ignacio, IBM, "Diseño Y construcción del vehículo solar Eolian 2", Universidad de Chile, Santiago Chile. (2011).
- Vittouris, Alexander; Richardson, Mark, "Designing Vehicles for Natural Production: Growing a

Velomobile from Bamboo" Industrial design, Monash University, Adelaide Australia. (2011).

- Malghan, Suhas , "Design and Development of the Turanga Velomobile" Baltimore, Maryland USA.
- Fazser, david; Dreixler, Charles; Maxry, Steven, "Velomobile power assist", Oregon Institute of Technology, Oregon, USA. (2010).
- Purdue Solar Racing Team, "Purdue Solar Racing Team, Solar Basis", 465 Northwestern Ave, Box 40, West Lafayette, IN

10. Entrevistas a expertos:

- Michell Elcayam, ingeniero Químico, especialista en materiales compuestos avanzados, MEP System.
- Enrique Muñoz, Ingeniero Mecánico, especialista en fabricación aeronáutica. ENAER.
- Luis Cavalin, Mecánico de bicicletas, taller especializado DR Bike.
- Edgardo Opazo, Kinesiólogo especialista fisioterapeuta y triatlleta. Facultad de Medicina Universidad de Chile.