



El UAV "Céfiro" de la ETSI de Sevilla: Proyecto, Construcción y Primeros Vuelos



Damián Rivas Rivas

Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos



Índice



- Introducción.
- Cálculo de Aviones en la Universidad de Sevilla.
- Diseño de Céfiro:
 - Diseño estructural y procesos de construcción.
 - aerodinámica.
 - Estabilidad y Control.
 - Actuaciones y modelado de de la planta propulsora.
 - Integración de sistemas y pruebas funcionales .
 - Puesta de largo de Céfiro.
- Conclusiones.
- Trabajo Futuro.





Introducción



- Motivaciones:
 - Investigación
 - Algunas de las áreas de investigación del Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Sevilla:
 - Optimización de trayectoria.
 - ATM.
 - Diseño de aeronaves.
 - Modelado de la dinámica de aeronaves y actuaciones propulsoras.
 - Sistemas de control de vuelo automáticos
 - La necesidad de avanzar en muchas de estos campos hace necesario el empleo de plataformas a escala (UAV).
 - Baja disponibilidad de plataformas comerciales adecuadas para dichas tareas crea la necesidad de diseñar y construir plataformas UAV a medida.
 - Educación
 - La filosofía del departamento identificó como una necesidad el hacer énfasis en el diseño de aeronaves para completar la experiencia académica.
 - Unificar el conocimiento adquirido por los estudiantes de Ingeniería Aeroespacial a lo largo de 5.
 - Proveer a los estudiantes de una visión real del trabajo de la industria aeroespacial.
- Las necesidades investigadoras y educacionales del Departamento motivaron la creación del proyecto Céfiro.

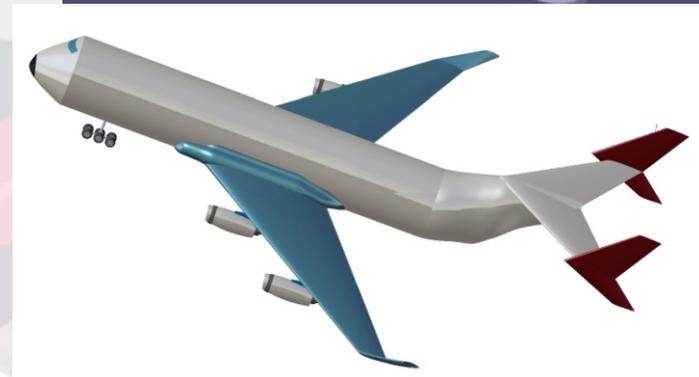
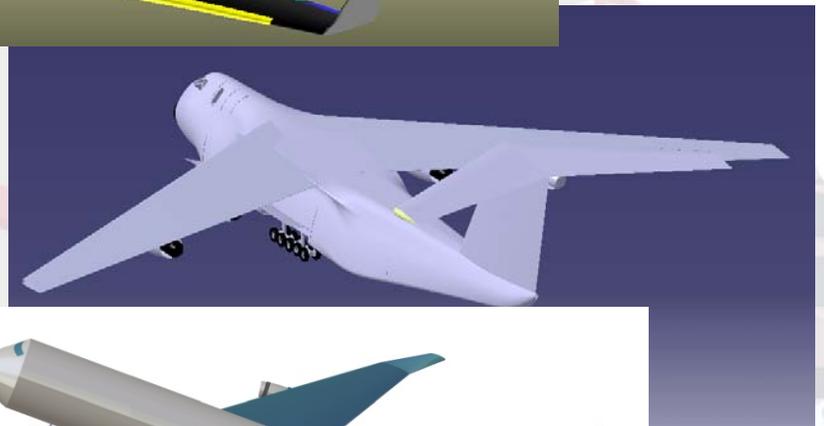
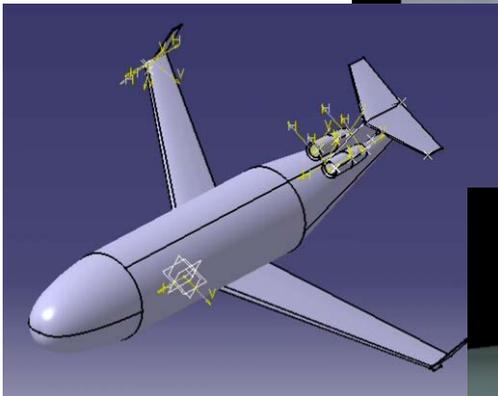
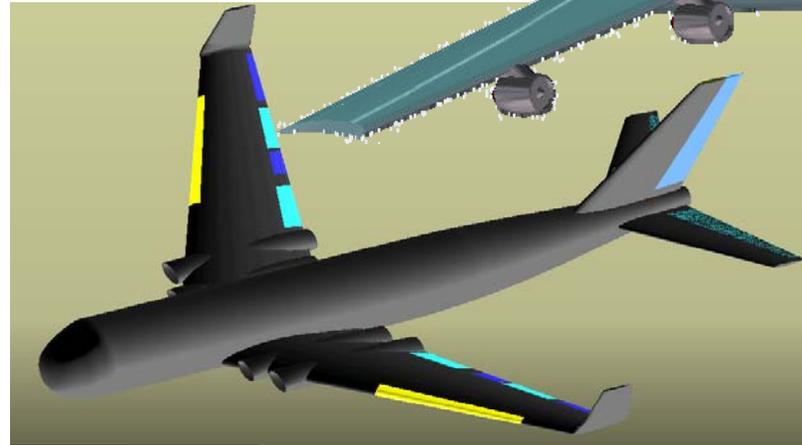
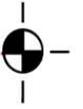


- Cálculo de Aviones es una asignatura enseñada durante el último curso del programa de Ingeniería Aeroespacial en la Universidad de Sevilla
- Los principales objetivos de la asignatura son:
 - Enseñar a los estudiantes todos los aspectos relacionados con el proceso de diseño de aviones.
 - Aprender a emplear las herramientas, métodos y procedimientos que se emplean en la industria aeroespacial durante el proceso de diseño conceptual de aeronaves.
 - Unificar el conocimiento aprendido durante la carrera, y ser capaces de aplicar dichos conocimientos en un problema real.
 - Proveer a los estudiantes de la primera experiencia con la industria.
 - Aprender a administrar un proyecto de grandes dimensiones con fechas y metas fijadas.
 - Experimentar los desafíos a los que se enfrentarán en una industria competitiva.
 - Los estudiantes trabajen en grupos (5.6) y compiten diseñando el avión que cumple mejor los requisitos de diseño establecido es un RFP.
 - Aprender a trabajar en grupos: Ingeniería Concurrente
 - Enseñar a los estudiantes a desmitificar el concepto "cubical engineering."



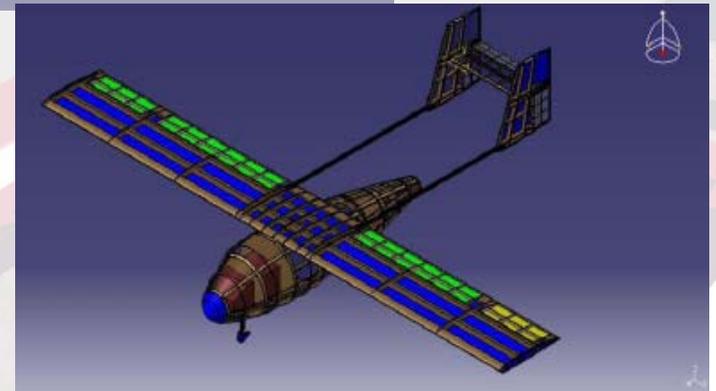
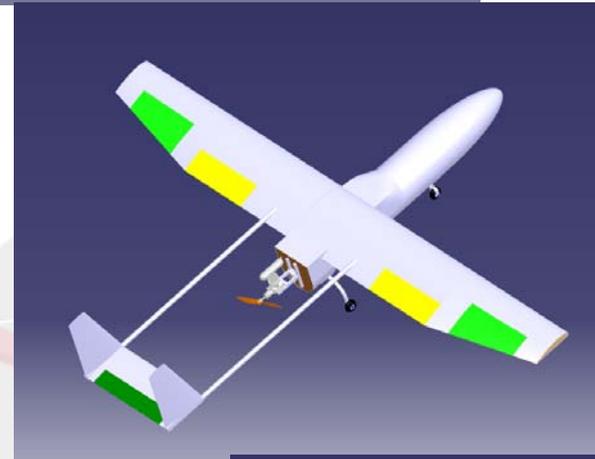
"Cálculo de Aviones" Diseños - 2006-07

CEFIRO



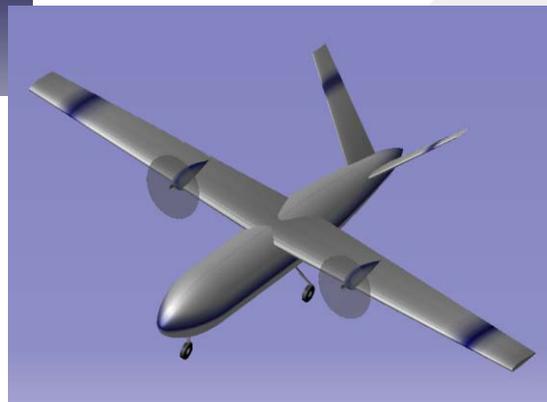
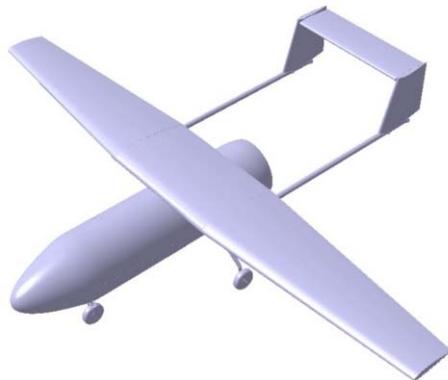
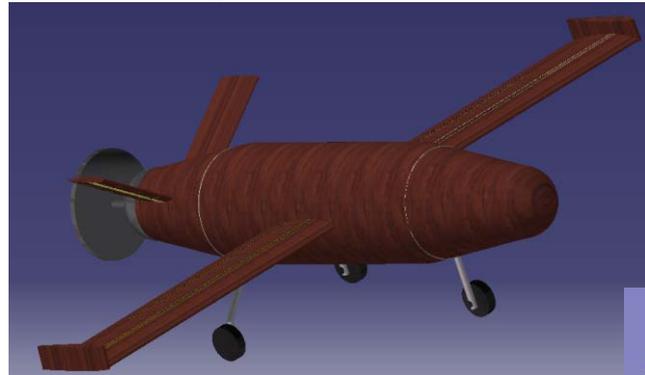
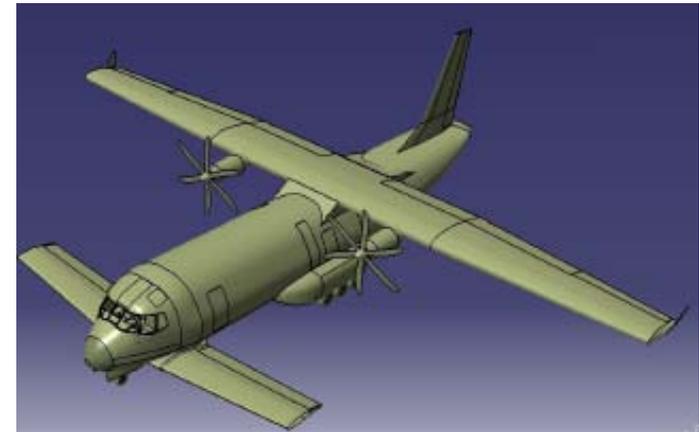
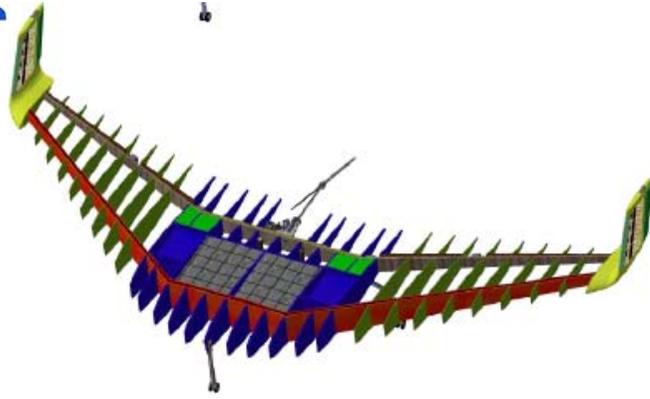


"Cálculo de Aviones" Diseños - 2007-08





"Cálculo de Aviones" Diseños - 2008-09

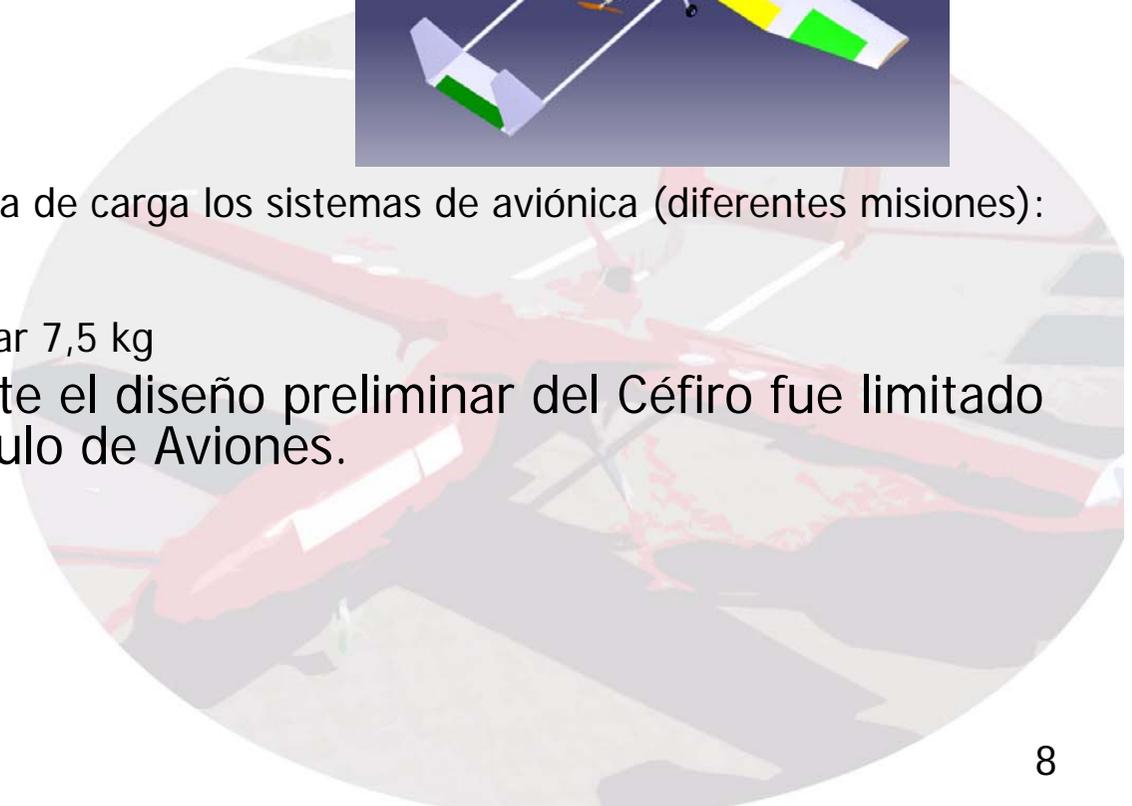
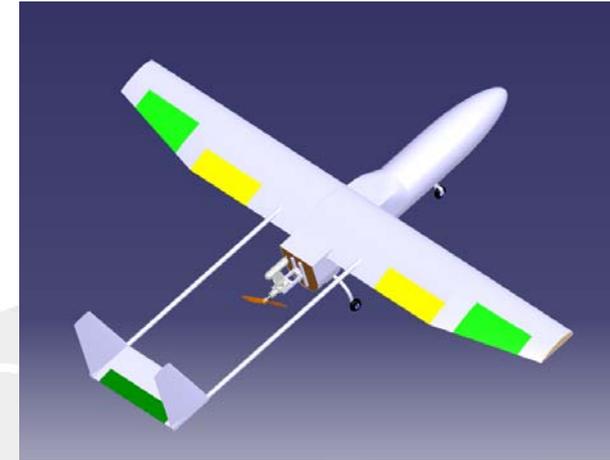




Céfiro: Proyecto del Diseño de un Aeronave - I

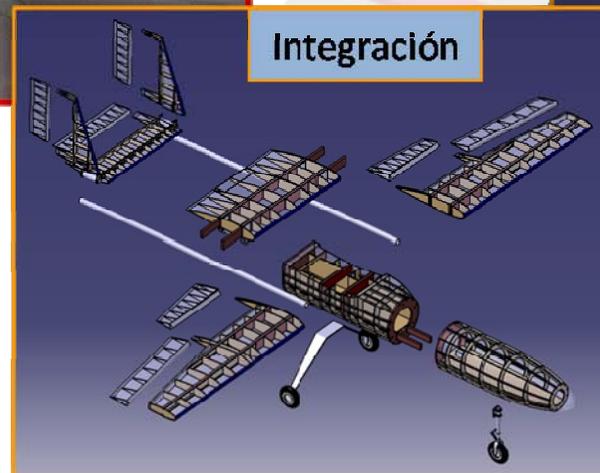
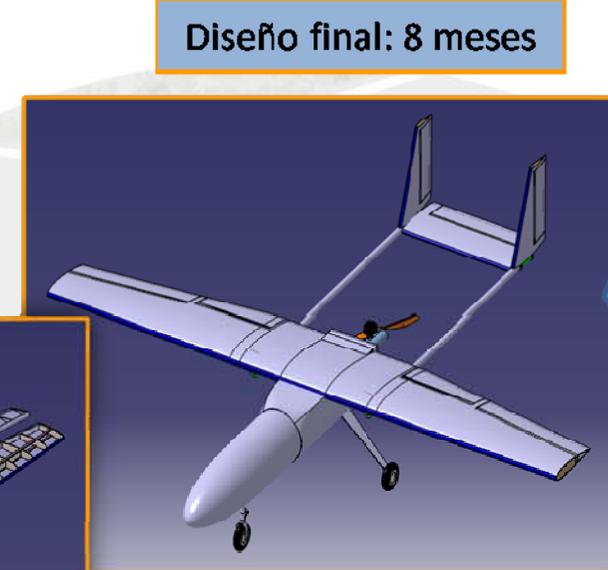
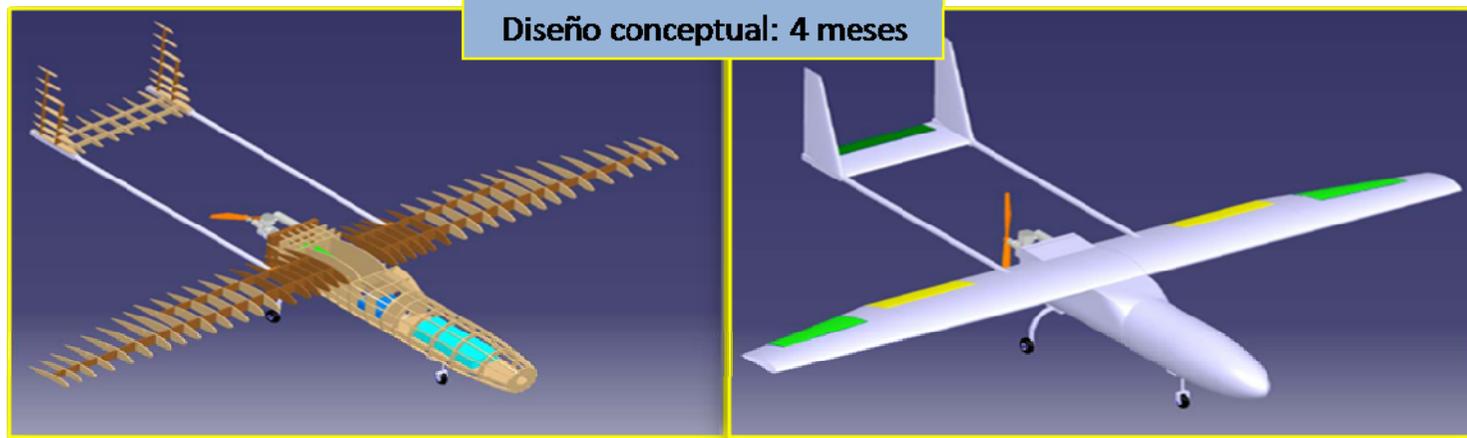


- Las necesidades investigadoras y educacionales del Departamento se ven cubiertas con el proyecto Céfiro.
- *Request For Proposal* (RFP) del proyecto Céfiro:
 - Requisitos de actuaciones:
 - Autonomía: 45 minutos.
 - Velocidad de crucero 90-140 km/h.
 - Altitud de crucero 500 m.
 - UAV de Diseño Modular:
 - Facilidad de transporte.
 - Facilidad de reconfiguración.
 - Misión de vuelo:
 - Perfil de vuelo definido.
 - Capacidad para adecuar en la bahía de carga los sistemas de aviónica (diferentes misiones):
 - Observación
 - Experimentos de identificación
 - Bahía de carga capaz de transportar 7,5 kg
- El nivel de detalle alcanzado durante el diseño preliminar del Céfiro fue limitado al alcance de la asignatura de Cálculo de Aviones.





Línea de Tiempo del Proyecto Céfiro



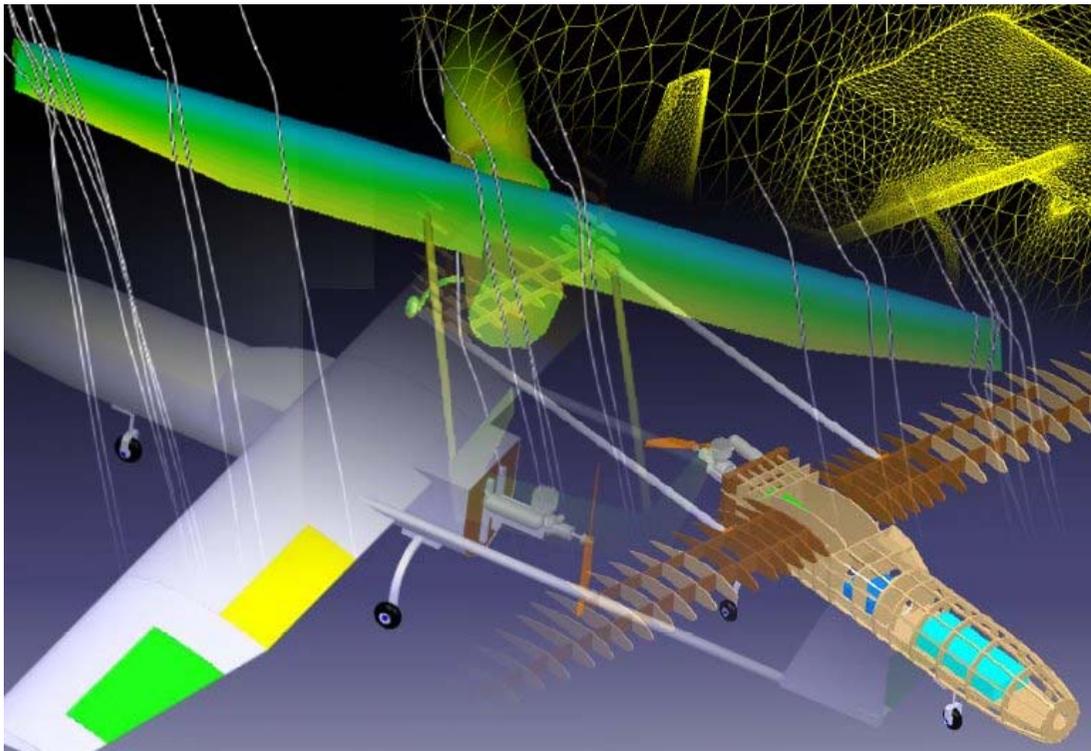
Duración total del proyecto Céfiro: 18 meses



Céfiro: Proyecto del Diseño de un Aeronave - II



- Necesidad de extender cada una de las áreas de diseño elaboradas durante la asignatura de Cálculo de Aviones para pasar de un diseño conceptual a un prototipo.
 - “Cálculo de Aviones” generó un buen diseño conceptual, pero no era suficientemente bueno como para convertirse en un avión que volara.
 - Cada una de las 5 áreas principales del diseño preliminar fueron asignadas a estudiantes para poder optimizar el diseño (proyectos fin de carrera)



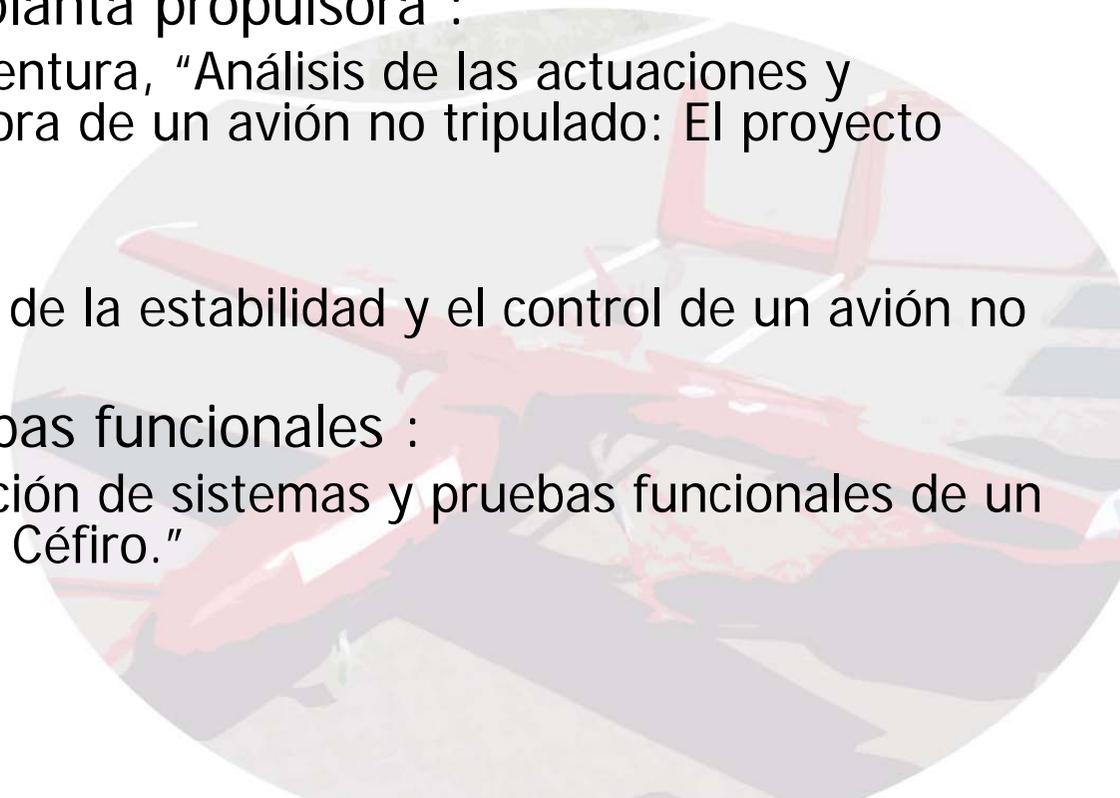
- Aerodinámica.
- Actuaciones y modelado de la planta propulsora.
- Estabilidad y control.
- Diseño estructural y procesos de construcción.
- Integración de sistemas y pruebas funcionales.



Proyectos Fin de Carrera



- Aerodinámica :
 - Martín Cañal, Adrián, "Diseño aerodinámico de un UAV de baja velocidad: El proyecto Céfiro."
- Diseño estructural y procesos de construcción :
 - Pérez Alcaraz, Daniel, "Diseño estructural y construcción de un avión no tripulado: El proyecto Céfiro."
- Actuaciones y modelado de la planta propulsora :
 - Samblás Carrasco, Francisco Ventura, "Análisis de las actuaciones y modelado de la planta propulsora de un avión no tripulado: El proyecto Céfiro."
- Estabilidad y control:
 - "López Teruel, Pedro, "Análisis de la estabilidad y el control de un avión no tripulado: El proyecto Céfiro."
- Integración de sistemas y pruebas funcionales :
 - Bernal Ortega, Carlos "Integración de sistemas y pruebas funcionales de un avión no tripulado: El proyecto Céfiro."



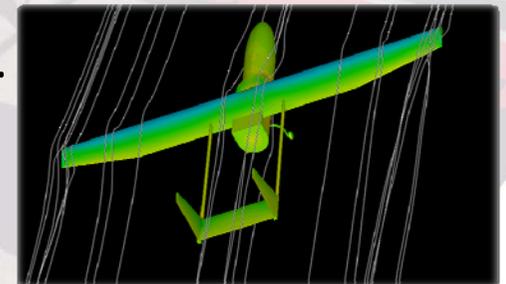
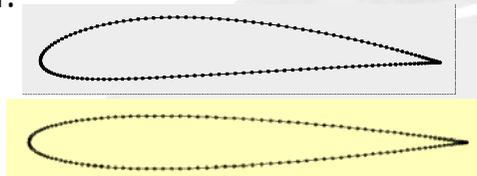
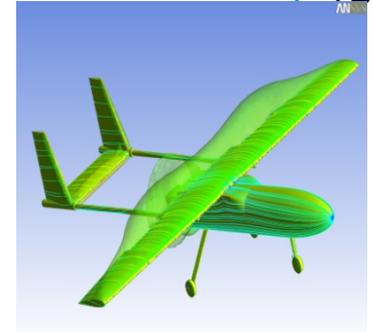


Aerodinámica - I



CEFIRO

- Compromiso entre actuaciones y la configuración de la misión
- Optimización para el diseño seleccionado
 - Configuración "Pusher"
 - Configuración de cola vertical doble..
 - Superficies, envergadura, y geometría del ala, superficies de control y cola.
- Estudio completo de la polar del avión utilizando varios métodos.
 - Métodos clásicos:
 - Composite build up methods.
 - Equivalent friction methods.
 - Uso extenso de herramientas computacionales(computer aided methods):
 - Vortex Lattice parametric wing model.
 - CFD:ANSYS CFX 10.0.
- Diseño del perfil del ala
 - Perfil del ala NACA 2415.
 - Perfil cola NACA 0012.
- Optimización del perfil de ala y la configuración de cola.
- Diseño y análisis de las superficies de control: Alerones, flaps, timones de profundidad y dirección.
- Estudio de la polar del avión para sus diferentes misiones.
- Proceso de ingeniería concurrente con el resto de áreas.

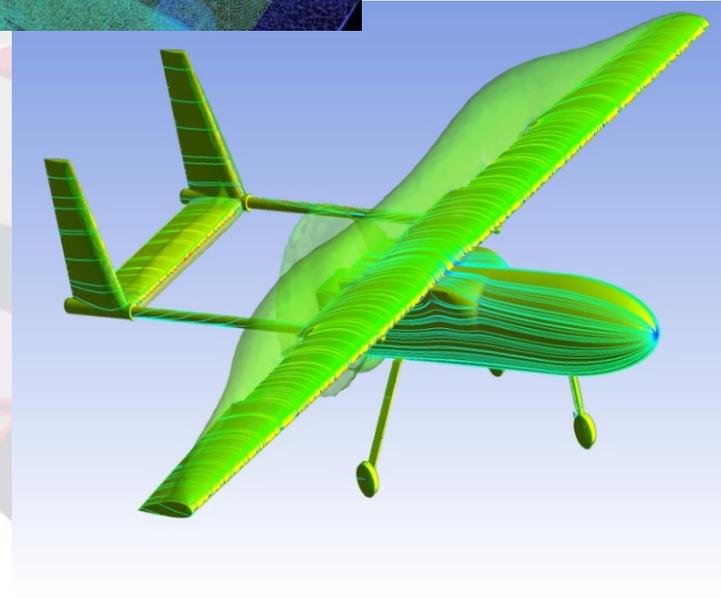
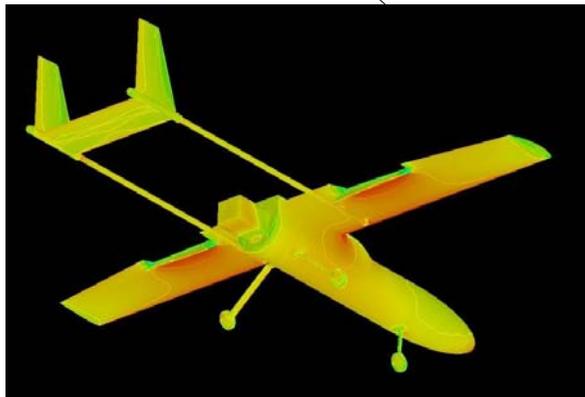
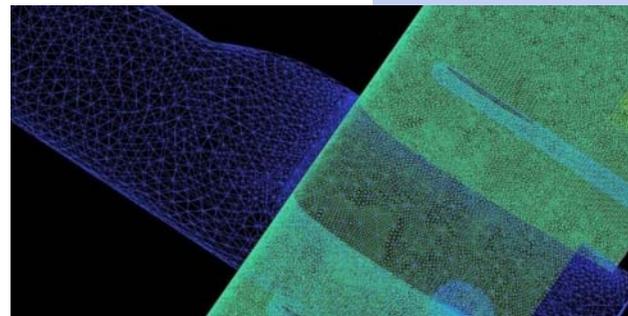
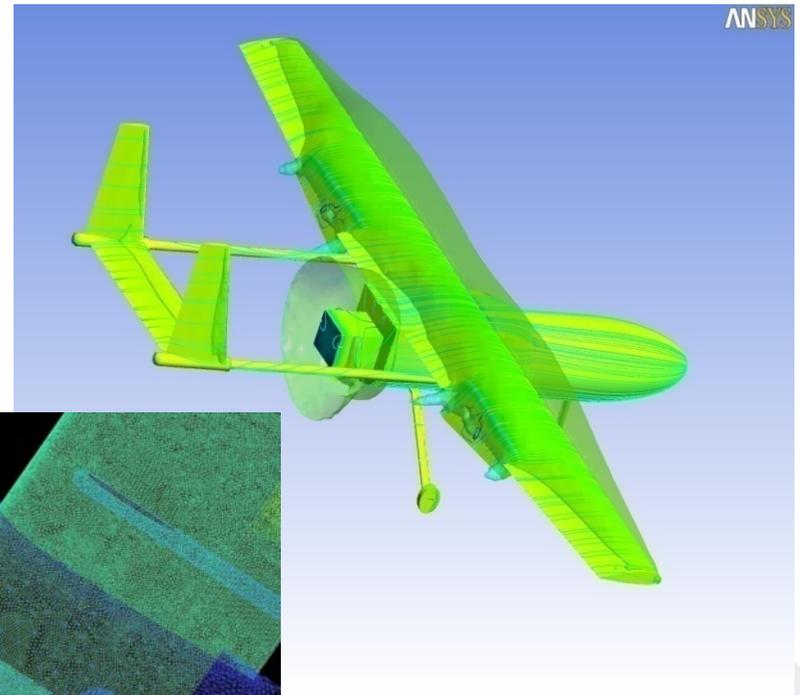
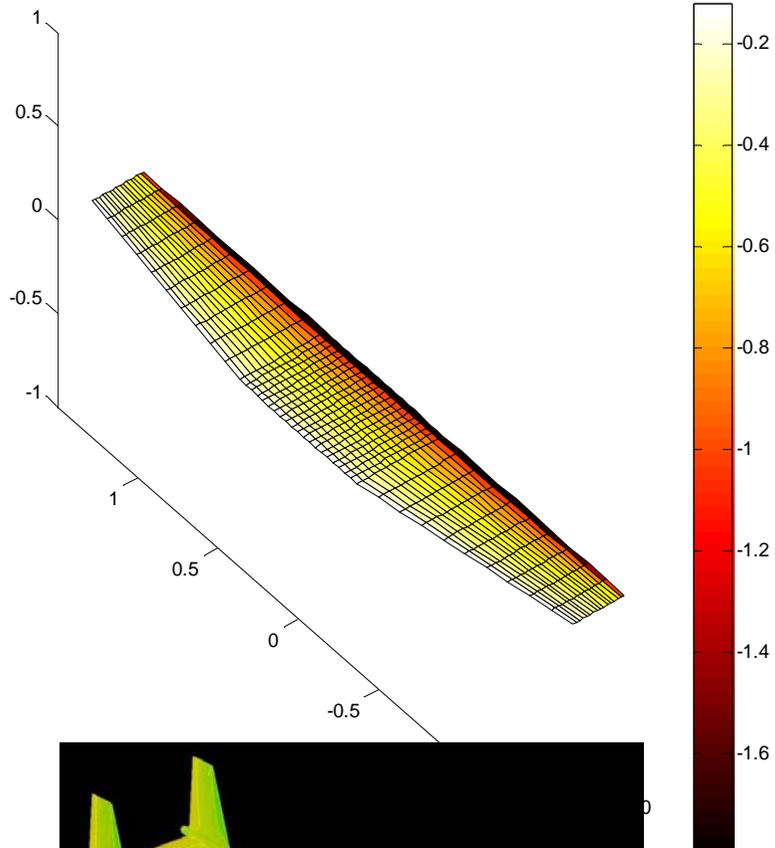




Aerodinámica - II

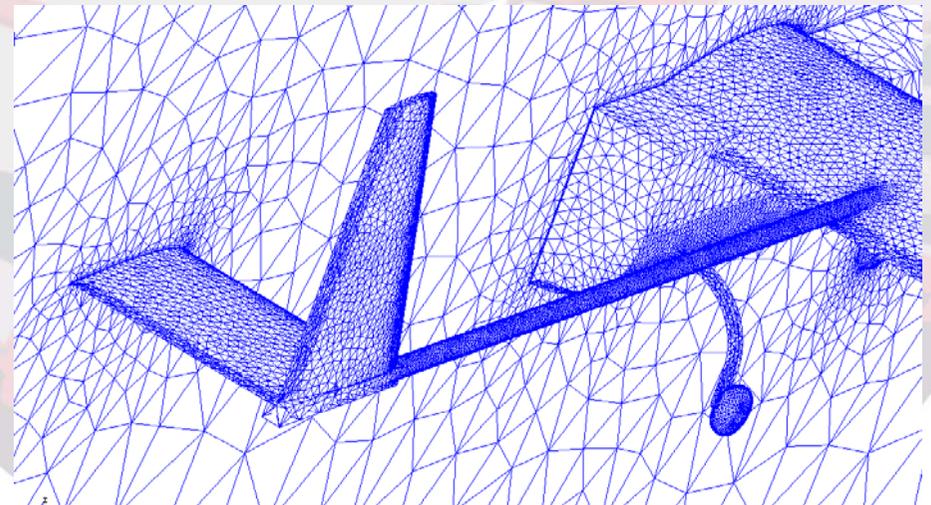
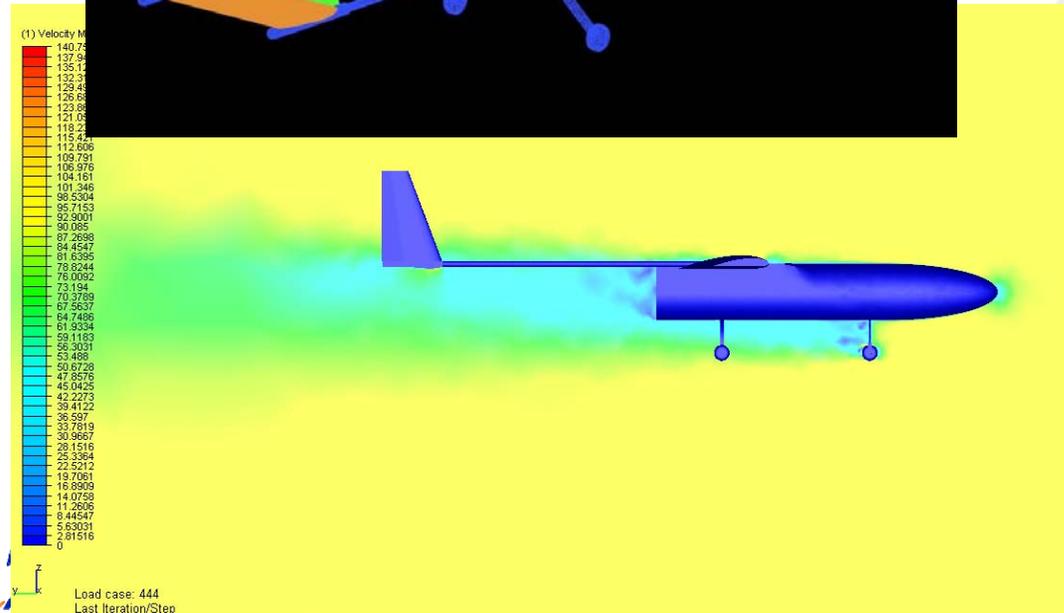
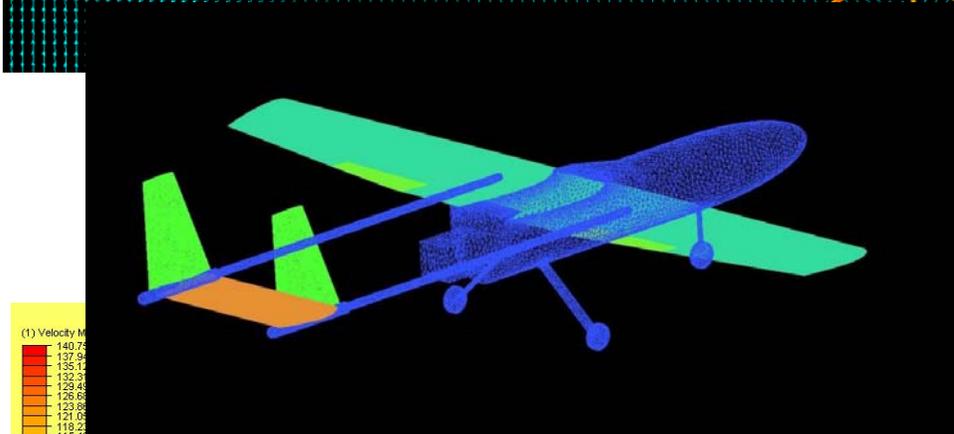
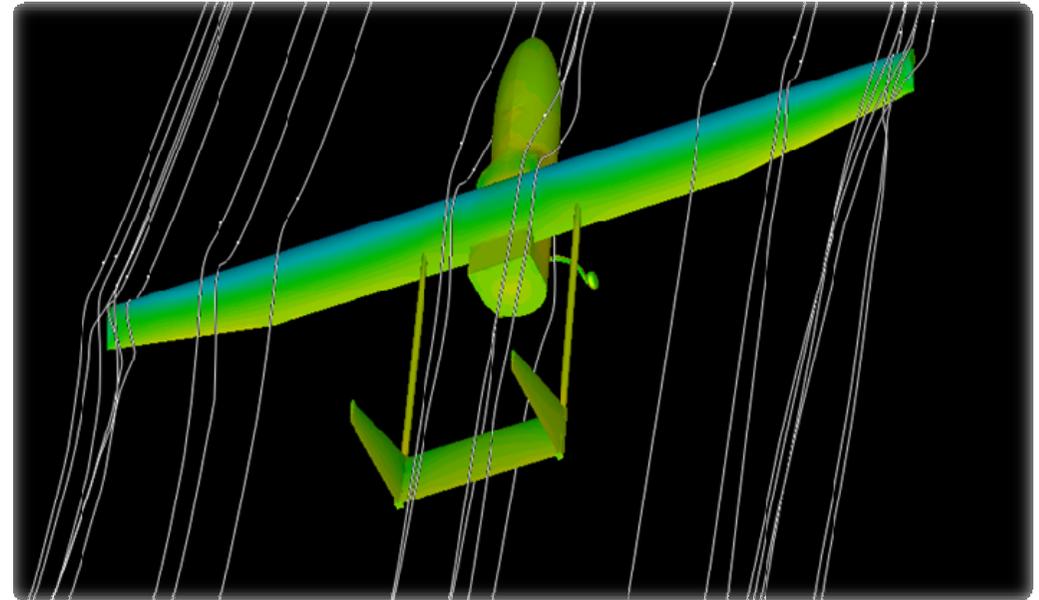
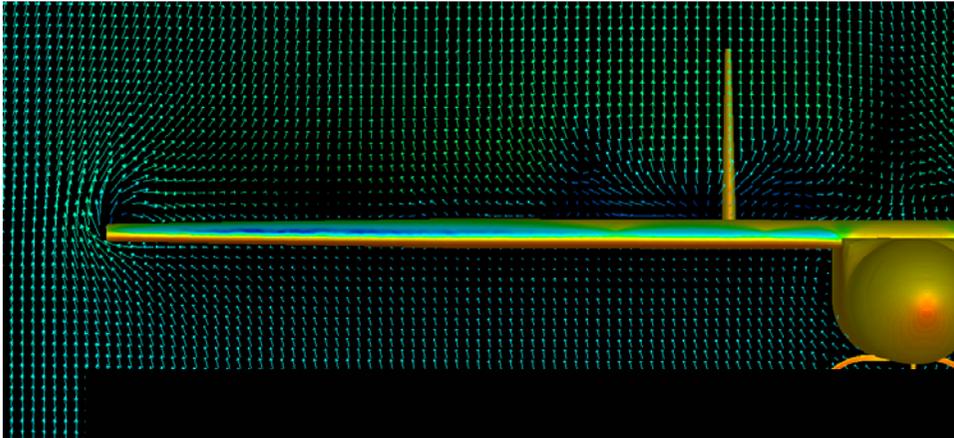


Delta cp distribution





Aerodinámica - III

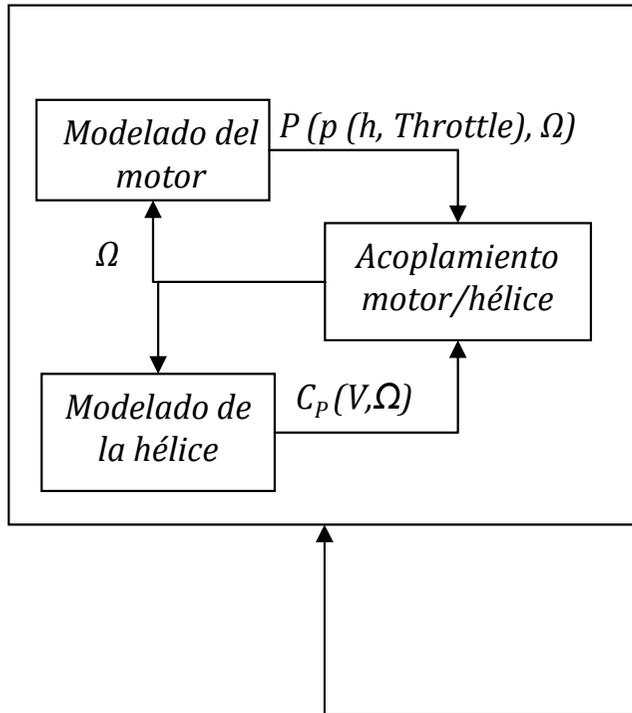




Actuaciones de Motor: Modelado - I



Modelado de la planta motora



Ecuaciones de movimiento

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = T - D - m \cdot g \cdot \sin \gamma$$

$$m \cdot V \cdot \cos \gamma \cdot \frac{d\chi}{dt} = L \cdot \sin \mu$$

$$m \cdot V \cdot \frac{d\gamma}{dt} = L \cdot \cos \mu - m \cdot g \cdot \cos \gamma$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{c_p}{g \cdot \eta_p} \cdot T \cdot V$$

$$\frac{dx}{dt} = V \cdot \cos \gamma \cdot \cos \chi$$

$$\frac{dy}{dt} = V \cdot \cos \gamma \cdot \sin \chi$$

$$\frac{dh}{dt} = V \cdot \sin \gamma$$

Actuaciones

RESULTADOS OBTENIDOS

- $\Omega(V, h, Throttle)$
- Consumo $(V, h, Throttle)$
- $P(V, h, Throttle)$
- $T(V, h, Throttle)$
- $\eta_p(V, h, Throttle)$

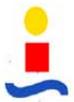
$$R = \int_{W_i}^{W_f} -\frac{v}{g \cdot c_p \cdot P} \cdot dW = \frac{\eta_p}{g \cdot c_p(M)} \frac{2 \cdot E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{1 - 2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}}} \arctan \left(\frac{(W_i - W_f) \sqrt{1 - 2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}} \cdot C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2}{(1 - k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}) \cdot ((C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2)^2 + W_i \cdot W_f) + (W_i + W_f) \cdot C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}} \right)$$

$$E = \int_{W_i}^{W_f} -\frac{dW}{g \cdot c_p \cdot P} = \frac{\eta_p}{g \cdot c_p(M)} \cdot \frac{1}{M \cdot a_0 \cdot \sqrt{\theta}} \frac{2 \cdot E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{1 - 2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}}} \arctan \left(\frac{(W_i - W_f) \sqrt{1 - 2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}} \cdot C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2}{(1 - k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}) \cdot ((C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2)^2 + W_i \cdot W_f) + (W_i + W_f) \cdot C_{Lopt} \cdot q_0 \cdot \delta \cdot M^2 \cdot k_1 \cdot E_{m\acute{a}x}} \right)$$



Actuaciones de Motor: Modelado - II



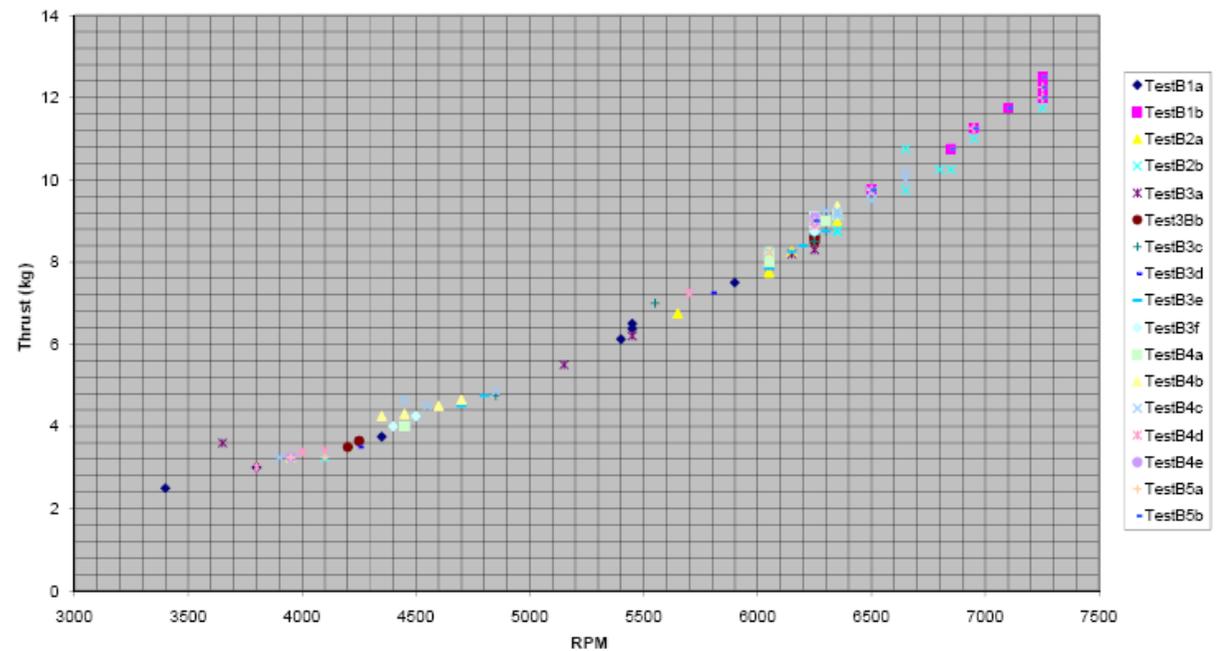


Actuaciones de Motor: Pruebas Funcionales



Mediciones de empuje y consumo de combustible

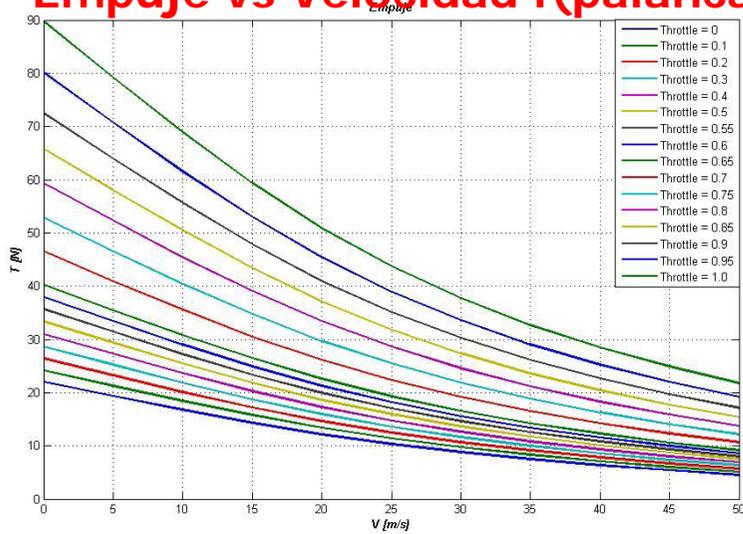
Thrust vs. RPM (rectificado)



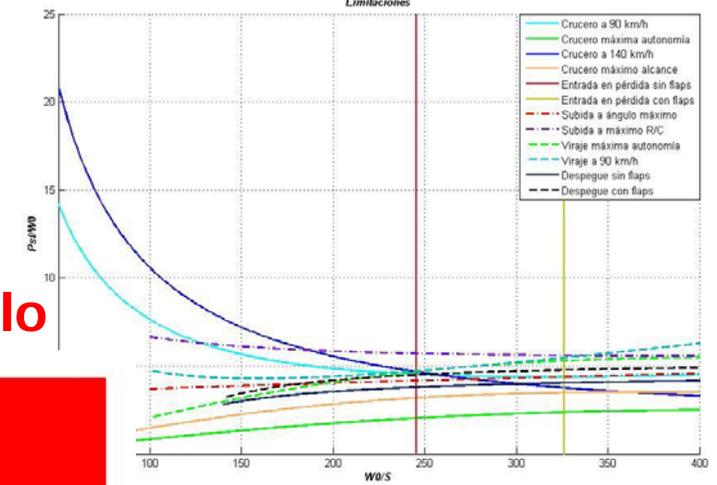


Estudio de las Actuaciones del Céfiro

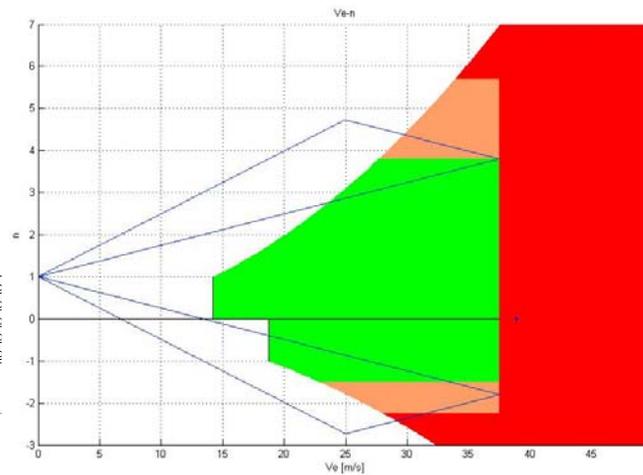
Empuje vs Velocidad f(palanca)



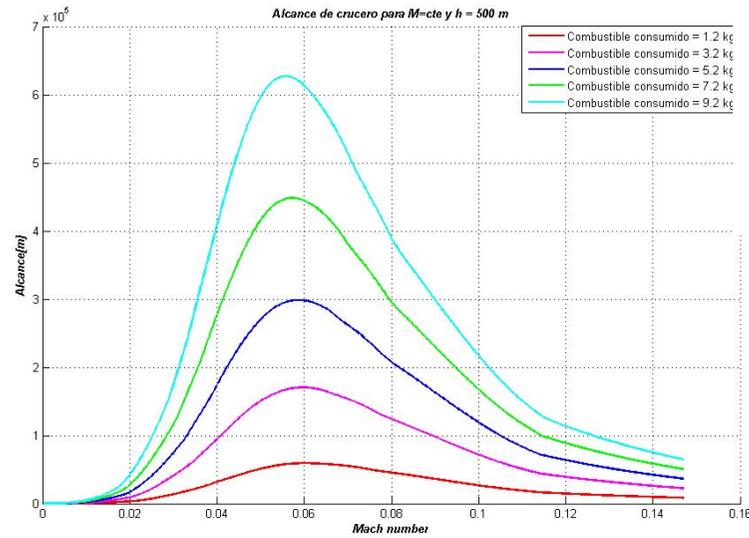
T/W vs W/S



Envolvente de Vuelo



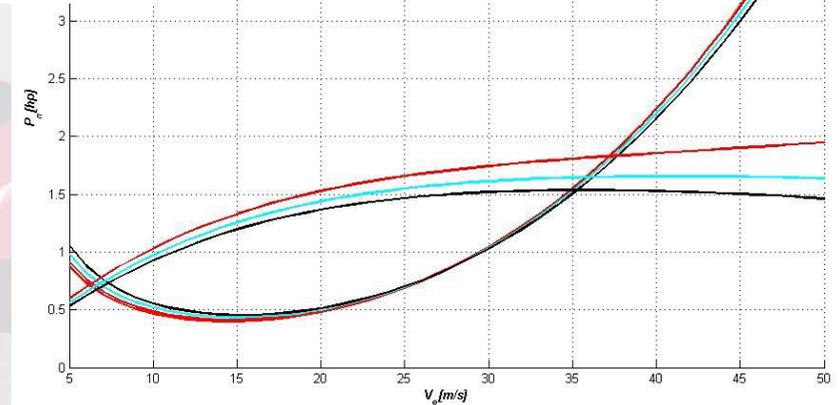
Alcance vs Mach f(combustible)



P vs. V

P_n vs V_n para diferentes h

- Potencia necesaria peso de despegue h = 0 m
- Potencia necesaria peso de despegue h = 500 m
- Potencia necesaria peso de despegue h = 1000 m
- Potencia disponible h = 0 m
- Potencia disponible h = 500 m
- Potencia disponible h = 1000 m

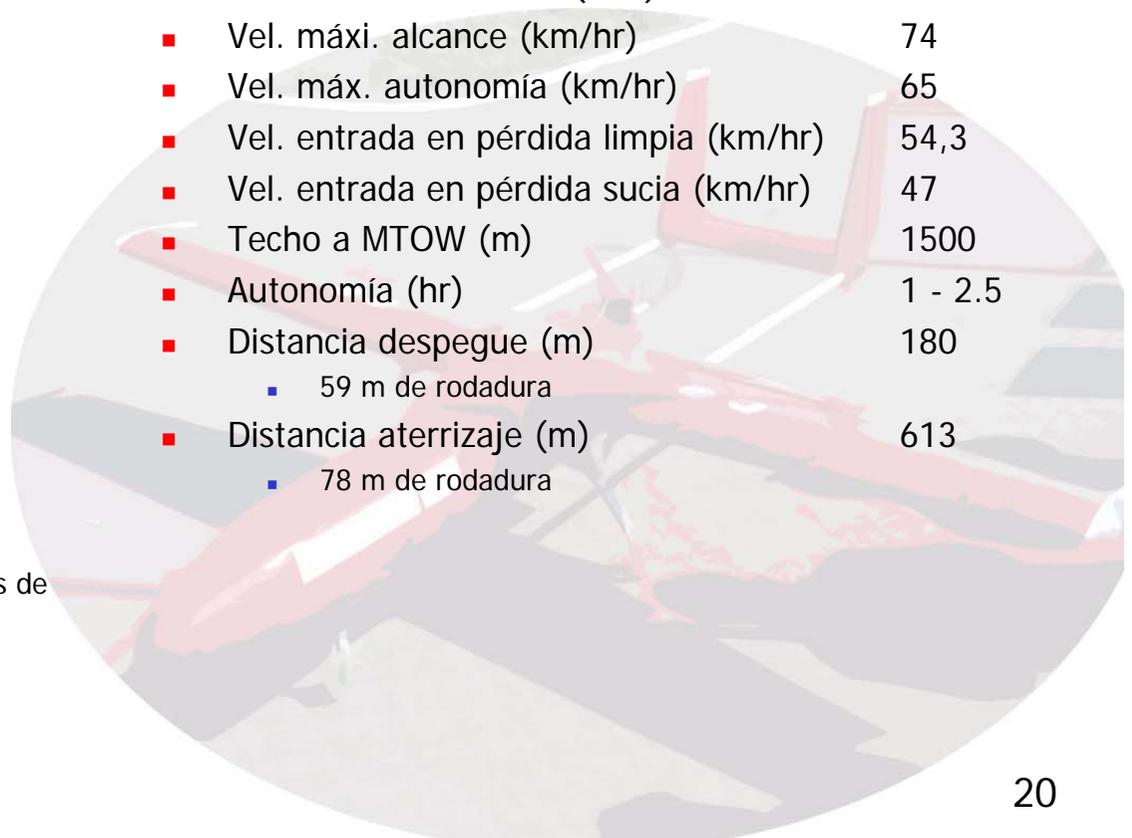




Actuaciones del Céfiro



- **Planta propulsora**
 - Motor alternativo de un cilindro, dos tiempos
 - Potencia (Hp) 8.5
 - Cubicaje (cm³) 58
 - Hélice (in) 22
- **Actuaciones**
 - Vel. crucero (Km/hr): 90
 - Vel. máx. ascensional (m/s): 3.2
 - Vel. máxi. alcance (km/hr) 74
 - Vel. máx. autonomía (km/hr) 65
 - Vel. entrada en pérdida limpia (km/hr) 54,3
 - Vel. entrada en pérdida sucia (km/hr) 47
 - Techo a MTOW (m) 1500
 - Autonomía (hr) 1 - 2.5
 - Distancia despegue (m) 180
 - 59 m de rodadura
 - Distancia aterrizaje (m) 613
 - 78 m de rodadura



■ Carga de pago:

- Máximo al despegue (MTOW) (kg) 25.6
- Carga máxima (kg) 7.5
- Máximo de combustible (kg) 2.0
 - (posibilidad de aumentar sustituyendo carga de combustible por carga de pago)
- Plomada o Lastre (kg) 3.5
 - puede portar hasta 10Kg según las especificaciones de diseño para las que ha sido diseñado

■ Modos de vuelo

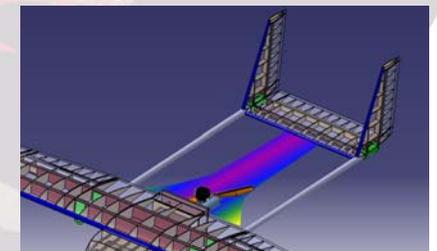
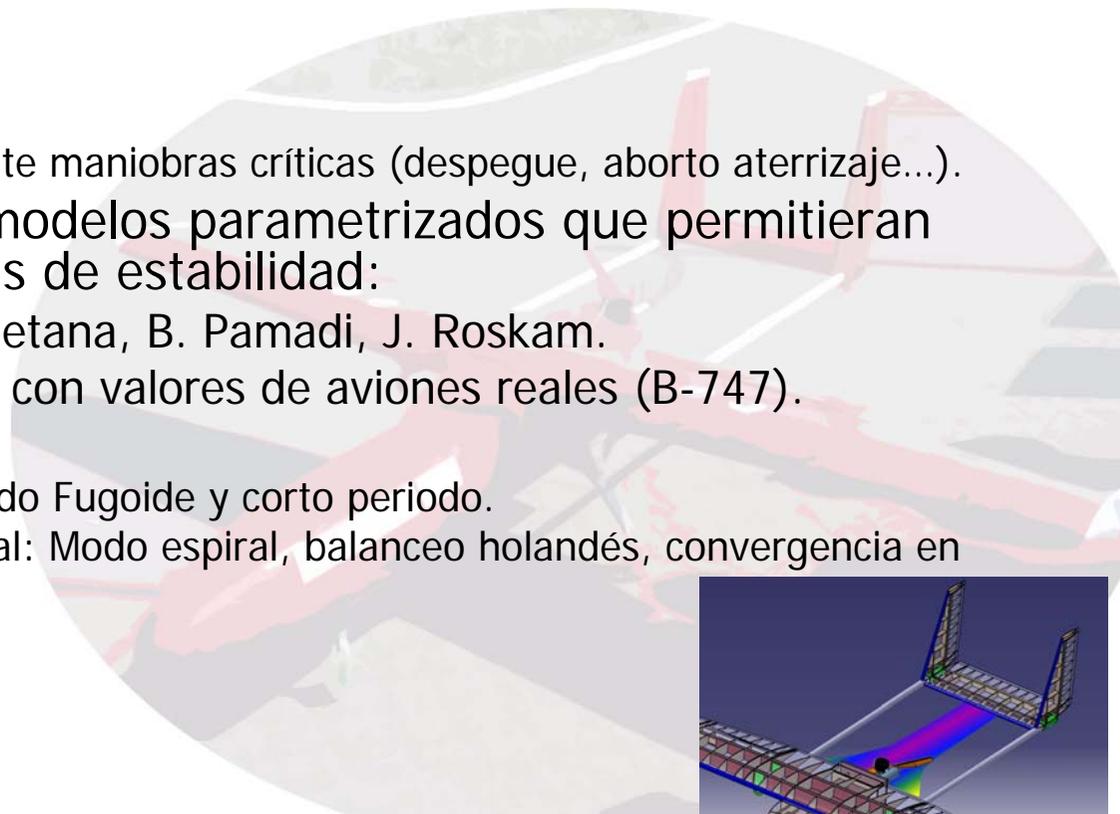
- Controlado manualmente desde tierra



Estabilidad y Control - I



- La necesidad de disponer de una estimación precisa del comportamiento dinámico y estático de Céfiro el estudio completo de la estabilidad y control del aeronave.
 - Empleo de herramientas clásicas para estudiar las respuestas estáticas y dinámicas.
 - Estabilidad longitudinal y lateral-direccional.
 - Estudio del margen estático:
 - Estudio de cargas de pago.
 - Optimización de las superficies de aerodinámicas (ingeniería concurrente)
 - Posición del ala.
 - Forma, tamaño y posición de la cola.
 - Análisis de trimado.
 - Estudio de incidencias (ala y cola).
 - Efectos de la planta propulsora durante maniobras críticas (despegue, aborto aterrizaje...).
- Gran esfuerzo enfocado en obtener modelos parametrizados que permitieran obtener estimaciones de las derivadas de estabilidad:
 - Fusión de literatura disponible: F. Smetana, B. Pamadi, J. Roskam.
 - Comparación de resultados analíticos con valores de aviones reales (B-747).
 - Extenso estudio de sensibilidad:
 - Estabilidad dinámica longitudinal: Modo Fugoide y corto periodo.
 - Estabilidad dinámica lateral direccional: Modo espiral, balanceo holandés, convergencia en balance.





Estabilidad y Control - II



Equilibrio de fuerzas	Equilibrio de momentos
$F = m \left(\frac{dV}{dt} \right)_i$	$M = \left(\frac{dH}{dt} \right)_i = \left(\frac{d(I\omega)}{dt} \right)_i = \left(\frac{dI}{dt} \right)_i \omega + I \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_i$
$F_x = m(\dot{U} + qW - rV)$ $F_y = m(\dot{V} + rU - pW)$ $F_z = m(\dot{W} + pV - qU)$	$L = \dot{p}I_x - I_{xz}(pq + \dot{r}) + qr(I_z - I_y)$ $M = \dot{q}I_y + rp(I_x - I_z) + I_{xz}(p^2 - r^2)$ $N = \dot{r}I_z - I_{xz}(\dot{p} - qr) + pq(I_y - I_x)$
Linealización del problema	
$\Delta C_x = \frac{\partial C_x}{\partial u} u + \frac{\partial C_x}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial C_x}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial C_x}{\partial \dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \frac{\partial C_x}{\partial q} q + \frac{\partial C_x}{\partial \delta_e} \Delta \delta_e \dots$	

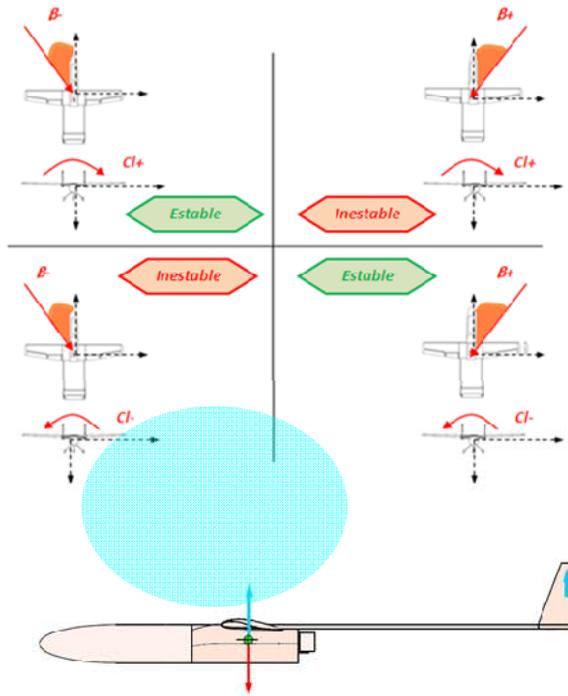
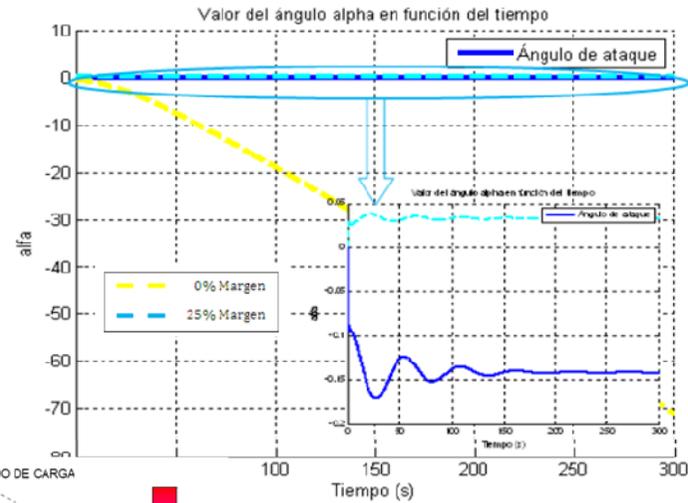


DIAGRAMA DE CENTRADO DE CARGA

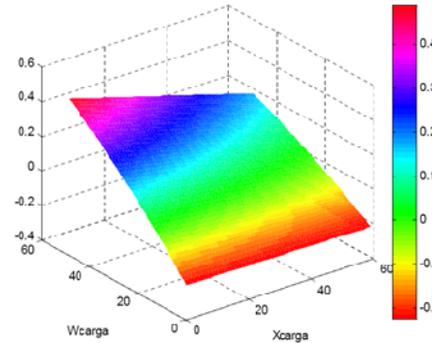
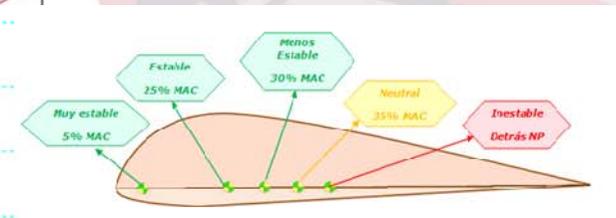
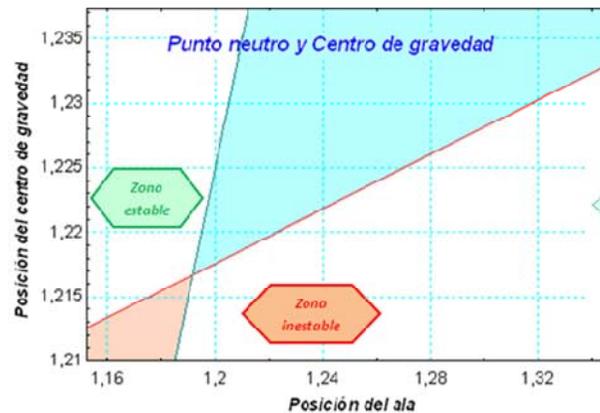
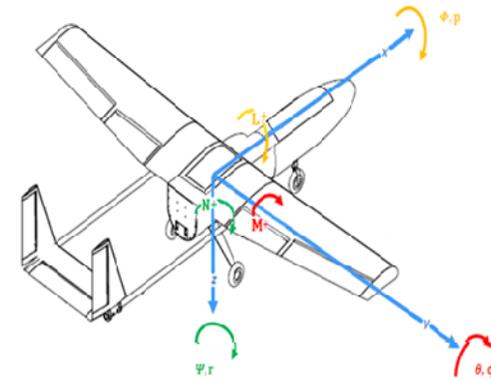


Figura 4.29. - Centrado carga de peso delantero estimada

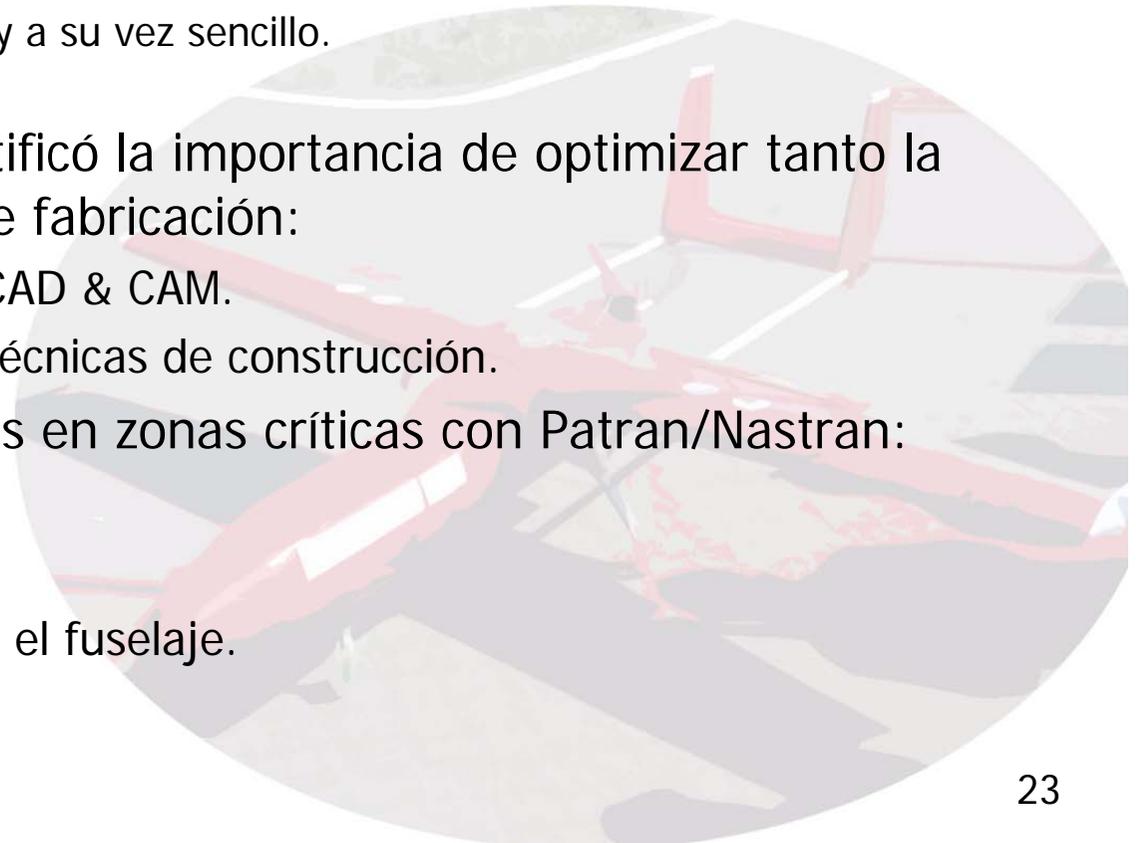




Diseño estructural y procesos de construcción

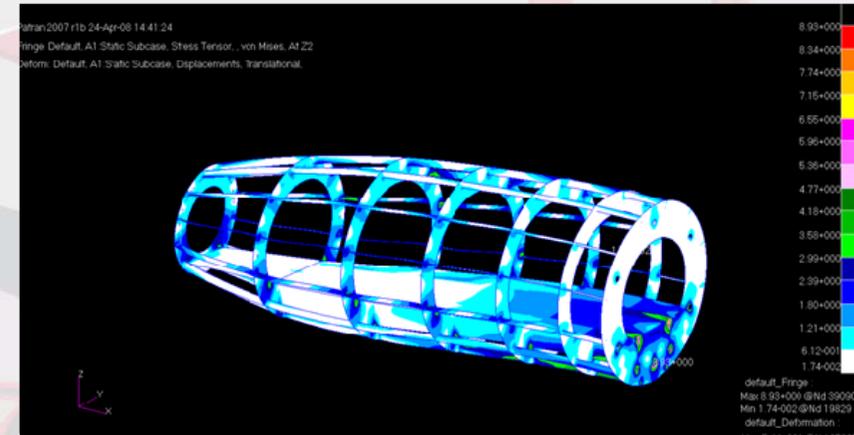
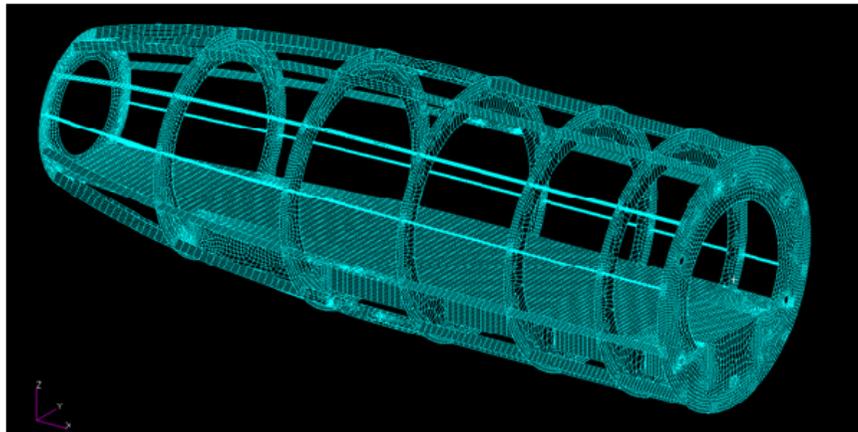
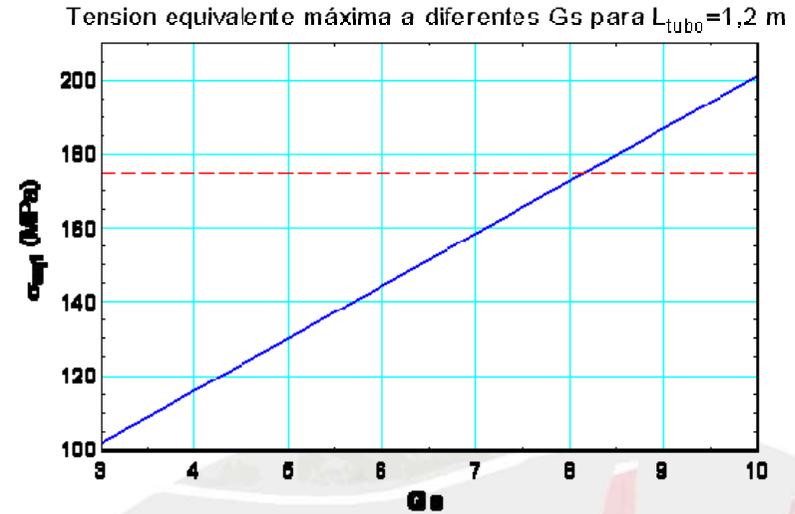
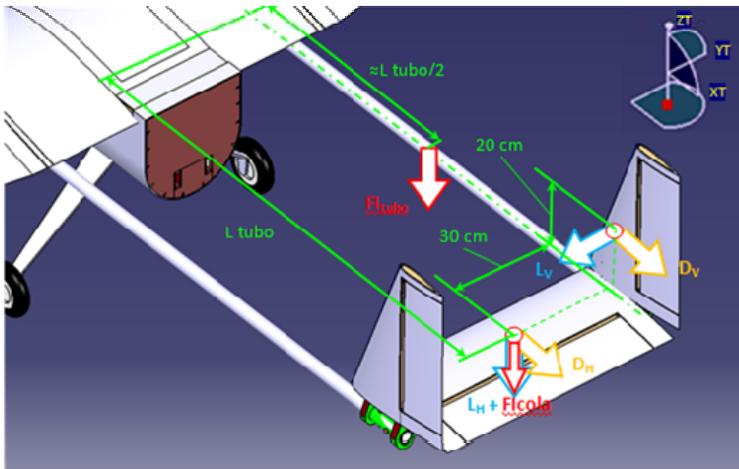


- Durante el diseño preliminar se hizo énfasis en que el UAV tenía que cumplir:
 - Requisitos de actuaciones (RFP).
 - Requisitos de construcción:
 - El uso de materiales convencionales era un imperativo para facilitar el proceso de construcción en el primer prototipo.
 - Diseño modular: facilidad en transporte y reparación.
 - Uso de materiales de fácil manejo y reparación.
 - Proceso de construcción robusto y a su vez sencillo.
 - Empleo extenso de utillajes.
- Durante la fase de diseño se identificó la importancia de optimizar tanto la construcción como los procesos de fabricación:
 - Uso exhaustivo de herramientas CAD & CAM.
 - Mejora del diseño original de las técnicas de construcción.
- Estudio los estreses y las tensiones en zonas críticas con Patran/Nastran:
 - Unión de las alas y el fuselaje.
 - Tail-booms.
 - Unión entre la sección de morro y el fuselaje.



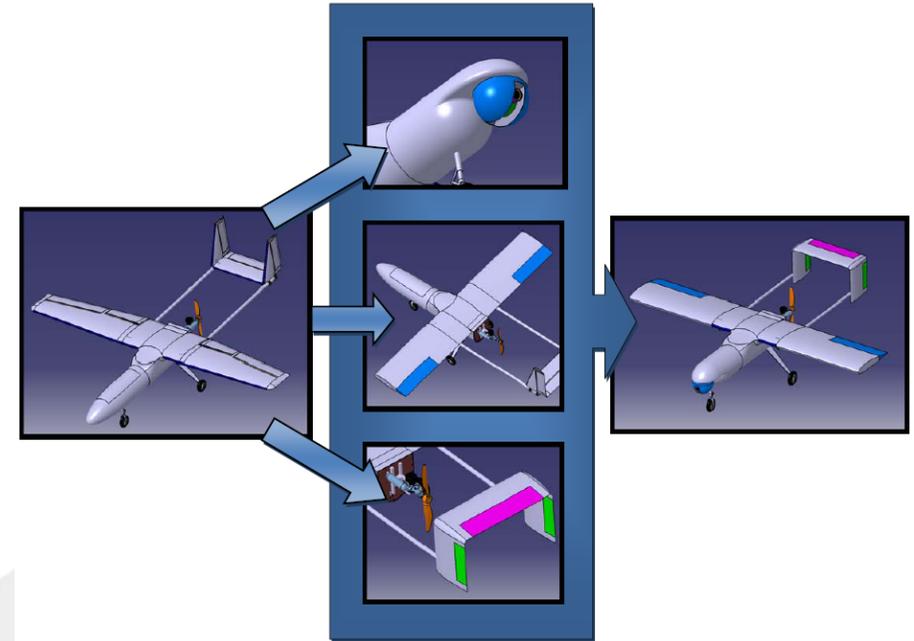
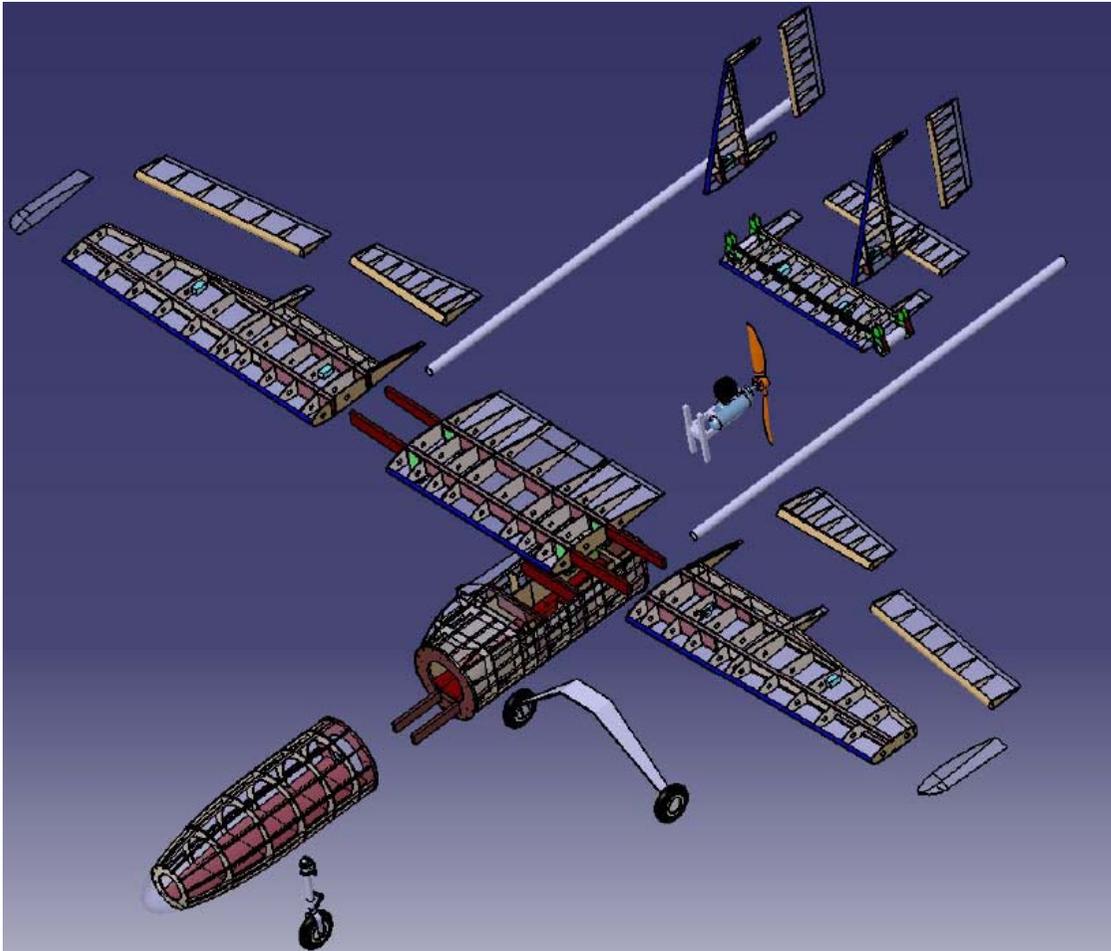


Diseño Estructural





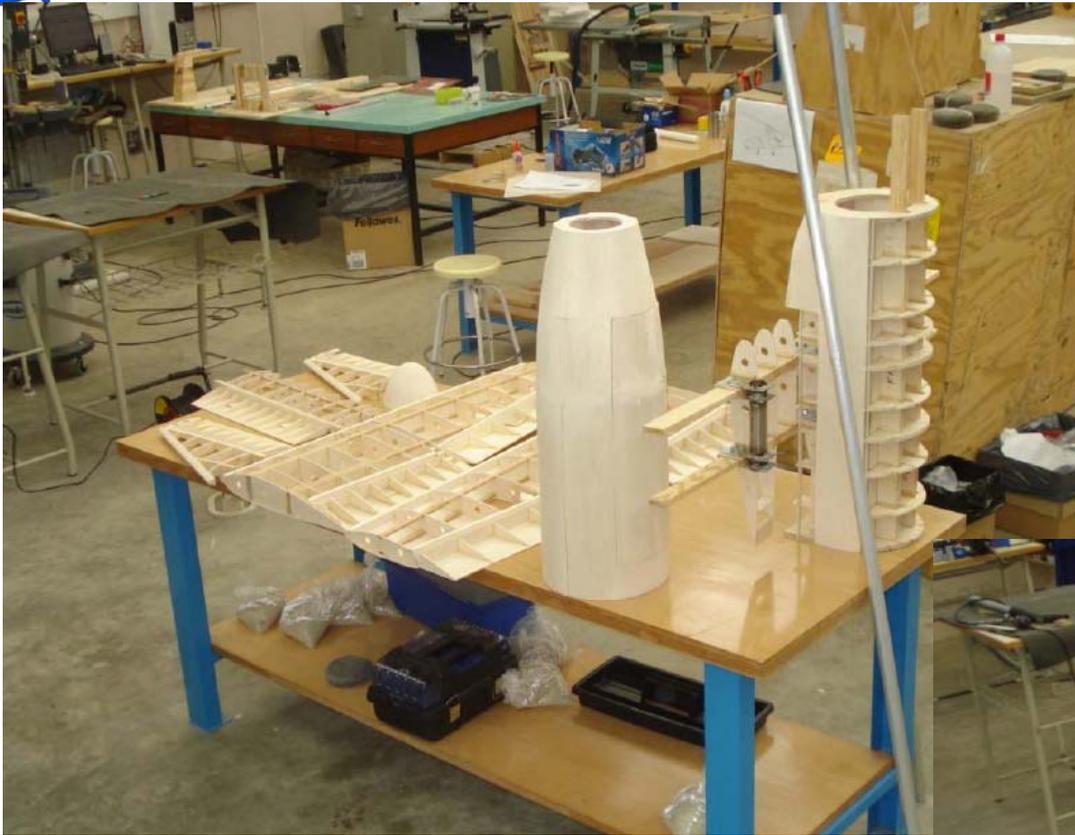
Diseño Modular - I



- Sección de morro.
- Fuselaje central.
- Ala dividida en tres secciones.
- Cola.
- Tail-booms.



Diseño Modular - II



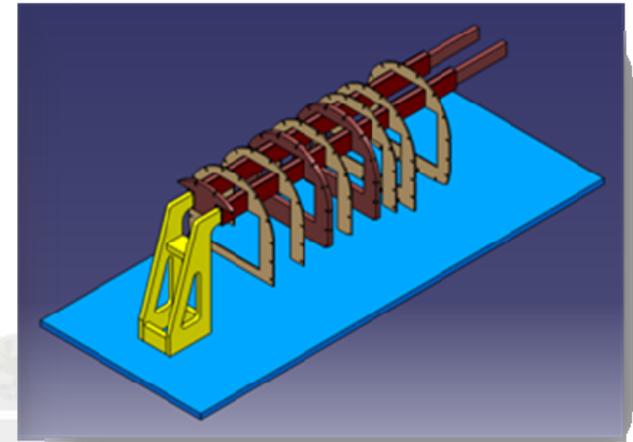
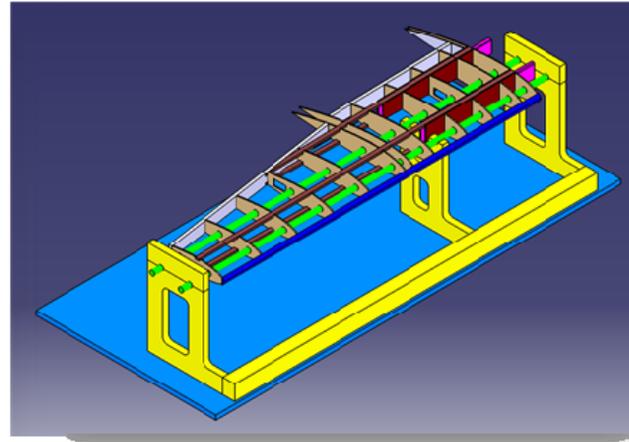
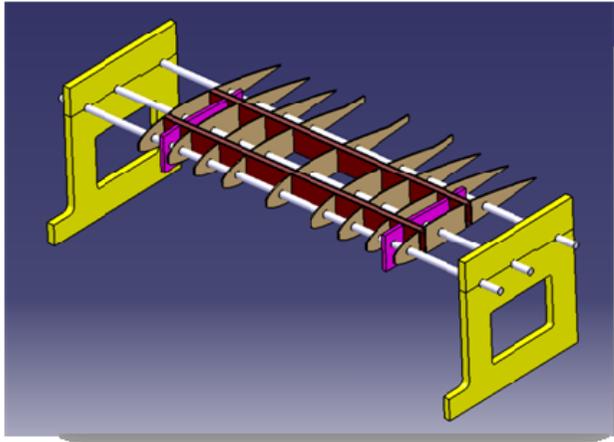


Procesos de Construcción - I

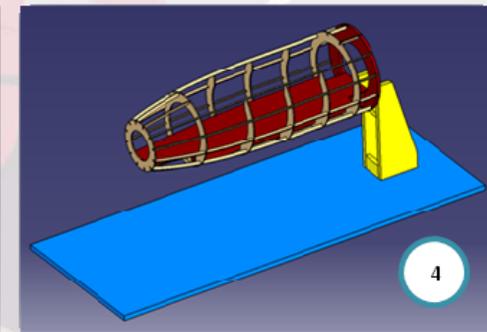
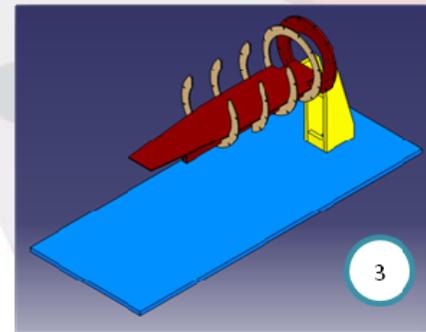
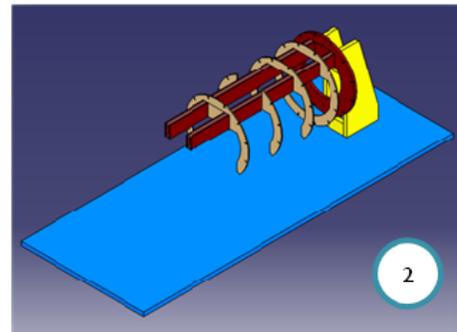
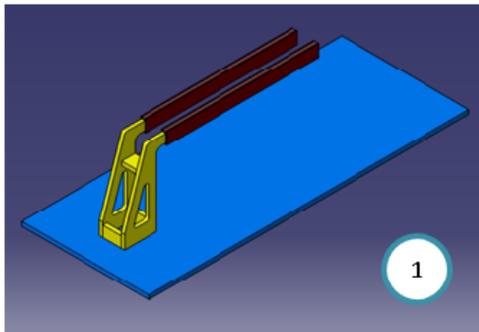


- Uso exhaustivo de técnicas para optimizar la construcción.

Utillajes para la Construcción



Proceso de Construcción

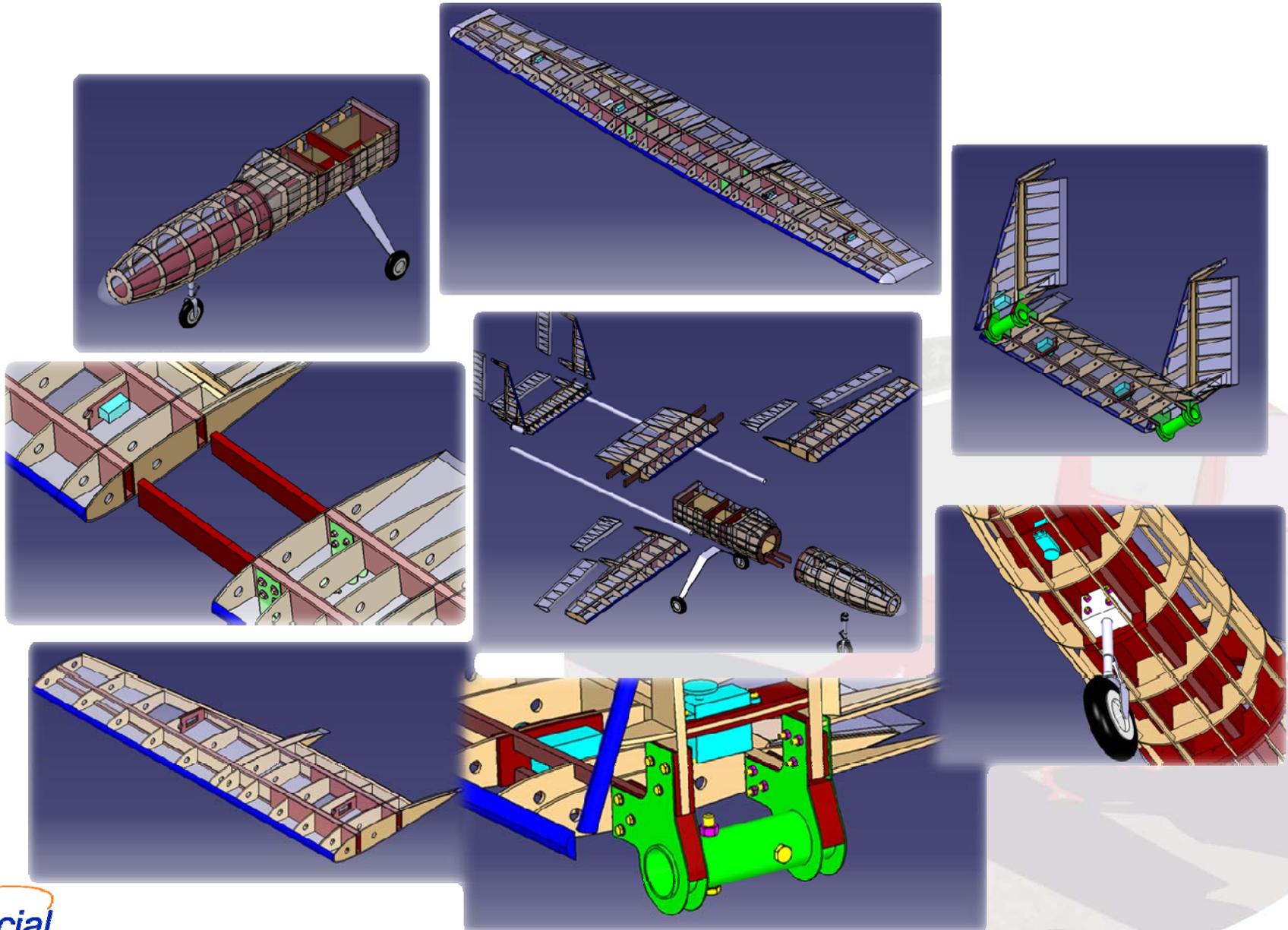




Procesos de Construcción - II



- Modelo detallado de CAD

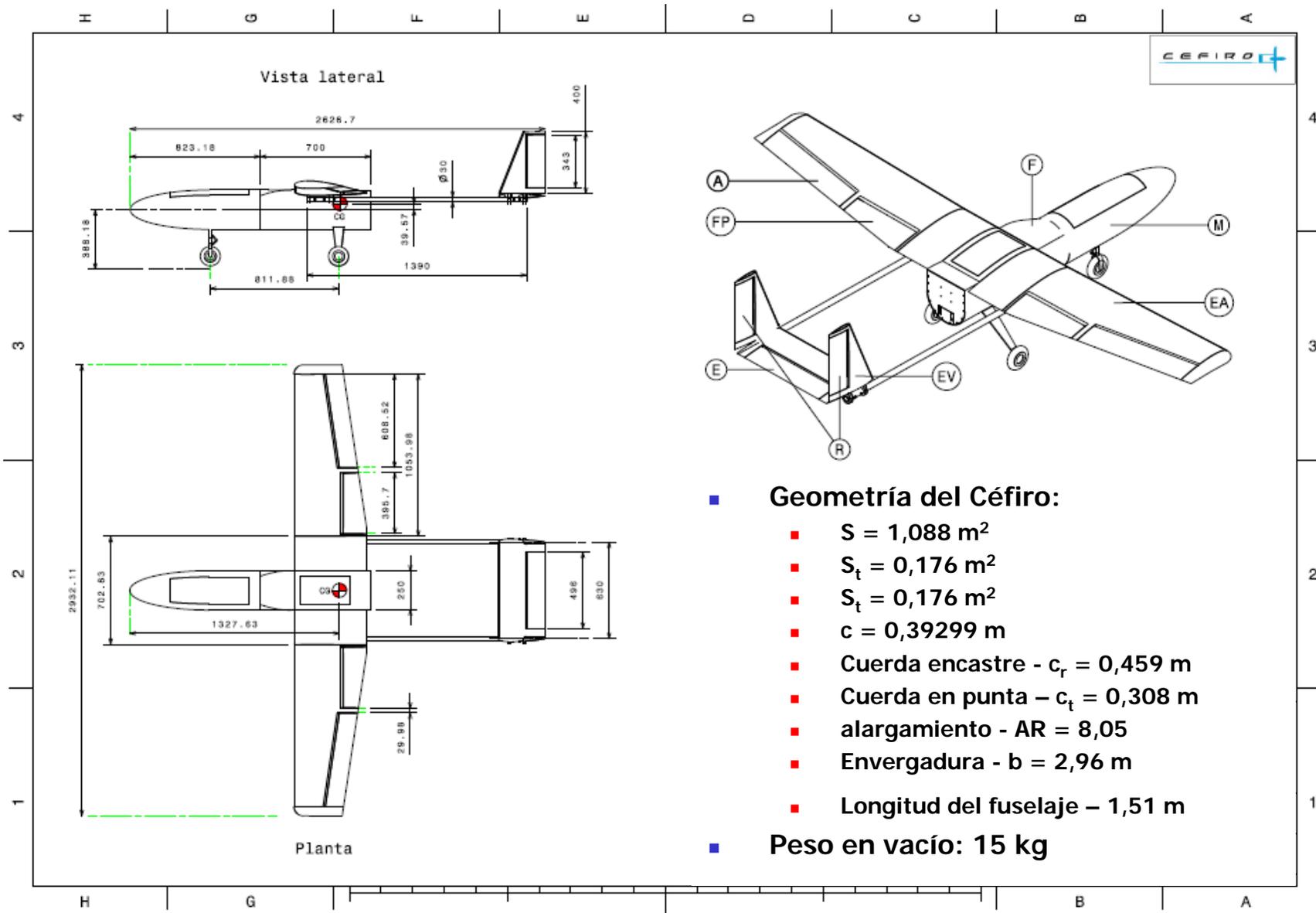




Geometría del Céfiro - I



CEFIRO



■ Geometría del Céfiro:

- $S = 1,088 \text{ m}^2$
- $S_t = 0,176 \text{ m}^2$
- $S_t = 0,176 \text{ m}^2$
- $c = 0,39299 \text{ m}$
- Cuerda encastre - $c_r = 0,459 \text{ m}$
- Cuerda en punta - $c_t = 0,308 \text{ m}$
- alargamiento - $AR = 8,05$
- Envergadura - $b = 2,96 \text{ m}$
- Longitud del fuselaje - $1,51 \text{ m}$

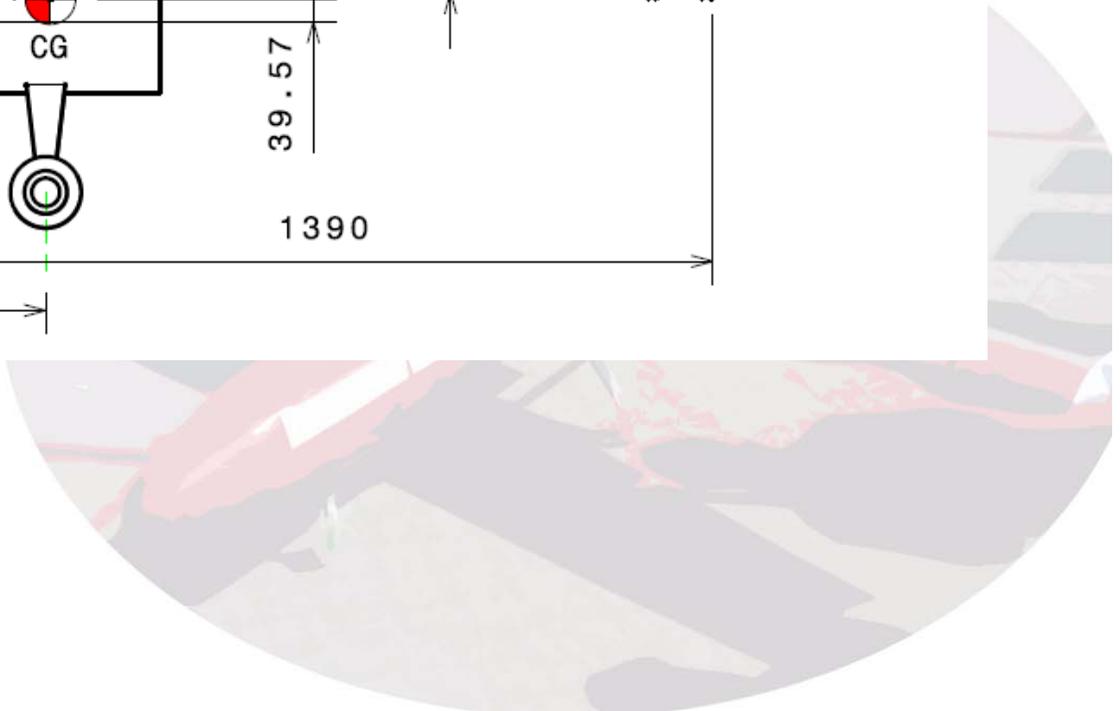
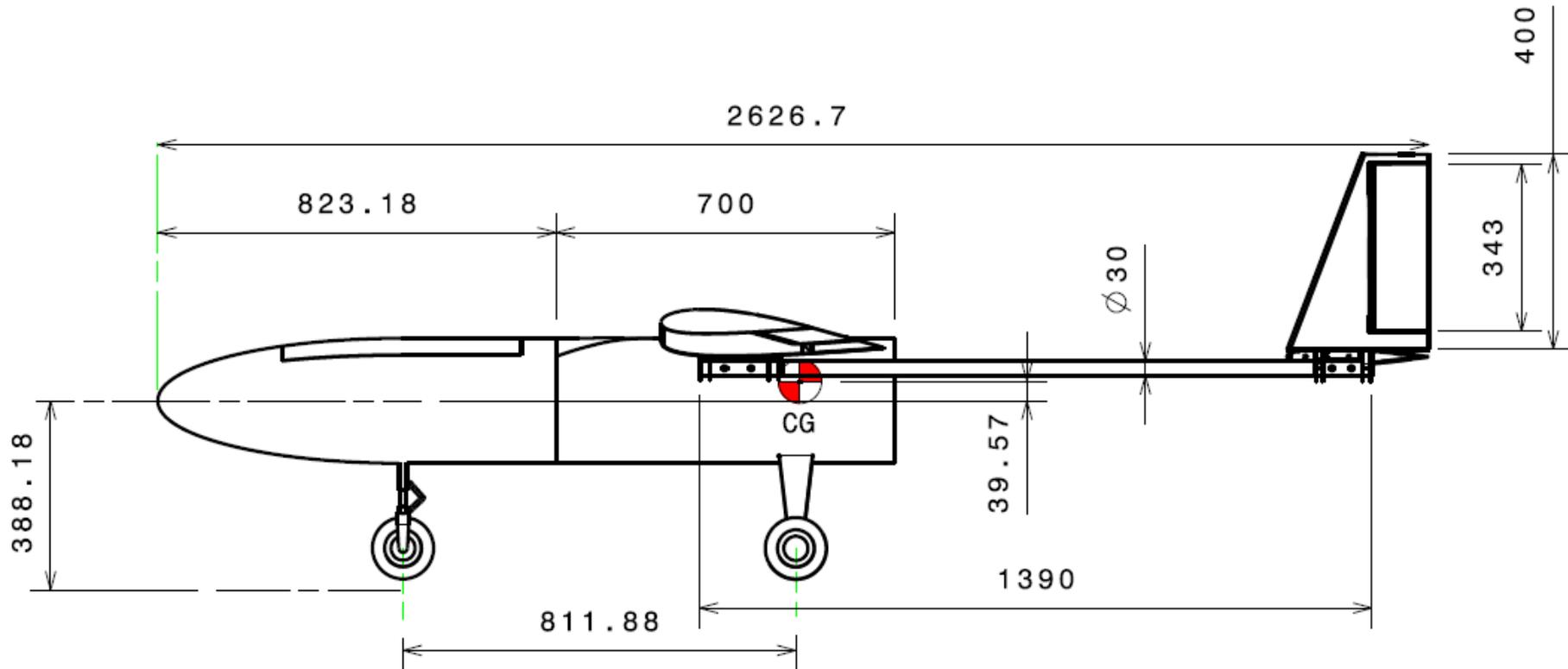
■ **Peso en vacío: 15 kg**



Geometría del Céfiro - II

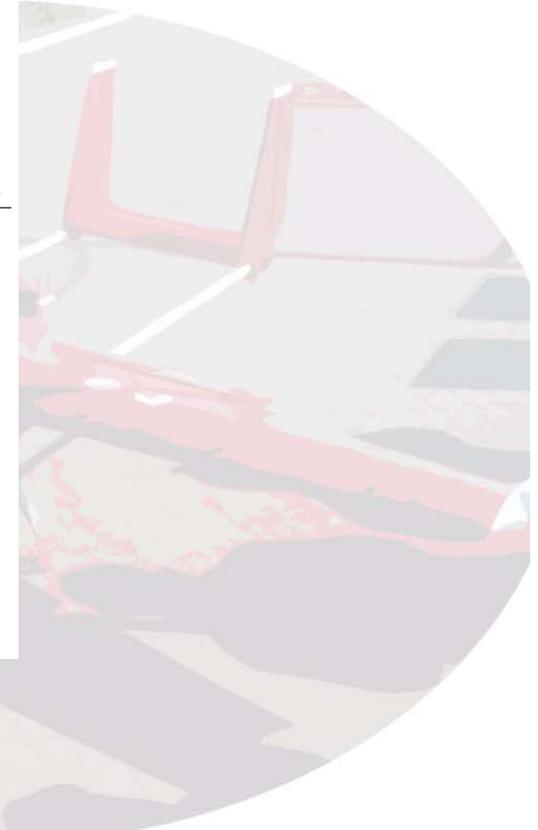
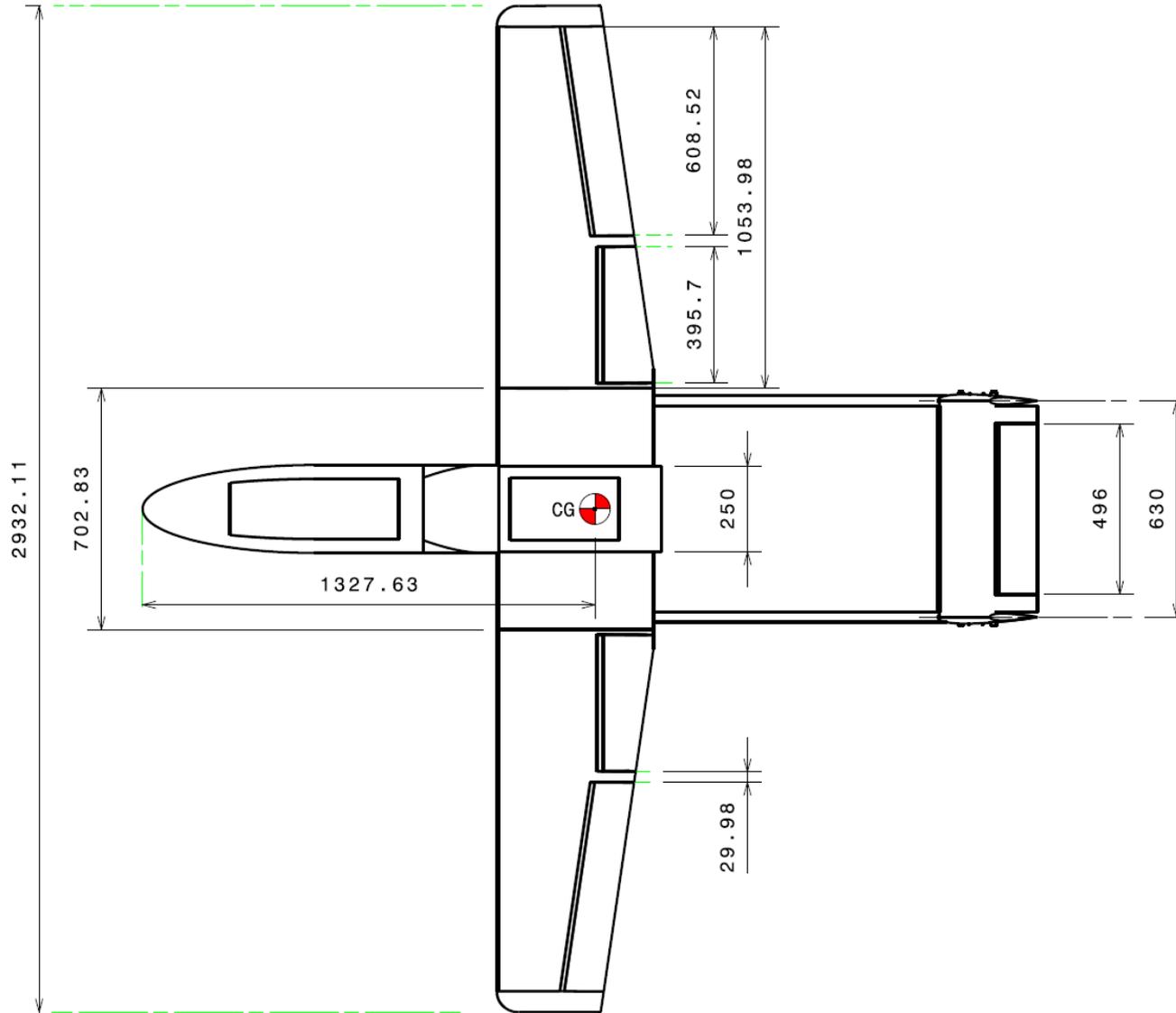


Vista lateral





Geometría del Céfiro - III

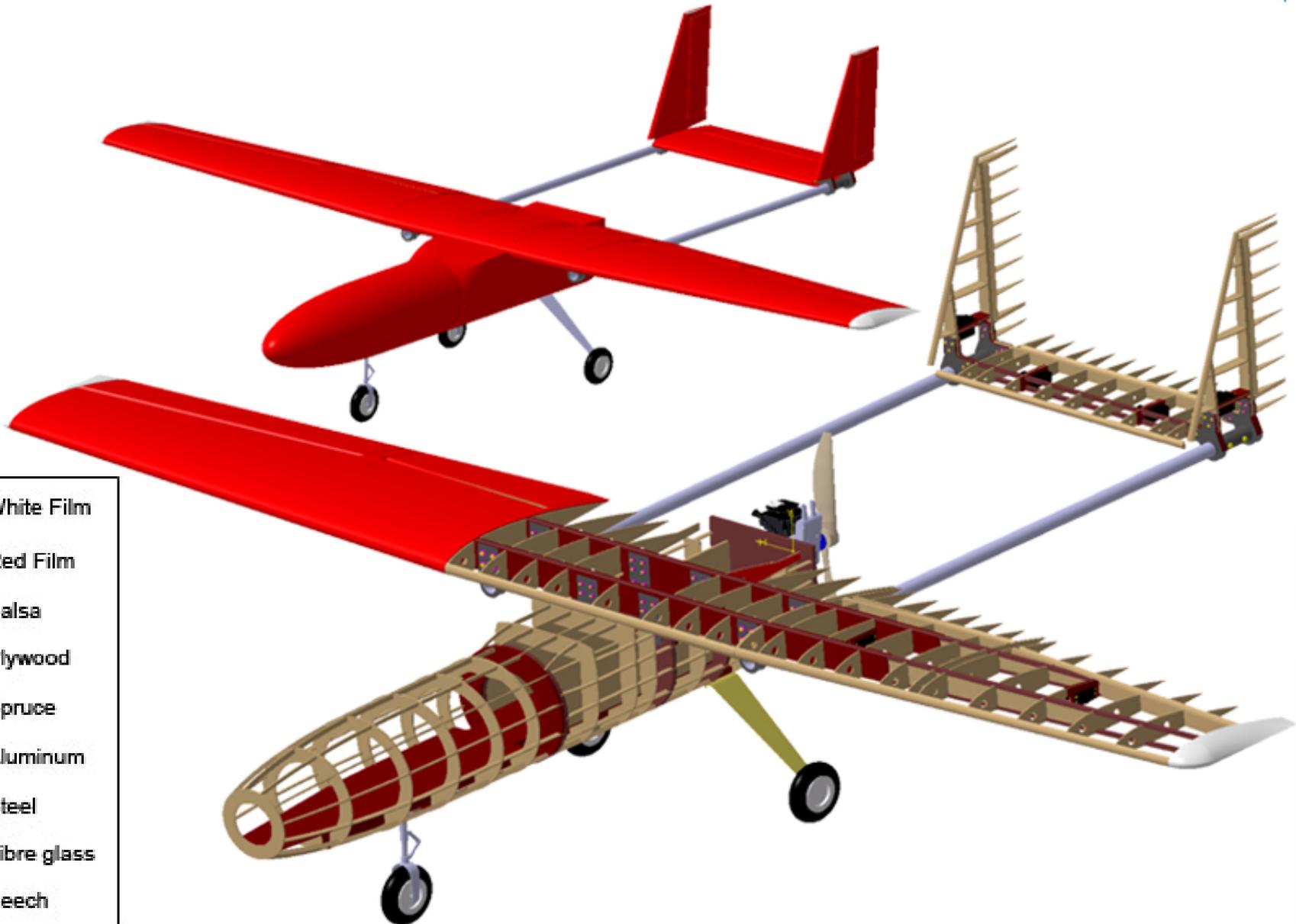




Materiales

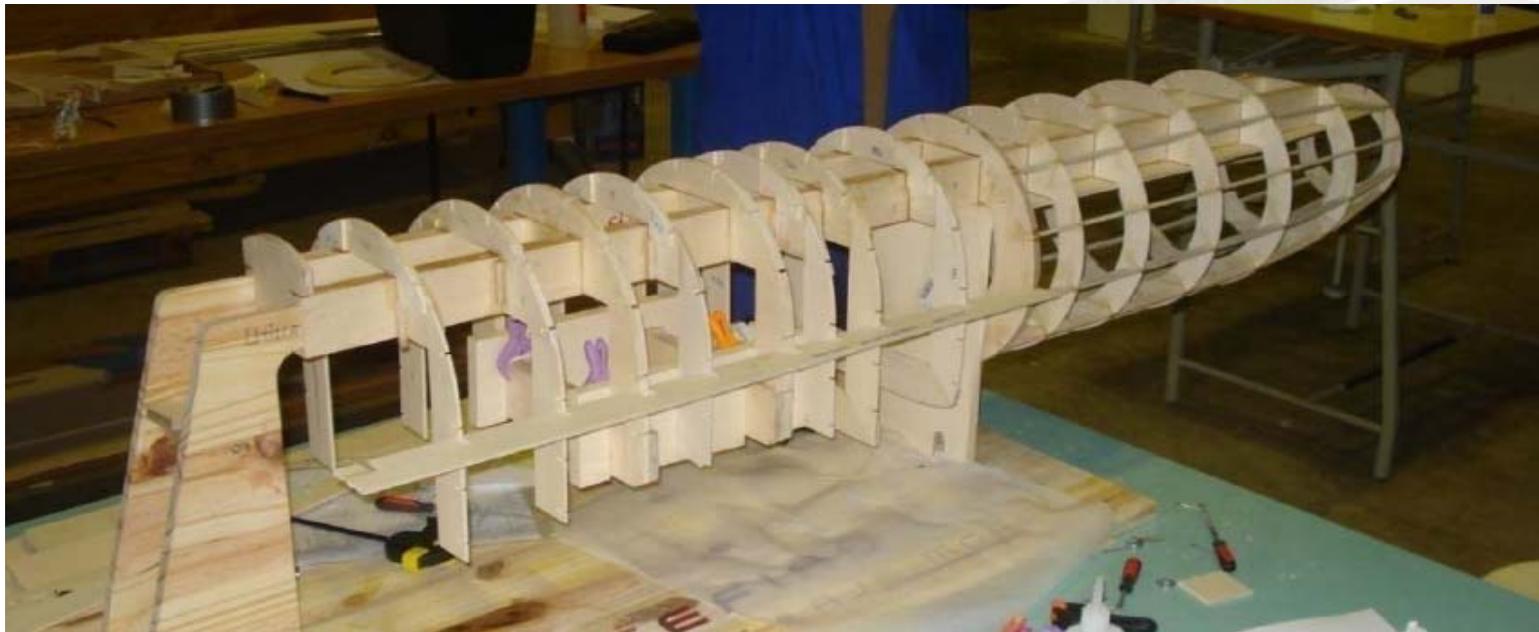
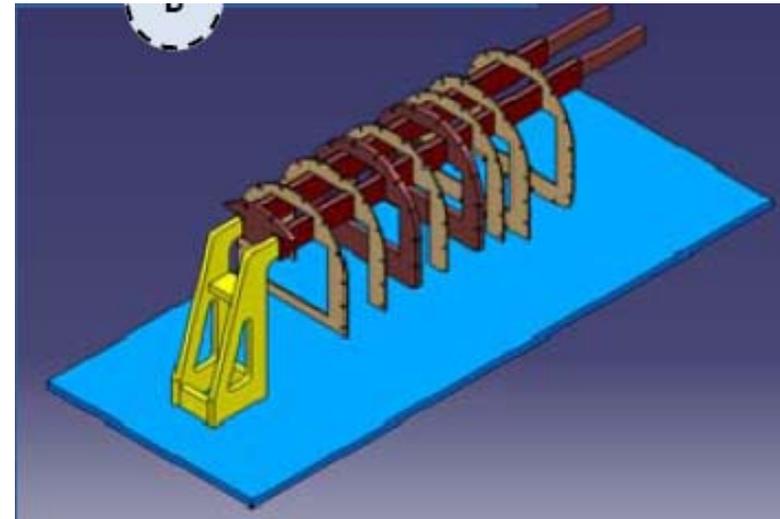
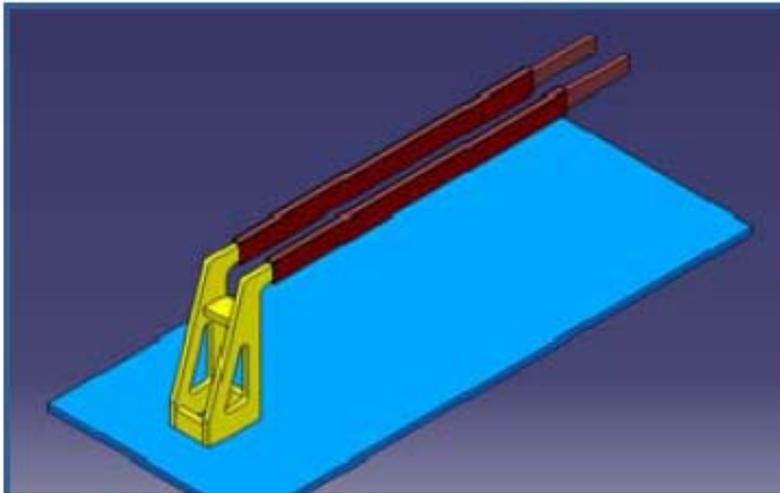


	White Film
	Red Film
	Balsa
	Plywood
	Spruce
	Aluminum
	Steel
	Fibre glass
	Beech





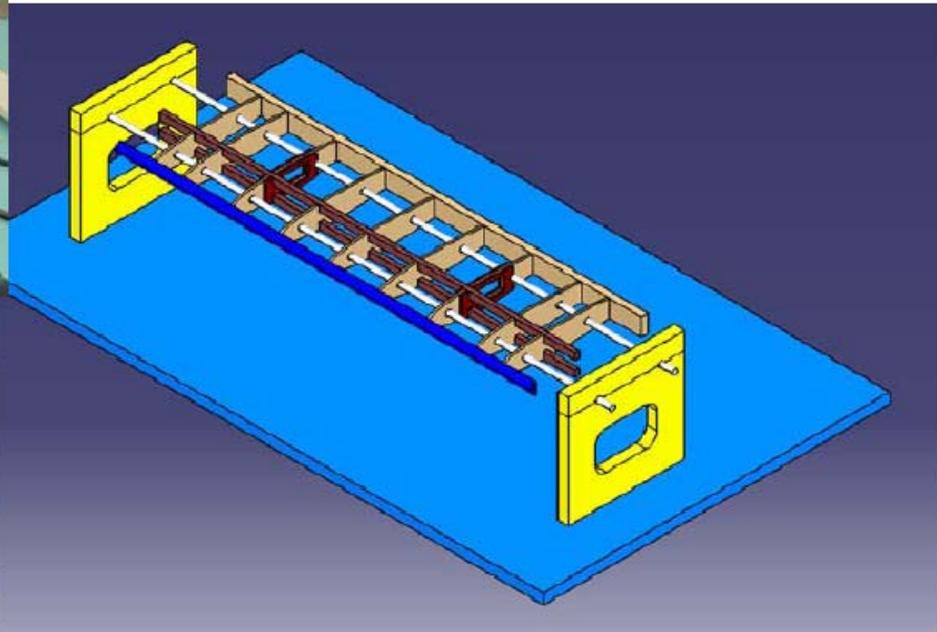
Técnicas de Construcción - I



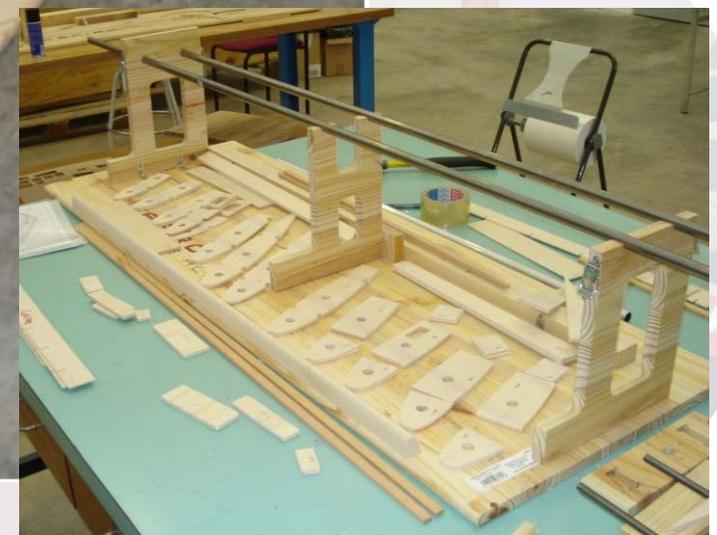
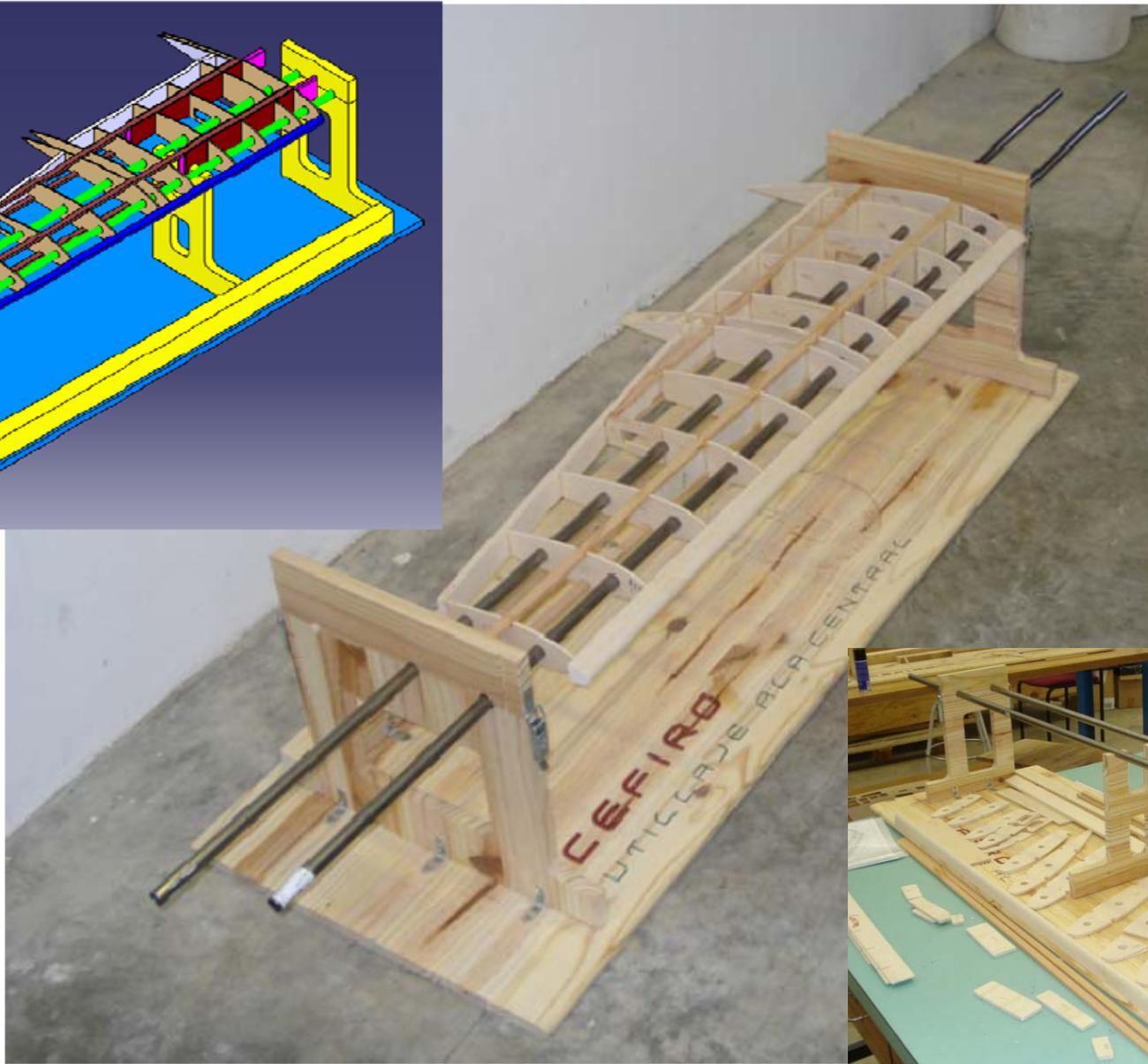
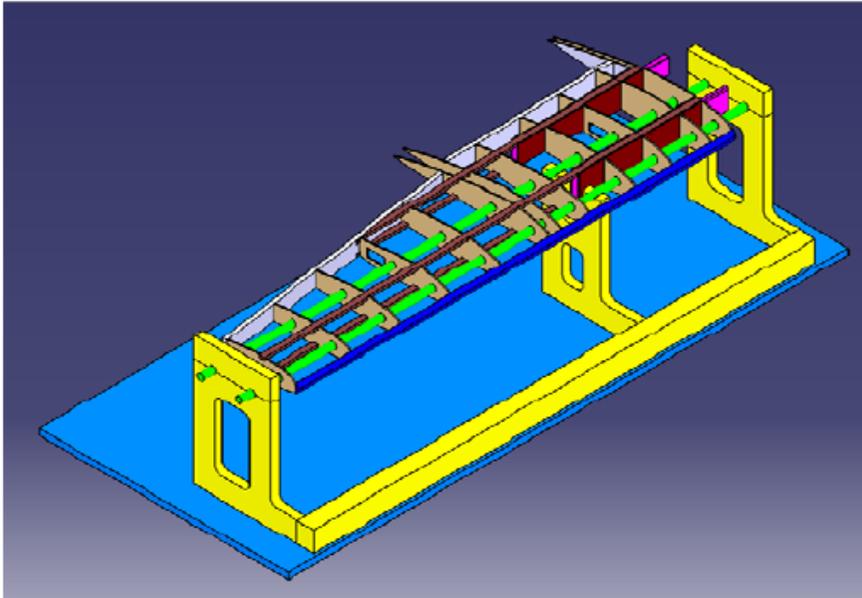
Fuselaje



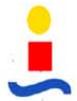
Estabilizador Horizontal



Técnicas de Construcción - III

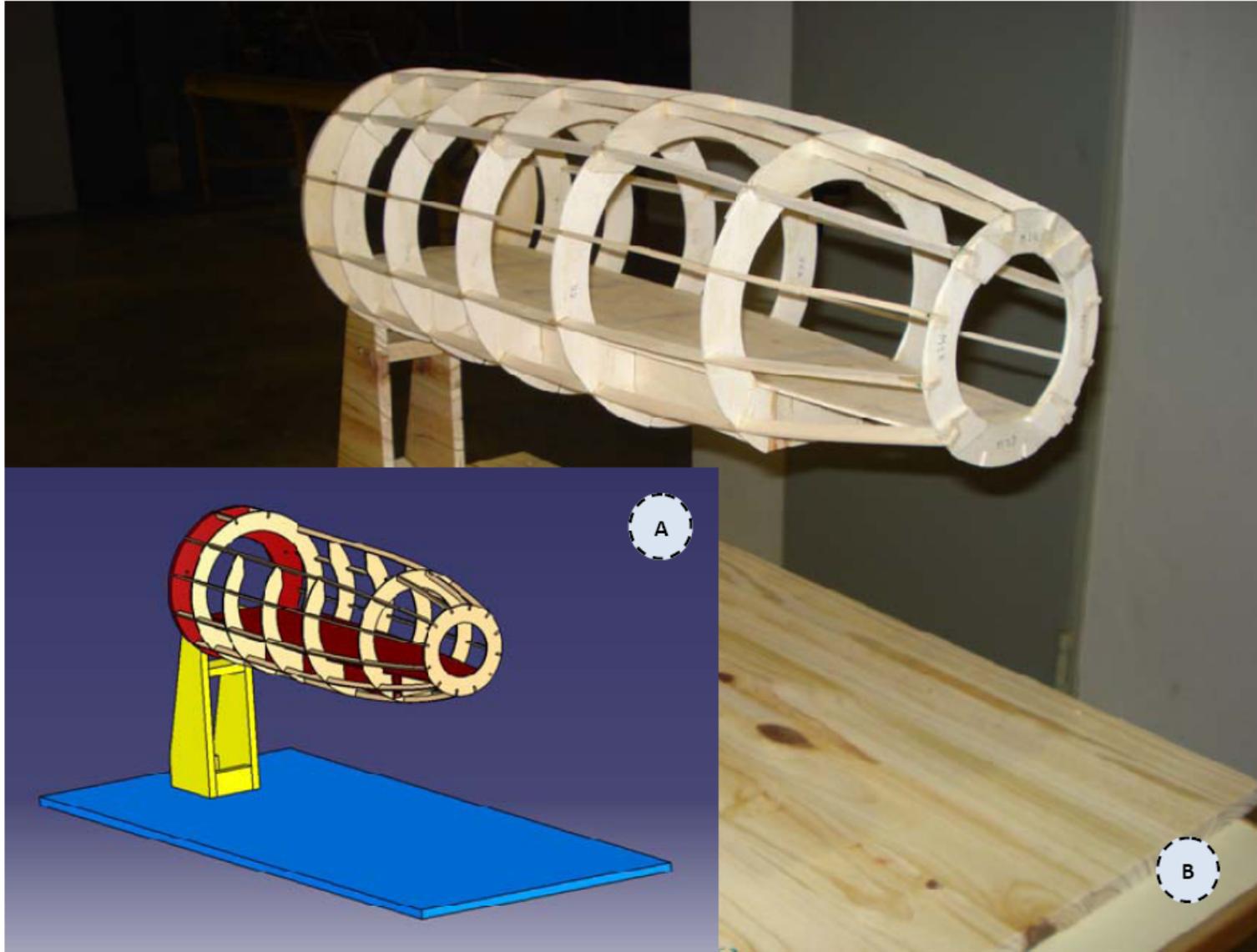


Ala



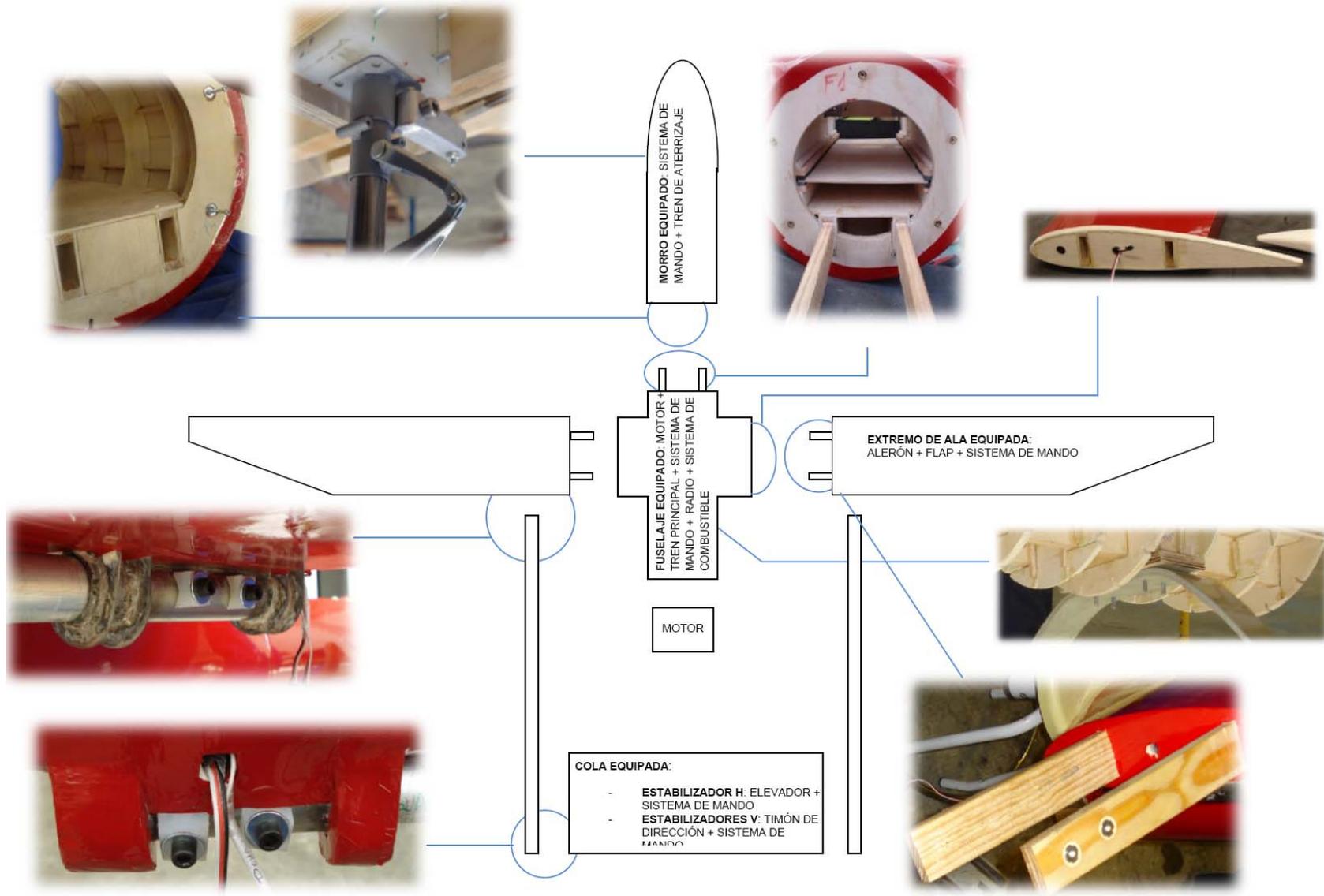
Técnicas de Construcción - IV

Sección de Morro



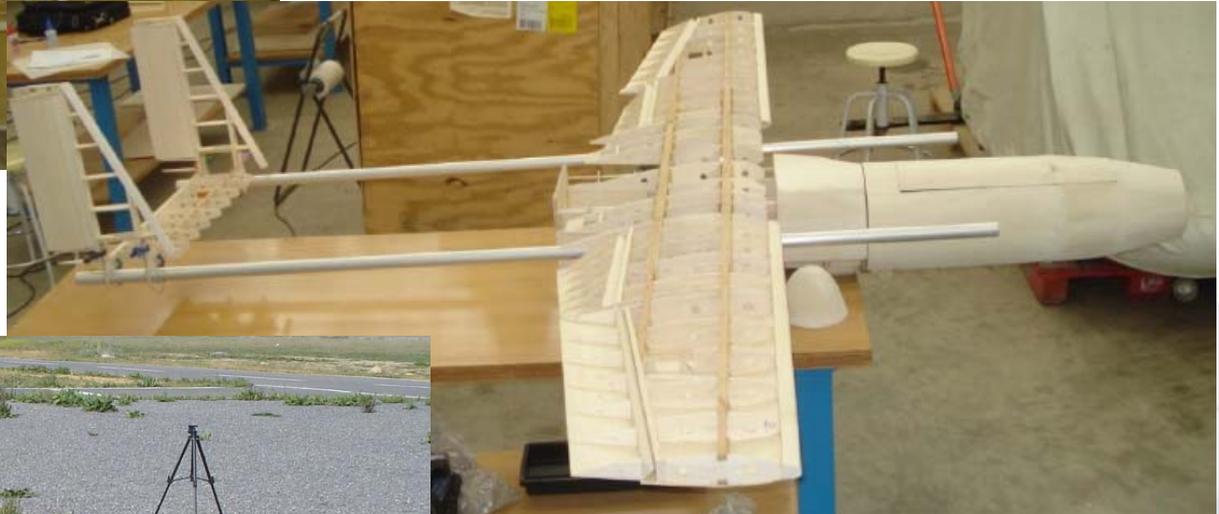


Técnicas de Construcción - V





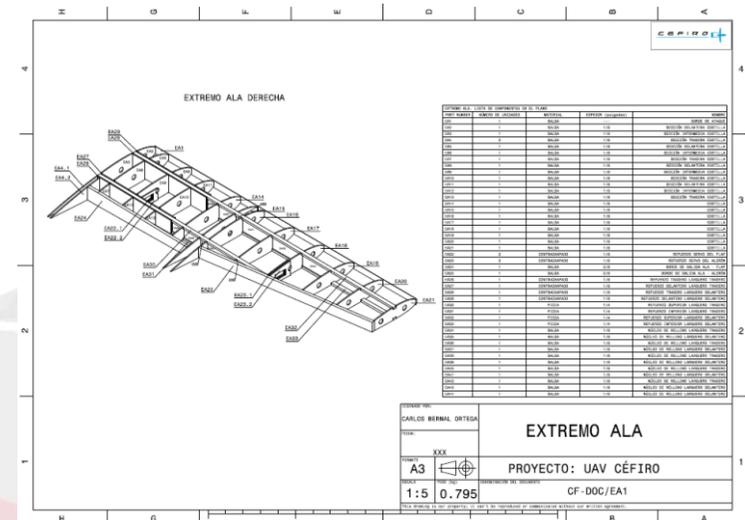
Técnicas de Construcción - VI





Integración de sistemas y pruebas funcionales - I

- Durante la fase de diseño se identificó la importancia de optimizar tanto la construcción como los procesos de fabricación.
- Para llevar a buen término dicha integración se identificó la necesidad de tener una secuencia de construcción e integración de sistemas bien definida. :
 - Organización de partes y métodos.
 - Integración de estructuras.
 - Integración del fuselaje:
 - Sección de morro y fuselaje.
 - Fuselaje-Ala.
 - Ala-cola.
 - Integración del tren de aterrizaje.
 - Integración de los tail-booms.
 - Integración de sistemas:
 - Planta motora y sistemas electrónicos.
 - Metodología de pruebas funcionales:
 - Integración de sistemas propulsores: de bancada de pruebas a la estructura de la aeronave.
 - Pruebas de electrónica: baterías, alcance de emisora de RF, servos.
- Acondicionamiento interior de los sistemas.
- Recubrimiento y finalizado exterior.
- Pruebas de vuelo:
 - Modelado de la planta motora: Estimación de los consumos de combustible y tracción.
 - Vuelo de pruebas y validación del prototipo.

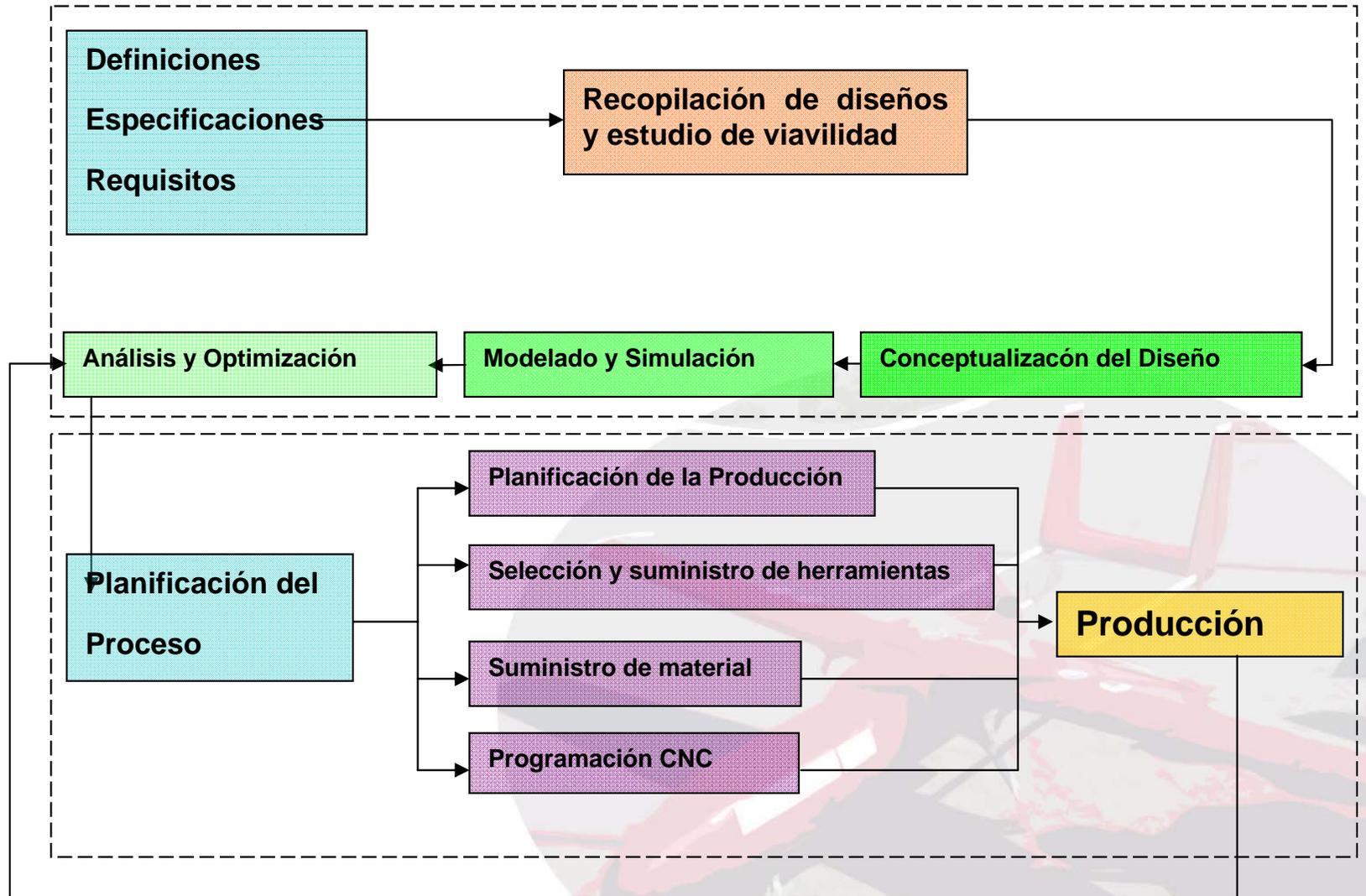




Integración de sistemas y pruebas funcionales - II

Procedimientos desde el Diseño hasta la Producción

Sep 07 – Sep 08
Cálculo de Aviones
& PFC



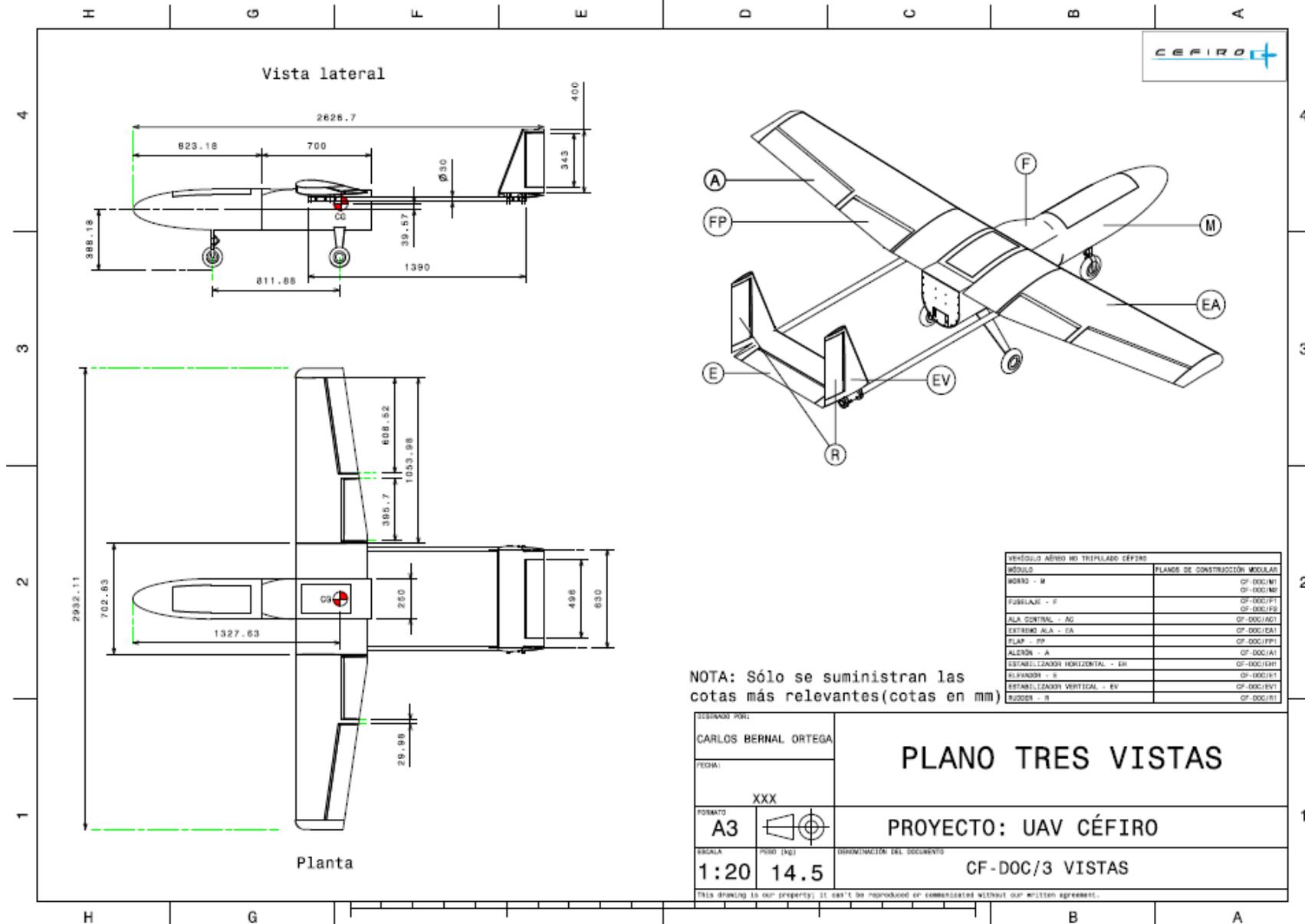
Nov 08 – May 09



Producción I – Plano de Configuración



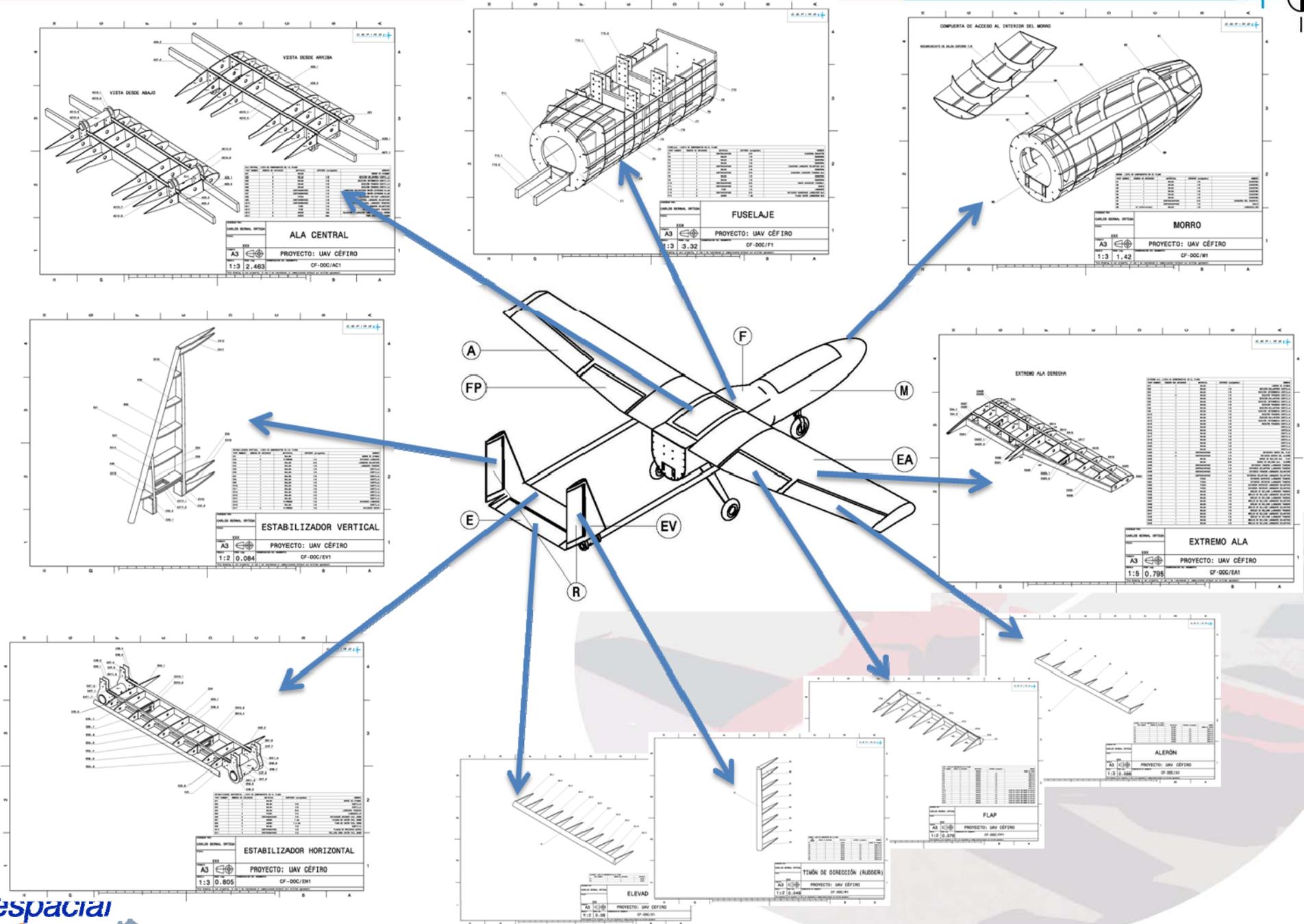
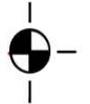
CEFIRO





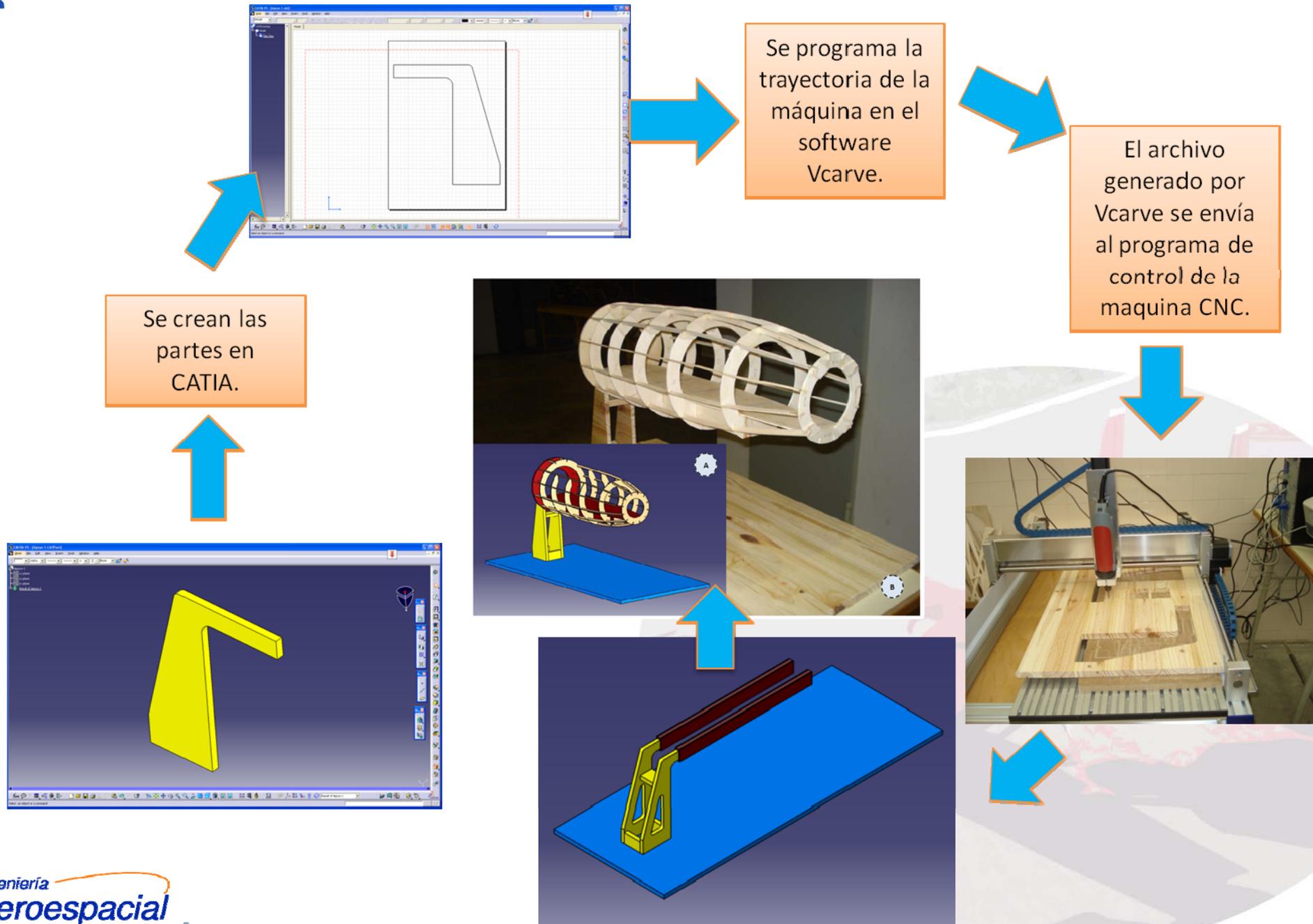
Producción II – Plano de Configuración

CEFIRO



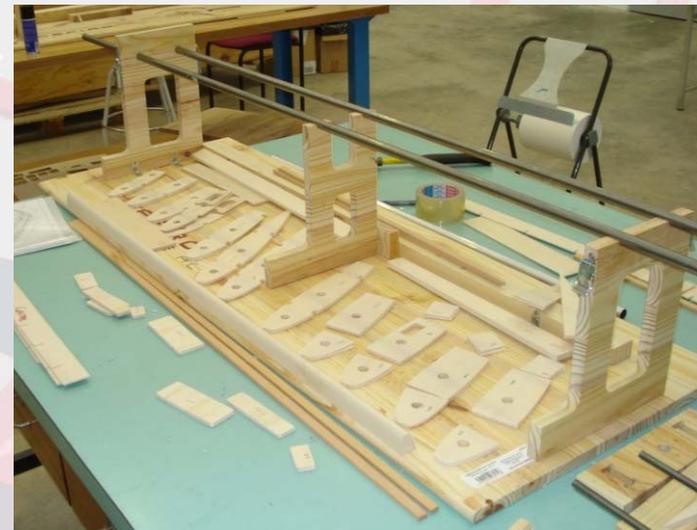
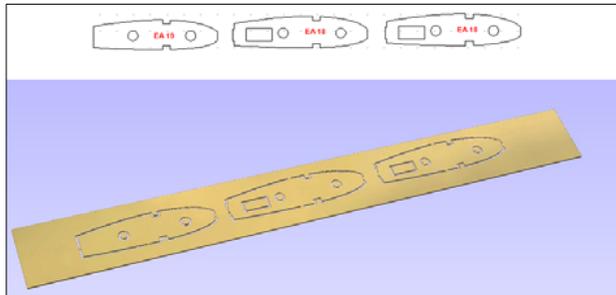
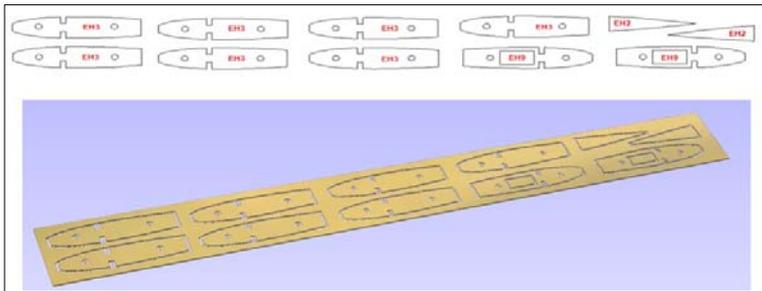


Producción III



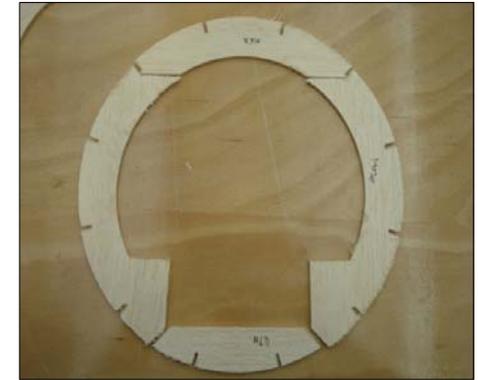
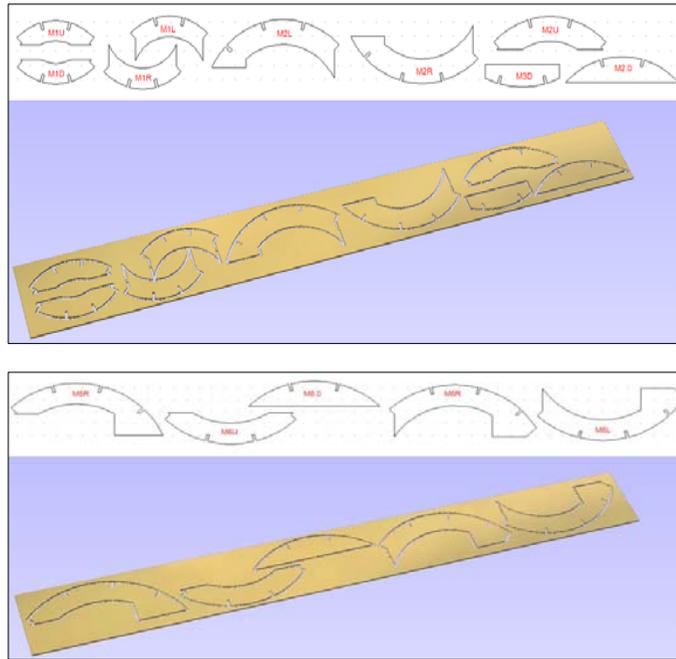


Producción IV





Producción V

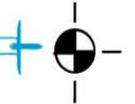




Integración de Sistemas y Pruebas Funcionales



CEFIRO



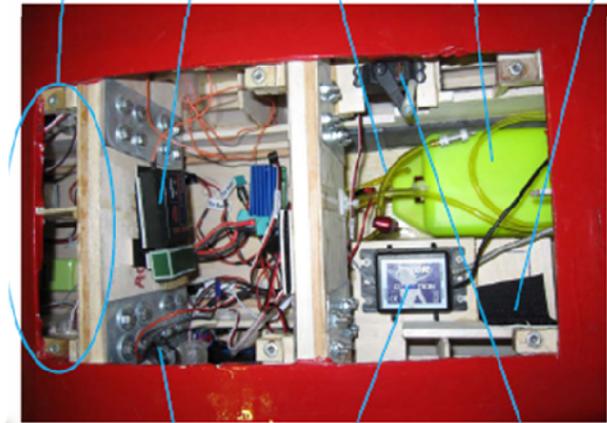
zons en Fig. 6.7.3

Receptor

del combustible

combustible

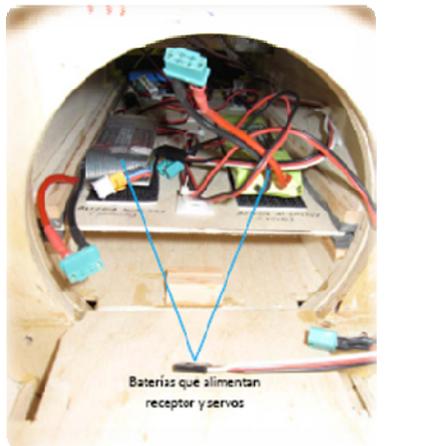
batería mot.



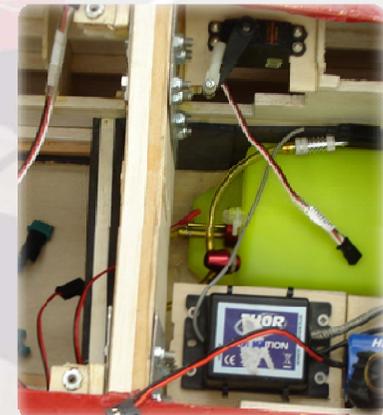
Regulador de voltaje

Sistema de ignición del motor

Servo de accionamiento de la palanca de gases del motor



Baterías que alimentan receptor y servos

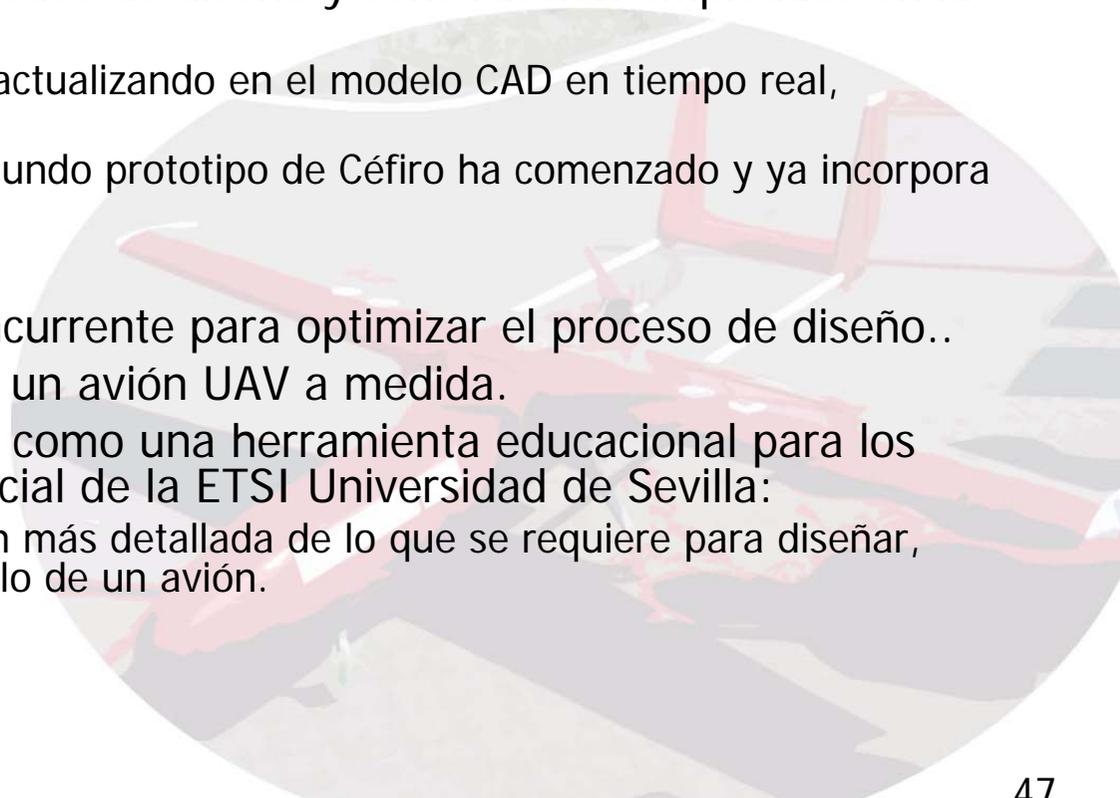




Conclusiones



- El proyecto Céfiro ha resultado ser una una excelente experiencia educativa para los estudiantes.
 - Los estudiantes han sido expuestos a los desafíos asociados con las fases involucradas en el diseño de aeronaves..
- Durante la fase de diseño se identificó la importancia de optimizar tanto los procesos de construcción como los de fabricación lo que supuso un porcentaje importante en el éxito del proyecto. :
 - Utilización extensa de herramientas CAD & CAM.
 - Mejoras importantes sobre los métodos de diseño y construcción empleados en la fase de diseño conceptual..
 - Las mejoras de diseño se han ido actualizando en el modelo CAD en tiempo real, permitiendo su uso inmediato.
 - El proceso de construcción del segundo prototipo de Céfiro ha comenzado y ya incorpora dichas mejoras.
- Se ha demostrado:
 - La importancia de la ingeniería concurrente para optimizar el proceso de diseño..
 - Capacidad para diseñar y construir un avión UAV a medida.
 - El empleo del diseño de aeronaves como una herramienta educativa para los estudiantes de ingeniería aeroespacial de la ETSI Universidad de Sevilla:
 - Proporciona a los alumnos in visión más detallada de lo que se requiere para diseñar, construir y realizar pruebas de vuelo de un avión.

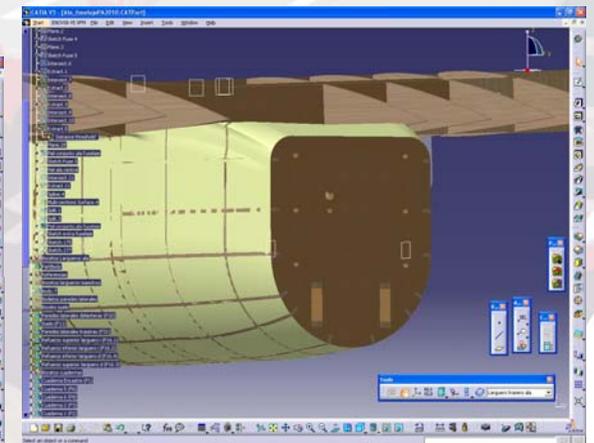
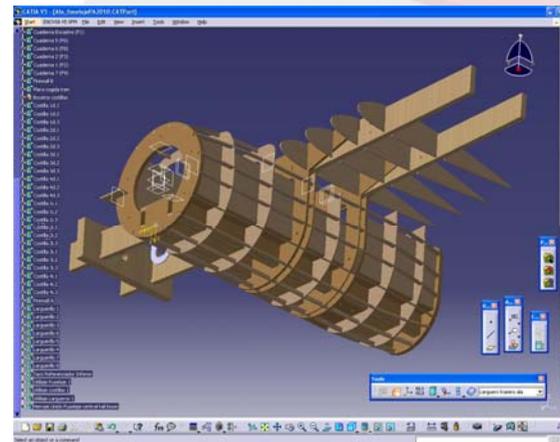
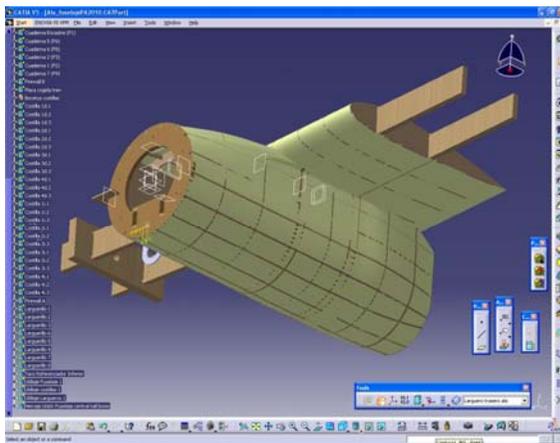




Trabajo Futuro - I



- Extender la experiencia a más estudiantes:
 - Sería deseable el tener el poder disponer de laboratorios más extensos para que el resto de estudiante de ingeniería aeroespacial se nutrieran de experiencias similares.
- Acciones a Corto Plazo:
 - Mejoras en el diseño de Céfiro:
 - Reducciones de pesos.
 - Simplificación de las técnicas de construcción.
 - Implementación progresiva de nuevos materiales.
 - Construcción del 2º prototipo en curso, incluyendo las mejoras propuestas.

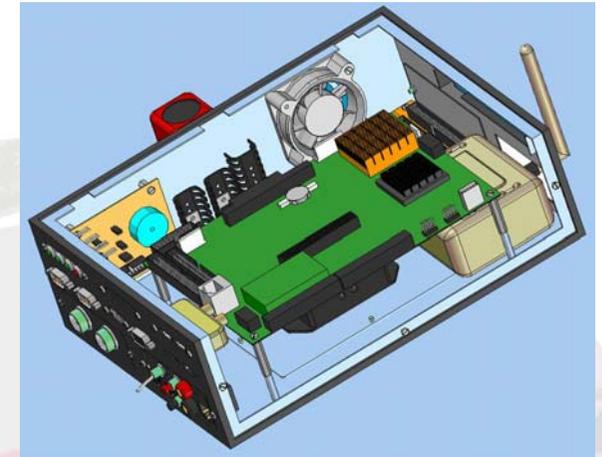




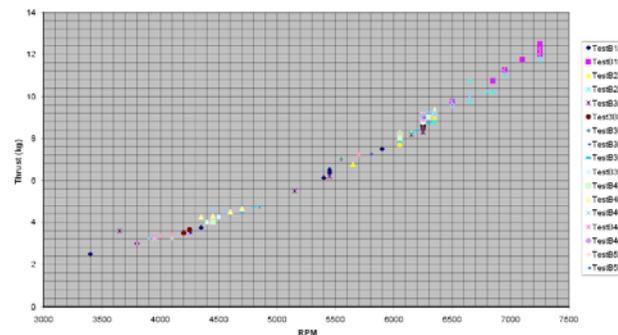
Trabajo Futuro - II



- Acciones a Corto Plazo (cont.):
 - Validación y expansión del modelo de la planta propulsora
- Acciones a Largo Plazo
 - Diseño e implementación y pruebas de los sistemas de aviónica.
 - Sistemas de adquisición de datos.
 - Modelado detallado de la dinámica y actuaciones.
 - Tele-operación via FPV.
 - Vuelo autónomo.



Thrust vs. RPM (rectificado)









Proyecto Céfiro

