



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL: Estudi Aerodinàmic (CFD) d'un UAV

AUTOR: Sara Avila Prieto

DIRECTORA: Adeline de Montlaur

DATA: 6 de juliol de 2006

Títol: Estudi Aerodinàmic (CFD) d'un UAV

Autor: Sara Avila Prieto

Directora: Adeline de Montlaur

Data: 6 de juliol de 2006

Resum

L'objectiu d'aquest treball és fer l'estudi aerodinàmic d'un UAV. Un UAV, Unmanned Aerial Vehicle, és un avió no tripulat que és capaç de fer vols autònomament. Aquesta tecnologia ha tingut molta importància des de fa dècades en l'àmbit militar, però ara se'n comença a treure profit en tasques civils. El principal avantatge dels UAVs és que no tenen restriccions humanes, és a dir, amb ells es pot obtenir informació en missions que resultarien perilloses o dures per a nosaltres. L'UAV que s'estudia en aquest TFC es troba a l'Escola Politècnica Superior de Castelldefels i pertany al grup de recerca ICARUS.

Per realitzar aquest estudi, el primer pas és mesurar totes les peces de l'UAV per després dibuixar-les amb un programa de CAD (Computer Aided Design). Un cop modelat l'avió a l'ordinador, se sotmetrà a una simulació en què un flux d'aire li provocarà l'aparició de les forces aerodinàmiques. Aquestes forces s'estudiaran per a diferents angles d'atac per poder definir el C_L i C_D que caracteritzen l'ala. Per últim, proposarem una modificació de la geometria de l'UAV i estudiarem la millora que aporta a la seva aerodinàmica. Per finalitzar el treball exposarem els resultats i en traurem conclusions.

El software que s'utilitza per a aquest estudi és el conjunt Gambit i Fluent. Modelarem la geometria de l'UAV i la seva malla amb el Gambit. I les simulacions sobre el comportament que tindrà aquest avió en vol les obtindrem amb el programa Fluent, que utilitza el mètode dels elements finits.

Title: Aerodynamic study (CFD) of a UAV

Author: Sara Avila Prieto

Director: Adeline de Montlaur

Date: July, 6th 2006

Overview

The purpose of this project is the aerodynamic study of a UAV (Unmanned Aerial Vehicle). A UAV is a plane that doesn't need any crew and that is able of doing autonomous flights. This technology has been used in the military field since the 1920s, but now its civil applications are more and more important. The main advantage of a UAV is the lack of human limitations, that is, they can obtain information in dangerous or dirty situations. The UAV that is studied in this TFC is used in the EPSC, Escola Politècnica Superior de Castelldefels, by the research group ICARUS.

To make this study, the first thing consists in measuring each part of the UAV and drawing them using a CAD software (Computer Aided Design). Once the model has been designed, a CFD program (Computational Fluid Dynamics) is used to simulate the air flow around the UAV and to study the aerodynamic forces generated. These forces will be studied for different angles of attack to obtain the lift and drag coefficients (C_L and C_D) of the airfoil. Eventually the geometry of the UAV is modified to improve its aerodynamics. In the last part the results and conclusions are exposed.

The software used for this research is Gambit-Fluent. The UAV and its mesh are modeled with Gambit. And the behavior of that plane in flight is simulated with Fluent, which use the finite elements method.

ÍNDEX

INTRODUCCIÓ	1
CAPÍTOL 1. CONCEPTES GENERALS	2
1.1. UAVs	2
1.1.1. Aplicacions.....	3
1.1.2. Elements.....	4
1.1.3. Integració dels UAVs a l'espai aeri.....	5
1.1.4. Exemplars.....	6
1.1.5. Grup ICARUS	8
1.2. Aerodinàmica.....	10
1.2.1. Forces aerodinàmiques	11
1.2.1.1. Sustentació	13
1.2.1.2. Resistència aerodinàmica	14
1.2.2. Eficiència aerodinàmica.....	17
1.2.3. Fluxes laminars i turbulents.....	18
1.3. Gambit i Fluent.....	19
1.3.1. Mètode dels elements finits.....	20
1.4. Objectius del treball	21
1.4.1. Modelar en CAD l'UAV	21
1.4.2. Obtenir les forces aerodinàmiques de l'UAV	21
1.4.3. Optimitzar la geometria.....	21
CAPÍTOL 2. DISSENY DE L'UAV	22
2.1. Mesures	22
2.2. Model en CAD	22
2.3. Malla.....	24
2.4. Hipòtesis.....	25
CAPÍTOL 3. SIMULACIÓ I RESULTATS	27
3.1. Visualitzacions.....	27
3.1.1. Angle d'atac 0°.....	27
3.1.2. Angle d'atac 4°.....	28
3.1.3. Angle d'atac 8°.....	29
3.1.4. Angle d'atac 12°.....	31
3.1.5. Angle d'atac16°.....	32
3.1.6. Angle d'atac 20°.....	33
3.1.7. Anàlisi de les visualitzacions	35

3.2. Gràfics i taules	36
3.3. Optimització	38
Conclusions	43
Bibliografia.....	44

INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest Treball Final de Carrera és realitzar l'estudi aerodinàmic d'un UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Un UAV és un avió que no necessita tripulació per fer els vols, sinó que els efectua autònomament. A l'Escola Politècnica Superior de Castelldefels hi ha un exemplar que pertany al grup de recerca ICARUS, i aquest precisament el model del qual s'extrauran les característiques aerodinàmiques.

Per la gent aliena al món de l'aeronàutica, la paraula UAV pot no resultar familiar. Uns aparells que s'hi assemblen i que són més coneguts, sobretot pel seu ús en l'oci, són els avions pilotats per control remot. Però els UAVs no són controlats remotament, sí que se'ls pot enviar ordres des d'una estació de control de terra, però els vols els realitzen per ells mateixos gràcies a uns sistemes de navegació, a uns sistemes de guiatge automàtic, a uns sistemes de sensors i a uns sistemes de comunicacions, entre d'altres. La tecnologia dels UAV ja ha estat aprofitada des de fa molts anys en l'àmbit militar, però la seva flexibilitat, baix cost i el fet de no suposar riscos per les persones, han fet i faran que esdevinguin una eina molt important per realitzar missions civils perilloses o feixugues. Alguns dels camps d'aplicació són la cartografia, el manteniment de les línies d'alta tensió, la vigilància aèria, la cerca i rescat de persones, etc.

Cal destacar l'útils que poden ser els UAVs per a les tasques mediambientals. La seva ajuda en l'extinció d'incendis és vital, ja que les persones no poden acostar-se a les zones de fum i quan arriba la nit s'ha d'aturar la lliuta contra el foc. En canvi, amb els avions no tripulats no hi ha risc per a cap ésser humà. Altres exemples, són l'observació i control d'espècies animals en perill d'extinció i la mesura de la polució.

El càlcul de les forces aerodinàmiques generades en el nostre UAV és necessari per introduir-les com a dades en els sistemes de control i en el pilot automàtic. Els estudis aerodinàmics es poden realitzar mitjançant experiments amb túnels de vent o fent ús de la simulació numèrica. En aquest treball se sotmet la geometria de l'UAV a simulacions numèriques que utilitzen el mètode dels elements finits i que realitzarem amb el programa Fluent. Les simulacions són una eina imprescindible en el món de l'enginyeria pel seu baix cost, per la rapidesa amb la que es poden resoldre o estudiar problemes, per la seva facilitat d'ús, etc.

En el capítol 1 del treball s'exposen els conceptes bàsics amb què cal estar familiaritzat per entendre les anàlisis i comentaris que es s'exposen més endavant. Els conceptes bàsics engloben el món dels UAVs, les bases de l'aerodinàmica, el software utilitzat i els objectius del treball. En el segon capítol es detalla el procés de creació del model de l'UAV: les primeres mesures, el seu disseny en CAD (Computer Aided Design) i la seva introducció al programa de simulació. I per últim, en el tercer capítol es mostren les visualitzacions, càlculs i resultats obtinguts amb el Fluent. Apart, per arrodonir l'estudi es proposa un canvi en la geometria de l'avió i s'estudia la millora que ofereix.

CAPÍTOL 1. CONCEPTES GENERALS

1.1 ELS UAVS

Els UAVs, Unmanned Aerial Vehicles, són avions operats sense tripulants de vol a bord, és a dir, són capaços de fer vols autònoms. Poden prescindir de pilot gràcies a un bon disseny aviònic que combina sensors, GPS, servomecanismes, tolerància a fallades i una CPU. No els hem de confondre amb un altre tipus d'avions no tripulats, els controlats remotament, més coneguts pel seu ús en l'oci.

Actualment existeixen molts tipus d'UAVs. El seu tamany pot variar des de poder-se agafar amb una mà fins a haver-se d'operar en una pista d'enlairament, de tenir una envergadura com la d'un Boeing 737 o ser tan petits com un model radiocontrolat. També es poden diferenciar en el pes del payload que són capaços de portar (d'uns grams a 2.000 kg), en el seu volum, en el tipus de missió (altitud, abast, durada), i en el seu comandament, control i adquisició de dades.

L'avantatge més gran dels UAVs és que no estan lligats a límits i restriccions humanes, i fan possible l'obtenció d'informació en missions perilloses, avorrides o feixugues.

La primera classificació que es pot fer dels avions no tripulats és segons l'àmbit, civil o militar. L'ús militar ha estat molt més important durant molt temps, el que és més, els avions no tripulats es van començar a utilitzar a la guerra. Ara se n'està treient profit per a tasques civils que poden ser molt útils o que tenen risc pels pilots.

- **Ús militar**

Els primers avions d'aquest tipus es van desenvolupar després de la 1a Guerra Mundial, on els Estats Units d'Amèrica els van utilitzar per a tasques de reconeixement on el vol tripulat era massa perillós. Durant la 2a Guerra Mundial es van utilitzar per entrenar a tiradors anti-avions.

L'interès en els UAVs va anar creixent per la possibilitat que oferien d'avions de lluita barats i sense risc per les tripulacions. Les generacions inicials van ser de vigilància, però alguns dels avions aviat van ser equipats amb armes, com ara el RQ-1 Predator, que va ser equipat amb missils aire-terra. Els avions de lluita no tripulats són coneguts comUCAV, Unmanned Combat Air Vehicle.

D'especial interès són el Global Hawk, construït per Northrop Grumman, el Predator, de General Atomics i el Cypher, de Sikorsky.

- **Ús civil**

L'ús civil dels UAVs està emergent just ara. Es projecta el seu ús per operacions de vol perilloses, on les conseqüències i els riscos desaconsellen les aeronaus habituals. L'ús dels UAVs per a aquestes missions ofereix molts avantatges perquè el risc per a la tripulació es redueix al màxim i el seu cost de construcció, operació i manteniment són molt baixos, comparativament.

Els avions no tripulats també es poden classificar segons el seu abast, i així obtenim les següents categories:

- **Close o Local Range:** dins d'un abast de 50 km.
- **Short o Regional Range:** dins d'un abast de 200 km.
- **Endurance:** qualsevol regió de més enllà d'aquests límits.

1.1.1. APLICACIONS

Els UAVs són uns aparells molt flexibles i poden ser usats per una gran varietat de propòsits que res tenen a veure amb la guerra i amb matar.

La lluita contra els incendis forestals és un exemple clar de la rellevància dels UAVs. Se'ls pot programar des de tasques de vigilància activa en horaris nocturns fins a possibles intervencions en cas de foc en condicions adverses i perilloses per la vida dels pilots.

Amb l'observació de volcans en situació de risc d'erupció els UAVs poden, tot i haver-hi altíssimes temperatures i presència de gasos tòxics, aportar informació de predicció molt útil per salvar vides humanes.

També es poden utilitzar pel control de fronteres en zones remotes o en línies de costa. Això permetrà millorar la vigilància per combatre el contraband de drogues o immigrants il·legals.

Serien de gran ajuda en el manteniment de grans infraestructures terrestres, com les línies elèctriques d'alta tensió, que tenen un alt valor comercial i estratègic i estan exposades a efectes atmosfèrics que poden degradar el seu funcionament. L'observació amb sensors de temperatura pot anticipar els riscos i avaries, sense necessitat d'exposar vides humanes de pilots a camps magnètics i a altes tensions. El mateix per a oleoductes de petroli, gaseductes o qualsevol obra de grans tuberies de transport d'energia.

En grans plantacions agrícoles s'estan utilitzant extensament avionetes de fumigació i control de plagues. Pe fer-ho, realitzen vols rasants de risc considerable i l'ús de pesticides químics no adequats per la salut. Per tant l'ús de UAVs pot ser un estalvi en costos i riscos.

Un cas particular és l'observació i control d'espècies animals directament amb càmeres de vídeo. Es poden detectar migracions d'aus amb possibles focus de

grip aviar o el seguiment d'animals en vies d'extinció o les possibles actuacions de caçadors furtius.

Un altre possible ús civil està en el desenvolupament de nous sistemes de comunicacions utilitzant els UAVs com a estacions repetidores de llarg abast.

Els UAVs també representen una nova tecnologia que pot contribuir en l'observació de tempestes i llamps. S'està duent a terme un experiment de camp a les rodalies del NASA Kennedy Space Center per investigar l'activitat dels llamps i la seva relació amb la morfologia de les tempestes. S'ha escollit l'avió no tripulat ALTUS II, produït per General Atomic Aeronautical Systems i el seu payload inclou sensors elèctrics, magnètics i òptics.

Una altra activitat és l'entrega de correu a llocs susceptibles com fronteres, ports o plantes d'energia; o llocs remots com les zones polars, desertes o torres de perforació lluny de la costa.

Pel que fa a contaminació, un programa de la NASA ha produït UAVs civils per monitoritzar la pol·lució i mesurar els nivells d'ozó. I el Departament d'Energia dels EUA està desenvolupant UAVs equipats amb sensors de radiació per detectar accidents potencials als reactors nuclears.

Apart de tots aquests exemples, els UAVs també operen en molts ambients més, com: recerca atmosfèrica, recerca científica, recerca oceanogràfica, recerca geofísica, exploració mineral, vigilància policial, monitoreig de desastres i emergències, cartografia i mapes, cerca i rescat, fotografies aèries, publicitat i promoció, experiments de vol... En funció de la utilitat que tinguin disposaran de diferents sistemes de sensors (càmeres de vídeo, infrarroigs, termòmetres).

En definitiva, els UAVs poden realitzar moltes de les típiques tasques que acostumen a fer els satèl·lits, però amb un cost molt inferior. Sobretot pel que fa al llançament, en el cas dels satèl·lits és una operació molt delicada i cara, però en el cas dels UAVs només calen pistes d'enlairament.

1.1.2. ELEMENTS

Apart dels sensors, els components aviònics d'una nau no tripulada són principalment el sistema de control de vol, que es el que proveeix d'autonomia a l'aparell i els sistemes de comunicació amb estacions a terra.

Els elements clau de la plataforma UAV són:

- **Fusellatge i motor.** El fusellatge ha de ser suficientment gran com per albergar tots els sistemes i capacitat elèctrica per alimentar-los durant el temps precís; el motor ha de ser suficientment veloç per desplaçar-se a les zones d'operació de forma acceptable i capaç de romandre en operació durant el temps desitjat.

- **El sistema de guiatge automàtic o Flight Computer System.** El FCS és el cor dels UAVs. Aquests sistemes són capaços d'operar els UAVs de forma totalment autònoma una vegada s'ha definit un pla de vol.
- **El sistema de control de payload,** ha de ser capaç de controlar l'operació dels diferents sensors (càmeres, instruments, etc) que composin el payload. Entre altres elements, s'ha de gestionar la direccionalitat de les càmeres, l'emmagatzematge de la informació fins la seva transmissió a l'estació de processat de dades, l'encesa o apagat dels sensors, etc. Aquest sistema necessita treballar amb el mòdul de comunicacions del UAV, així com amb el FCS per conèixer a cada moment l'actitud del UAV i operar els sensors en concordància.
- **Plataformes d'observació.** Són el suport sobre el qual se situen la major part dels sensors embarcats en l'UAV. Aquesta plataforma ha de permetre orientar els sensors fins la zona d'interès garantint una correcta focalització de les imatges.
- **Sistemes sensors requerits per medicions atmosfèriques i mediambientals:** són els que en realitat han de dur a terme la missió, és a dir, transmetre imatges a temps real. Aquests sensors inclouran l'evaluació de càmeres de video CCD o CMOS, càmeres d'infrarroigs, escàners termals, etc.
- **Sistemes de transmissió/recepció de dades.** Tenen dues funcions principals: mantenir el contacte operatiu entre l'estació base i la plataforma UAV i permetre la transferència de dades i imatges des de l'UAV a l'estació de processat de dades a temps real.

1.1.3. INTEGRACIÓ DELS UAVS A L'ESPAI AERI

L'ús civil dels UAVs en qualsevol país exigeix que les aeronaus compleixin els requisits per les regles de vol visual (VFR) i instrumental (IFR). Aquests requisits inclouen que l'aeronau garanteixi un nivell de seguretat igual o superior a l'aconseguit en aeronaus tripulades.

Existeixen diverses tecnologies que s'apliquen per evitar o detectar el risc de col·lisió d'aeronaus en vol, entre els que destaquen el Traffic Alert and Avoidance System i el VHF Data Link mode 4. Aquests sistemes només s'apliquen a aeronaus cooperatives, es a dir, aquelles que utilitzen algun tipus de transponder per informar de la seva posició. No ofereix cap tipus de protecció contra aeronaus que no estiguin equipades amb aquests sistemes i evidentment, en un espai aeri obert a tot tipus d'aeronaus, podem trobar-nos algunes que no disposin d'ells. Per això, en alguns UAVs s'ha optat per instal·lar un sistema de *sense and avoid*, que és el procés d'intentar detectar obstacles en la trajectòria del vehicle, i determinar si són una amenaça per a la integritat de l'aeronau.

El futur desenvolupament de la tecnologia UAV requereix, per tant, la definició de metodologies i sistemes avionics que permetin la correcta integració de l'operació autònoma dels UAVs amb el control del tràfic aeri i amb la resta d'aeronaus presents en l'espai aeri.

Actualment a Espanya no existeix cap regulació pel vol dels UAVs, amb la qual cosa es fa difícil el desenvolupament d'aquest nou sistema que tants avantatges podria aportar.

1.1.4. EXEMPLARS

Boeing X-45



Fig. 1.1 Boeing x-45 A



Fig. 1.2 Boeing x-45 C

El 1999, Boeing va construir dos X-45A, que corresponen als de la **figura 1.1**, per desenvolupar i provar la tecnologia per a futurs UCAVs per atacs a terra, per vigilància i altres operacions en àrees d'alt risc.

L'X-45A estava equipat amb tren d'aterratge en forma convencional de tricicle i un motor turbofan Honeywell. El seu sistema de navegació estava basat en el GPS i anava equipat amb una bodega per a armes de 680 kg de capacitat.

El primer que se li va instal·lar va ser el sistema d'enlairament i d'aterratge, el sistema de navegació i les comunicacions bàsiques amb l'estació de control de terra. El març de 2004 l'X-45A va llançar una bomba per primera vegada, i a l'agost, els dos X-45A van volar en formació per primera vegada.

Finalment, després de diversos tests, l'UCAV era capaç de detectar i evitar múltiples amenaces simulades, de determinar quin d'entre un grup de blancs havia de ser atacat i de replanejar la missió després de que l'operador canviés les prioritats.

L'X-45A tenia una velocitat màxima de Mach 0.75 (800 km/h), una altitud màxima de 10.000 m i un abast de 920 km.

El prototip operacional final va ser el X-45B. El disseny s'assembla al de l'X-45A però és una mica més gran per aconseguir més payload i més abast. Aquest prototip va ser substituït per un X-45C (**figura 1.2**) encara més gran amb un payload de 2040 kg, una velocitat màxima de Mach 0.85 (900 km/h), una altitud màxima de 12.200 m i abast de 2.400 km.

RQ-1 Predator

El RQ-1 Predator (**figura 1.3**) és un UAV de mitja alçada i de gran abast. És un sistema, no només un avió, perquè l'equip complet consta de 4 naus amb sensors, una estació de control de terra (GCS), un satèl·lit primari i 55 persones per operacions contínues les 24 hores.

La seva funció principal és la vigilància, el reconeixement i la detecció de blancs. La seva velocitat en creuer pot arribar als Mach 0.12 (130 km/h), té un abast de més de 740 km i una altitud màxima de 7.620 m. Té un payload de 204 Kg i inclou sensors electro-òptics d'infraroigs tant per dia com per nit i un SAR (Synthetic Aperture Radar).



Fig. 1.3 RQ-1 Predator



Fig. 1.4 RQ-3A Darkstar

RQ-3A Darkstar

El Darkstar (Tier III Minus) va ser dissenyat per proveir vigilància contínua a temps real i en totes les condicions atmosfèriques. És un UAV de gran alçada i de gran abast optimitzat pel reconeixement en àrees molt defensades. És capaç de realitzar enlairament, vol i recuperació autònomament, i també de replanejar les seves tasques en vol. Està equipat amb radars difícils d'interceptar i el seu payload és de 450 kg. Té un abast de 930 km, una altitud màxima de 14.000 m i una velocitat de Mach 0.4 (460km/h). Se'n pot observar un exemplar a la **figura 1.4**.

1.1.5 GRUP ICARUS

ICARUS, Intelligent Communications and Avionics for Robust Unmanned (Aerial) Systems és un grup de recerca de la Escola Politècnica Superior de Castelldefels (UPC) que és multidisciplinar, ja que està constituït per enginyers d'informàtica, telecomunicacions i aeronàutica. Tenint en compte que a l'escola s'imparteix des de fa 3 anys la titulació d'aeronàutica, un màster d'investigació aeronàutica, i que hi ha el CRAE, Centre de Recerca per l'Aeronàutica i l'espai, el grup ICARUS ha orientat la seva investigació cap als UAVs.

El grup col·labora amb empreses i institucions del territori i de l'estat: CTAE (Centre Tecnològic per l'Aeronàutica i l'Espai), l'Institut de Geomàtica, l'INTA, UAV Navigation, etc... totes elles implicades en el desenvolupament dels vehicles aeris no tripulats per activitats civils i militars.

A més, el grup està participant en el projecte Platino (Plataforma Ligera Aèrea de Tecnologies Innovadoras), liderat per INTA. Aquest projecte vol desenvolupar varies tècniques de caràcter innovador en el sector aeronàutic i específicament en el sector dels avions no tripulats. L'UPC hi participa amb tecnologies de sistemes de control de vol i, a través del CTAE, participa en l'apartat de control o guiatge de la navegació.

L'objectiu fonamental d'aquest grup és el desenvolupament tecnològic dels UAVs per aconseguir la seva aplicació pràctica en l'espai aeri civil. S'està treballant en tres àmbits diferenciats:

a. Sistemes avionics pel control intel·ligent de missió i payload.

És a dir, s'estan desenvolupant arquitectures hardware/software que controlen les operacions científiques, i s'incideix de forma especial en els conceptes de cost, flexibilitat i interoperabilitat.

b. Estratègies per la planificació de plans de vol basats en GPS.

La navegació aèria convencional es poc flexible i ineficient. Consisteix en què les aeronaus segueixin aerovies sobrevolant un conjunt de radioajudes instal·lades al llarg del territori, i la vigilància aèria consisteix en radars primaris i secundaris. Actualment els plans de vol estan basats en aquest tipus de navegació, per això el grup ICARUS està treballant en els basats en el GPS, que ofereixen diverses millores.

Els nous sistemes de navegació per satèl·lit o GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tindran un paper molt important en el futur. Permetran volar rutes més directes i eficients, facilitaran la navegació aèria en zones on fins ara era complicat i milloraran la gestió del tràfic aeri en general. I pel que fa a la vigilància, el sistema de vigilància dependent automàtica (ADS, Automàtic Dependent Surveillance) millorarà la seguretat dels vols i facilitarà la vigilància en zones on no hi ha cobertura radar. Aquest sistema consisteix en enviar la posició de l'aeronau als diferents centres de control i a les aeronaus que estan volant a la mateixa zona.

c. Arquitectures per la integració a l'espai aeri civil.

Els mètodes actuals operatius de l'ATS (Air Traffic System) centren tota la responsabilitat del control del tràfic aeri al Air Traffic Controller i, per tant, és una operativa que es realitza per complet de forma manual i que comporta congestions i col·lapses en quant a volum d'operacions aèries acceptades. Aquest és un factor que limita la integració en l'espai aeri dels sistemes UAV, i aquest grup n'està trobant solucions.

Actualment, el grup ICARUS, vol instal·lar en el fusellatge d'un model d'avió els sistemes aviónics que el mateix grup ha dissenyat.

1.2. AERODINÀMICA

En aquest treball es realitza l'estudi aerodinàmic d'un UAV. Per tant, és necessari conèixer i entendre bé la base de l'aerodinàmica.

Aerodinàmica prové de dues paraules gregues: *aerios*, que significa aire, i *dynamis*, que significa força. Per tant, l'aerodinàmica és l'estudi de les forces i els moviments que resulten en els objectes que travessen l'aire. La definició exacta és: branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen en els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i el fluid que els rodeja. Té efectes tant en un avió comercial, com en un coet, com en una pilota de baseball, com en un parapent. I per a l'ús eficient de tots aquests objectes és necessari un estudi aerodinàmic.

Es diu que un cos té un bon comportament aerodinàmic quan la seva geometria ofereix una resistència mínima a l'avanç i l'aire que l'envolta no es torna molt turbulent.

S'han establert diverses classificacions dels problemes aerodinàmics. Segons la naturalesa del fluid podem trobar:

- problemes d'aerodinàmica **incompressible**, en què la velocitat del vent relatiu és menor que $0.3M$ (M = número de Mach = velocitat del so = 340 m/s)
- problemes d'aerodinàmica **compressible**, en què la velocitat és major que $0.3M$.

També podem trobar aerodinàmica externa i interna:

- L'aerodinàmica **externa** és l'estudi del flux al voltant d'objectes amb diferents formes. L'avaluació de la sustentació i la resistència en un avió i l'estudi de les ones de xoc que es formen al nas d'un coet, en són exemples.
- L'aerodinàmica **interna**, en canvi, és l'estudi del flux a través de passatges o canonades en objectes sòlids. Com a exemple tenim l'estudi del flux d'aire a través d'una turbina o a través d'una canonada de l'aire condicionat.

Per últim, els problemes aerodinàmics es poden classificar segons el número de Mach:

- **Subsònic:** la velocitat del flux del problema que estem estudiant és sempre menor que la del so, $M < 1$. Els UAVs, les avionetes i els avions comercials realitzen vols subsònics.
- **Transsònic:** els valors que pren la velocitat estan al voltant de la velocitat del so, $M = 1$.
- **Supersònic:** quan la velocitat del flux sempre és major que la velocitat del so, $M > 1$. El Concorde i els avions de combat són exemples d'aparells supersònics.

- **Hipersònic:** quan la velocitat és molt més gran que la del so, aproximadament $M > 6$. Els transbordadors espacials realitzen vols hipersònics.

Segons la viscositat ens podem trobar amb fluxos **viscosos** o **no viscosos**. Recordem que un fluid viscos és el que ofereix resistència en avançar per una superfície.

En la solució d'un problema aerodinàmic normalment és necessari el càlcul de varies propietats del fluid, com la velocitat, la pressió, la densitat i la temperatura, en funció del punt estudiat i del temps. Modelitzant el camp de fluid és possible calcular (en quasi tots els casos de manera aproximada) les forces i moments que actuen sobre els cossos submergits en aquest fluid. Per la complexitat dels fenòmens que es produeixen i de les equacions que s'hi descriuen, són molt útils els assajos pràctics (per exemple en túnels de vent) i les simulacions numèriques, eina que utilitzem en aquest treball.

1.2.1. FORCES AERODINÀMIQUES

Les forces que actuen sobre una aeronau en vol són la tracció, exercida pel motor, el pes, que és degut a la gravetat, la resistència i la sustentació (**figura 1.5**). Aquestes dues darreres són les forces aerodinàmiques, i apareixen en un cos pel fet de moure's a través de l'aire.



Fig. 1.5 Les 4 forces que actuen sobre una aeronau en vol

La resistència i la sustentació són, en realitat, les dues components de l'anomenada **força aerodinàmica**. Aquesta força s'origina gràcies a dos principis físics, l'efecte Venturi i el teorema de Bernoulli.

- **Teorema de Bernoulli:** si una partícula d'aire augmenta la seva velocitat disminuirà la seva pressió, així com si disminueix la seva velocitat augmentarà la seva pressió. És vàlida només si el fluid és incompressible ($v < 0.3M$).

$$\text{pressió} + \text{velocitat} = \text{constant}$$

(1.1)

- **Efecte Venturi:** quan una partícula d'aire pateix un estretament, disminueix la seva pressió i augmenta la seva velocitat.

Així es va demostrar en el conegut tub de Venturi (**figura 1.6**). El cabal d'aire del tub ha de ser igual a l'entrada (1) que a la sortida (2) amb la qual cosa el cabal també ha de ser igual en la part estreta (3). Considerem que l'aire és incompressible, per tant, no es pot comprimir, l'únic que pot fer doncs és augmentar la seva velocitat i, per tant, disminuir la seva pressió.

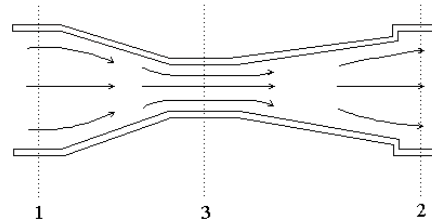


Fig. 1.6 Tub de Venturi

Mitjançant el perfil d'una ala succeeix el mateix, s'obliga a les partícules de l'aire a estretar-se més en la zona de l'extradós que a l'intradós, perquè el primer té més curvatura (**figura 1.7**). Per tant, tenim menys pressió damunt l'ala que sota. Aquesta diferència de pressions entre l'extradós i l'intradós genera la força aerodinàmica, de color vermell a la **figura 1.8**, que té el punt d'aplicació al centre de pressions de l'ala. Les seves dues components són la sustentació (L), que és la component perpendicular al vent, i la resistència (D), que és paral·lela al vent.

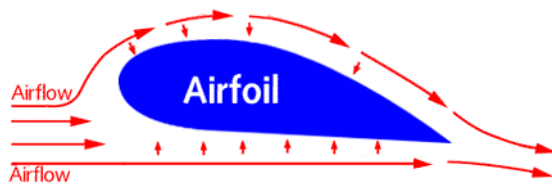


Fig. 1.7 Moviment de l'aire al voltant d'un perfil d'ala.

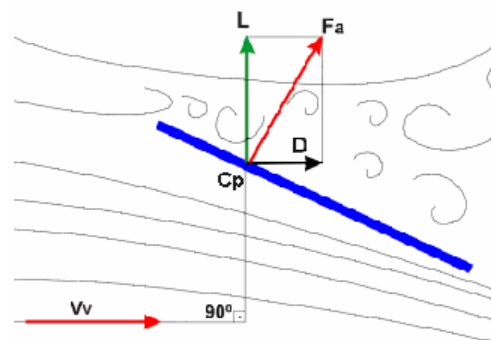


Fig. 1.8 Força aerodinàmica (sustentació + resistència)

La força aerodinàmica i, per tant, la sustentació, depenen molt del tipus de perfil. Aquests es poden classificar en asimètrics, com el de la **figura 1.7**, i simètrics. Els perfils simètrics no produeixen sustentació amb un angle d'atac nul, en canvi, els asimètrics sí.

1.2.1.1 LA SUSTENTACIÓ

La sustentació (L) és la component de la força aerodinàmica que és perpendicular al vent (**figura 1.9**), és a dir, és la força ascensional generada per un cos que es desplaça dins un fluid.



Fig. 1.9 La sustentació és sempre perpendicular al vent relatiu

En aeronàutica, la sustentació és la principal força que permet que una aeronau amb ales es mantingui en vol, contrarestant el seu pes (gravetat) i, com hem vist, la seva generació consisteix bàsicament en fer recórrer a l'aire una distància més gran a la part superior de l'ala que en la seva part inferior.

A la pràctica, s'utilitzen coeficients adimensionals per representar aquestes forces, és a dir, per representar l'efectivitat dels perfils alars. C_L és el coeficient de sustentació, una constant en la que queden definides les característiques d'un cos o perfil alar concret (amb un angle d'atac concret), encara que variï la velocitat del vent relatiu o la densitat de l'aire.

Experimentalment, s'ha trobat que:

$$\frac{L_1}{q_1 \cdot S} = \frac{L_2}{q_2 \cdot S} = C_L = \text{constant} \quad (1.2)$$

on L = sustentació (Newtons), ρ = densitat de l'aire (kg/m^3), v = velocitat del vent relatiu (m/s), S = superfície de l'ala (m^2) i $q = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ (pressió dinàmica, Pa).

A partir d'aquí trobem la fórmula de la sustentació:

$$L = q \cdot S \cdot C_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_L(\alpha) \quad (1.3)$$

Com més alt és el coeficient de sustentació, més sustentació té un perfil. Les altres variables que fan incrementar la sustentació són la velocitat, la superfície alar i l'angle d'atac. El cas de l'angle d'atac és especial, ja que la sustentació augmenta segons augmenta aquest, fins a arribar a un punt màxim després del qual disminueix i desapareix degut a les turbulències (**figura 1.10**). És de gran interès la representació del C_L en funció de l'angle d'atac (α), d'aquesta manera tenim definit totalment cada perfil alar.

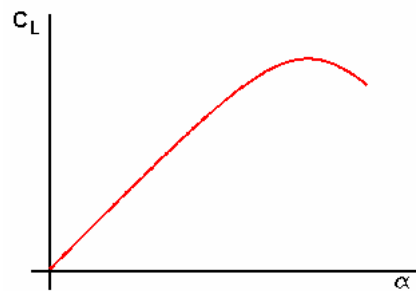


Fig. 1.10 Gràfica del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac

1.2.1.2. LA RESISTÈNCIA AERODINÀMICA

La resistència aerodinàmica també és una força que s'exerceix sobre un cos en moure's a través de l'aire, però en aquest cas és la component de la força aerodinàmica paral·lela a la direcció de la velocitat relativa entre l'aire i el cos (**figura 1.11**). Es diu que és la força que s'oposa al avanç d'un objecte a través de l'aire.



Fig. 1.11 La resistència aerodinàmica és sempre paral·lela al vent relatiu i de sentit oposat al de la trajectòria

Com amb altres forces aerodinàmiques, també s'utilitza un coeficient adimensional, conegut com coeficient aerodinàmic o de resistència, C_D . Els mateixos passos de l'apartat anterior es poden fer per trobar-lo:

Experimentalment, s'ha trobat que:

$$\frac{D_1}{q_1 \cdot S} = \frac{D_2}{q_2 \cdot S} = C_D = \text{constant} \quad (1.4)$$

I el valor de la resistència:

$$D = q \cdot S \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_D(\alpha) \quad (1.5)$$

La resistència aerodinàmica (D) també depèn de la superfície, de la velocitat i de l'angle d'atac.

La resistència total d'un avió en vol es pot descompondre en resistència paràsita, que és la més intuïtiva, i la resistència induïda.

Resistència paràsita

Es denomina així tota resistència que no és funció de la sustentació. És la resistència que ofereix un cos, per la seva geometria, al seu pas a través de l'aire, i és deguda a la fricció. Per exemple, la resistència paràsita d'un camió és molt major que la d'un estel.

Resistència induïda

Aquesta resistència és la induïda per la sustentació que es genera en un cos. Per tant, com a mesura que augmenta l'angle d'atac augmenta la sustentació d'un perfil, la resistència induïda també augmentarà (**figura 1.12**).



Fig. 1.12 Resistència induïda en funció de l'angle d'atac

La fórmula de la resistència induïda és:

$$D_i = \frac{2L^2}{\rho\pi b^2 V^2 e} \quad (1.6)$$

On D_i = Resistència induïda (Newtons), L = Sustentació (Newtons), ρ = Densitat del fluid (kg/m^3), b = Envergadura (m), V = Velocitat (m/s) i e = Factor d'eficiència, que depèn de la forma en planta de l'ala (adimensional)

El coeficient de la resistència induïda és:

$$C_{D_i} = \frac{D_i}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} = \frac{C_L^2}{\pi A e} \quad (1.7)$$

On C_L - Coeficient de sustentació i $A = b/c$ = Allargament de l'ala (b = envergadura i c = corda)

Resistència total

Així doncs, la resistència aerodinàmica total és la suma de la resistència paràsita i la induïda:

$$C_D = C_{D_{\text{parasita}}} + C_{D_{\text{inducida}}} \quad (1.8)$$

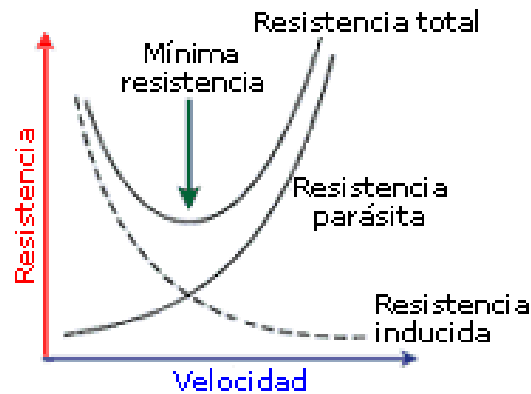


Fig. 1.13 Resistència total, resistència paràsitica i resistència induïda en funció de la velocitat

La resistència paràsitica, generada per la geometria del cos, augmenta segons augmenta la velocitat. En canvi, la resistència induïda per la sustentació disminueix amb la velocitat, alhora que augmenta amb l'angle d'atac (**figura 1.13**).

1.2.2. EFICIÈNCIA AERODINÀMICA

Per definir l'eficiència aerodinàmica d'un cos o ala, s'utilitza un paràmetre adimensional anomenat finesa (f) que relaciona la sustentació amb la resistència aerodinàmica:

$$f = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} \quad (1.9)$$

Per tant, una avió amb una eficiència aerodinàmica elevada serà el que generi molta sustentació alhora que poca resistència. Un planador, per exemple, té una finesa molt bona, ja que li interessa recórrer el màxim de distància sense utilitzar propulsió. En canvi, els avions comercials tenen una finesa més baixa.

1.2.3. FLUXOS LAMINARS I TURBULENTS

La turbulència és un dels grans problemes de la dinàmica de fluids. Es manifesta fàcilment en la vida quotidiana però és molt difícil d'explicar i definir.

Un flux turbulent està caracteritzat per alta convecció i canvis de pressió i velocitat molt ràpids tant en espai com en temps. El moviment de partícules turbulentes és caòtic, desordenat i formant petits remolins aperiòdics. Però també hi ha fluxos laminars, en què les partícules es mouen ordenadament, de manera que el fluid es mou en làmines paral·leles.

Quan un fluid flueix sobre una superfície, degut a la tracció, la capa més propera a la superfície s'atura completament. Damunt d'aquesta capa se'n formen d'altres, cadascuna de les quals té menys fricció que l'anterior i, per tant, més velocitat. Així fins que a partir d'una capa concreta ja no hi ha fricció. El conjunt de capes que va des de la que té velocitat zero fins a la que té velocitat lliure s'anomena capa límit.

Quan la capa límit comença a fluir pel caire d'atac de l'ala ho fa de forma laminar, enganxada a l'ala i molt fina. A mesura que flueix cap al caire de sortida, més o menys pel centre de l'ala, el fluid comença a perdre velocitat degut a la fricció i es va fent capa turbulenta, més separada de l'ala i amb més gruix. El punt en el qual la capa laminar es comença a fer turbulenta s'anomena punt de transició a turbulència. Fins als 8° d'angle d'atac amb prou feines hi ha capa turbulenta (**figura 1.14 (1)**); a partir dels 12° el punt de transició a turbulència comença a desplaçar-se cap al centre de l'ala (**figura 1.14 (2)**); a $16-20^\circ$ la capa turbulenta és molt extensa, l'ala està a punt d'entrar en pèrdua (**figura 1.14 (3 i 4)**).

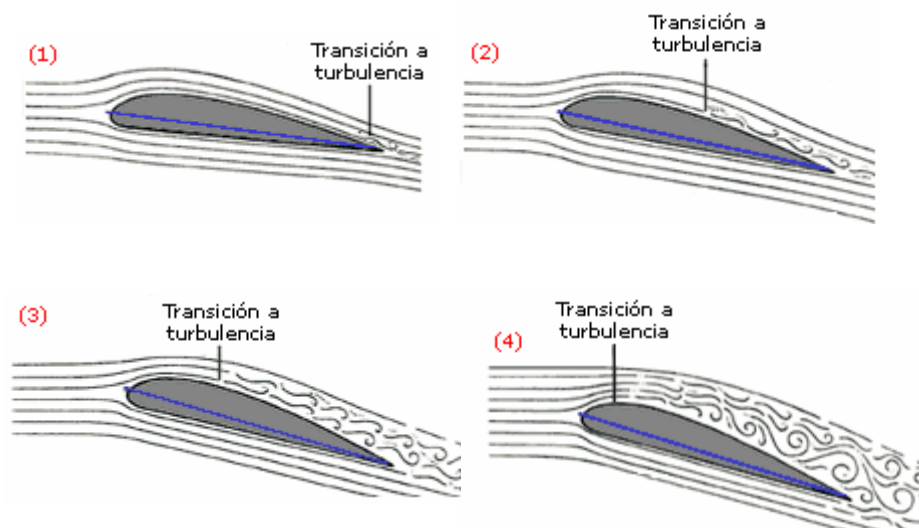


Fig. 1.14 Desplaçament del punt de transició amb l'increment de l'angle d'atac.

1.3. GAMBIT I FLUENT

La simulació numèrica d'aquest treball ha estat realitzada gràcies al programa Fluent. Aquest és un dels proveïdors de software i serveis de CFD (Dinàmica de Fluids Computacional) més importants del món. És un programa que permet a molts enginyers simular processos com la transferència de massa o de calor en un fluid, fenòmens que inclouen fluxos turbulents, multifase, etc. És a dir el CFD converteix l'ordinador en un laboratori virtual.

El Fluent és un programa utilitzat per moltes companyies, empreses i institucions acadèmiques de tot el món, ja que l'anàlisi CFD millora la qualitat dels productes i estalvia diners. Permet crear prototips virtuals d'objectes o processos per entendre millor la seva performance i per millorar el seu disseny.

General Atomics Aeronautical Systems, Inc. és el líder del mercat dels UAVs. Aquesta tecnologia està avançant molt ràpidament i demana cicles de disseny molt curts. Per això aquesta empresa utilitza l'anàlisi amb Fluent CFD (**figura 1.15**).

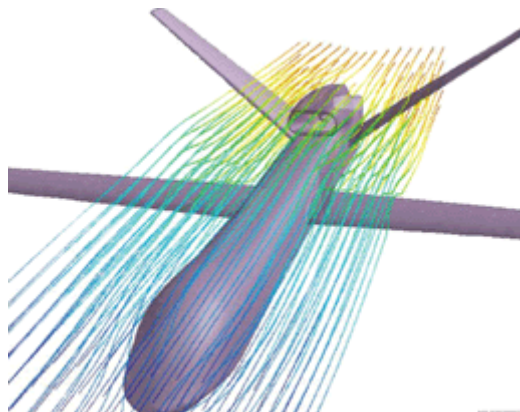


Fig. 1.15. Línies de trajectòria del fluid a les proximitats del fusellatge de l'UAV Predator, per General Atomics

La Dinàmica de Fluids Computacional, CFD, es basa en l'ús de tècniques matemàtiques per modelar un fluid. Utilitza el mètode dels elements finits (apartat 1.3.1) per resoldre les equacions que governen el fluid, les equacions de Navier-Stokes. També permet triar entre diferents models físics, com compressible o incompressible, viscosos o no viscosos, laminar o turbulent, etc.

Per generar les geometries sobre les quals se simularà el comportament del fluid s'utilitza el programa Gambit. Aquest permet construir volums amb eines de construcció bàsiques i importar fitxers CAD (Computational Aided Design). També genera les malles dels volums a estudiar, un dels elements més importants.

1.3.1. MÈTODE DES ELEMENTS FINITS

El mètode dels elements finits és un mètode d'aproximació a problemes continus. Es basa en transformar un cos de naturalesa continua en un model discret aproximat. Aquesta transformació s'anomena discretització del model.

Descripció del procés:

- El continu es divideix en un nombre finit de parts, *elements*, el comportament de les quals s'especifica amb un nombre finit de paràmetres associats a certs punts característics, anomenats *nodes*. Aquests nodes són els punts d'unió de cada element amb els seus adjacents.
- La solució del sistema complet es forma per assemblatge dels elements.
- Les incògnites del problema deixen de ser funcions matemàtiques i passen a ser el valor d'aquestes funcions en els nodes.
- El comportament a l'interior de cada element queda definit a partir del comportament dels nodes mitjançant les adequades funcions d'interpolació.

Per tant, el coneixement del que passa a l'interior d'aquest model del cos aproximat s'obté mitjançant la interpolació dels valors coneguts en els nodes. És, doncs, una aproximació dels valors d'una funció a partir del coneixement d'un nombre determinat i finit de punts.

1.4. OBJECTIUS DEL TREBALL

Com s'ha explicat abans, el grup ICARUS de l'EPSC, després de fer tot el disseny aviònic, ha comprat el fusellatge d'un model d'avió per instal·lar-hi els seus sistemes i fer-lo funcionar. Els enginyers d'aquest grup saben com funcionen els seus sensors, processadors, sistemes de navegació, etc. però no saben quin serà el comportament d'aquest aparell a l'aire, és a dir, la seva aerodinàmica. Això és, precisament, el que s'intentarà fer en aquest treball.

1.4.1. MODELAR EN CAD L'UAV

El primer objectiu d'aquest treball és modelar la geometria de l'UAV amb el Gambit. Per a aconseguir-ho, s'han seguit els següents passos:

- Prendre les mesures de totes les peces de l'UAV, que es troben al laboratori del grup ICARUS a l'EPSC.
- Dibuixar-les, una per una, en CAD (Computer Aided Design) amb el programa Gambit.
- Unir les peces per aconseguir la geometria completa de l'UAV.

1.4.2. OBTENIR LES FORCES AERODINÀMIQUES DE L'UAV

El segon objectiu és calcular les forces aerodinàmiques, sustentació i resistència, exercides sobre l'UAV en diferents angles d'atac. És necessari conèixer els seus valors per poder definir l'aerodinàmica del nostre avió no tripulat.

1.4.3. OPTIMITZAR LA GEOMETRIA

Per últim, s'intentarà millorar la geometria de l'UAV ja que s'ha aproximat el seu motor amb cub, figura que no és gens aerodinàmica. S'avaluarà la diferència quan es cobreix amb una tapa menys abrupta.

CAPÍTOL 2. DISSENY DE L'UAV

2.1 MESURES

El primer pas per dissenyar el model de l'UAV ha estat mesurar totes les parts de l'avió que el grup Icarus va comprar, per després poder-les dibuixar en CAD.

Les parts en què l'UAV estava desmuntat són:

- 2 ales de perfil simètric i amb els respectius flaps
- Fusellatge buit per encabir-hi els sistemes
- Pla de cua amb el timó de profunditat
- Deriva amb el timó de direcció
- Tren d'aterratge
- Hèlix

Les figures 2.1 a 2.6 mostren les parts principals de l'UAV:



Fig 2.1 Vista de perfil del fusellatge



Fig 2.2 Vista de planta del fusellatge



Fig 2.3 Ala

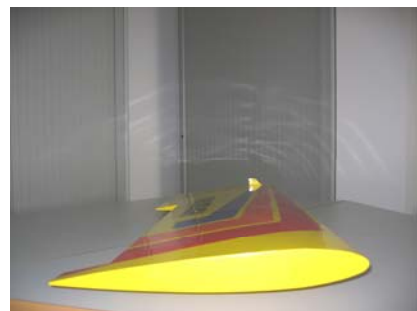


Fig 2.4 Perfil de l'ala



Fig 2.5 Pla de cua

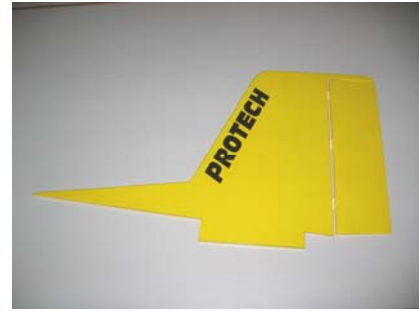


Fig 2.6 Vista de perfil de la deriva

2.2 MODEL EN CAD

Un cop fetes les mesures, s'han dibuixat totes les peces amb el Gambit, utilitzat com a programa de CAD, i després s'han ajuntat per aconseguir la geometria completa de l'UAV (**figura 2.7**). Tret del tren d'aterratge, el motor i l'hèlix, totes les parts s'han dibuixat el més exactes possible, segons les mesures realitzades.

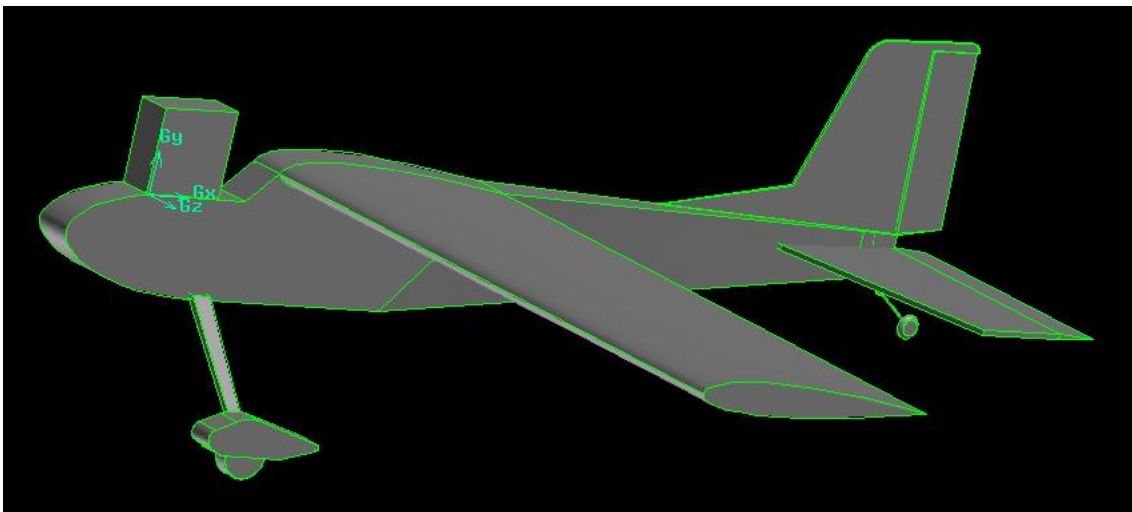


Fig 2.7 Geometria de l'UAV en Gambit

La protecció dels pneumàtics s'ha hagut d'aproximar degut a la complexitat de la seva geometria. D'altra banda, no s'ha dibuixat l'hèlix de l'UAV també per la seva dificultat. Aquest fet no és preocupant ja que en aquest treball només es vol estudiar l'efecte del fusellatge en l'aire del voltant, i la potència que proporciona l'hèlix, la suplim generant un flux d'igual velocitat amb el programa Fluent. El motor s'ha aproximat amb un cub mides semblants que sobresurt del fusellatge, la seva forma real és molt complexa.

Apart de la geometria pròpia de l'UAV, també s'ha de limitar el volum d'aire que es vol al voltant de l'avió amb un prisma el suficientment gran (**figura 2.8**), que fa la funció de túnel de vent. Un cop definit aquest volum s'ha de definir quina és la funció dels diferents elements, ja que el Gambit no sap per on entra el flux d'aire, per on surt, què és el que ha de tractar com a paret, etc. La cara del prisma que queda davant de l'avió s'ha definit com entrada de velocitat (en blau, a la **figura 2.8**), la cara que queda darrera serà la sortida de pressió (en vermell), la cara sobre la qual està recolzat l'avió s'ha definit com a paret de simetria (en color mostassa), ja que només s'ha dibuixat la meitat de l'aparell, i per últim, totes les cares de l'avió s'han definit com a paret, és a dir, com a elements que el flux d'aire no pot travessar, que els ha d'envoltar (en gris).

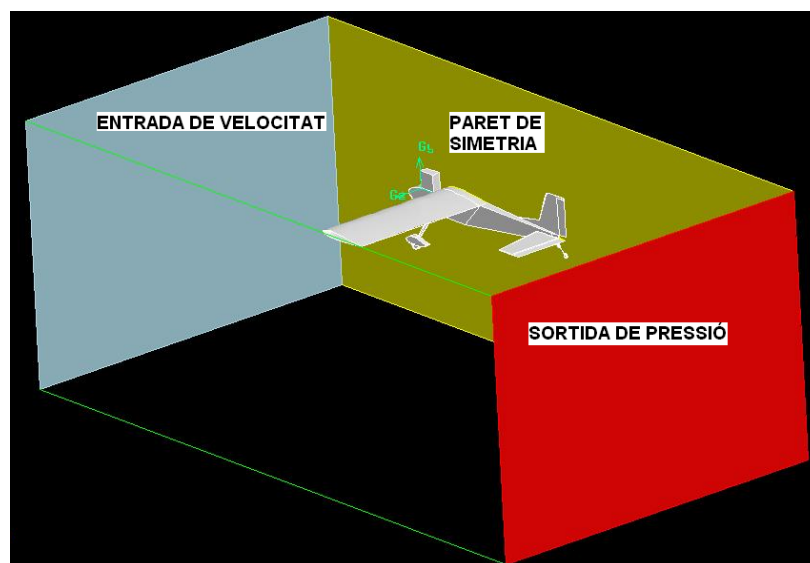


Fig 2.8 Funcions de les parets del volum

2.3 MALLA

La malla és el conjunt d'elements en què s'ha dividit el cos continu i és molt important en el procés de simulació d'un fluxe, ja que ens determinarà la precisió dels càlculs que després realitzarà el Fluent. Com més petits siguin els elements de la malla més precisos seran els resultats. En aquest estudi s'ha generat la malla més petita possible a les proximitats de l'UAV perquè ens hi interessa tenir bona resolució, i el seu tamany va augmentant a mesura que se n'allunya.

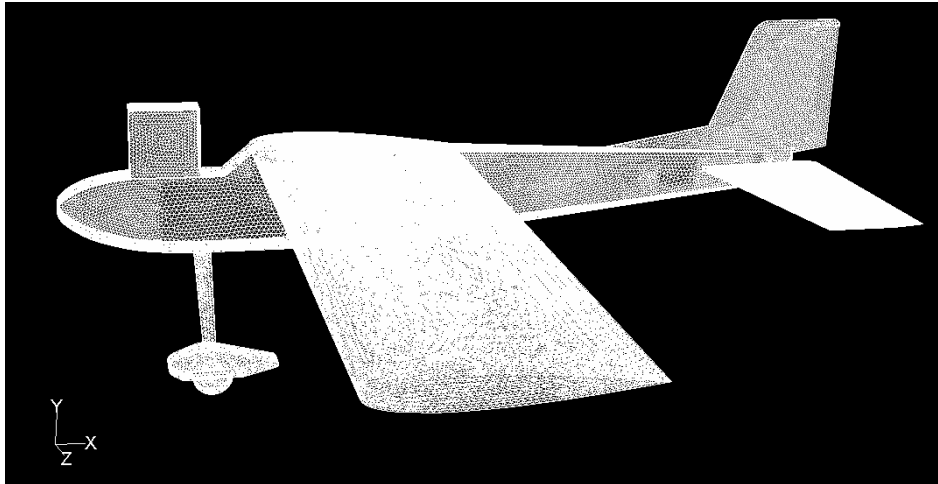


Fig. 2.9 Detall de la malla a les cares de l'UAV

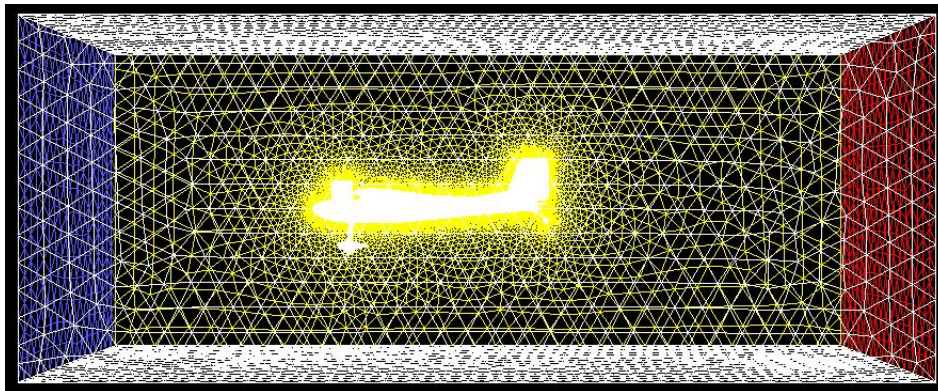


Fig. 2.10 La malla augmenta el seu tamany a mesura que s'allunya de l'UAV

2.4 HIPÒTESIS

Un cop modelat i mallat l'avió mitjançant el programa Gambit, ja es pot començar la simulació del comportament del flux d'aire al voltant de la seva geometria. Per a això, s'utilitza el programa de Dinàmica de Fluids Computacional Fluent, al qual s'hauran d'introduir les dades i hipòtesis necessàries. Per a la resta de dades, com la pressió, densitat, temperatura, etc. es deixen els valors per defecte.

Hipòtesis introduïdes:

- La velocitat de l'aire a l'entrada del volum a estudiar és de 17 m/s (uns 60km/h) i té direcció horitzontal, és a dir, només té component en l'eix longitudinal (de les x).
- El flux es incompressible, densitat constant $\rho=1.225\text{kg/m}^3$.
- La pressió de referència es 0Pa a l'entrada del volum.
- El model de viscositat de l'aire utilitzat es el model k-epsilon
- Hi ha conservació de l'energia

CAPÍTOL 3. SIMULACIÓ I RESULTATS

En aquest capítol es poden veure els resultats de les simulacions dutes a terme amb el Fluent. En primer lloc, tenim una mostra de les visualitzacions del comportament de diferents paràmetres per a cada angle d'atac. A continuació, s'exposen els resultats de les forces aerodinàmiques. I per últim, s'estudia la millora que aporta un canvi de geometria concret.

3.1. VISUALITZACIONS

3.1.1. Angle d'atac 0°

Les figures 3.1 a 3.6 mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 0°.

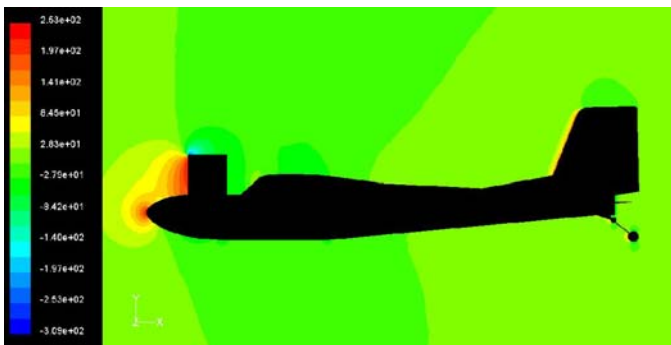


Figura 3.1 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

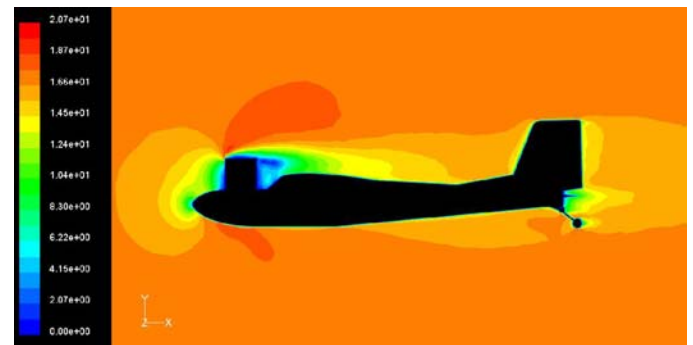


Figura 3.2 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

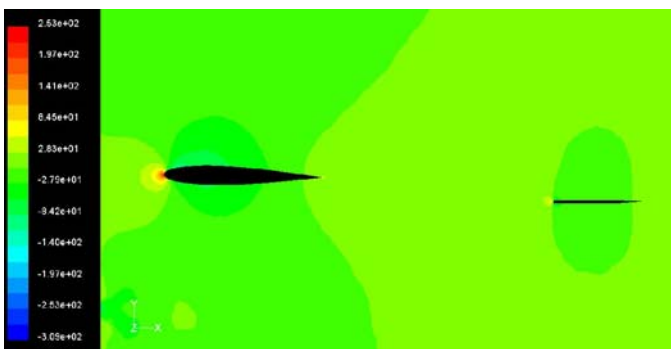


Figura 3.3 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

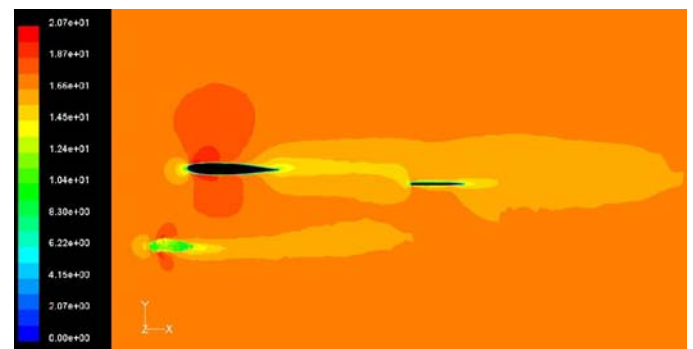


Figura 3.4 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

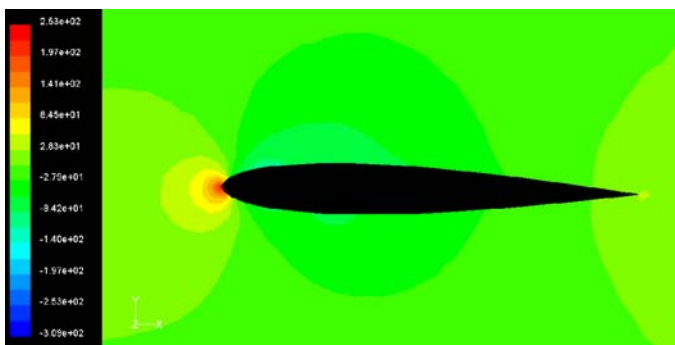


Figura 3.5 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

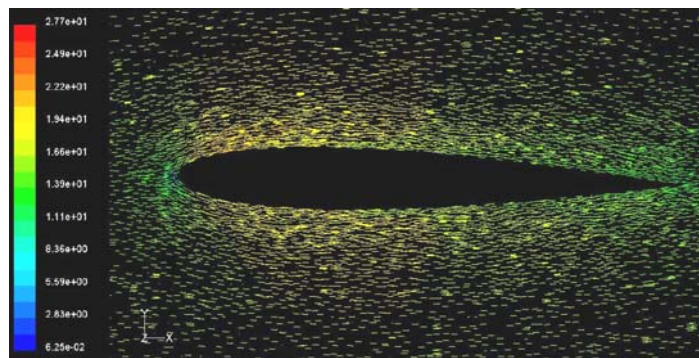


Figura 3.6 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al perfil de l'ala

En aquestes visualitzacions en angle d'atac nul, es pot observar que la diferència de pressió entre l'extradós i intradós del perfil simètric és gairebé nula (**figura 3.5**), que al voltant del perfil el flux és laminar (**figura 3.6**) i que apareixen unes turbulències al voltant del motor (**figura 3.2**). Els tons blaus de la velocitat indiquen velocitat molt baixa, per aquest motiu s'han detectat els remolins.

3.1.2. Angle d'atac 4°

Les **figures 3.7 a 3.12** mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 4°.

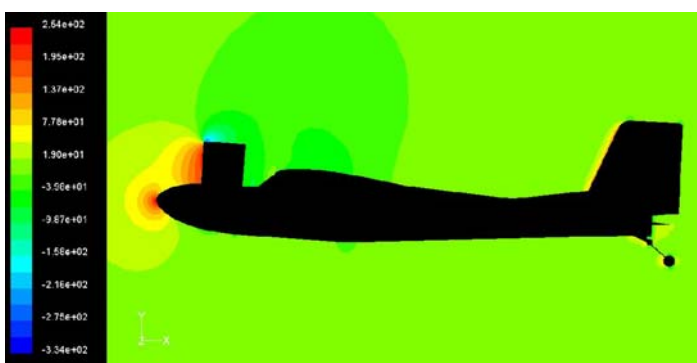


Figura 3.7 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

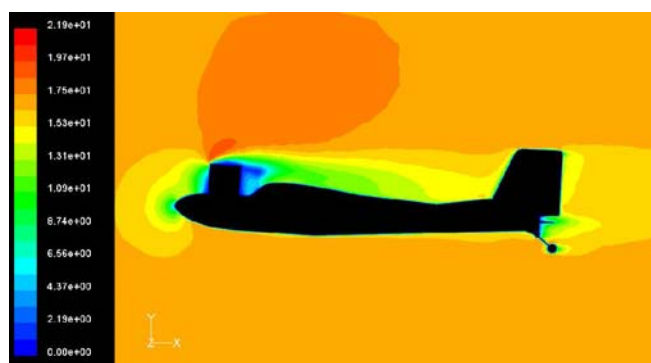


Figura 3.8 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

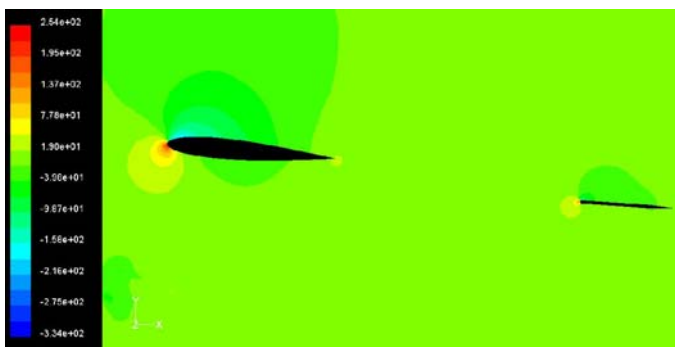


Figura 3.9 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

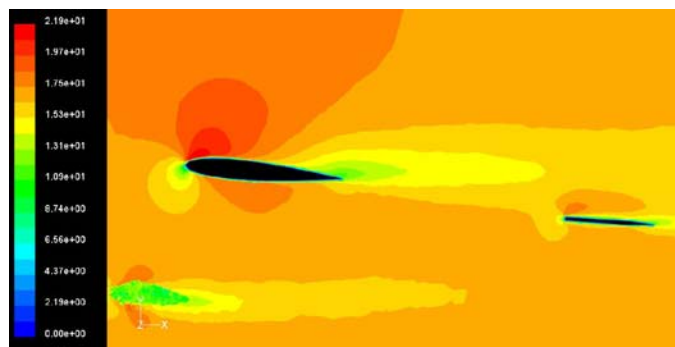


Figura 3.10 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

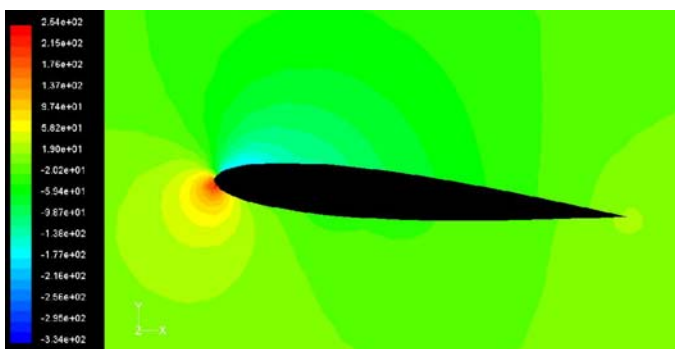


Figura 3.11 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

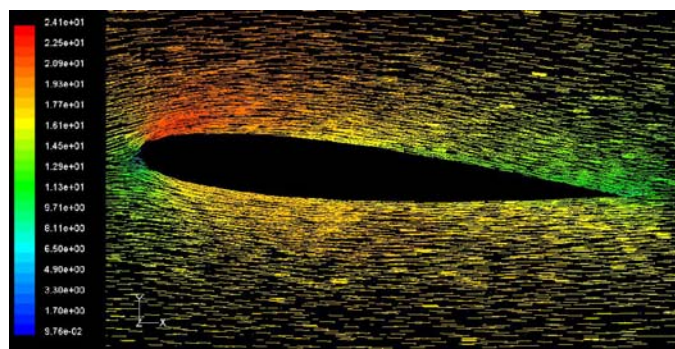


Figura 3.12 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al perfil de l'ala

En el cas d'angle d'atac de 4° comença a augmentar la diferència de pressions a dalt i a baix de l'ala (**figura 3.11**). Les turbulències al voltant del motor es mantenen igual i el fluid continua sent laminar al voltant del perfil.

3.1.3. Angle d'atac 8°

Les **figures 3.13 a 3.18** mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 8° .

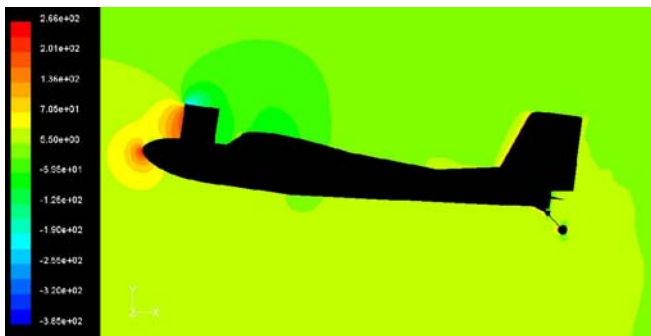


Figura 3.13 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

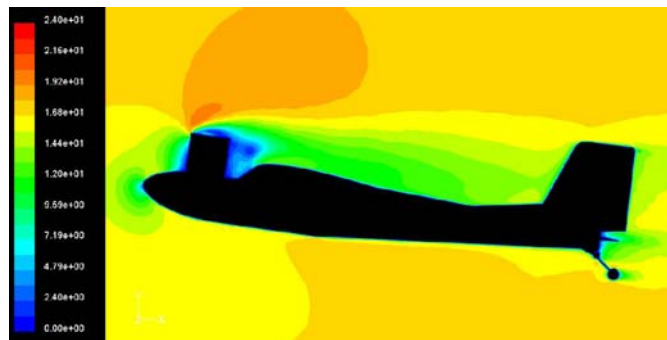


Figura 3.14 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

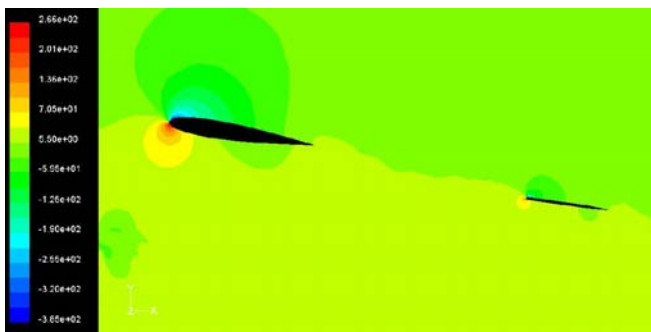


Figura 3.15 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

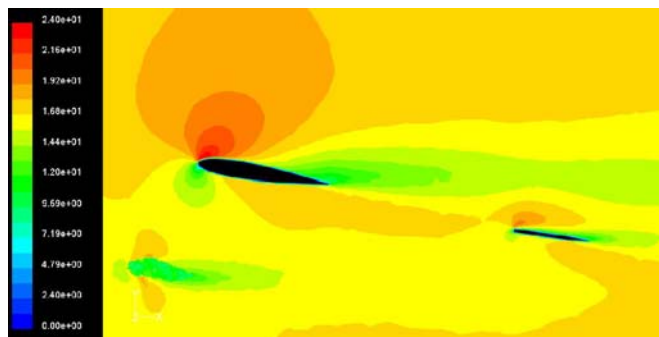


Figura 3.16 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

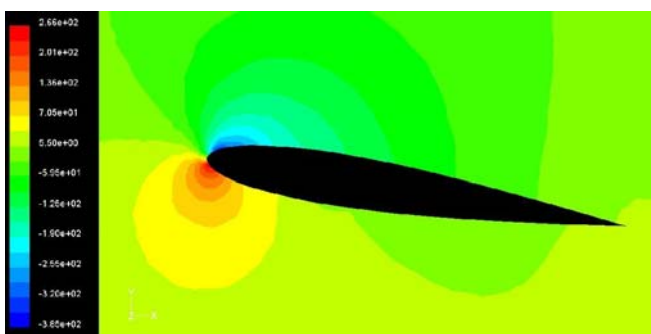


Figura 3.17 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

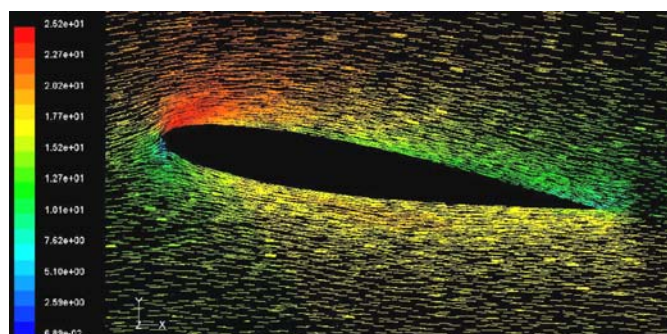


Figura 3.18 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al perfil de l'ala

Amb angle d'atac de 8° , la capa límit comença a tenir tons blaus al caire de sortida, cosa que significa que comença a haver-hi turbulència, (**figura 1.18**). D'altra banda els remolins han augmentat al voltant del motor.

3.1.4. Angle d'atac 12°

Les **figures 3.19 a 3.24** mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 12°.

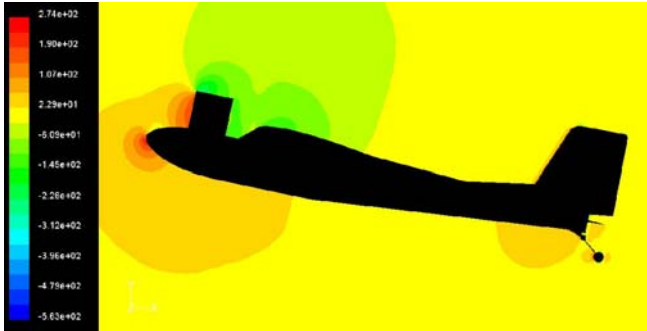


Figura 3.19 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

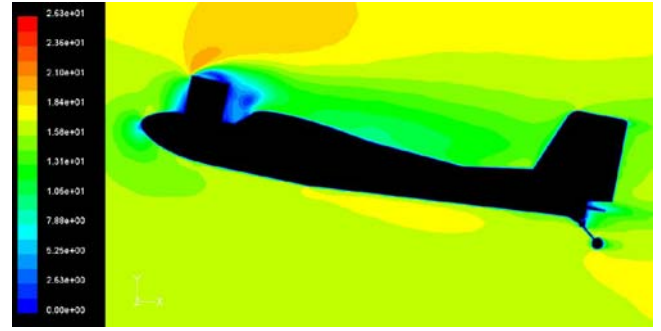


Figura 3.20 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

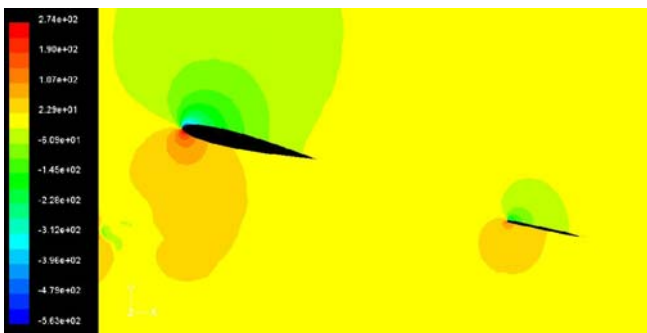


Figura 3.21 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

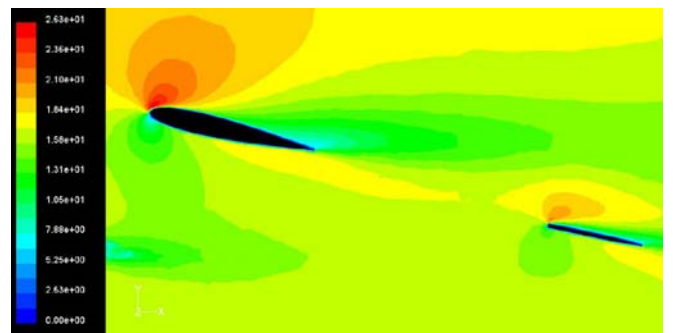


Figura 3.22 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

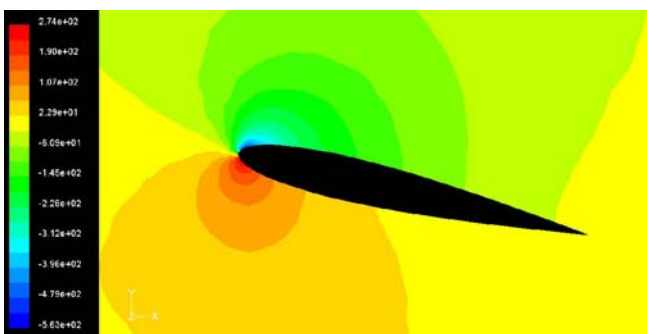


Figura 3.23 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

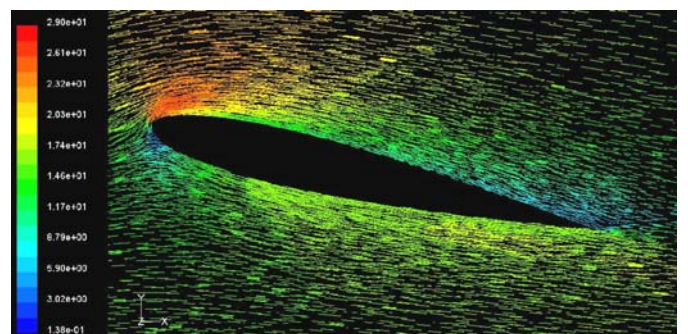


Figura 3.24 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al perfil de l'ala

En aquestes imatges de l'UAV amb 12° d'angle d'atac, la capa límit es comença a convertir en turbulenta (**figura 3.24**) i el punt de transició de laminar a turbulenta es desplaça cap al caire d'entrada, tal i com s'ha explicat en l'apartat 1.2.3. D'altra banda, la diferència de pressions entre l'extradós i l'intradós és considerable.

3.1.5. Angle d'atac 16°

Les figures **3.25 a 3.30** mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 16° .



Figura 3.25 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

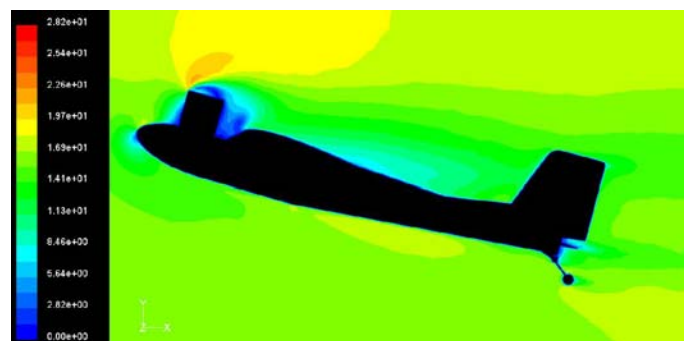


Figura 3.26 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria



Figura 3.27 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

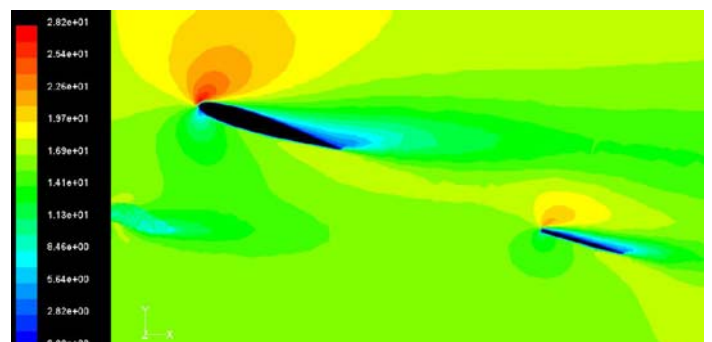


Figura 3.28 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

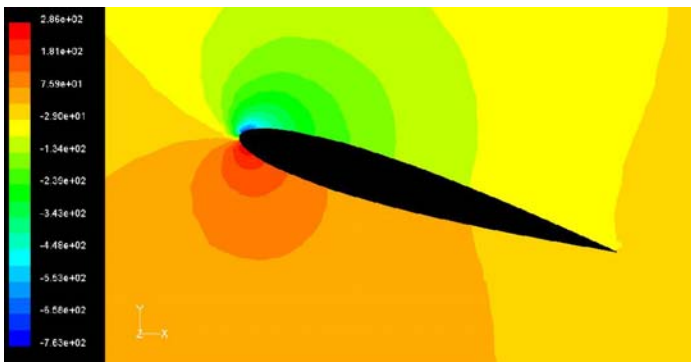


Figura 3.29 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

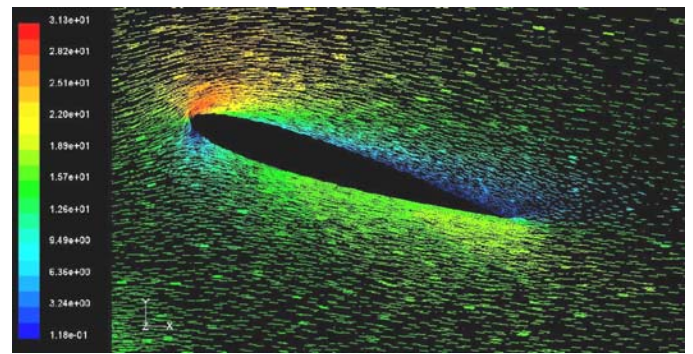


Figura 3.30 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

En aquestes imatges de l'UAV amb angle d'atac 16° s'observa com el punt de transició a turbulència ja es troba al centre de l'ala (**figura 3.30**), la sustentació, però, és molt elevada.

3.1.6. Angle d'atac 20°

Les **figures 3.31 a 3.36** mostren els contorns de pressió i velocitat al voltant de diferents parts de l'avió per un angle d'atac de 20° .



Figura 3.31 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

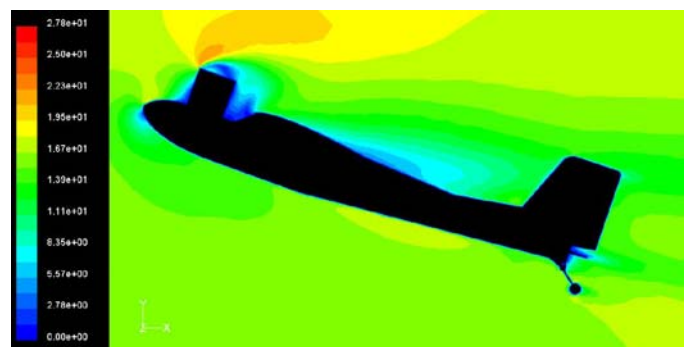


Figura 3.32 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

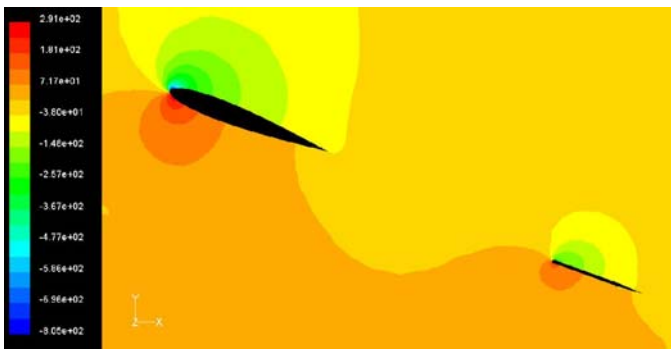


Figura 3.33 Pressió de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

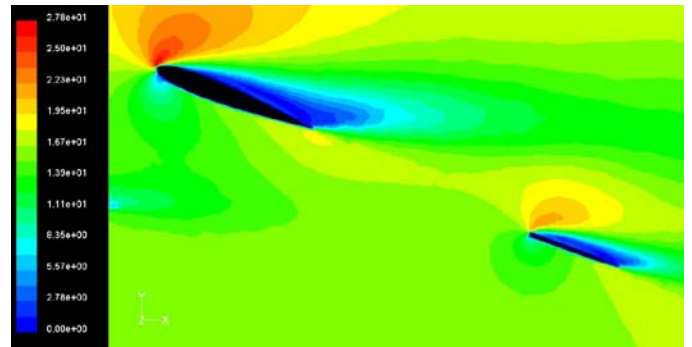


Figura 3.34 Velocitat de l'aire al voltant de l'ala i el pla de cua

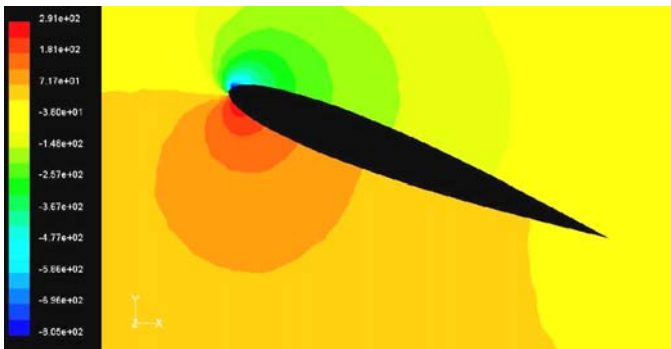


Figura 3.35 Detall de la pressió de l'aire al perfil de l'ala

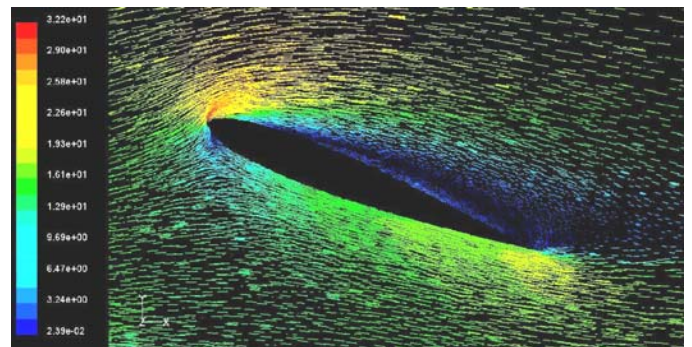


Figura 3.36 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al perfil de l'ala

Per últim, amb 20° d'angle d'atac la capa turbulenta és molt gran i el punt de transició es troba molt a prop del caire d'entrada (**figura 3.36**). En la **figura 3.34** es pot observar el mateix efecte en el pla de cua del nostre UAV.

3.1.7. Anàlisi de les visualitzacions

La primera conclusió que s'extreu de les visualitzacions és que es compleixen el teorema de Bernoulli i el teorema de Venturi, i que, per tant, l'ala d'aquest avió genera sustentació. En les simulacions de la pressió es pot comprovar aquest fet. Per a tots els angles d'atac, a l'extradós hi ha menys pressió que a l'intradós, ja que, com diu la llegenda, els tons blaus i verdosos corresponen a valors inferiors que els tons vermellosos. Per exemple, si observem la **figura 3.35**, la pressió a l'extradós és de -367 Pa (relativa a la pressió de referència 0Pa a l'entrada del volum d'estudi) i a l'intradós és de 18 Pa. Un cas especial és el d'angle d'atac nul. Com s'ha explicat anteriorment, els perfils simètrics no proporcionen sustentació si no tenen un mínim d'angle d'atac positiu, i així s'observa a la **figura 3.5**.

Un altre fet important és l'increment de la sustentació amb l'angle d'atac. En les visualitzacions es pot observar que a mesura que augmenta l'angle d'atac, la diferència de pressió entre l'extradós i l'intradós augmenta, com reflexa la gràfica del C_L - α de la **figura 1.10**.

El motor en forma de cub genera un efecte també destacable. Aquesta geometria no és aerodinàmica i al seu voltant l'aire forma uns remolins (**figura 3.37**) que afecten de manera negativa a la sustentació i a l'estabilitat de l'avió.

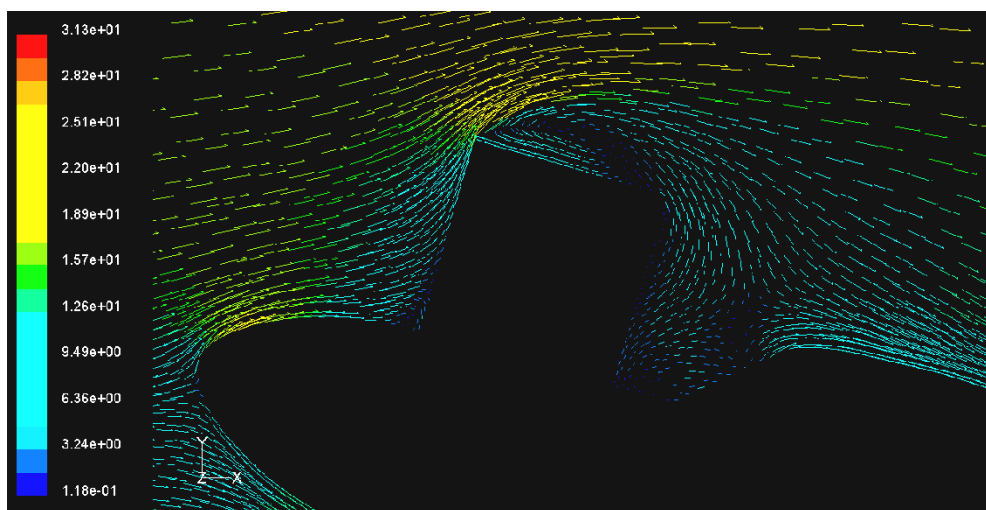
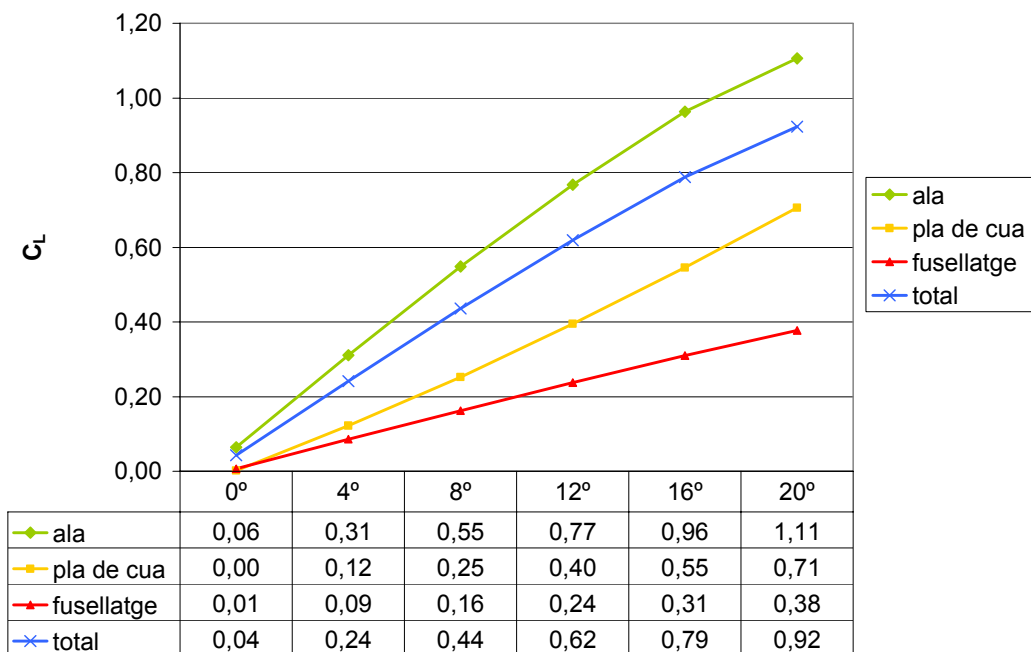
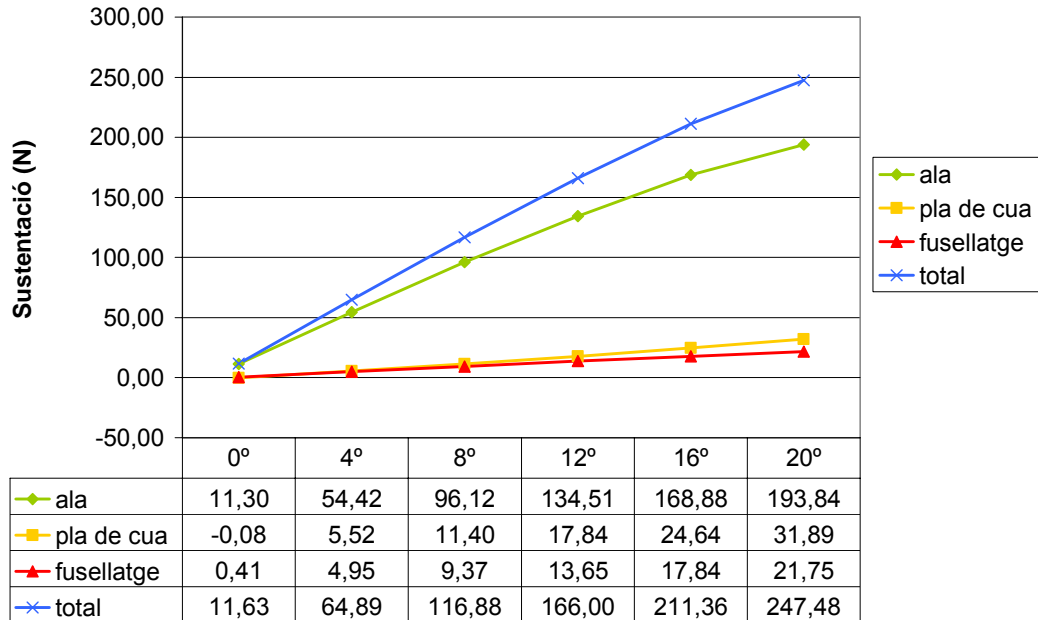


Figura 3.37 Detall dels vectors de la velocitat de l'aire al voltant del cub que formen remolins

Per últim, cal comentar l'evolució de la capa límit al voltant de l'ala a mesura que s'augmenta l'angle d'atac. Fins a 12° no hi ha capa turbulenta, a partir d'aquí va augmentant i el punt de transició va avançant cap al caire d'entrada. A partir de 20° l'ala podria entrar en pèrdua. Totes les observacions concorden amb l'explicat a la teoria.

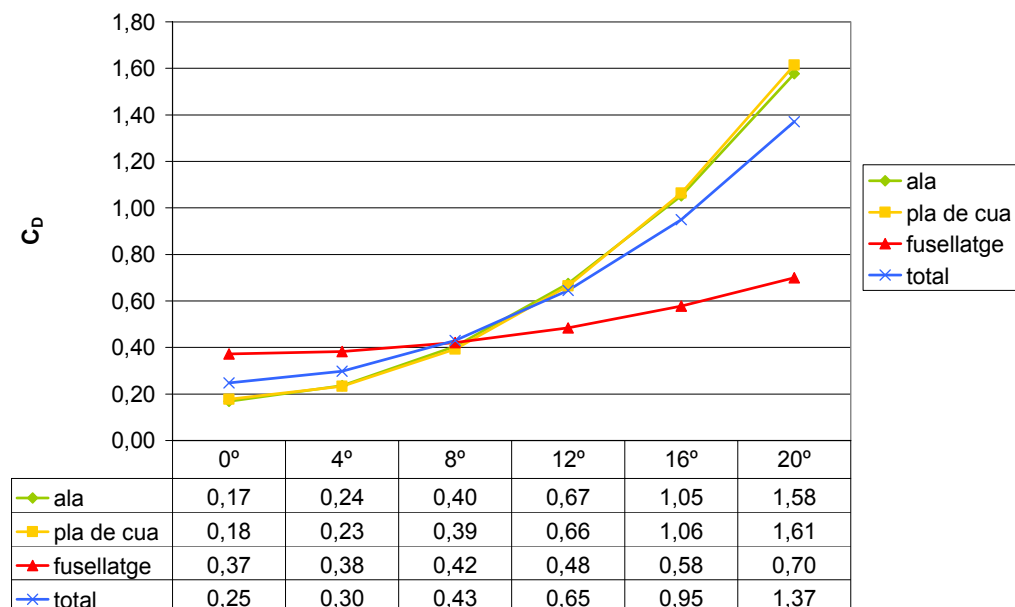
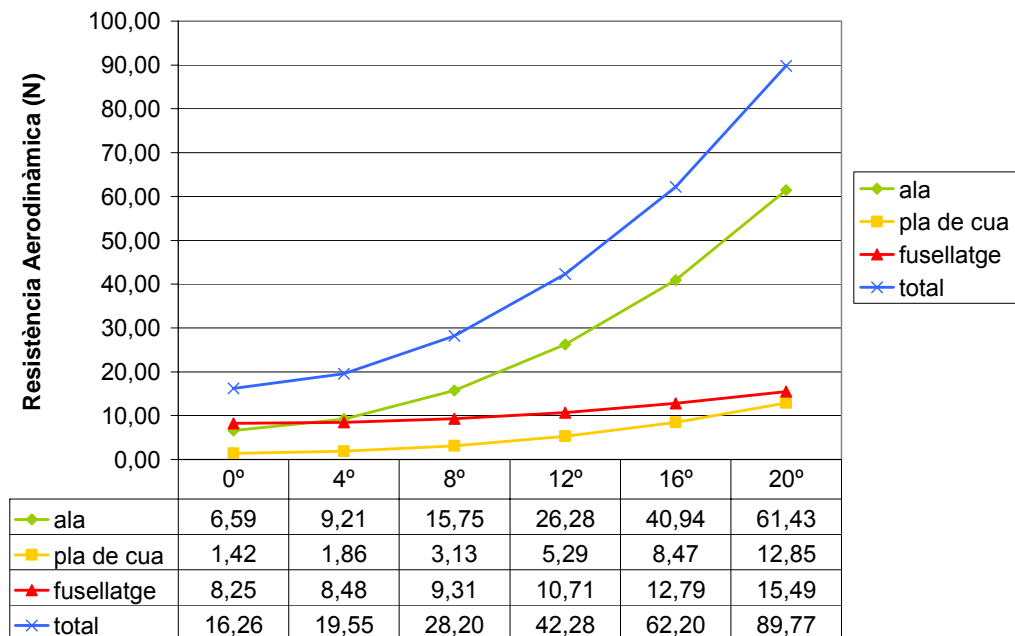
3.2. GRÀFICS I TAULES

Amb les taules de valors i els gràfics podem obtenir el comportament de l'UAV en vol d'una manera més numèrica. Aquests són els resultats aerodinàmics obtinguts:



Taula 3.1 Evolució de la sustentació i el coeficient de sustentació de l'UAV amb l'augment de l'angle d'atac

Pel que fa a la sustentació, es confirma el que s'ha deduït anteriorment. Amb un angle d'atac nul l'avió genera sustentació però no és suficient com per contrarrestar el seu pes. A mesura que augmenta l'angle d'atac, augmenta la sustentació. L'ala és la part principal com a generadora de sustentació, com s'observa en els valors i gràfics de la **figura 3.1**. El pla de cua i el fusellatge aporten una petita ajuda, però com a mínim no generen sustentació negativa.



Taula 3.2 Evolució de la resistència i el coeficient de resistència de l'UAV amb l'augment de l'angle d'atac

D'altra banda, la resistència també augmenta amb l'angle d'atac. El primer gràfic de la **taula 3.2** mostra quines parts generen més o menys resistència. L'ala n'és la principal generadora, seguida pel pla de cua i el fusellatge. Però el segon gràfic no concorda amb el primer, és a dir, l'ordre de generació de C_D no és el mateix. L'explicació és que el fusellatge genera molta menys sustentació que l'ala i que el pla de cua, d'aquesta manera la seva resistència és sobretot paràsita i poc induïda. Per això la seva corba del C_D és menys pronunciada que les corbes de l'ala i del pla de cua.

Un altre fet que es pot aclarir és que segons el primer gràfic de la **taula 3.2**, a 8° l'ala ofereix uns 12N més de resistència que el pla de cua. Però el C_D de l'ala i el pla de cua coincideixen, segons el segon gràfic. El motiu és que tot i que tinguin el mateix coeficient, l'ala té una superfície superior a la del pla de cua i, per tant, la força de resistència també és major.

3.3. OPTIMITZACIÓ

El motor de l'UAV d'aquest treball està situat a l'exterior del fusellatge. Aquest fet, com s'ha exposat en apartats anteriors, no afavoreix l'aerodinàmica de la geometria. La seva forma abrupta genera unes turbulències que s'han d'eliminar.

- S'ha dissenyat una tapa amb el Gambit que es podria afegir al fusellatge de l'avió (**figura 3.38**).

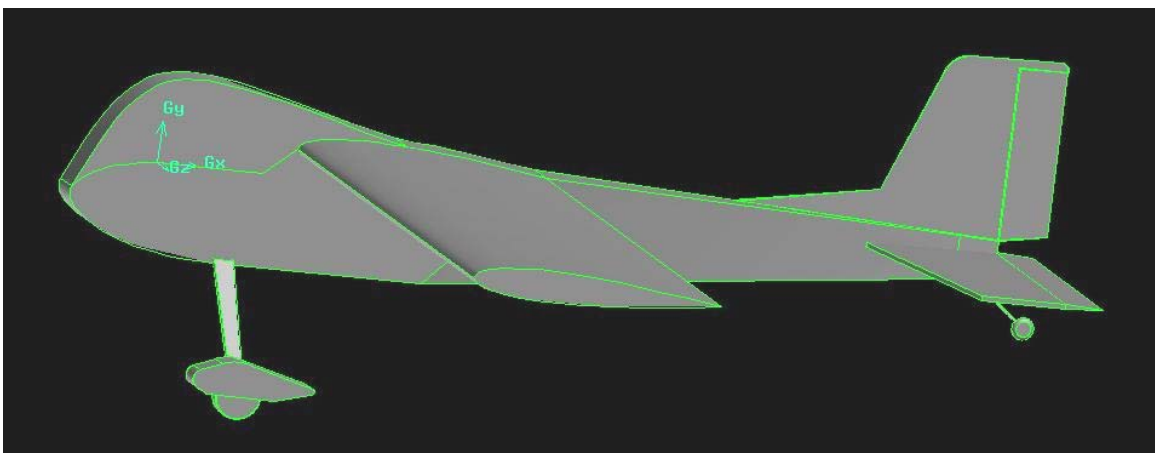


Fig. 3.38 Nova geometria de l'UAV amb el motor cobert.

- S'ha sotmès aquesta geometria millorada a simulacions amb les hipòtesis anteriors i a angles d'atac 0° i 8° .

Angle d'atac 0°

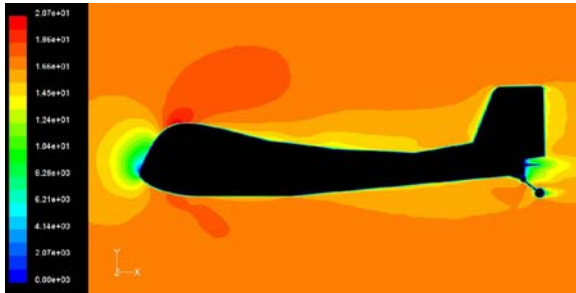


Figura 3.39 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

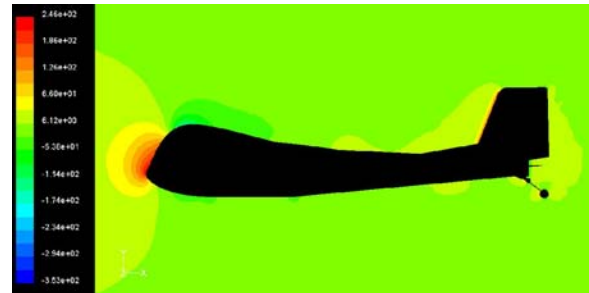


Figura 3.40 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

Angle d'atac 8°

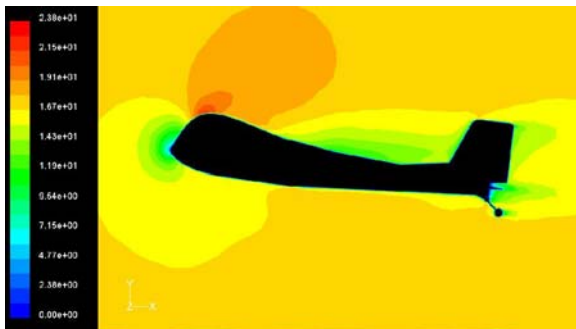


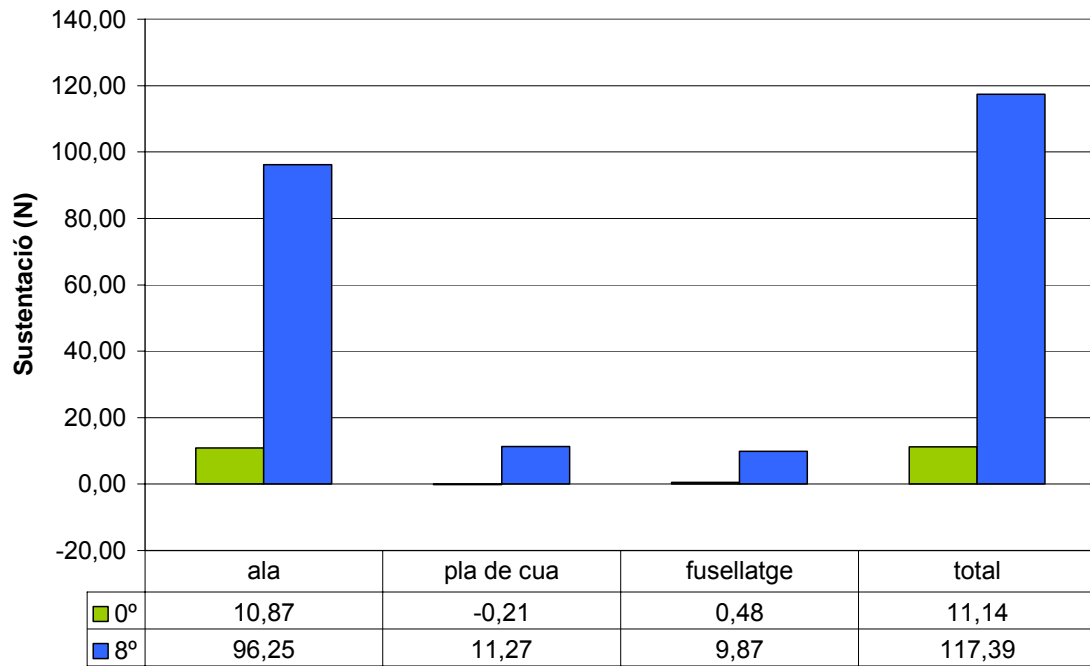
Figura 3.41 Pressió de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria



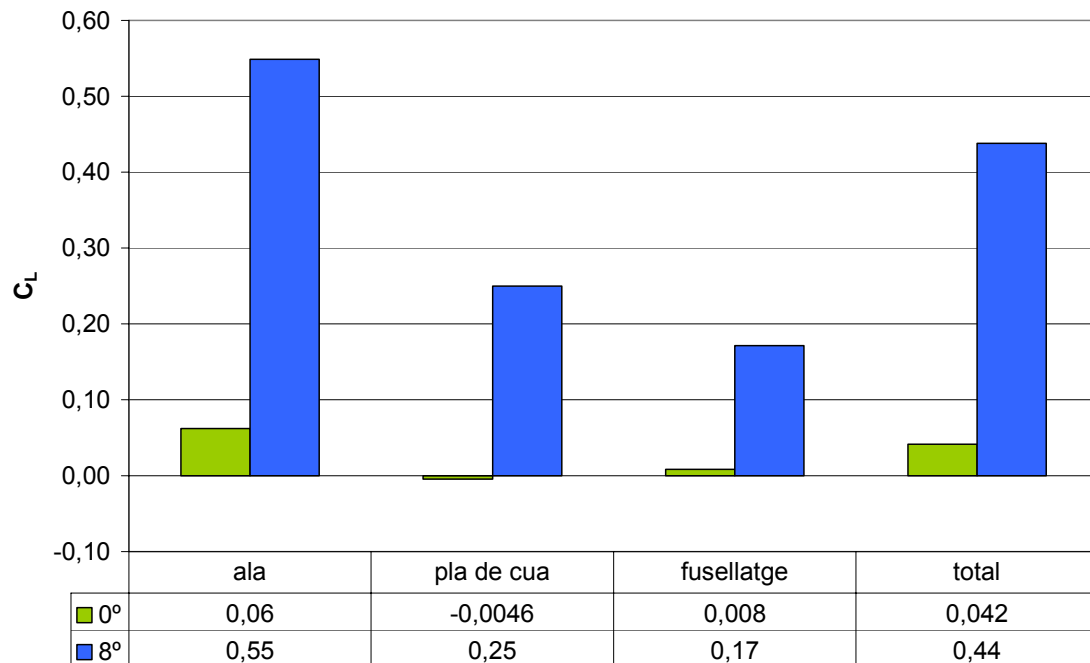
Figura 3.42 Velocitat de l'aire al voltant de l'UAV, al pla de simetria

El més important observable en aquestes visualitzacions és la desaparició dels remolins d'aire al voltant del motor, que generaven turbulències no desitjades.

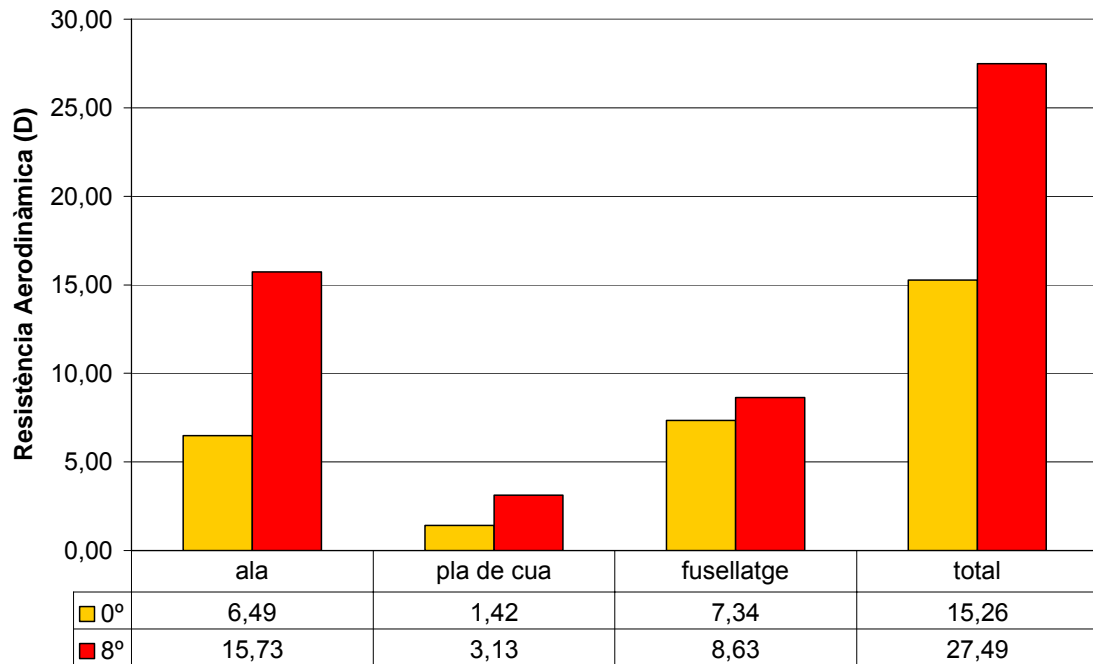
- Els resultats obtinguts amb el Fluent es troben a les taules i gràfics següents.



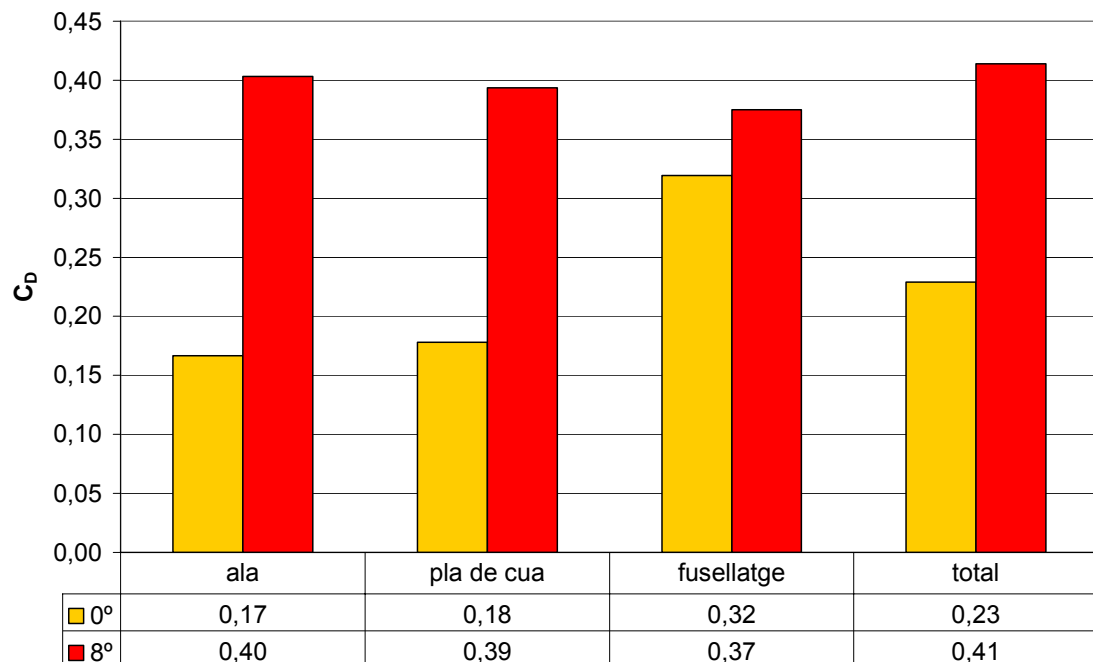
Taula 3.3 Sustentació obtinguda segons l'angle d'atac amb la nova geometria



Taula 3.4 Coeficient de sustentació obtingut segons l'angle d'atac amb la nova geometria

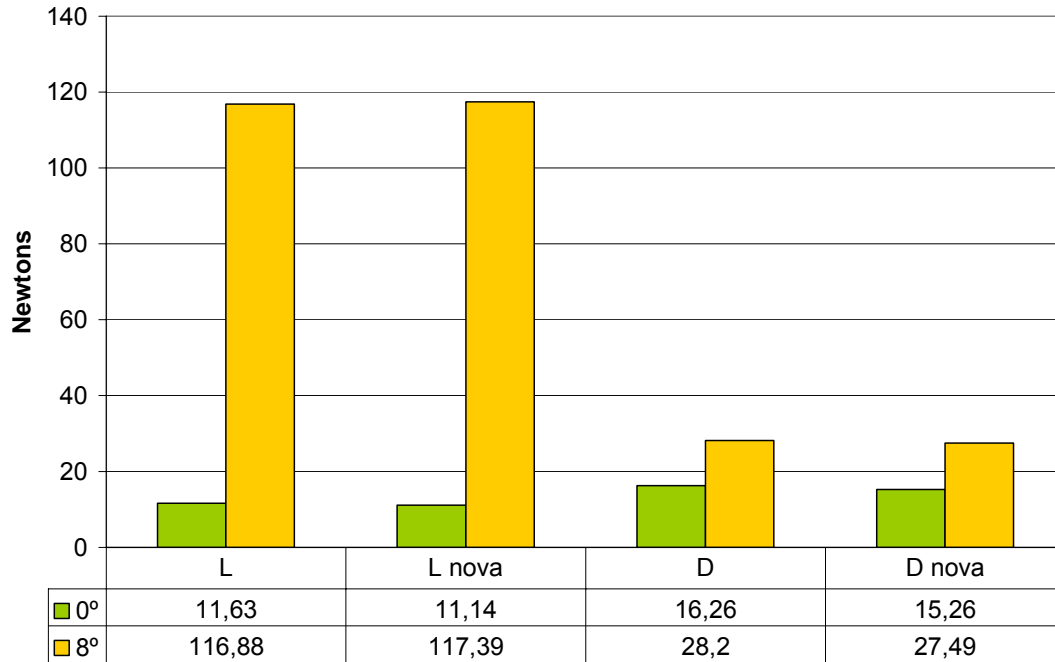


Taula 3.5 Resistència obtinguda segons l'angle d'atac amb la nova geometria



Taula 3.6 Coeficient de resistència obtingut segons l'angle d'atac amb la nova geometria

Apart de l'eliminació de les turbulències, amb aquesta geometria millorada s'ha obtingut un discret augment de la sustentació generada pel fusellatge i una disminució de la resistència. S'ha de tenir en compte, però, que el pes de l'UAV s'ha incrementat una mica. Una comparativa dels resultats generals obtinguts sense la nova peça i amb la nova peça es troba en la **taula 3.7**.



Taula 3.7 Taula comparativa de les forces aerodinàmiques generades amb la geomtria real de l'UAV i la millorada

CONCLUSIONS

Després de tot l'estudi aerodinàmic, es poden concloure diverses qüestions sobre l'aerodinàmica de l'UAV. Els avions amb el seu tipus de geometria, com les avionetes, mai volen amb angle d'atac nul, inclús per a enlairar-se ja ho fan amb angle positiu. Per tant, el nostre avió gaudirà d'una bona sustentació i d'una resistència no important. D'altra banda, un tret negatiu de la geometria és el motor, que trenca la forma aerodinàmica de l'UAV.

Amb els càlculs realitzats en aquest treball ja tenim descrit el model de l'UAV. El grup Icarus utilitzarà els valors de les forces i coeficients aerodinàmics per introduir-los com a dades, per exemple, en els sistemes de control de l'avió i pilot automàtic.

Però, per acabar-ho d'arrodonir, s'han d'eliminar les turbulències generades pel motor en forma de cub que sobresurt del fusellatge. Per aquest motiu s'ha dissenyat una proposta de *tapa*. La millora aconseguida amb ella no és molt important pel que fa a les forces aerodinàmiques, però sí que ho és per la total eliminació dels remolins d'aire. El nostre avió gaudeix ara de més estabilitat.

L'eina de treball Fluent ha estat indiscutiblement de gran ajuda en aquest estudi aerodinàmic, de fet, les simulacions han permès la detecció de les turbulències al voltant de l'avió. Els avantatges que ofereixen les simulacions numèriques són molt importants: menys costos, menys temps per al disseny de productes, visualització ràpida i fàcil dels resultats, etc. M'agradaria destacar la gran utilitat d'aquest mètode d'estudi i la importància que té saber-lo tractar i utilitzar. Totes les empreses aeronàutiques del món fan ús de les simulacions numèriques, per aquest motiu he volgut fer un treball d'aquestes característiques, per al futur.

Parlant de futur, hi ha una nova tecnologia, encara no gaire assimilada, de la qual s'ha parlat molt en aquest treball i que aviat serà molt utilitzada per realitzar determinades tasques molt útils per a la societat i perilloses si les han de realitzar les persones. Efectivament, es tracta dels UAVs. Aquests avions no tripulats, com moltes altres coses, van ser ideats per a finalitats bèl·liques, però en aquests moments comença a sorgir la seva importància en activitats civils.

La flexibilitat d'aquest tipus d'avions ofereix un ventall molt ample d'aplicacions, des de l'extinció d'incendis forestals, fins a recerca oceanogràfica, passant pel manteniment de grans infraestructures terrestres i la cartografia. Moltes d'aquestes tasques són dutes a terme actualment per satèl·lits, una tecnologia 10 vegades més cara. Com he dit, els UAVs encara no estan assimilats, ni contemplats, ni regulats, com a mínim aquí a Espanya. Bé, en el nostre estat el món aeronàutic no és gaire destacable, però tot arribarà.

BIBLIOGRAFIA

Anderson, J.D., *Fundamentals of Aerodynamics, Third Edition*, Mc Graw – Hill, New York, NY (2001).

<http://uav.wff.nasa.gov/Main.cfm>

<http://www.fas.org/irp/program/collect/predator.htm>

<http://www.tc.gc.ca/civilaviation/general/recavi/Brochures/uav.htm>

<http://www.uav-applications.org/>

<http://inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV13.html>