

Software libre y prototipado con tecnología CNC en la didáctica de laboratorio de diseño industrial:

posibilidades para el desarrollo colaborativo de productos complejos a bajo costo

Free software and prototyping with CNC technology in the teaching of industrial design lab: possibilities for the collaborative development of low cost complex products

Artículo recibido 20/04/2014 aprobado 27/08/2014
ICONOFACTO VOL. 10 N° 15 / PÁGINAS 35 - 57

Autor: Sergio Donoso PhD.

Doctor en Diseño industrial y Comunicación Multimedial, Politécnico de Milán. magíster en Educación y Multimedia, Universidad de Barcelona. Licenciado en diseño, Universidad de Valparaíso. Diseñador de productos, Universidad de Valparaíso. sergiodonoso@uchilefau.cl

Autor: Pablo Domínguez Mg.

Ingeniero en mecánica de la Universidad Tecnológica Metropolitana de Santiago de Chile y magíster en Tecnologías del Diseño de la Universidad Andrés Bello. Docente del Departamento de Ingeniería de la Universidad Tecnológica Metropolitana; de la Escuela de Diseño de la Universidad de Talca y del Departamento de Diseño de la Universidad de Chile.

Experto en procesos de diseño y producción de partes y piezas, principalmente en materiales compuestos, generación de planimetrías, simulación paramétrica y prototipado rápido. Formó parte del equipo de diseño, desarrollo y fabricación de las aeronaves Manque y UNABe. Dirigió la restauración, planimetría fabricación de partes y piezas, de los

aviones Voisin 1910 y Fairchild FC-2, en el Museo Nacional Aeronáutico y del Espacio de Chile. ing.pablodominguez@gmail.com E-mail: ing.pablodominguez@gmail.com

Autor: Mauricio Tapia Mg.

Diseñador industrial de producto, licenciado en diseño, magíster en Tecnologías del Diseño. Grupo de investigación: Departamento de Diseño, Universidad de Chile. Trayectoria académica: diseño y desarrollo planeador ultra ligero en materiales compuestos "UNABE", electro movilidad vehículos electro solares Protean 1 y Protean 3, Vehículo eléctrico Híbrido Protean 2. Planeador ultra ligero Flugtag. Diseño e innovación en saberes tradicionales "mimbre".

mauricio.tapia@uchilefau.cl

Autor: Rodrigo Díaz Mg.

Diseñador, ergónomo. Consultor en ergonomía, desarrollo de proyectos de I+D con patente (Coautor de System of graduates devices por articulating plasterless upper casts, investigador principal: medición de capacidades funcionales en extremidad superior en tercera edad, diseño e innovación en saberes tradicionales, mimbre, desarrollo de dispositivo para reducir riesgos de trastornos músculo esqueléticos Bio-feedback 2.0, co-investigador vehículo híbrido solar.

rdiazgronow@gmail.com

36

Resumen

En diseño industrial, las tecnologías aeronáuticas no se abordan habitualmente, ni se incorporan como ejercicios de docencia en laboratorios. Las variables económicas y tecnológicas dificultan la intervención académica del diseño industrial, en la aeronáutica al carecer de recursos e instalaciones especializadas. Sin embargo, la aparición de programas computacionales paramétricos, orientados a usuarios con poca experiencia en cálculo, el acceso a tecnologías de prototipado rápido y la disponibilidad de materiales de alta tecnología a bajo costo, han permitido el diseño y construcción de un planeador ultraliviano primario, como una experiencia académica experimental de la Escuela de Diseño de la Universidad de Chile.

La competencia de planeadores aficionados llamada *Flugtag*, auspiciada por una reconocida marca de bebidas energéticas, se presentó como la oportunidad propicia para el desarrollo de un vehículo volador y además en un desafío para abrir una potencial área de desarrollo en la escuela de diseño. Este trabajo debe entenderse como un primer acercamiento al diseño de aeronaves primarias, asistido con *software*, que se apoya en la experiencia preliminar que el grupo académico

ha desarrollado en el diseño y construcción de vehículos terrestres. El proceso generó muchas más preguntas que certezas, las que a su vez, permitirán abordar un segundo proyecto con más experticia y un mejor registro de todas las etapas de construcción y pruebas.

Palabras clave Aerodinámica, materiales compuestos, diseño asistido, CAE, CAM, CFD, CNC *router*.

Abstract In industrial design, aeronautical technologies are not usually addressed, nor are they incorporated as teaching exercises in laboratories. The economic and technological variables make it difficult to carry out the academic intervention of industrial design, in the aeronautical design due to the lack of resources and specialized facilities. However, the emergence of parametric computer programs, aimed at users with little experience in calculation, the access to rapid prototyping technologies and the availability of low-cost high-tech materials, have enabled the design and construction of a primary ultra light glider, as an experimental academic experience of the School of Design of the University of Chile.

The competition of amateur gliders called Flugtag, sponsored by a recognized brand of energetic drinks, arose as the perfect opportunity for the development of a flying vehicle and also as a challenge to open a potential development area at the school of design. This work should be understood as a first approach to the design of primary aircraft, assisted with software, which is based on the preliminary experience that the academic group has developed in the design and construction of land vehicles. The process generated many more questions rather than certainties, which in turn, will allow to address a second project with more expertise and better track of all stages of construction and testing.

Keywords Aerodynamics, composite materials, assisted design, CAE, CAM, CFD and CNC *router*.

Introducción

El vuelo ha sido un ámbito poco explorado por las escuelas de diseño en el mundo, ya sea por las dificultades técnicas y disponibilidad de recursos, o bien por la carencia de instalaciones idóneas. Al menos en Chile, cuando se ha incursionado en el desarrollo de vehículos aéreos, lo ha sido con la colaboración de especialistas de la ingeniería y se ha debido recurrir a instalaciones muy especializadas de difícil acceso, alto costo y baja disponibilidad.

Sin embargo, recientemente han aparecido programas computacionales y aplicaciones para dispositivos móviles, tanto en modelación CAD¹, como en simulación CAE² y CNC Router³ y CFD⁴, los que facilitan el cálculo de las variables aerodinámicas con un alto grado de certeza y una construcción con poca tolerancia. Los resultados, tanto aerodinámicos como estructurales, permiten proyectar y construir planeadores y aviones ultralivianos primarios, de prestaciones limitadas.

En la estructura curricular de diseño industrial de la Universidad de Chile, se establece una clara orientación tecnológica: se incorporan las materias de matemáticas, física, estructuras I y II, materiales y procesos industriales, con lo que se facilita la interpretación de los datos. Más aún, este proyecto fue abordado por estudiantes del último curso, que ya tienen amplia experiencia en tecnologías CAD y CAE. Por otra parte, desde hace varios años, la escuela de diseño colabora con la escuela de ingeniería, desarrollando automóviles solares, que han participado en diversas competencias internacionales, con buenos resultados. Estos programas de diseño aerodinámico están disponibles desde hace unos 20 años, su gratuidad, facilidad de uso y capacidad para ser instalados en dispositivos móviles han producido gran efervescencia en el medio de los constructores de aeronaves aficionados.

Por otra parte, existe disponibilidad y acceso más o menos expedito a materiales de altas prestaciones (Mott, R., 2009), a tecnologías constructivas que garantizan una resistencia ajustada a los parámetros de diseño y también a la fabricación digital que facilita la construcción de un vehículo volador. El acceso a materiales de alta tecnología, se debe a su constante baja de precio en los últimos años; hace sólo una década, habría sido casi imposible acceder a ellos, estando reservados solamente a las grandes universidades.

La metodología utilizada en este ejercicio fue el “taller”, donde los estudiantes trabajaron junto a los profesores, divididos en grupos temáticos, cada uno de ellos dedicados a resolver y construir, de manera concurrente, una parte del proyecto. La innovación didáctica radicó en la implementación de grupos temáticos, que realizaron construcciones modulares y cuyo cálculo aerodinámico y estructural fueron efectuados con aplicaciones computacionales gratuitas y producidas, finalmente, con materiales de bajo costo.

Estado del arte

Desde fines de la década de 1990, es posible acceder desde la academia al concepto de “fabricación digital” y desde inicios de la década de 2000, su uso ha pasado gradualmente desde la investigación a la didáctica, debido la sostenida

1 CAD *Computer Asist Drawing*: dibujo asistido por computador
2 CAE *Computer Asist Engineering*. Ingeniería asistida por computador
3 CNC Router: Corte con máquina de control numérico
4 CFD, *Computational Fluid Dynamic*: estudio computacional de fluidos aerodinámicos

disminución tanto de los precios de adquisición de equipos como a sus costos de operación. Esto ha permitido una masificación tal, que es posible incorporar este tipo de fabricación, a los ejercicios habituales de aula.

Por otra parte, han aparecido una serie de programas computacionales gratuitos, que permiten el cálculo y simulación de vehículos aéreos subsónicos; la simulación implica, por ejemplo, el diseño aerodinámico, sin el uso de túneles de viento (Cook, 1997). Estos programas, con todas sus limitaciones, permiten el diseño básico de planeadores, aviones ultralivianos y modelos radio controlados.

Uno de los primeros programas de cálculo y dimensionamiento aerodinámico, disponible de manera abierta, es el DACPEI (DACPEI, 2015). La aparición de este tipo de programas, libres de pago tanto para plataformas MAC como PC, es la que ha permitido la proliferación de experiencias de este tipo. DACPEI ha sido el primer *software*, pero que sin embargo, estuvo plagado de errores de programación. Se ha ido depurando, como consecuencia del trabajo de revisión de una comunidad que se ha organizado en función de la tecnología del vuelo; se podría afirmar que este programa es el resultado del trabajo de la co-creación por parte de una comunidad tecnológica.

En general, se trata de programas de análisis de fluidos o CFD[®] (Autodesk, 2015), y bajo costo, como Force Effect Flow[®] (Wertel, 2015), que permite el diseño estructural con gran facilidad y sencillez, estando también disponible para dispositivos móviles. El programa, también gratuito como el XFOIL (MIT, 2014) y su sucesor el XFLR5[®], (XFLR5, 2015), permite un cálculo eficiente de las superficies alares. En general, los nombres de los productos son crípticos y no significan nada, al menos de dominio público. La totalidad de los programas permiten el control de parámetros que inciden en la velocidad de *stall*⁵, la capacidad de sustentación, la distribución de la presión en el ala, coeficiente de arrastre y eventualmente el diseño del fuselaje⁶. Esto último no es abordado con igual profundidad por todos los programas, habiendo una cierta dejación hacia el diseño del fuselaje, debido a que la habitabilidad no es una variable fundamental en el diseño, a lo más considera al peso del piloto y a los factores ergonómicos mínimos de pilotaje.

Todos los programas acercan al usuario a la nomenclatura y perfiles NACA⁷, lo que facilita también el acceso a abundantes fuentes de información, sobre todo a aquellas disponibles en Internet.

5 *Stall* o velocidad de pérdida es la mínima velocidad de viento, en sentido contrario al avance, que permite el vuelo o sustentación de la aeronave; a velocidades inferiores el planeador deja de volar y cae.

6 El fuselaje es el cuerpo del planeador.

7 *National Advisory Committee for Aeronautics*, agencia norteamericana que buscaba promover la investigación aeronáutica; luego de 43 años de operación, dio origen a la NASA. Esta organización desarrolló la mayor parte de los perfiles alares actualmente en uso.

Todos son capaces de realizar simulaciones tanto de estabilidad, sustentación y velocidad, como del centro de gravedad y el planeo. Esto último, es un aspecto no menor, ya que siendo la disponibilidad de recursos un factor decisivo en este proyecto, la capacidad de simular, permite una aproximación atendible a la problemática, mediante una propuesta de solución, correcta en su modelación y estructura, pero que sin embargo resulta poco clara en sus aspectos constructivos. Ninguno de los programas aborda el problema de la construcción de la aeronave, debido a que se centran solo en el cálculo de las superficies aerodinámicas, siendo la ingeniería de detalles materia por resolver por el propio equipo de trabajo.

Metodología

El método de trabajo fue el taller, que es una metodología constructivista de trabajo colaborativo en aula y en el caso de este proyecto, de carácter cualitativo-creativo. Sin embargo, debemos distinguir lo realizado en aula, como método didáctico del proyecto en sí, que siguió un camino más bien cuantitativo. Se pueden distinguir dos grandes fases, la metaproyectual y la proyectual; la primera, cualitativa-creativa, se centró en la génesis del proyecto, en la búsqueda de soluciones creativas, en tanto que la segunda fase, la proyectual, fue cuantitativa y se centró en el cálculo y simulación, para luego realizar las pruebas constructivas y la construcción misma del vehículo.

La fase metaproyectual, (cualitativo-creativa), se basó en método de taller y en la búsqueda bibliográfica, a fin de desarrollar un breve estado del arte, centrado en indagar acerca de los materiales disponibles, en el comercio local, a fin de seleccionar los más adecuados, para la fabricación digital; de estos, se seleccionaron aquellos destinados a los perfiles de las costillas alares, cortados, mediante *router* CNC. Se usó poliestireno de alta densidad, reforzado longitudinalmente con fibra de carbono unidireccional y resina epóxica. Esta solución, se debió a que los esfuerzos estaban concentrados mayormente en el eje X e Y, para estabilizar el eje Z, y por tanto el alabeo, se utilizaron tensores de Nylon. Se analizó la posibilidad de usar madera terciada (Maderas Tantauco, 2015) con refuerzos de fibra de vidrio y resina de poliéster; sin embargo, el material compuesto que se lograba era muy pesado y tendía a fallar catastróficamente.

Otro material estudiado fue el coligüe, que es un tipo de bambú chileno, muy resistente y económico, conectado entre sí por amarras de yute y resinas alifáticas, especialmente formuladas para su uso en maderas, para así crear otro material compuesto. La propia naturaleza del bambú implicaba un exceso de variabilidad en el material, que hacía poco previsible y replicables los resultados estructurales. En la tabla siguiente, se puede observar un comparativo de los materiales finalmente seleccionados, por kilogramo:

	Horas hombre	Costos materiales USD	Costo fabricación (maquinaria y material perecible)	Costo total si HH es pagado a USD 4/hora	Peso de ala en kilos
Aluminio/costillas de PS expandido y refuerzo de carbono	52	475	125	808	20
Estructura de Colihue reforzado con carbono y epóxico	160	150	150	940	62
Terciado unido con cola alifática y reforzado con fibra de vidrio y epóxico	140	300	250	1110	50

Tabla 1: costos de los materiales considerados. Fuente: los autores.

Hay que dejar en claro que los costos de las otras alternativas son mayores por los esfuerzos a los que está sometido el ala, ya que para grandes estructuras es necesario reforzar aún más el sistema, lo cual no sucede en sistemas más pequeños o con menores cargas.

Por otra parte, los costos de producción y concepción del aeroplano, fueron los siguientes, considerando que varios procesos fueron realizados en las dependencias de la escuela de diseño:

Prototipado digital	Horas hombre (horas)		a cargo de los alumnos y profesores	a cargo de los alumnos y profesores
Definición de forma y variables general	10			
Modelación de morfologías básicas	3			
Simulación de perfiles alares (10 iteraciones)	1			
Simulación y cálculo de centro de masa	1			
Simulación estructural por barras	1			
Construcción de prototipo	Horas hombre (horas)	Tipo material	Costo material (USD)	Costo uso de maquinaria o insumos perecibles (USD)
Ala				
Corte cnc de copias de perfil	2	Ps expandido de alta densidad	15	En talleres de la escuela: us \$ 0
Testeo de probetas de perfil laminado	6	Distintas fibras y resinas	90	En talleres de la escuela: us \$ 0
Refuerzo de perímetro con fibra de carbono	9	Fibra de carbono y resina epóxica	50	8
Corte y armado de viga principal	3	Aluminio comercial AA6063T5	70	10
Corte y armado de borde de ataque	4	Aluminio comercial AA6063T5	65	6
Corte y armado de borde de fuga	4	Aluminio comercial AA6063t5	65	6
Ensamble costillas, borde de ataque, viga principal y borde de fuga	20	Resinas y fibras de refuerzo (varios tipos)	90	50
"Entelado" ala	10	Cinta transparente autoadhesiva	120	5
Corte y armado chasis (estructura soportante piloto)	15	Aluminio comercial AA6063T5	100	10
Corte y ensamble boom	7	Aluminio comercial AA6063T5	130	10
Fabricación superficies de cola	12	Varios símil ala	75	12

Tabla 2: Costos finales del prototipo

En este punto se debe recordar el perfil tecnológico de la carrera de Diseño Industrial de la Universidad de Chile, ya que toda la experiencia en materiales compuestos proviene de los automóviles solares: *Eolian 1,2 y 3*, *Protean 1y 2* y el futuro *Carún* del tipo híbrido, realizados en la escuela de diseño, en los tres últimos años. Fue justamente esta experiencia, la que indicó los materiales más idóneos por usar y que en su momento fueron ensayados, junto a otros, en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería.

Un ejercicio central de esta fase fue determinar la mejor manera de construir el vehículo, realizando distintas maquetas, para observar principalmente la forma de los vínculos y demás elementos de la estructura, a fin de llegar a una solución lo más liviana y resistente posible.

Como complemento, se realizaron entrevistas explorativas a expertos para recabar información tanto técnica, como práctica de la construcción de aeronaves.

Durante el desarrollo del proyecto, los ensayos mecánicos fueron los mínimos, dado que se confió en los datos aportados por los fabricantes de los materiales y en los programas de simulación y cálculo. Se diseñaron ensayos de tracción, para medir la capacidad adhesiva de la cinta a las distintas costillas, para verificar que no se despegasen del ala, lo que dio resultados positivos, continuándose el uso de dicho implemento. También se realizó un ensayo estático de flexión, colgando pesos en el centro de una viga similar a aquella por utilizar y manteniendo ambos extremos libres, pero cada uno sobre una cuña, para verificar su límite elástico y la consistencia de los datos aportados por las tablas del fabricante de los perfiles de aluminio.

Hipótesis:

1. El acceso a programas gratuitos de simulación, cálculo aerodinámico y diseño estructural permite a la disciplina del diseño proyectar vehículos voladores primarios.
2. El acceso a materiales de alta tecnología, a bajo costo, le permite al diseño construir vehículos voladores primarios.

Ambas hipótesis fueron sometidas a experimentación, con el propósito de demostrar su validez o su inconveniencia.

Proyecto

El diseño del planeador ultraliviano primario nace como excusa para participar en un concurso de vuelo de planeadores, El reglamento de esta competencia, determina una serie de consideraciones técnicas que limitan el marco de acción de los distintos equipos y que permite acotar las variables, a fin de minimizar los riesgos. Entre estas condiciones, citamos de manera textual, aquellas que inciden directamente sobre el diseño del planeador:

“No debe tener más de 6 de largo, 3 m de alto y no más de 8 m de envergadura⁸de ala”.

“No puede pesar más de 180kg incluyendo al piloto”.

“La aeronave debe volar por fuerza humana, no se permiten catapultas, debe ser empujada por atrás”.

“Es altamente recomendable que uses materiales que floten, de igual forma y donde sea posible, utiliza materiales livianos como madera y plástico”.

“Sólo la fuerza humana es permitida, nada de motores, cohetes, baterías o bandas elásticas. Tu aeronave debe ser 100% diseñada y construida por el equipo. No se permite adaptar ultralivianos ni objetos voladores livianos ya inventados por el hombre”.

“Idealmente preferimos que no uses materiales que se transformen ultra pesados tras el contacto con el agua, esto tanto para la aeronave como para los disfraces”.

“Tenemos un límite de trabajo, una vez que las aeronaves lleguen al muelle, cada una debe estar al menos 95% construida; no se permitirán soldaduras, pintura o herramientas eléctricas ya estando en el muelle. Solo se permitirá el mínimo de trabajo sobre las aeronaves”.

Las condiciones para todos los planeadores en la competencia estaban claramente definidas, asunto que facilitó el diseño y el cálculo del aparato. El proceso metodológico (Fig.1) nace con la definición de los objetivos del proyecto, a fin de acotar aún más las variables, simplificando el proceso de diseño y la construcción del planeador.

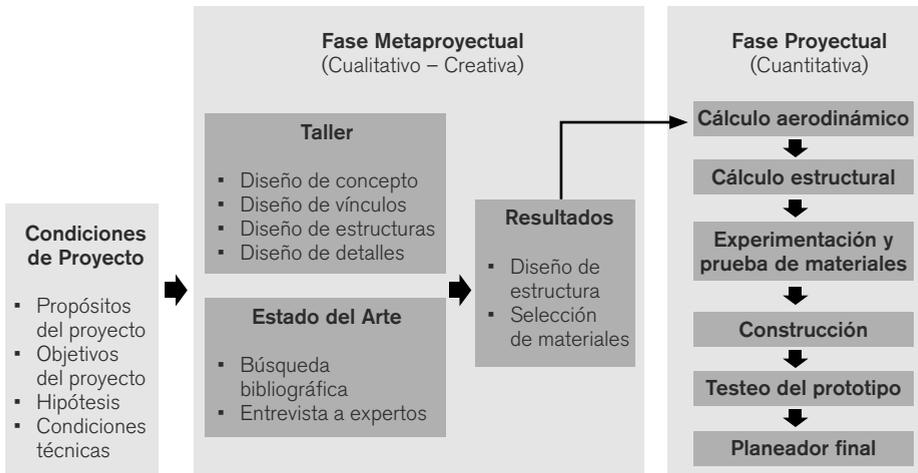


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología del proceso de diseño. Fuente: los autores.

a. Objetivo de la competencia

Volar la mayor distancia posible, a partir de la mayor velocidad de despegue alcanzable por un grupo de personas empujando el aeroplano, desde una altura de 5 m y llevando un pasajero de 80 kg.

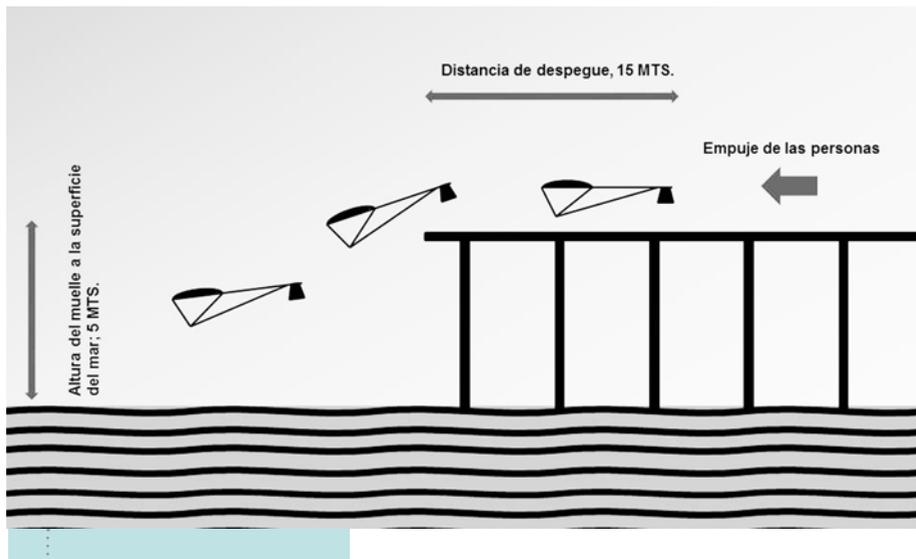


Figura 2: Principales elementos que intervinieron en el vuelo del planeador, en el muelle. Fuente: los autores.

b. Condiciones de diseño

El resultado de este proceso fue la determinación de las condiciones de diseño aerodinámico, que consistieron en:

Baja velocidad de *stall*: 20 Km/h.

Capacidad de levante: 135 Kg.

Condiciones ergonómicas de pilotaje: definido en función del centro de masa y del control de la aeronave.

La velocidad mínima de vuelo, de 20 Km/h, se determinó en función de la velocidad máxima que pueden alcanzar un grupo de cuatro personas del equipo, que empujan el aparato, en una posición encorvada.

Las condiciones de diseño fueron muy básicas y se limitan a lograr el objetivo del proyecto; es decir lograr el vuelo más largo posible, por lo tanto toda consideración ergonómica o antropométrica fue secundaria.

Los estudiantes, realizaron los cálculos preliminares, de manera colaborativa, con la concurrencia de profesores. Cada profesor lideraba un equipo de trabajo, centrado en algún tema técnico en particular, que debieron resolver en la construcción posterior.

c. Diseño de concepto

Se relacionó con la configuración del planeador, donde el margen de acción fue más bien estrecho para el diseño, debido a la prevalencia de las condiciones técnicas que imponía el programa, por sobre aquellas del significado. En este sentido, el proyecto tuvo un mayor énfasis en factores de ingeniería, razón por la cual las condiciones estéticas fueron condicionadas por el *software*, y el acabado superficial fue aquel que permitieron los propios materiales, a fin de mantener el peso del planeador en un mínimo. A pesar de ello, los aportes del diseño industrial fueron relevantes en el desarrollo de los vínculos (Groover, M. 1997), estructuras portantes, procesos constructivos, selección de materiales y sobretodo, la búsqueda de la ligereza, a través de las distintas pruebas que se hicieron.

El programa de cálculo influyó de manera decisiva en la selección de la forma y composición del planeador, ya que posee una base de datos muy parametrizada. En ella se ofrecen una decena de configuraciones sobre las cuales es difícil innovar, siendo seleccionada aquella que resultaba más factible de construir en las dependencias de la escuela de diseño, solo con los recursos disponibles (Fig.2). De la misma manera en las alas, la conceptualización formal, no tuvo ningún espacio de trabajo, por cuanto los perfiles y superficies alares están tipificados y determinados por el programa, bajo los estándares NACA; las alas, solo pueden ser parametrizadas en función de las condiciones de sustentación que se requieran.(Anon, Bundu, Pamadi, 2010).

46

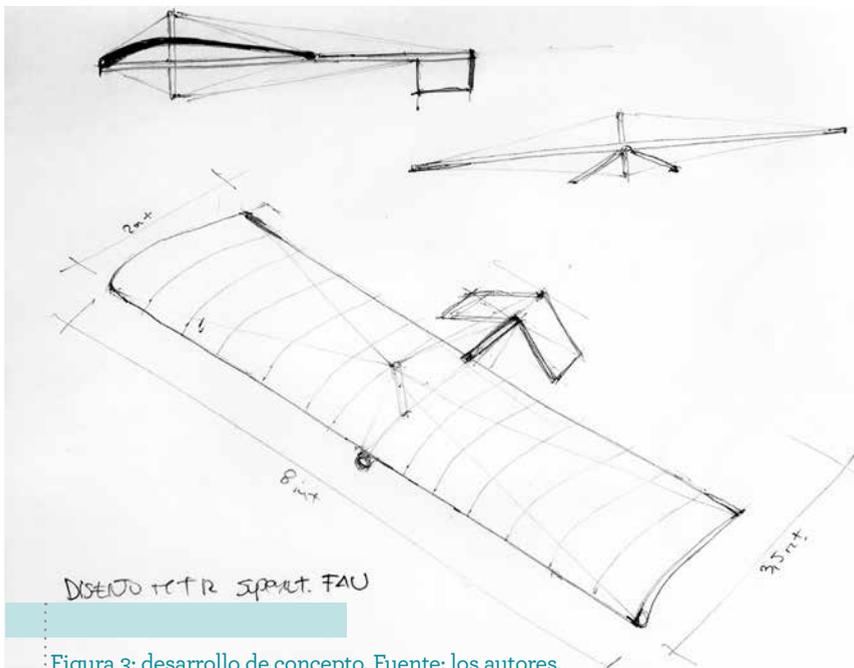


Figura 3: desarrollo de concepto. Fuente: los autores.

d. Cálculo aerodinámico, estructural y ensayo de materiales

El cálculo aerodinámico fue realizado con la total asistencia del *software* de diseño aeronáutico, Force Effect Flow®, los únicos datos aceptados, fueron aquellos parámetros aerodinámicos, que en este caso estaban dados por las limitaciones del concurso y por los objetivos de diseño desempeño del planeador.

A fin de determinar las propiedades aerodinámicas básicas (Mesenger, 2010), se recurrió a la ecuación más elemental de cálculo de sustentación:

$$W = \frac{1}{2} d S V_{\text{stall}}^2 C_{L_{\text{max}}} \text{ Ecuación 1}$$

Donde W es el empuje vertical o sustentación.

d , es la densidad del fluido, en este caso, aire.

S , es la superficie del ala.

V_{stall} es la velocidad mínima de sustentación o velocidad de pérdida.

De la ecuación anterior se desprende que la única variable posible de modificar era el coeficiente de sustentación máximo ($C_{L_{\text{max}}}$) lo cual se realizó modificando la forma transversal del ala o perfil alar.

Las diferentes propuestas fueron revisadas con simulaciones de flujo (CFD), sobre las propuestas del perfil alar, con la asistencia del *software*, FORCE EFFECT FLOW®, las que fueron dibujadas previamente, en programas CAD, con los parámetros determinados en la etapa anterior y teniendo como variable la curvatura de la superficie superior e inferior del ala. En la figura 3 se pueden apreciar unos ejemplos de los perfiles estudiados y las diversas condiciones simuladas de vuelo. Estos datos fueron corroborados con literatura especializada, encontrándose dentro de los parámetros aceptados (Federal Aviation Administration, 2015).



Figura 4: Perfiles alares analizados con FORCE EFFECT FLOW®. Fuente: trabajo de los autores

El perfil que cumplió de mejor forma las restricciones impuestas, tanto por las reglas de la competencia como por aquellas impuestas por el equipo de trabajo, fue el ubicado en la posición superior de la figura 3. El análisis del peso, los materiales y forma constructiva, dio como resultado el perfil mostrado en la figura 4, donde se puede destacar una fuerza de sustentación de 223,6 N por cada metro de envergadura del ala, suficiente para generar el levante de 135 Kg que se requería en los objetivos de proyecto.

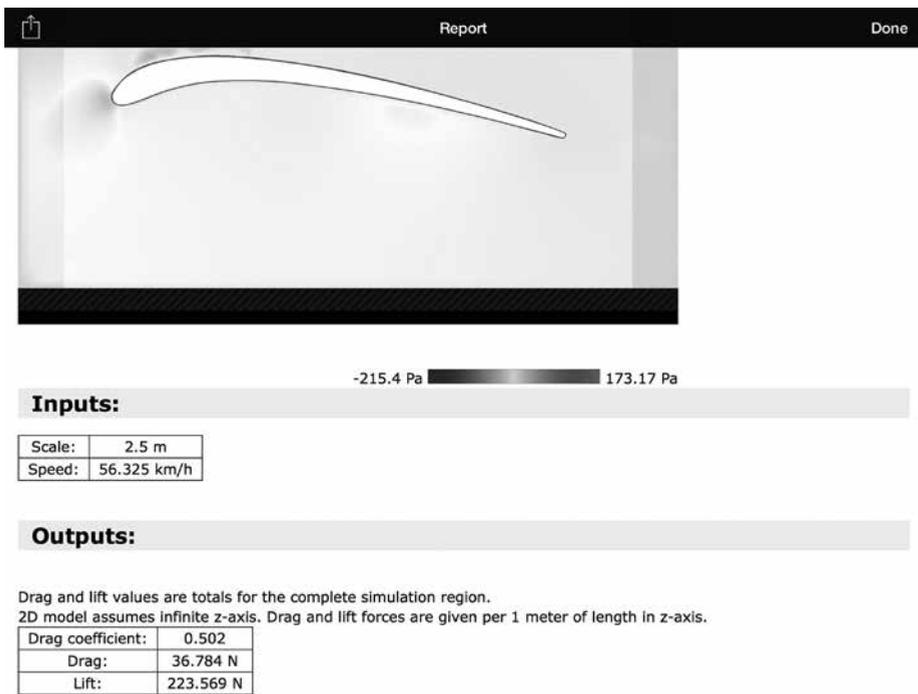


Figura 5: captura de pantalla del programa FORCE EFFECT FLOW®, donde se pueden ver los resultados de la CFD. Fuente: trabajo de los autores

Si bien el *software* entrega soluciones aerodinámicas, estas solo se refieren a la forma del ala y sus dimensiones generales, en una de las configuraciones estandarizadas que trae por defecto el programa, pero nada dice acerca de la estructura mecánica que soporta esta forma.

La estructura del planeador fue modelada en AutoCAD® y sometida a ensayos mecánicos con otro módulo Force Effect®, orientado al análisis estructural 2D, lo que permitió diseñar las partes y piezas de la estructura, considerando los principales esfuerzos de alabeo, cabeceo, roll, el peso de la estructura y del piloto. Las

distintas partes y piezas, al estar dimensionadas paramétricamente, permitieron conocer sus propiedades mecánicas.

Para la construcción del ala, se seleccionó el método tradicional de costillas, unidas por una estructura portante horizontal o largueros. Como siempre en aeronáutica, el peso es un factor crítico y en el caso de un planeador lo es aún más. Los estudiantes se dedicaron a observar el comportamiento de diversos materiales compuestos que ya conocían, a raíz de lo cual se determinó que las costillas deberían ser construidas con poliestireno expandido de alta densidad, en relación a los otros materiales estudiados; la madera contrachapada y el coligüe. Estas fueron cortadas con una máquina *router* CNC, lo que aseguró buenas tolerancias de corte y fidelidad con el perfil alar, entregado por el cálculo del *software* y un sustantivo ahorro de tiempo. Una razón importante en la selección del poliestireno expandido, es su flotabilidad, característica que estuvo dentro de las bases del concurso.

Se observó que el conjunto de costillas podrían presentar una falla mecánica, en el punto de inserción de los largueros, si las solicitaciones mecánicas sobrepasaran los límites de diseño, más allá del margen de seguridad (Reichmann, 1987). Esto se verificó, al ver de manera gráfica la concentración de fuerzas en el punto de inserción del larguero principal y de los dos secundarios. También existía una tendencia a una deformación lateral, dada por la flexibilidad del poliestireno, que afectaba la integridad aerodinámica del ala.

A fin de superar las deficiencias que presentaba el poliestireno expandido de alta densidad, se decidió reforzar el perímetro de cada costilla con fibra de carbono (Kumar, 2002), en forma de filamentos unidireccionales y recubiertos con resina epóxica. La selección de estas fibras por sobre las bidireccionales, se debió a que los esfuerzos se centraban solo en el eje X y no existían fenómenos de torsión apreciables; en los otros ejes (Y y Z), estos esfuerzos serían absorbidos por el material de recubrimiento del ala. Esta solución fue probada en distintas probetas, demostrándose que el grado de rigidez obtenido era el adecuado, con el refuerzo de la laminación de carbono a un ancho de 12 mm, con 1 mm de espesor. Previamente se realizaron pruebas con fibra de vidrio y poliéster, que fueron satisfactorias, pero con un peso bastante mayor a igual rigidez que la fibra de carbono.

Por otra parte, la fibra de vidrio tendía a fallar de manera catastrófica, sobre todo al ser laminada con poliéster. No obstante, la resistencia y flexibilidad mejoraban con resina epóxica, pero en cualquier caso eran superadas por la dupla epoxi-carbono. A pesar de no ser materiales precisamente económicos, la cantidad

Como siempre en aeronáutica, el peso es un factor crítico y en el caso de un planeador lo es aún más.

usada fue mínima y solamente se restringió al perímetro de las costillas alares y al respecto se debe decir que el carbono que se empleó fue solo una fibra de cerca de 1 mm de diámetro, y en consecuencia, la cantidad de resina epóxica utilizada, también fue muy baja. Esta actividad fue realizada en un taller de la escuela de diseño, dedicado a los materiales compuestos, que cuenta con implementos básicos y equipamiento bastante “artesanal”, pero que ofrece las capacidades suficientes para este tipo de actividad⁹.

En un principio y relacionado con otro proyecto de investigación del equipo, se consideró el uso de bambú como el material estructural, sin embargo, a pesar de ser un material con propiedades adecuadas para la construcción del proyecto, no estaba lo suficientemente tipificado, como para garantizar un comportamiento predecible; existía una gran variabilidad dimensional y de resistencia, que dificultaban un cálculo seguro y un comportamiento más o menos predecible de la estructura.

Para los largueros, se seleccionó el aluminio; en la figura 5 se observa, en color gris, los tubos de aluminio, y en color amarillo, se evidencian las cuadernas de poliestireno reforzado. Los materiales se seleccionaron de acuerdo a lo disponible en comercios no especializados, donde las condiciones esenciales eran tener un bajo peso, una adecuada resistencia para ser maquinado en la máquina CNC y un bajo precio de adquisición.

En cuanto al aluminio, existían dos grandes alternativas: el aluminio comercial para la extrusión de tubos y perfiles, y el aluminio aeronáutico AA2014T5 (Ramírez, 2009). Este último presentaba las mejores cualidades mecánicas para construir el planeador, pero su alto costo y dificultad de obtención disuadieron su uso. El aluminio utilizado, de calidad comercial, fue el habitual AA6063T5 (INDALUM, 2003), que es una aleación de aluminio-magnesio-silicio y que para el caso del presente proyecto podría resultar útil.

Los materiales se seleccionaron de acuerdo a lo disponible en comercios no especializados, donde las condiciones esenciales eran tener un bajo peso, una adecuada resistencia para ser maquinado en la máquina CNC y un bajo precio de adquisición.

9 En este taller se realizan, habitualmente, múltiples pruebas de materiales, específicamente de materiales compuestos, en que se combinan materiales y resinas, para lograr las más diversas prestaciones. Este taller se vincula a la asignatura de Seminario de Materiales y Procesos industriales, donde los alumnos deben crear un nuevo material y someterlo a ensayos físico-mecánicos.

Realizados los cálculos estructurales, se determinó que con el simple aumento del diámetro y espesor del tubo, podrían lograrse buenas características mecánicas, acordes con los requerimientos de vuelo y dentro de un peso razonable. La resistencia a la tracción del aluminio AA6063T5, es de unos 1.550 Kg/cm², o de unos 15,5 Kg/mm², en tanto que la resistencia del aluminio de aviación AA2014T5 es de cerca de 40 Kg/mm². Con estas consideraciones se construyó una estructura prevalentemente tensionada, ya que se estimó según los cálculos, que las propiedades del aluminio AA6063T5 eran suficientes para soportar los esfuerzos dinámicos del planeador (Alustock, 2014).

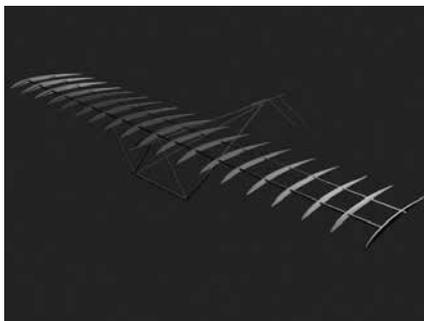


Figura 6: se aprecian los tubos de aluminio y las cuadernas de poliestireno reforzado.
Fuente: los autores.

f. Construcción

Cortados y laminados los perfiles alares (Fig.5 y 6), los grupos de estudiantes iniciaron el ensamblaje de los distintos conjuntos, cada uno de ellos compuesto por varias piezas. Se optó por esta construcción modular, a fin de optimizar el uso del espacio y permitir el trabajo del total de estudiantes y profesores de manera cómoda. Los primeros problemas para los estudiantes, se centraron en la dificultad para construir el planeador a partir de los planos de AutoCAD®, con materiales reales, y sobre todo resolver los vínculos entre las distintas piezas.

Uno de los problemas más interesantes fue lidiar con el peso, el volumen y la fragilidad, de manera simultánea; en efecto, el ala de 8 metros de largo poseía un gran volumen, que hacía muy difícil su manipulación, más aun con un peso cercano a los 25 Kg, que requería el esfuerzo de varios estudiantes para poder trabajar con ella. A pesar de ser un planeador ultraliviano, el peso final fue de cerca de 60 kg. Otro problema al que se enfrentaron los estudiantes fue lo relativamente delicado de las superficies, que junto al peso propio, hacían que el menor roce tuviese consecuencias graves en el revestimiento.



Figura 7: proceso de laminado de las costillas del ala. Fuente: los autores.

La construcción del ala se realizó en mesones de trabajo, donde fueron insertadas las costillas del ala en la viga maestra, cada cuaderna fue fijada en su posición con adhesivo epóxico (Gibson, 2012). Según los cálculos, el alabeo podría sobrepasar el límite de resistencia elástica de la viga maestra, produciendo una falla catastrófica, esta situación se solucionó reforzando la raíz alar y las costillas más cercanas a ella, con más costillas de poliestireno.

Las estructuras fueron construidas con aluminio tubular remachado, técnica constructiva tradicional en aeronáutica y en cualquier estructura metálica sometida a constantes vibraciones.

El revestimiento del ala se realizó con cinta adhesiva transparente (Fig.6), la cual se aplicó en capas longitudinales a lo largo de toda el ala y cuya primera capa estaba ubicada en el borde posterior o de fuga, esto produjo un traslape entre las distintas capas, que favoreció el flujo laminar de aire.

La resistencia a la tracción de la cinta adhesiva resulta ser muy adecuada, sobre todo considerando la capacidad de levante del ala, en relación a su superficie de 12 m^2 . Esto arroja una fuerza de tracción, por el levante, de un promedio de $0,001125 \text{ Kg/cm}^2$, cantidad más que suficiente, tanto para la resistencia a la tracción de la cinta adhesiva de celofán.



Figura 8: proceso de construcción del ala. Fuente: los autores.

Otro tema, que llevó una parte importante del tiempo, de esta fase, fue cómo revestir el ala, de manera eficiente. Este asunto decantó, en que la cinta adhesiva, debía ser aplicada longitudinalmente al ala, en capas desde el borde de fuga, hacia el borde de ataque, permitiendo que el flujo de aire fuese suave y que no despegase las capas delanteras de cinta.

Resultados

Existen dos tipos de resultados:

Didáctica: en esta dimensión, los mayores resultados, se vieron en la capacidad de organizar equipos de trabajo, separados por funciones y procesos, para la integración del producto final. El proceso más relevante fue el diseño asistido y cálculo a través de *software* gratuito. Lo novedoso radica en la capacidad de diseño de una aeronave (Fig.7), totalmente correcta en cuanto a sus parámetros y limitada a unas prestaciones más bien bajas, pero suficientes para llevar adelante este proyecto.

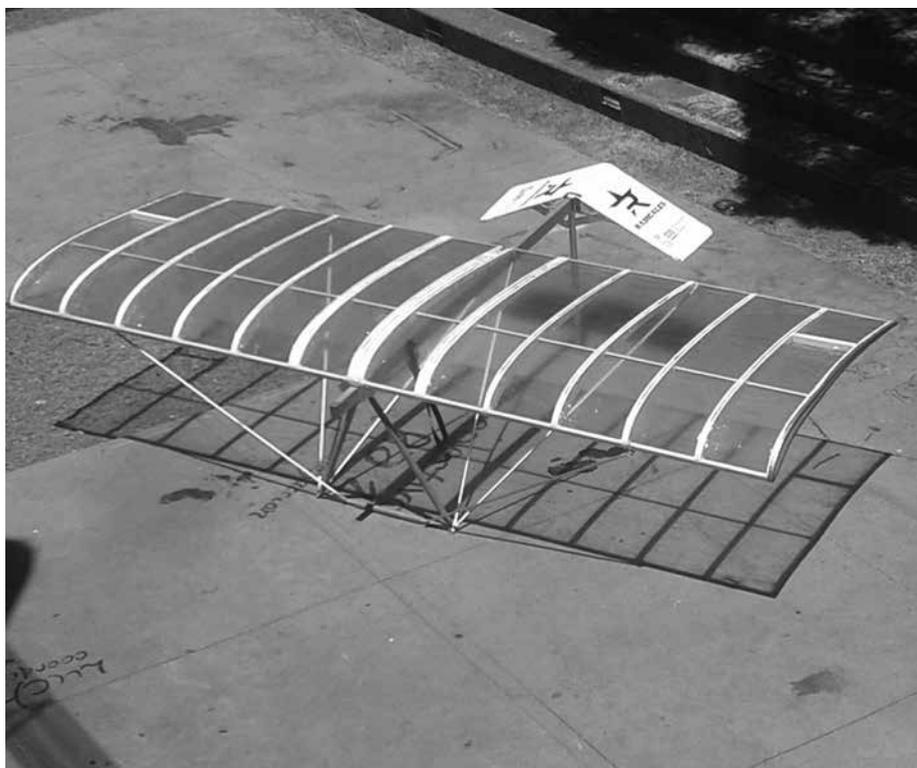


Figura 9: el planeador terminado. Fuente: los autores.

Producto: Finalmente el vehículo voló en las pruebas preliminares, lo que permitió comprobar lo correcto de los cálculos y de los criterios de selección de materiales. En el concurso mismo, el planeador no voló la distancia esperada, debido a algunos factores clave.

- Viento de cola de 14 Km/h: que afectó decisivamente el vuelo, ya que implicaba que las personas que empujaban, deberían haber corrido a una velocidad de 34 km/h, lo que es irrealizable en la práctica. Se debe recordar que el planeador fue calculado para volar con una velocidad relativa del viento de 20 Km/h.
- Baja velocidad de despegue: las personas que empujaron, no fueron las mismas que realizaron las pruebas, y llegaron sólo al momento de lanzar el planeador, debido a una imposición del auspiciador y no supieron cómo empujar el vehículo.
- Poca experiencia de vuelo del piloto.

Otro resultado importante, fue el constar que los materiales seleccionados funcionaron a la perfección y dentro de sus parámetros de seguridad, indicando que con recursos limitados, se puede diseñar y construir un aparato volador de prestaciones limitadas.

También fue importante adentrarse en un área absolutamente cuantitativa, donde el experimento y la comprobación de hipótesis son los elementos que condicionan absolutamente el proyecto; sin embargo, gracias a la preparación académica de los estudiantes y el enfoque de la Universidad de Chile, más bien racionalista, permitieron enfrentar este encargo, sin mayores dificultades y aportando desde la creatividad, soluciones técnicas.

En cuanto a la didáctica, se comprobó que es posible implementar el modelo de taller para el desarrollo de una aeronave, estableciendo una cadena de producción que emule un proceso productivo real, organizando a los estudiantes en grupos de trabajo temático y a la vez concurrente, en el proyecto final. Esta experiencia de laboratorio permite un acercamiento vivencial del alumno al mundo de la producción, al experimentar cómo se materializa un proyecto nacido en un formato digital.

Conclusiones

Dado el acceso a nuevos programas de simulación y cálculo aerodinámico (CFD) y estructural (CAE), se han comprobado ambas hipótesis; es posible para la disciplina del diseño proyectar planeadores o aviones subsónicos primarios, con prestaciones limitadas, y hacerlo con materiales de fácil acceso y bajo costo. El acceso a los programas de cálculo, también de bajo costo o gratuitos, permite que una cantidad mayor de escuelas de diseño puedan desarrollar aeronaves. De esta manera se abre un nuevo campo de intervención de la disciplina.

Por otra parte, existe una variedad cada vez mayor de materiales comerciales de alta tecnología, que pueden ser conseguidos a un precio razonable y que cumplen con los requerimientos de una aeronave básica. Sin embargo, en este aparente protagonismo de tecnología “dura”, surgen espacios fértiles para el diseño industrial y que se relacionan con la creatividad para la concepción de detalles y la resolución de estructuras, además claro, de toda la intervención ergonómica del habitáculo. Si consideramos

Esta experiencia de laboratorio permite un acercamiento vivencial del alumno al mundo de la producción, al experimentar cómo se materializa un proyecto nacido en un formato digital.

a la antropometría¹⁰, se puede proyectar la navegabilidad del aparato volador, más allá de sus propiedades aerodinámicas. Por lo tanto, en este tipo de trabajo multidisciplinario, la intervención del diseño no es puramente estética, sino que es fundamental, desde el punto de vista de la creatividad, para la problematización y resolución de problemas y la visualización general del proyecto.

Existen consideraciones técnicas que dificultan el trabajo con aeronaves y se relacionan con la seguridad y las regulaciones. Ciertamente una de las razones del escaso rendimiento final del aparato, se debió a la inexperiencia del piloto, que de no haber volado en un lugar controlado, podría haber terminado en un accidente. Por lo tanto, el vuelo sigue presentando desafíos para el diseño, pero se requiere de una preparación especializada, para hacerlo en propiedad.

Referencias

- Alustock. (16 de 10 de 2014). Alustock Handbook. Obtenido de http://www.alu-stock.es/catalogo/pdf/guia/Alu-Stock-GA3-10-informacion_tecnica.pdf
- Autodesk. (22 de 02 de 2015). *Simulation*. Obtenido de <http://www.autodesk.es/products/simulation/features/simulation-cfd/all/list-view>
- Autodesk. (22 de 02 de 2015). *Simulation*. Obtenido de <http://www.autodesk.es/products/simulation/features/simulation-cfd/all/list-view>
- Bundu, P. (2010). *Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes* (2 ed.). Reston: AIAA.
- Cook, M. (1997). *Flight Dynamics Principles*. New York: Wiley.
- DACPEI. (22 de 02 de 2015). DACPEI *Conceptual Design of Light Fixed Wing Aircraft*. Obtenido de <http://sourceforge.net/projects/dacpei/>
- DACPEI. *Conceptual Design of Light Fixed Wing Aircraft*. (22 de 02 de 2015). Obtenido de <http://sourceforge.net/projects/dacpei/>
- Federal Aviation Administration. (22 de 02 de 2015). *Glider Handbook*. Obtenido de https://www.faa.gov/regulations_policies/handbook_manuals/aircraft/glider_handbook.
- Fernández, L. Xflr5 v4.17 software de análisis de perfiles, planos y aviones: estudio y diseño de un cn-235 (16 de 10 de 2014). Obt. http://www.e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15280/PFC_Lucas_Fernandez-Pena_Molla.pdf?sequence=1
- Gibson, R. (2012). *Principles of Composite Materials Mechanics*. Boca Ratón: CRC Press.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*, Tomo I, México; Pearson Education.
- INDALUM. (16 de 2014 de 2003). INDALUM. Obtenido de http://www.indalu.cl/uploads/genericos_pagnas_acordion/libro_tecnico_ok.pdf

10 Hablamos de antropometría, ya que el control del vuelo, se realiza basculando el cuerpo.

- Kumar, S. (2002). Fibers from Polypropylene/nano Carbon Fiber Composites. *Polymer*, 43(5), 1701-1703.
- Maderas Tantauco. (22 de 02 de 2015). *Tableros terciados*. Obtenido de <http://www.tantauco.cl/productos.html>
- Mesenguer, J. (2010). *Aerodinámica básica*. Barcelona: Gaceta.
- MIT. (2015 de 02 de 22). *Xfoil Subsonic Airfoil Development System*. Obtenido de <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- Ramírez, J. (2009). El euro código 9. Proyecto de estructuras de aluminio. *Informes de la Construcción*, 51(461), 37.
- Reichmann, H. (1987). *Vuelo sin motor. Técnicas avanzadas*. Madrid: Paraninfo.
- Mott, R. (2009). *Resistencia de materiales*. Pearson Educación, México.
- Wertel, S. (22 de 02 de 2015). *Engineering, Design Software*. Obtenido de <http://engineering.com/DesignSoftware/designSoftwareArticles/ArticleID/6219/Autodesk-Force-Effect-Flow.aspxXFLR5>. (22 de 02 de 2015). *XFLR5, Analysis Tool for Airfoils, Wings and Planes*. Obtenido de <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>
- xflr5. (15 de 02 de 2015). Obtenido de <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>