

Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulats d'un autogir d'aeromodelisme

Jaume Llaó Herrera

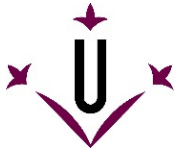
Joan Roca Enrich, Xavier Terribas Sala

11 de Juliol del 2017



Grau en Enginyeria Mecànica



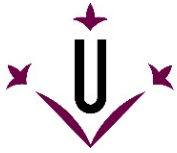


Memòria

1. Introducció
2. Objecte del projecte
3. Metodologia emprada
4. Referències
5. Notació utilitzada
6. Definicions prèvies
7. Anàlisi aerodinàmica del conjunt rotor principal
8. Paràmetres de funcionament del conjunt rotor principal
9. Estudi de velocitats en el conjunt rotor principal
10. Forces originades en les pales degudes al vol
11. Anàlisi de requeriments del conjunt mecànic del rotor
12. Disseny mecànic del rotor, anàlisi de les solucions adoptades
13. Conclusions

Plànols

1. Conjunt rotor
2. Bancada
3. Eixos de capcineig i balanceig
4. Creueta
5. Subconjunt 1
6. Eix del rotor
7. Porta-rodament
8. Orella porta-rodament
9. Subconjunt 2
10. Boixa
11. Barret
12. Subconjunt 3
13. Sòlid de batiment
14. Sòlid d'arrossegament
15. Plànol muntatge



Plec de condicions

1. Especificacions dels components del rotor
2. Especificacions dels materials
3. Especificacions dels coixinets
4. Especificacions dels rodament

Pressupost

*Avantprojecte de disseny de la
part mecànica del rotor de tres
pales articulad d'un autogir
d'aeromodelisme*

MEMÒRIA

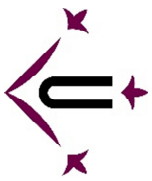
Jaume Llaó Herrera

Joan Roca Enrich, Xavier Terribas Sala

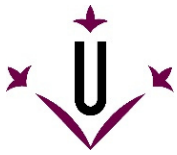
11 de Juliol del 2017



Grau en Enginyeria Mecànica

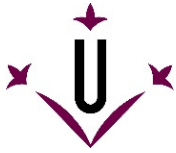


Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

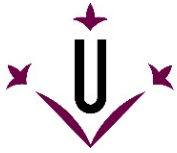


ÍNDEX

1. Introducció	4
1.1. Breu història de l'autogir	4
1.2. Descripció de l'aparell i les seves parts	5
2. Objecte del projecte	7
2.1. Motivació	7
2.2. Objectius	7
2.3. Justificació i abast	8
3. Metodologia emprada.....	8
4. Referències	9
4.1. Llibres i documents	9
4.2. Pàgines i portals web	9
4.3. Arxius Media	9
5. Notació utilitzada	10
6. Definicions prèvies	11
6.1. Teorema de la quantitat de moviment	11
6.2. Teoria de l'element de pala	13
6.3. Rotor semirígid i rotor articulat	13
7. Anàlisi aerodinàmica del conjunt rotor principal	15
7.1. Sistema inercial rotor, perquè tres pales?	15
7.2. Velocitat induïda	15
7.3. Elecció del perfil alar i geometria general de les pales	17
7.4. Tracció del rotor.....	19
8. Paràmetres de funcionament del conjunt rotor principal	21
8.1. Paràmetres de dimensionat del rotor	21
8.2. Autorotació i règims de funcionament en funció de la inclinació de l'eix de rotació	24
9. Estudi de velocitats en el conjunt rotor principal	26
9.1. Rotor rígid	26
9.2. Rotor semirígid.....	27
9.2.1. Determinació de l'angle, velocitat i acceleració de batiment	29
9.2.2. Articulació d'arrossegament	31
10. Forces originades en les pales degudes al vol	32
10.1. Resistència a l'avanç del rotor	32
10.2. Força sustentadora neta total efectuada pel rotor	33



10.3. Aixecament asimètric del rotor.....	33
11.Anàlisi de requeriments del conjunt mecànic del rotor	35
11.1. Derivats de les capacitats productives i restriccions de muntatge	35
11.2. Derivats de l'estudi de forces.....	36
12.Disseny mecànic del rotor, anàlisi de les solucions adoptades.....	37
12.1. Conjunt Bancada	38
12.2. Creueta articulada, eixos de Balanceig i de Capcineig	39
12.3. Conjunt porta rodament	41
12.3.1. Elecció del rodament	45
12.3.2. Elecció dels coixinets	46
12.4. Eixos de balanceig i de capcineig	48
12.5. Eix de rotació	48
12.6. Boixa	50
12.7. Sòlids de batiment i arrossegament.....	52
12.7.1. Determinació de la junta elàstica	55
12.8. Disseny de la pala.....	55
12.9. Conjunt explosionat	56
13.Conclusions.....	57



1. Introducció

1.1. Breu història de l'autogir

Com citava el pilot Ferran Rosselló Verdaguer, comandant espanyol de l'exèrcit de l'aire, en el seu llibre titulat "El Autogiro y su vuelo" (2005), "El autogiro es una aeronave muy especial". Aquesta afirmació es força interessant per poder entendre com obté la força sustentadora necessària per enlairar-se un autogir, donat que aquest tipus d'aeronaus presenten clares similituds pel que fa a la forma de vol amb els helicòpters, tot i que obtenen la força sustentadora com a resultat de la translació de l'aparell en un fluid viscos (l'aire), fet més aviat assimilable als avions d'ala fixa, quedant així a mig camí entre helicòpters i avions.

Tot i que avui en dia existeix la percepció generalitzada de què l'autogir fou tan sols un pas evolutiu per acabar desembocant en la concepció de l'helicòpter, aquest fet dista notablement de la intenció de l'inventor de l'aparell Juan de la Cierva Codorniu [imatge 1], el qual patentà als anys 20 del segle passat el primer autogir (primer vol en autogir el 9 de gener de 1923), dècada en què ja existien nombroses empreses destinades al desenvolupament i construcció d'helicòpters (més de 400 empreses comptabilitzades tan sols als Estats Units a finals de la dècada). No obstant això, aquesta percepció no és del tot infundada, ja que fins a la invenció de l'autogir no fou possible el desenvolupament d'un sistema de rotor pràctic i eficaç per a les aeronaus d'ales rotatives, helicòpters inclosos, les quals fins avui dia basen el seu funcionament en el sistema de control del rotor desenvolupat i patentat per Juan de la Cierva l'any 1932.



imatge 1 – Juan de la Cierva Codorniu (1932)

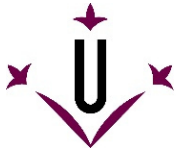
Per entendre la motivació de l'inventor per concebre l'autogir cal ubicar-se a principis del segle passat, quan l'aviació era la gran novetat de l'època. Juan de la Cierva cursà enginyeria de camins, ja que per aquells anys encara no existia la carrera d'aeronàutica, i en el darrer curs dels seus estudis presentà un disseny per a un avió trimotor al concurs organitzat per l'Aviació Militar, l'Hispano Suiza de 3 motors i 220 CV, el qual fou un aparell revolucionari per l'Espanya de l'època. Tot i que fou un aparell extraordinari, s'estavellà quan entrà en pèrdua poc després del primer enlairament i d'aquest fet sorgí la voluntat de l'inventor de concebre una aeronau capaç de volar a velocitats reduïdes i que la seguretat de vol de l'aparell no és veïes compromesa per una pèrdua de velocitat deguda a la fallida del sistema de propulsió.

Lamentablement i irònicament, el desenvolupament de l'autogir es va veure truncat per la prematura mort del seu inventor en mans del citat aparell l'any 1936.

Actualment, els autogirs han sigut relegats pràcticament per complet al vol d'oci [imatge 2], motiu pel qual des de la seva invenció no se n'ha optimitzat el seu disseny. Són pocs els que avui en dia encara creuen en la bondat del disseny de l'autogir, aeronau que brinda nombrosos avantatges respecte els helicòpters en determinades situacions, existint però un interès incipient que valora atributs dels autogirs tals com la seva reduïda despesa energètica necessària per volar i la seva seguretat de vol fruit de l'autorotació, que provoca sustentació al marge d'una contribució energètica exterior al rotor (la rotació es genera a partir de la velocitat relativa de l'aire incident al rotor com a resultat del vol d'avanç).



imatge 2 – Autogir Arrow-copter AC-10 destinat al vol d'oci



1.2. Descripció de l'aparell i les seves parts

Un Autogir o Giroplà és un tipus de girodina (aerodina d'ales rotatòries), tal com un helicòpter, però que a diferència d'aquest no requereix d'un sistema motor per generar el moviment de les pales que genera la sustentació. La rotació de les pales, al voltant del seu eix lleugerament inclinat cap endarrere, es deguda a l'aire relatiu incident, en sentit contrari a la direcció d'avanç i per sota del pla de rotació. La translació o avanç de l'aeronau es provoca mitjançant un equip de propulsió, que sol estar materialitzat per una hèlix d'eix horitzontal (paral·lel a la direcció d'avanç) com en el cas dels avions.



imatge 3 – Autogir de les sèries NACA

Tot i que l'aparença d'aquest tipus d'aeronaus és presumiblement la d'un híbrid entre helicòpter i avió, i així o plasma la notació en anglès ("gyroplane" o "gyrocopter"), el seu funcionament es basa en un concepte inexistent en ambdós tipus d'aeronaus, l'autorotació. Així es considera més correcte la designació mitjançant el mot Autogir, el qual s'entén que és un terme neutre i que fa referència al principi de funcionament que el caracteritza.

Les principals característiques definitòries d'un autogir són:

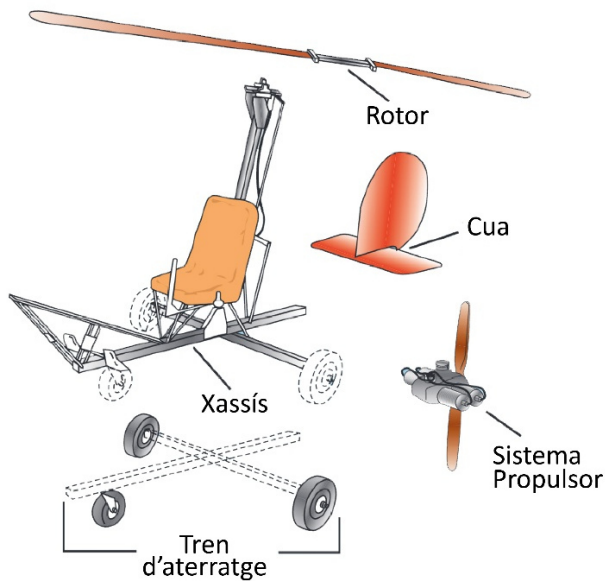
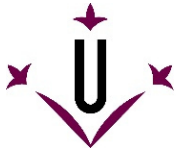
- Presenta l'efecte d'autorotació sota l'efecte de la velocitat de translació de l'aeronau.
- És un aparell volador amb un ampli rang de velocitats de vol, el qual és capaç d'utilitzar trams molt curts per a l'aterratge.
- No és capaç de realitzar un vol estacionari, sinó tan sols ascendir amb una gran pendent i descendir pràcticament en vertical amb l'aparell anivellat.

Donat que el rotor de l'autogir, gira de manera lliure en funció de les velocitats de l'aire incident en les pales, aquests tipus d'aparells no requereixen un sistema antiparell, essent així els d'un sol rotor la configuració més habitual. En principi, el nombre de pales del rotor principal d'un autogir pot ser divers, essent els de dues i tres pales els més comuns.

Per altra banda, el sistema de propulsió d'un autogir es pot diferenciar entre dos tipus, podent ser tractor o propulsor, impulsor, el que significa que el sistema motor pot estar muntat en la part frontal de l'aeronau, estirant així de l'autogir, o bé en la part posterior d'aquest, respectivament. Històricament, els primers dissenys d'autogir presentaven la configuració de sistema propulsor davanter, ja que derivaven d'avions d'ala fixa modificats, no obstant això, amb els anys aquest tipus de configuració ha estat substituït pels aparells amb sistema propulsor, preferible pels pilots, ja que brinden una millor visibilitat en el vol a banda d'un millor control de l'aparell per estar col·locat el timó en l'estela de l'hèlix impulsora.

Tot i existir múltiples configuracions quant a dissenys d'autogirs, majoritàriament tots comparteixen els mateixos components bàsics: fuselatge, motor, sistema rotor, cua i tren d'aterratge [imatge 4]. Essent les ales un component no vital per l'aparell, però que n'incrementa notablement el seu rendiment. El Xassis de l'aeronau és l'element estructural que serveix de substrat de tots els altres components, oferint al conjunt la cohesió i robustesa necessàries. Aquests poden estar conformats per diferents elements i materials, essent els muntatges formats per tubs d'aliatges metàl·lics o fibra de carboni els més usats.

L'element encarregat de l'avanç de l'autogir és el sistema propulsor, normalment materialitzat mitjançant un motor de combustió interna que imprimeix el moviment de rotació de l'hèlix impulsora i aporta a l'aeronau la capacitat d'ascensió, avanç i control de l'aparell.



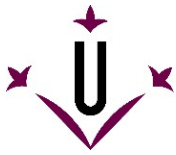
imatge 4 – Parts principals d'un Autogir

El rotor, al marge del nombre de pales que munti, es diferencia en dues famílies principals, els sistemes anomenats semirígids, que ofereixen les prestacions suficients per al correcte funcionament del rotor, i els totalment articulats, que a banda de garantir-ne el bon funcionament, garanteixen un vol amb menys vibracions i més comoditat de pilotatge.

La cua de l'autogir, per la seva banda, sol estar formada per un aleró que ajuda a posicionar l'autogir horitzontalment i contraresta el posicionament avançat del centre de gravetat de l'autogir (a causa del muntatge de la cabina que allotja al pilot), i sempre integra un timó que conjuntament amb el posicionament del pla de rotació de l'aeronau, en permet la maniobrabilitat. En multitud d'autogirs però, es munten diverses superfícies tipus aleró per tal d'assegurar-ne un vol horitzontal, a més d'estabilitzadors verticals i timons o flaps auxiliars.

Per la seva banda, el tren d'aterratge proporciona la mobilitat necessària per a l'aterratge i enlairament, essent la configuració de tricicle la més habitual. La disposició de les tres rodes està fortament lligada al sistema de propulsió, quedant sempre la parella de rodes coaxials més allunyada respecte l'hèlix impulsora o tractora que la roda directriu.

Les ales, en canvi, poden o no formar part d'un autogir, però en implementar-se en un disseny, proporcionen un major rendiment de l'aparell, major capacitat d'elevat càrregues i un notable augment de l'estabilitat. En els dissenys més sofisticats, les ales laterals de l'autogir es projecten de manera que participin de forma activa en la sustentació de l'aeronau, brindant així una suavitat de vol més pròxima als avions d'ala fixa, tot permetent una maniobrabilitat més aviat comparable a la dels helicòpters.



2. Objecte del projecte

Motivació

És extensament conegut pels aficionats al vol de ràdio control, que la principal limitació que troben aquest tipus d'aparells n'és l'autonomia. Els drons en concret, basen el seu funcionament en diversos rotors propulsats mecànicament que s'abasteixen per mitjà de les bateries integrades en l'aparell.

Tot i que durant els darrers anys s'han aconseguit nombrosos avenços en la fabricació de dispositius d'emmagatzematge d'energia, aquest encara és un tema que limita tan el temps de vol com les dimensions i capacitat de càrrega d'aquest tipus d'aparells. Òbviament, la dinàmica actual apunta cap a un increment de la capacitat de les bateries, fet que es manifesta per exemple en les noves cèl·lules de grafè les quals són capaces d'emmagatzemar pràcticament el triple energia amb la meitat de pes respecte a les bateries de liti. Però la millora de les bateries pot esdevenir estèril si no va acompanyada d'una major eficiència de vol (menor despesa energètica requerida).

Per mitjà del present avantprojecte, es pretén posar de manifest alguns avantatges que els autogirs tenen respecte al tipus d'aparells voladors comentat, en concret la seva menor despesa energètica, ja que el motor muntat en un autogir posseeix una ínfima part de la potència requerida per un helicòpter per enlairar-se.

2.2. Objectius

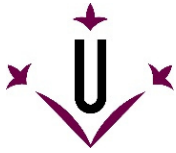
Objectiu general

Disseny dels elements mecànics (sòlids i enllaços) necessaris per definir un rotor articulats (semirígid) de tres pales per a autogirs. Optimització del mecanisme i quantificació de les millores vers el model inicial i els models de rotor de dues pales existents i d'ús més comú en autogirs.

Realització d'un primer prototip mitjançant eines de prototipatge ràpid i mecanitzat.

Objectius específics

- Recerca i comprensió de nocions aerodinàmiques implicades en el cas d'estudi (autogir). Estudi del fenomen de sustentació i resistència a l'avanç, dels teoremes energètics i de la teoria de l'element de pala, per tal de garantir l'assimilació de les eines necessàries per al disseny d'un rotor.
- Comprensió i assimilació de la mecànica implícita en l'artefacte rotor, estudi qualitatiu de les velocitats i esforços resultants del vol.
- Esquematzació i estudi del mecanisme mitjançant un programa CAD paramètric, familiarització amb la potència de càlcul del programa.
- Simulació de la solució més convenient i estudi, mitjançant un programa de CAD paramètric i l'entorn matemàtic MATLAB, dels esforços tan interns de cada element com els originats en els enllaços a causa del mateix moviment i de les accions exteriors (velocitat del vent incident en les pales fruit del vol i de la velocitat angular del rotor, esforços derivats de la sustentació i resistència a l'avanç)
- Estudi de les sol·licitacions dinàmiques originades en cada element integrant, per plasmar la resistència mecànica del conjunt en condicions normals i estudiar el correcte funcionament del mecanisme (vibracions i esforços parasitaris).



2.3. Justificació i abast

Actualment els autogirs estan tenint una època de ressorgiment a escala mundial, comptant ja amb diverses universitats que precursors d'estudis i sistemes per al càlcul i comprensió de la dinàmica implicada en el vol d'autorotació. Però avui en dia, tot i que existeixen nombrosos programes i paquets de software destinats a la simulació de l'aerodinàmica i dinàmica de girodines tals com *COPTER* (desenvolupat per Belltextron INC.) o bé el desenvolupat per l'empresa FlightLAB, són programes especialment concebuts per a l'estudi d'helicòpters i de preus elevats que n'impossibiliten l'ús universitari/educatiu. Ara per ara, no es coneix l'existència de cap procediment senzill i eficaç per al disseny d'autogirs i aquest fet és degut que la simulació del fenomen d'autorotació comporta una tasca enorme i complexa, la qual cal desglossar i anar resolent-se progressivament.

Lavors, l'abast del present projecte queda fitat per procurar un sistema de càlcul aproximat, però prou acurat, per preveure el funcionament d'un rotor en règim d'autorotació i possibilitar-ne així la seva comprensió en l'àmbit universitari i brindar les sol·licitacions que marquen el disseny del mecanisme. Per dur a terme aquesta tasca es desenvolupa de manera conjunta amb el present projecte de disseny, mitjançant algorismes MATLAB, un model matemàtic capaç de descriure l'aerodinàmica i dinàmica implicades en el vol d'autorotació de forma prou acurada, asseient així els primers passos del projecte de disseny ulterior del qual el present document n'és l'avantprojecte.

3. Metodologia emprada

La metodologia emprada per a la realització del treball es basa en un seguit d'eslavons necessàriament seqüencials, els quals parteixen dels coneixements assolits durant la titulació i es completen mitjançant el treball individual de documentació i recerca dut a terme.

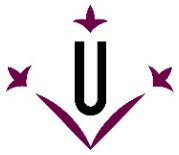
Per a l'anàlisi del mecanisme, prèvia esquematització per comprendre'n la interacció entre els sòlids integrants, s'utilitza un programa de simulació de mecanismes de CAD paramètric 3D (CREO) com a motor de càlcul. La realització d'un algorisme de càlcul dins el mateix programa de simulació, habilita l'estudi de les sol·licitacions originades en les pales del rotor a causa de la velocitat del vent incident, a més de les reaccions originades en tots els sòlids i articulacions que formen part del mecanisme, en qualsevol de les seves configuracions i durant el funcionament normal de l'aparell rotor.

Per a la realització de l'algorisme de càlcul, es prenen els estudis realitzats fins al moment, majoritàriament dels informes de NACA de mitjans del segle passat, se'n normalitza i adequa la notació i es computeritzen les equacions que governen el moviment de l'aparell mitjançant l'entorn matemàtic MATLAB.

El correcte funcionament de l'algorisme de càlcul es comprova mitjançant un full de càlcul realitzat, que a la vegada serveix per esbrinar la paritat entre les variables de funcionament del rotor, com ara les velocitats de rotació i de translació, amb les característiques intrínseques de l'aeronau com en són les seves dimensions més significatives i la massa màxima que l'aparell es capaç d'eleva.

Ja definits els esforços que cada membre integrant del rotor ha de suportar, es procedeix al seu dimensionat tenint en compte les forces aerodinàmiques, centrífugues i gravitacionals a les quals cada sòlid es troba sotmès. Mitjançant aquest esgló, es fan explícits els requisits de disseny de cada part.

Definits els requisits de disseny, es realitza el disseny de detall de tots els sòlids integrants i es prossegueix amb l'estudi, que a partir d'aquest punt es centra en l'anàlisi de resistència mecànica de les parts i el conjunt. Per dur a terme aquest estudi, s'ha calculat (de forma manual) per algunes configuracions més singulars, la resistència mecànica de l'aparell i de nou se n'automatitza el procediment de càlcul mitjançant els entorns CREO i MATLAB. Dels resultats del programa de còmput se n'extreu el seguit de conclusions que conformen les especificacions del disseny definitiu de tots els sòlids integrants, i de retruc del conjunt.



4. Referències

4.1. Llibres i documents

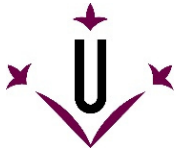
- ^[1] Cap. RODRIGUEZ DIAZ. Capítol IX. *Aeronàutica*. Madrid: Espasa-Calpe, 1935, p. 207-228.
- ^[2] H. SCARPIN, Gustavo. Capítol II. *Apuntes de aeronàutica general*. Còrdova: Instituto Universitario de Aeronàutica, 2002.
- ^[3] BARCALA MONTEJANO, Miguel A. RODRIGUEZ SEVILLANO, Ángel A. *Helicópteros, sistema sustentador y tipos de cabeza de rotor*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica, 2005.
- ^[4] BARCALA MONTEJANO, Miguel A. RODRIGUEZ SEVILLANO, Ángel A. *Helicópteros, Teoría del elemento de pala en vuelo vertical ascendente*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica, 2005.
- ^[5] H. HEYSON, Harry. A brief survey of rotatory wing induced-velocity theory. *NASA Technical Memorandum*. Virginia: 1978, No. 78741.
- ^[6] H. GLAUERT, M.A. A general theory of the autogiro. *NACA Reports and Memoranda*. British A.R.C: 1928, No. 1111.
- ^[7] J. LEISHMAN, Gordon. *Development of the autogiro: A technical Perspective*. Maryland: 2003
- ^[8] B. WHEATLEY, John. An aerodynamic analysis of the autogiro rotor with a comparison between calculated and experimental results. *NACA Reports and Memoranda*. British A.R.C: 1934, No. 487, p. 235-249.
- ^[9] ROGER ULL, Alejandro. *Apuntes de ingeniería aeronáutica, Diseño de helicópteros y aeronaves diversas*. ETSEIAT Terrassa: 2011.
- ^[10] ROSSELLÓ VERDAGUER, Ferràn. Capítols 1, 2 i 3. *El Autogiro y su vuelo*: Thomson Paraninfo, 2005.
- ^[11] U.S. Department of transportation. Capítols 15, 16, 17 i 18. *Rotorcraft Flying Handbook*. Oklahoma: 2000.

4.2. Pàgines i portals web

- [Fòrum d'aviació en ultralleugers, descripció d'experiències i transmissió de coneixement]. (s.d.). <http://aviacionultraligera.es/foro-ulm/>
- [Fòrum d'autogirs tripulats, descripció de diferents tipus d'aparells i experiències de vol]. (s.d.). <http://clubmagni.blogspot.com.es/p/foro-clubautogirosec.html>
- AIRBET, serveis aeronàutics, s.l. [Informació bàsica sobre tipus d'autogirs i rotors]. (s.d.). <http://airbet1965.wixsite.com/airbet>
- *CientificosAficionados*. [Descripció de diversos muntatges d'aeromodels d'autogir per part d'aficionats al modelisme]. (s.d.). <http://www.cientificosaficionados.com/>
- *Aeromodelismo i radiocontrol*. [Descripció de diversos muntatges d'aeromodels d'autogir per part d'aficionats al modelisme]. (s.d.). <http://www.miliamperios.com/foro/autogiros-f50/>
- *El autogiro, ese viejo e incomprendido invento de La Cierva*. [Història i evolució de l'autogir]. (2014, Agost 14). <http://www.aviacioncivil.com.ve/el-autogiro-ese-viejo-e-incomprendido-invento-de-la-cierva>

4.3. Arxius Media

- Johannes Lemburg (2013, Setembre 30). *Gyrocopter Rotor Gopro Hero3*. [Artxiu de vídeo]. Extret de: <https://www.youtube.com/watch?v=7DkgNw3hTKY>
- Fotos Antiguas de Mallorca (2015, Desembre 15). *Juan de La Cierva y el Autogiro (1923)*. [Artxiu de vídeo]. Extret de: <https://www.youtube.com/watch?v=W2nn70aY2ul>
- JustUsFlyers (2016, Març 2). *AC10 Autogyro - Hobbyking*. [Artxiu de vídeo]. Extret de: <https://www.youtube.com/watch?v=h-xyNIUot-4>



5. Notació utilitzada

m : Massa total del conjunt rotor més aeronau

r : Coordenada radial amb origen l'eix de rotació i direcció la generatriu de la pala

R_R : Dimensió radial del pla de rotació

H : Dimensió transversal a la direcció d'avanç de l'autogir

L : Dimensió longitudinal, paral·lela a la direcció d'avanç, de l'autogir

$\Phi_{\text{BALANCEIG}}$: Inclinació del pla de rotació al voltant de l'articulació de balanceig (a dreta i esquerra respecte a la direcció d'avanç)

$\Phi_{\text{CAPCINEIG}}$: Inclinació del pla de rotació al voltant de l'articulació de capcineig (endavant i endarrere respecte a la direcció d'avanç)

Φ_c : Diàmetre d'un caragoll

Φ_b : Diàmetre d'un buló o passador

V : Velocitat d'avanç (translació) de l'aeronau

Ω : Velocitat de rotació de les pales del rotor

Φ : Diàmetre total de la caixa i els sòlids que materialitzen les articulacions de batiment i arrossegament.

ch : Corda de la pala (chord)

ρ : Densitat de l'aire considerada

k : Constant de proporcionalitat entre el coeficient de sustentació i l'angle del vector vent incident en una pala

λ : Variable que relaciona la component tangencial del flux d'aire (V) amb la velocitat en la punta de les pales deguda a la rotació.

μ : Variable que relaciona la component normal del flux d'aire (V) amb la velocitat en la punta de les pales deguda a la rotació.

θ : Angle de pas fix (de muntatge) de les pales respecte el pla de rotació

B : Coeficient de pèrdues en punta de pala

Φ_R : Inclinació del pla de rotació respecte la direcció d'avanç

C_L : Coeficient de sustentació de la pala

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç de la pala

ϕ : Angle d'incidència del vent en la pala respecte la direcció d'avanç d'aquesta

α_p : Angle comprès entre la direcció del vent incident i la corda d'un perfil alar

Alpha : Notació genèrica per a l'angle d'incidència del vent

ΣM_{boixa} : Sumatori dels moments produïts per la suma vectorial de la sustentació i la resistència a l'avanç aplicats al centre de la caixa respecte l'eix d'aquesta

F_S : Força de sustentació total produïda per una pala i aplicada a l'articulació de batiment

F_C : Força centrífuga produïda per la rotació d'una pala

F_R : Força de resistència a l'avanç total del conjunt rotor

R : Força resultant efectuada pel pes del conjunt aeronau més les forces resultants del vol no estacionari

g : Acceleració de la gravetat

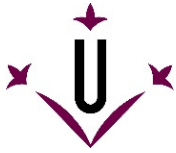
a : Acceleració deguda al vol no estacionari de l'autogir

m_{pala} : Massa d'una pala

C_M : Coeficient de majoració de les forces

d : Diàmetre d'un allotjament de buló més coixinet antifrcció

e : Distància entre els eixos de balanceig i capcineig del pla de rotació



G : Notació del centre de gravetat d'un sòlid

I_{ii}^0 : Moments d'inèrcia, vectors propis de la matriu tensor d'inèrcia

$[\mathbb{I}_G]_V$: Matriu del tensor d'inèrcia en G

β : Angle de batiment de la pala respecte el pla de rotació descrit per la boixa

Ψ : Angle girat per la boixa respecte la posició inicial, que queda definida per la pala 1 en sentit contrari a la direcció d'avanç

6. Definicions prèvies

Per tal d'abordar el problema de quantificar les forces aerodinàmiques que sorgeixen en el rotor de l'autogir en moviment, es descriuen els teoremes de conservació, aplicats a un fluid, juntament amb la teoria de l'element de pala. Aquests, conformen el substrat sobre el qual es realitzen tots els càlculs efectuats en el treball.

6.1. Teorema de la quantitat de moviment

El teorema de la quantitat de moviment lineal o de conservació de l'energia deriva directament de la segona llei de Newton: "El canvi de moviment és proporcional a la força motriu i es produeix en línia recta en la direcció en què s'imprimeix la força". Aquesta llei és de caràcter conservatiu, el que significa que no obeeix als processos de dissipació d'energia fruit de la fricció amb l'aire. Així, acceptar la bondat d'aquesta llei en el cas d'estudi, representa fer la simplificació de considerar l'aire com si es tractés d'un gas ideal, i per tant, mancat de viscositat, canvis de densitat i compressibilitat.

L'aplicació de la teoria de la conservació de la quantitat de moviment es duu a terme per mitjà de les lleis fonamentals de conservació de moviment en un fluid: llei de conservació de la massa, de la quantitat de moviment, i del moment cinètic. Les quals es descriuen segons les equacions següents:

- Llei de la conservació de la massa: La massa d'un sistema tancat es conserva i no canvia.

$$\left. \frac{dm}{dt} \right|_S = 0$$

- Llei de la conservació de la quantitat de moviment: Si l'entorn exerceix força sobre un sistema, aquest tendeix a accelerar-se.

$$\sum \vec{F}_S = m \cdot \vec{a}$$

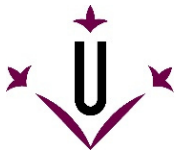
- Llei de conservació del moment cinètic: Si s'exerceix un parell en el centre de masses d'un sòlid, s'origina una rotació al voltant d'aquest.

$$\sum \vec{M}_S = \sum \vec{r} \times \vec{F}$$

- Llei de conservació de l'energia: Primera llei de la termodinàmica que plasma la conservació de l'energia.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sistema}}$$

Tot i les simplificacions implícites en aquestes quatre lleis, la seva utilització és vital per tal d'iniciar l'estudi aerodinàmic del mecanisme rotor de l'autogir, donat que brinden resultats prou fidedignes a l'hora de valorar els fluxos d'aire que travessen la superfície del pla de rotació. Tot i això, la forma en què estan escrites aquestes lleis està orientada a l'estudi



de partícules o bé sòlids en moviment i no són compatibles amb els estudis aerodinàmics tals com els continguts en aquest treball. Per això és imprescindible l'aplicació del Teorema de Transport de Reynolds, el qual relaciona la derivada temporal d'una propietat del sistema, amb la variació d'aquesta en un volum de control fitat:

Essent A una propietat canviant del sistema, i avaluant aquest canvi mitjançant la seva derivada $\alpha = dA/dm$ el Teorema de Transport de Reynolds queda definit segons l'expressió:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} A_{\text{sistema}}}_{\text{Variació temporal de la propietat A del sistema}} = \underbrace{\frac{d}{dt} \left(\int_{v.c.} \alpha \cdot \rho \cdot dV \right)}_{\text{Variació temporal de la propietat A en el volum de control}} + \underbrace{\int_{s.c.} \alpha \cdot \rho \cdot (\vec{C}_r \cdot \vec{n}) \cdot dS}_{\text{Flux de la propietat A que entra o surt del sistema a través de la superfície de control}}$$

Essent C_r la velocitat relativa del fluid respecte el volum de control.

Llavors, aplicant el teorema de Transport a les lleis de conservació anterior, i fent la consideració del fluid (aire) és incompressible, les expressions anteriors en resulta:

- Llei de la conservació de la massa:

$$0 = \int_{s.c.} \vec{C} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

- Llei de la conservació de la quantitat de moviment:

$$\sum \vec{F}_S = \rho \cdot Q \cdot (C_{\text{sortida}} \cdot \vec{n}_s - C_{\text{sentrada}} \cdot \vec{n}_e)$$

- Llei de conservació del moment cinètic:

$$\int_{s.c.} (\vec{r} \times \vec{c}) \cdot \rho \cdot (\vec{c} \cdot \vec{n}) = \sum (\vec{r} \times \vec{c})_{\text{sortida}} \cdot \dot{m}_{\text{sortida}} - \sum (\vec{r} \times \vec{c})_{\text{entrada}} \cdot \dot{m}_{\text{entrada}}$$

- Llei de conservació de l'energia:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt} \int_{v.c.} e \rho \cdot dV + \int_{s.c.} e_{\text{entrada}} \cdot \rho \cdot v_{\text{entrada}} \cdot dS_{\text{entrada}} + \int_{s.c.} e_{\text{sortida}} \cdot \rho \cdot v_{\text{sortida}} \cdot dS_{\text{sortida}} \quad ; \quad \text{amb } e = \frac{dE}{dm}$$



6.2. Teoria de l'element de pala

La teoria de l'element de pala, extensament utilitzada, té com a finalitat calcular l'empenta produïda per un determinat perfil alar, avaluant les forces i moments aerodinàmics que actuen sobre un element diferencial de secció. De la integració al llarg de tota la longitud (R) de la pala en resulta la força sustentadora total efectuada. Aquesta teoria proporciona de manera detallada la distribució de càrregues sobre el rotor utilitzant com a principi la teoria de línia de sustentació, però en el cas d'estudi, aplicada a una ala rotatòria o pala.

La teoria, per tant, estableix que cada element diferencial de secció en què es divideix la pala actua com a un perfil aerodinàmic bidimensional, capaç de produir forces aerodinàmiques elementals.

Cal recordar que, si bé aquesta teoria és habitualment utilitzada per al càlcul de les forces aerodinàmiques originades en un rotor, no deixa de ser una aproximació, que és perfectament aplicable sempre que el nombre de pales del rotor no sigui prou elevat com perquè l'estela turbulenta d'una pala afecti les velocitats incidents de la següent. Així, per a la utilització d'aquesta teoria es marca un màxim de cinc pales, que s'entén com al màxim perquè a cadascuna de les pales incideixi un flux d'aire que es considera no pertorbat.

D'aquesta teoria se'n desprèn que el conjunt de forces aerodinàmiques que actuen sobre un element diferencial de la pala es poden desglossar en dues: la força de resistència a l'avanç (D de la notació anglosaxona drag), en la mateixa direcció i sentit que el flux d'aire incident en el perfil i la força sustentadora (L , lift), perpendicular a aquesta:

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ch \cdot C_D \cdot V^2$$

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ch \cdot C_L \cdot V^2$$

Essent:

ρ : la densitat de l'aire

ch : la corda de la secció de pala (*chord*)

C_D : el coeficient de resistència a l'avanç del perfil alar

C_L : el coeficient de sustentació del perfil alar

V : la velocitat de l'aire relativa incident en la secció de pala

La resultant de totes les forces aerodinàmiques que actuen sobre una pala del rotor, s'obté mitjançant la integració de la suma vectorial de les forces elementals dL i dD al llarg de tota la generatriu de la pala (dimensió radial amb origen en el centre de rotació de les pales).

6.3. Rotor semirígid i rotor articulats

En principi qualsevol sistema rotor capaç d'entrar en autorotació és vàlid per ser utilitzat en un autogir, aquests es categoritzen en funció de la seva complexitat en rotors del tipus rígid, semirígid o articulats. La principal diferència entre les tres famílies de rotors, és el nombre de parells cinemàtics que permeten, cadascun respectivament, més moviments relatius entre les pales i la caixa del rotor.

S'anomenen rotors rígids aquells en què la pala roman sempre continguda en el pla de rotació, essent l'única articulació entre la pala i la caixa la d'arrossegament, que permet el moviment lliure però esmorteït de la pala al voltant d'un eix perpendicular al pla de rotació. Aquesta articulació és vital per garantir el bon alineament de les pales que provoca la força centrífuga fruit de la rotació, a la vegada que elimina vibracions en l'aeronau i n'elimina la fatiga a la qual es sotmeten les pales quan l'aire relatiu canvia sobtadament de direcció o sentit.

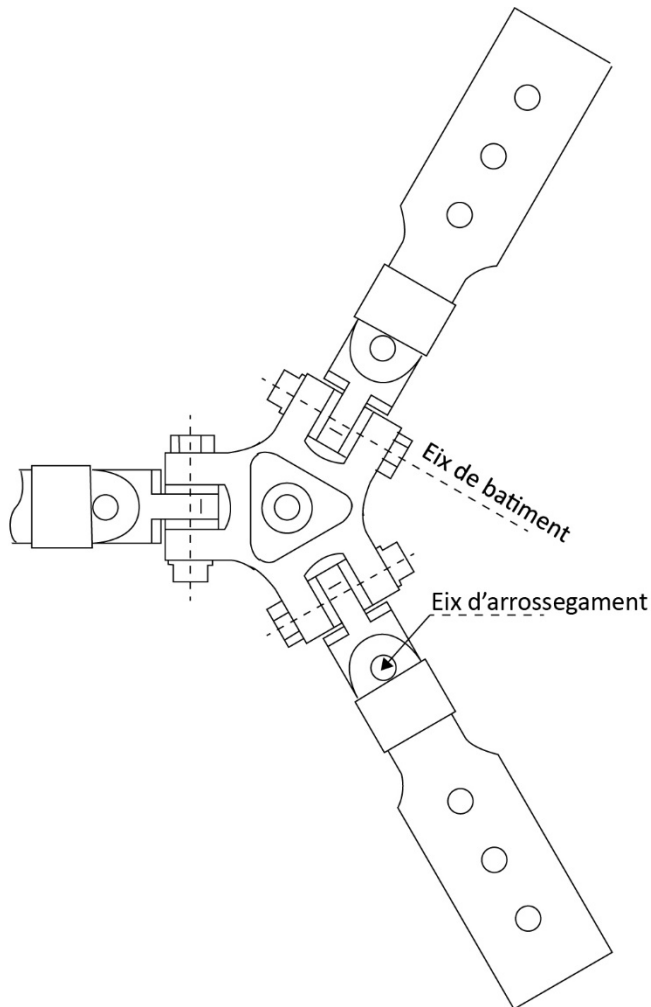
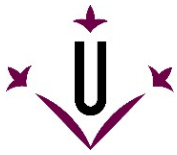


figura 1 – Eixos d'arrossegament i batiment del rotor

En oposició, els rotors articulats són aquells que atorguen a la pala els tres graus de llibertat angulars respecte la caixa, mitjançant les articulacions d'arrossegament, de batiment i el pas variable. L'articulació de batiment és necessària donat que la sustentació no es reparteix de manera homogènia en tot el pla del rotor, decreixent en les pales que avancen en el mateix sentit al d'avanç de l'autogir, i creixent en les pales que ho fan en sentit contrari. Aquesta articulació, definida per un eix contingut al pla de rotació i perpendicular a la generatriu de la pala permet que la pala s'elevi o decaigui en funció de la sustentació associada a la posició en què es trobi.

La definició de rotor semirígid acaba amb la implementació d'aquestes dues articulacions, la d'arrossegament i la de batiment, reservant així la notació de rotor articulats per aquells que a més de posseir les articulacions esmentades són capaços de modificar l'angle de pas de cadascuna de les pales, mitjançant un parell cinemàtic que permet la rotació de la pala al voltant de la seva generatriu (rotors pràcticament idèntics als dels helicòpters).

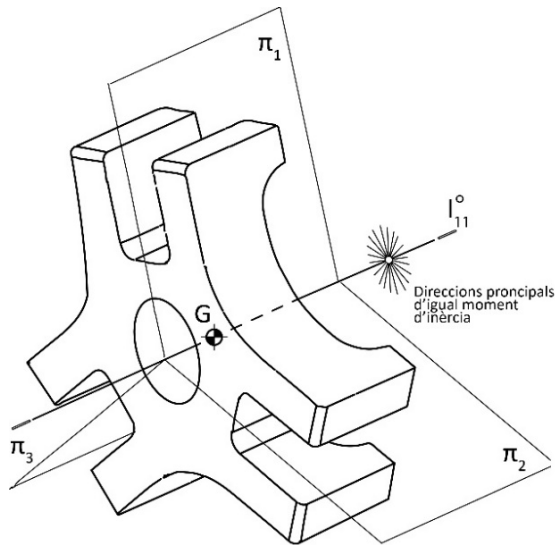
En el treball que es presenta, el rotor dissenyat pertany a la família dels semirígid, els més habituals en autogirs, i es descarta l'opció de dotar-lo de pas variable, ja que des d'un principi no es contempla l'opció d'afegir al disseny un prellançador del rotor per possibilitar l'enlairada vertical (principal avantatge dels rotors articulats).



7. Anàlisi aerodinàmica del conjunt rotor principal

7.1. Sistema inercial rotor, perquè tres pales?

Al capdamunt del mecanisme rotor es troba la caixa, sòlid que defineix el pla de rotació de les pales i en permet el batiment. La voluntat de dotar l'aparell de tres pales en comptes de dues (solució més habitual), rau en el fet que la part mòbil del rotor esdevé així un rotor simètric (veure *figura 2*).



π_i : Plans de simetria de la distribució de massa

figura 2 – Rotor simètric caixa

Així, si es pren com a base vectorial la formada per qualsevol parella de versors que neixen en G i són perpendiculars a I_{11}^o , la matriu del tensor d'inèrcia queda diagonalitzada.

$$[I_G]_V = \begin{bmatrix} I_{11}^o & & \\ & I_{22}^o & \\ & & I_{33}^o \end{bmatrix}$$

I els seus valors propis, per contenir el centre de masses, s'anomenen moments centrals d'inèrcia. Per trobar-se en el sòlid dos o més plans de simetria de la distribució de masses no ortogonals entre ells (π_i), el sòlid esdevé rotor simètric per a tots els punts de la intersecció d'aquests plans i en cadascun d'ells són iguals els moments d'inèrcia (per a les direccions perpendiculars a la seva intersecció).

L'avantatge és doncs que un rotor simètric ho és per definició respecte qualsevol parell de direccions contingudes en el pla perpendicular a l'eix de rotació, els quals conserven sempre el mateix moment d'inèrcia. També, donada la geometria del rotor, els productes d'inèrcia són nuls, garantint així un moviment rotatiu suau sense vibracions fruit del desequilibri inercial.

No obstant això, cal tenir en compte que la geometria del conjunt rotor (caixa més pales) varia durant el seu funcionament, canviant la posició relativa de les pales respecte a la caixa. Aquest fet posa fi a la simetria exposada, i per tant les consideracions fetes pel que fa al tensor d'inèrcia de la caixa només són extrapolables al conjunt sempre i quan es puguin quantificar els angles de batiment i d'arrossegament i siguin prou petit per a negligir-los.

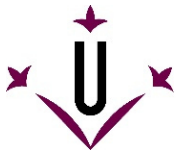
7.2. Velocitat induïda

Es defineix la velocitat induïda com a la impartida al flux d'aire que travessa el rotor a causa de les forces aerodinàmiques generades per aquest. Aquesta velocitat, fruit de l'aplicació del teorema de la quantitat de moviment al mecanisme rotor, esdevé una bona aproximació inicial, que com es veurà més endavant, cal que sigui complementada amb la teoria de l'element de pala per tal de poder realitzar l'estudi dinàmic del moviment d'autorotació.

Cal però entendre que, acceptar aquest raonament com a vàlid, implica allunyar-se de la realitat, ja que és necessari assumir certes hipòtesis, la majoria de les quals representen una idealització de l'aire.

Les hipòtesis acceptades per tal de poder determinar la velocitat induïda en un rotor són:

- El fluid es considera incompressible i de viscositat nul·la.
- L'estela del rotor es projecta en la direcció perpendicular al pla del rotor.
- Es considera la velocitat induïda uniforme sobre tot el pla del rotor.



A priori, sembla que el concepte de velocitat induïda atempta contra la lògica de l'autogir, donat que la velocitat de translació de l'aeronau V incideix per la part inferior del rotor. Aquesta velocitat és la que produeix la sustentació i la resistència a l'avanç en les pales, generant una resultant que pot provocar una acceleració angular positiva o negativa del rotor depenent de la regió del pla de rotació.

Per l'altra banda, cal entendre que l'enlairament de l'autogir és una aplicació de la tercera llei de Newton, i per tant, per a cada acció (enlairament de l'autogir) li correspon una reacció contrària (desplaçament d'aire en direcció descendent), fet assimilable al que succeeix en un perfil alar.

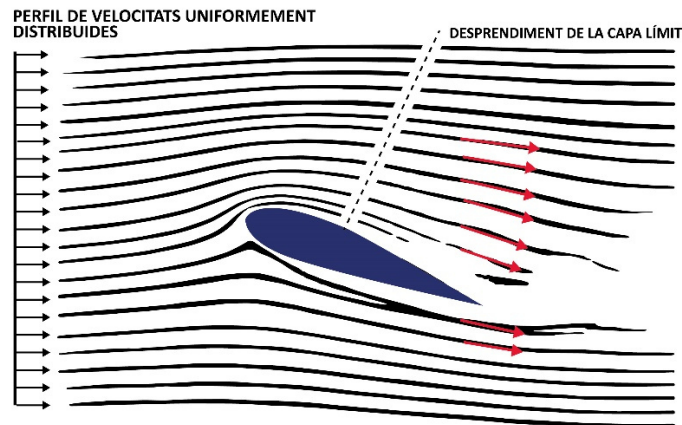


figura 3 – Flux al voltant d'un perfil alar

Habitualment, almenys en una primera aproximació, s'explica la sustentació dels aerodines mitjançant el Principi de Bernoulli, és a dir, la diferència de convexitat de la part superior (extradós) de l'ala i la inferior (intradós), el que provoca un augment de velocitats en l'extradós, fet que implica una diferència de pressions que empeny l'ala amunt. Però aquesta explicació no concorda amb els avions d'acrobàcies capaços de volar cap per avall.

La sustentació d'un perfil, a més a més, es pot explicar com un desviament en direcció descendent del flux d'aire incident en la pala (l'acció), el que imprimeix en l'ala una força ascendent que la fa enlairar (la reacció) (figura 3).

Llavors es dedueix que la rotació de les pales, en certes regions del pla de rotació, provoca una alteració del flux d'aire desviant-lo cap avall, essent aquesta regió la part del rotor que consumeix la potència que genera la resta (autorotació).

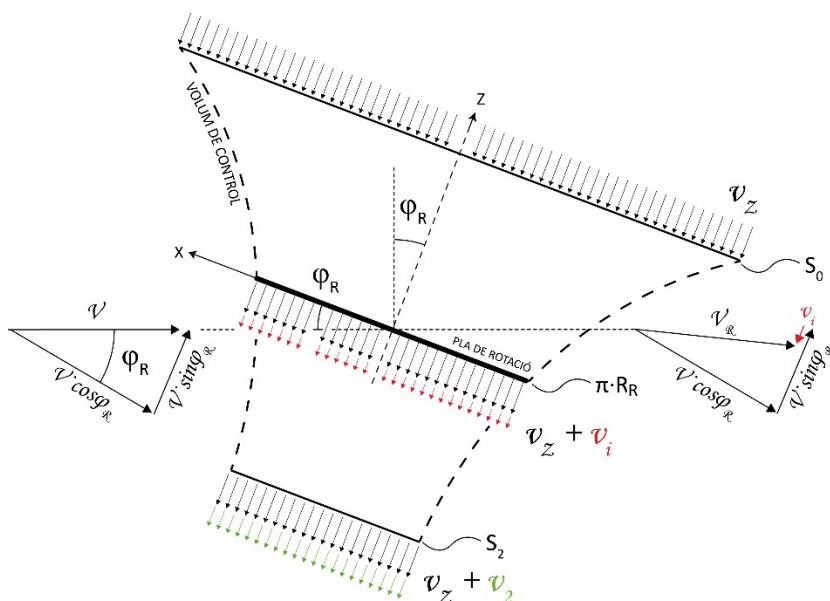


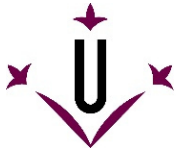
figura 4 – Volum de control i velocitats en el rotor

Per determinar la velocitat induïda es considera llavors el volum de control que es mostra en línies discontinües en la figura 3, aquest queda definit per una secció aigües amunt (S_0) i s'estén i estreny en direcció z i sentit negatiu, formant una meitat d'hiperboloide, a través del qual la velocitat de l'aire s'incrementa.

Per avaluar com s'incrementa el mòdul de la velocitat en direcció z , cal tenir en compte que la quantitat de massa que abandona el volum de control és igual a la que entra.

$$\oint \rho \vec{v} d\vec{S} = 0 \rightarrow \dot{m} = \rho S(v_z + v_i) \quad [1]$$

s.c.



De l'aplicació del teorema de conservació de la quantitat de moviment, i considerant els fluxos incident i sortint com a estacionaris, en resulta una força ascendent total T que enlaira el rotor:

$$T = \rho S_2 (v_z + v_i)^2 - \rho S_0 v_z^2 \quad [2]$$

Aplicant l'equació de la conservació de la massa [1] i simplificant en resulta:

$$T = \dot{m} \cdot v_2 \quad [3]$$

De l'equació de conservació de l'energia se'n desprenen dues equacions addicionals gairebé de caràcter axiomàtic:

- La potència efectuada pel rotor és la responsable de la diferència d'energies cinètiques del flux d'aire entre l'entrada i la sortida del volum de control:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} ((v_z + v_2)^2 - v_z^2) \quad [4]$$

- La potència es pot calcular també mitjançant el producte de la tracció (T) efectuada pel rotor i la velocitat impartida a l'aire:

$$P = T(v_z + v_i) = \dot{m} v_2 (v_z + v_i) \quad [5]$$

Igualant les dues expressions anteriors ([4] i [5]), s'obté la relació de velocitats [6]:

$$v_2 = 2 \cdot v_i \quad [6]$$

Que substituint a l'equació [3] i aplicant novament l'equació de conservació de la massa, en resulta:

$$v_i = \frac{T}{2\pi R^2 \rho V} \quad [7]$$

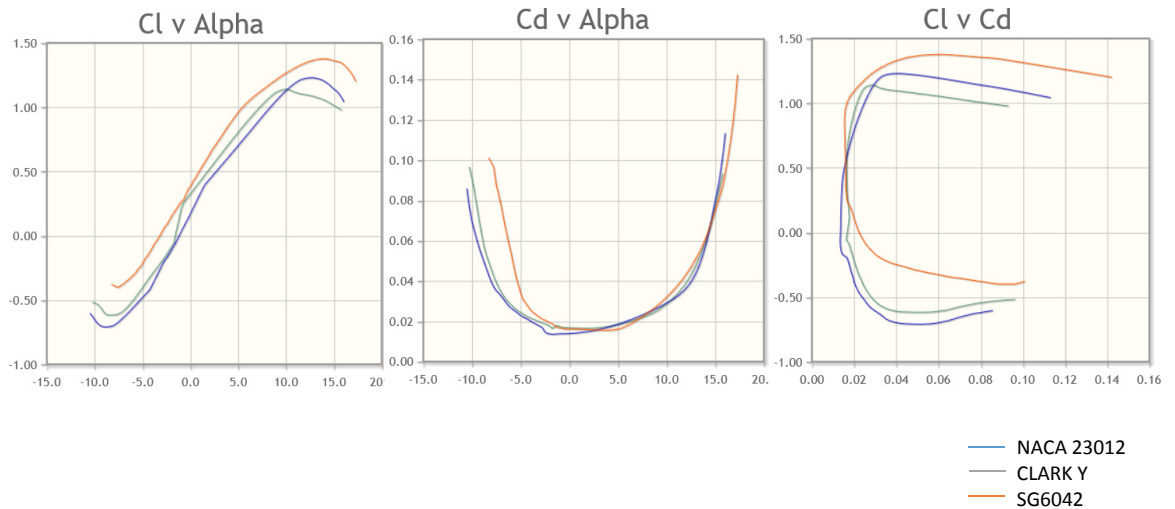
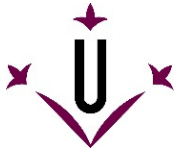
Quedant definida així la velocitat induïda en el rotor, considerant exclusivament la direcció en què es produeix la tracció o força sustentadora total del rotor. Es defineix com la velocitat impresa al flux d'aire que travessa el rotor, necessària per produir l'enlairament del rotor.

7.3. Elecció del perfil alar i geometria general de les pales

El primer pas per afrontar el disseny mecànic de l'aparell és definir el perfil alar més adequat, a partir dels més utilitzats en aeronaus d'aquesta índole. L'estudi és realitzat mitjançant un full Excel de càlcul programat per retornar els valors de sustentació i resistència a l'avanç en cada punt de la pala, en qualsevol posició que es trobi i per als diferents perfils estudiats.

taula 1 – Avantatges i inconvenients perfils alars estudiats

Perfil alar	NACA 23012	CLARK Y	SG 6042
Secció			
Avantatges	Referència	Menor velocitat de vol (translació de l'aeronau) necessària	Menor velocitat de rotació de les pales necessària
Inconvenients	Referència	Menor sustentació per angles d'incidència elevats	Menor capacitat de generar tracció per a angles negatius
	ESCOLLIT	DESCARTAT	DESCARTAT



gràfica 1 – Gràfiques coeficients de sustentació i resistència a l'avanç per als perfils estudiats

Com es pot observar en els gràfics comparatius de la figura 3, el perfil que ofereix millors resultats per al mecanisme estudiat és el perfil NACA 23012. Tot i no ser el que ofereix majors valors de sustentació, és preferible als descartats per tenir una bona relació sustentació/resistència, i al seu torn provoca coeficients menors de resistència a l'avanç per a angles compresos entre -10 i 10° en oposició al perfil SG6042. A més, el perfil seleccionat endarrereix més el punt d'entrada en pèrdua en comparació al perfil Clark Y per a valor d'angles d'incidència positius elevats, fet que es tradueix en una major capacitat sustentadora de les parts més properes a l'eix central del rotor.

En la taula 4 es mostra els valors obtinguts, considerant els paràmetres de la taula 5 (pàg. 21), pel que fa a la capacitat sustentadora (massa que el rotor és capaç d'eleva) i el moment resultant a la caixa per als diferents perfils considerats.

taula 2 – Comparativa sustentació i condició d'autorotació perfils estudiats

$V = 31,32 \text{ Km/h}$ $\Omega = 1439 \text{ r.p.m}$	NACA 23012	CLARK Y	SG 6042
M [Kg]	2,2	1,71	1,84
ΣM_{caixa} [N·m]	0,15	-12,1	5,99

Cal tenir present que és desitjable un moment resultant a la caixa positiu però de magnitud reduïda per tal de vèncer les friccions parasitàries del rotor, ja que aquest moment és el que condiciona el fenomen d'autorotació, accelerant el rotor quan és positiu i frenant-lo en cas contrari.

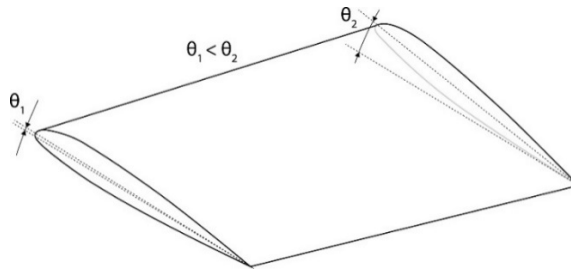
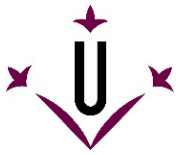


figura 5 – Porció d'ala amb angle de pas (ϑ) variable

De manera tangencial també, s'ha estudiat a grans pinzellades la influència d'un angle de pas variable al llarg de la generatriu de la pala, el que s'anomena torsió de pala, tot i quedar descartada en part per les dificultats productives que comporta i en part pel temps disponible. Però, donat que el present treball s'engloba dins el marc d'un avantprojecte, tan sols fent-ne menció i facilitant alguns resultats senzills de l'anàlisi aerodinàmic discret s'ha considerat suficient.

La torsió de pala introduïda consisteix en, tot mantenint la corda de la pala constant, implementar un angle de pas de la secció més propera a la boixa $\theta_1 = 5^\circ$ que es modifica al llarg de la generatriu de la pala fins a assolir $\theta_2 = 10^\circ$. La principal conclusió que s'extreu de l'estudi realitzat es resumeix en la *taula 5*, en la que es mostra una reducció de la velocitat angular necessària per garantir la sustentació de l'autogir, al mateix temps que se'n possibilita una major velocitat de translació (d'avanç) de l'aparell.

taula 3 – Comparativa entre pala d'angle de pas constant i variable

NACA23012 M = 2,2 Kg	θ constant ($\theta = 7^\circ$)	θ variable ($\theta_1 = 5^\circ$) ($\theta_2 = 10^\circ$)
V [Km/h]	31,32	35,77
Ω [r.p.m.]	1450	1203

7.4. Tracció del rotor

El mètode emprat per al càlcul de la sustentació total efectuada pel rotor és una adaptació de l'utilitzat en l'article de la NACA escrit per en John B. Wheatley [ref. 8, pàg 7]. En apartats posteriors, mitjançant una aproximació per mètodes numèrics, es calcula de forma més acurada la tracció total efectuada pel rotor, però per decidir els paràmetres principals de funcionament del rotor, es considera el mètode de John B. Wheatley com a una primera aproximació.

Amb la teoria de l'element de pala, s'assumeix que la resultant de totes les forces actua sobre un element (dr) de secció el perfil alar de la pala, i que la seva magnitud, direcció i sentit depèn exclusivament de les velocitats contingudes en aquest pla. Aquesta simplificació és equivalent a menysprear la component radial de la velocitat de l'aire en impactar contra la pala.

També per simplificar el mètode de càlcul, resulta habitual no considerar la contribució de la força de resistència a l'avanç a la sustentació de la pala {veure apartat 9, pàg 22}. Llavors la velocitat del vent incident en una secció de pala es pot separar en la seva component tangencial i la perpendicular, segons es mostra en la *figura 6*.

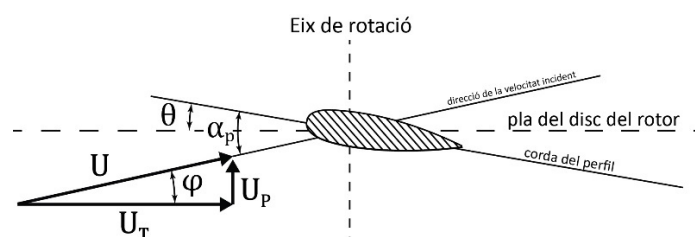
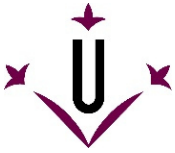


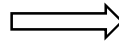
figura 6 – Diagrama de l'angle d'atac en un element de pala



L'angle ϕ , comprès entre la direcció de la velocitat del vent incident en el perfil i el pla de rotació, és petit en la major part de la pala del rotor, essent major de 10^0 tan sols en les parts més properes a la caixa. Aquestes seccions properes a l'eix de rotació es menyspreen en el càlcul de la tracció efectuada pel rotor, donada la seva reduïda velocitat i perquè sovint l'angle α_p provoca que el perfil entri en pèrdua. Llavors, és habitual fer la simplificació de considerar el sinus igual a l'angle i el cosinus igual a la unitat.

$$\rightarrow U_T = U \cdot \cos\phi \approx U \quad [8]$$

$$\rightarrow U_P = U \cdot \sin\phi \approx U \cdot \phi \quad [9]$$



$$\rightarrow U^2 = U_T^2 \quad [10]$$

$$\rightarrow \phi U^2 = U_T \cdot U_P \quad [11]$$

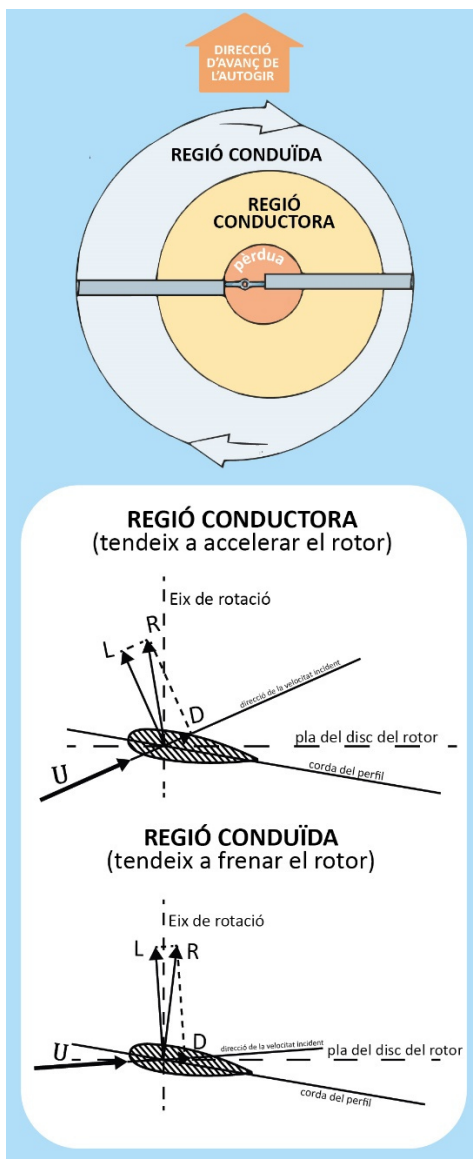


figura 7 – Regions conduïda, conductora i en pèrdua del pla de rotació

Per determinar la tracció efectuada pel rotor, cal primer determinar quina regió del pla de rotació genera sustentació (regions conduïda i conductora), i en quina part de les pales el flux d'aire incideix per la part posterior provocant que el perfil entri en pèrdua. Cal entendre que, en el vol estacionari d'avanç la distribució de velocitats en el disc rotor varia. Les velocitats incidents en les pales, que fruit de la rotació, avancen amb el mateix sentit que el del vol de translació de l'autogir són sempre major que les que retrocedeixen. Així la regió de pèrdua s'ubica cap a la dreta (figura 7) sempre que el sentit de gir del rotor sigui horari.

La frontera entre la regió que genera sustentació i la de pèrdua queda determinada per tots aquells punts en què la velocitat tangent a la secció de la pala (U_T) és nul·la, és a dir, tots aquells punts en què la projecció de la velocitat de les pales deguda a la rotació en la direcció d'avanç i la velocitat del vent deguda a l'avanç de l'autogir es compensen. Segons la relació:

$$\Omega r - V \cos\phi_R \cdot \sin\psi = 0 \quad [12]$$

Quedant definit així el radi límit (R_L), a partir del qual el disc rotor genera sustentació:

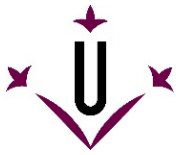
$$R_L = \frac{V \cos\phi_R \cdot \sin\psi}{\Omega} \quad [13]$$

Llavors els límits de la integral per al càlcul de la força sustentadora total del rotor queden definits per $[R_L, R_R]$. A tall de simplificació, es considera també que la dependència entre el coeficient sustentador C_L i l'angle d'incidència en el perfil és lineal: $C_L = k \cdot \theta$ (gràfica 2).

Efectuades aquestes consideracions, i amb la relació entre les velocitats incident, tangencial i perpendicular a la secció que es desprèn de la figura 6:

$$\phi \approx \frac{U_P}{U_T} \quad [14]$$

L'angle d'incidència del flux d'aire total en el perfil serà: $(\phi + \theta)$ (figura 6).



Essen b el nombre de pales del rotor, ch la corda d'aquestes i BR el factor de pèrdua en la punta de la pala que equival a ($BR=R_R \cdot ch$), en resulta una sustentació total del rotor T :

$$T = \frac{b}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{BR} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ch \cdot U^2 \cdot C_L \cdot dr \quad [15]$$

A l'equació [11] cal restar-li la regió en què el flux d'aire incideix en les pales en sentit invers, provocant tan sols resistència a l'avanç i sustentació nul·la. Separant la integral [11] en dues parts (la que sustenta i la de pèrdua), i tenint en compte les aproximacions [10] i [11], en resulta:

$$T = \frac{b}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{BR} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ch \cdot k \cdot (\theta \cdot U_T^2 + U_T \cdot U_P) dr - \frac{b}{\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{R_L} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ch \cdot k \cdot (\theta \cdot U_T^2 + U_T \cdot U_P) dr \quad [16]$$

Integrant l'expressió [16] en resulta l'equació de John B. Wheatley [17].

8. Paràmetres de funcionament del conjunt rotor principal

8.1. Paràmetres de dimensionat del rotor

Es considera paràmetres de funcionament totes les variables necessàries per descriure el moviment del mecanisme (velocitat de vol i de rotació de les pales), a més de la geometria bàsica del rotor (diàmetre de la boixa i corda i longitud de les pales).

Primerament, cal definir el sentit de gir del rotor que per al cas d'estudi s'ha considerat horari. Aquesta decisió pot semblar arbitrària, i en part ho és, però cal que el sentit de gir escollit per al rotor sigui coherent amb el parell que l'hèlix impulsora realitza sobre la nau. En autogirs, existeixen diverses tècniques per tal de contrarestar el moment de bolcada (balanceig de l'aeronau) que efectua l'hèlix impulsora com a reacció del gir que en provoca l'avanç, com ara un lleuger desplaçament de l'eix de l'hèlix motriu (tècnica molt habitual en els avions d'ala fixa). Però aprofitant la dissimetria del rotor (les pales que avancen en la mateixa direcció que l'aeronau generen més sustentació), s'escull un sentit de gir horari per a una hèlix motriu que gira en sentit antihorari (desplaçament de l'aire cap endarrere) (figura 8).

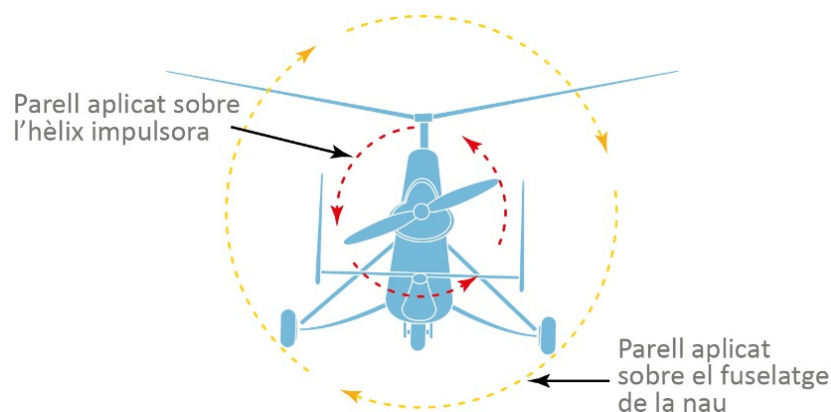


figura 8 – Parell aplicat sobre l'hèlix impulsora i el fuselatge

A través de la documentació prèvia ha estat possible extreure els valors que garanteixen el correcte funcionament de l'aparell, els quals es basen en els estudis realitzats per John B. Wheatley l'any 1933, enginyer de NACA que realitzà una anàlisi matemàtica d'autogirs tripulats, i que brindà l'expressió equació 1.

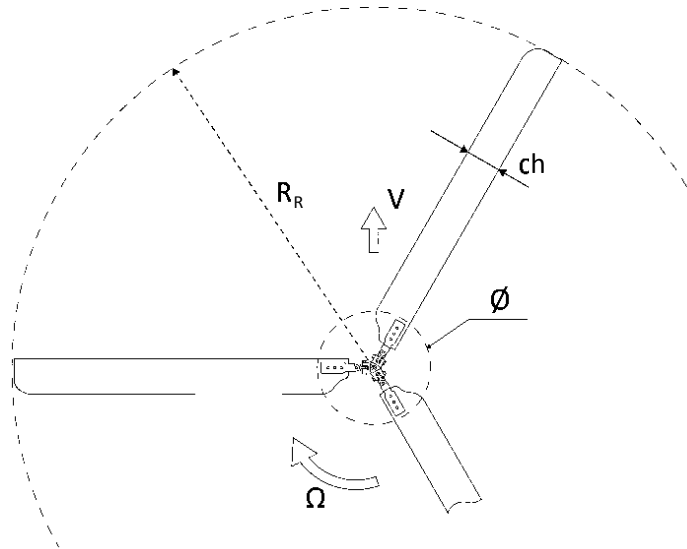


figura 9 - Paràmetres de funcionament del rotor

$$T = \frac{1}{2} b c \rho k \Omega^2 R^3 \left[\frac{1}{2} \lambda \left(B^2 + \frac{1}{2} \mu^2 \right) + \theta \left(\frac{1}{3} B^2 + \frac{1}{2} \mu^2 B - \frac{4}{9\pi} \mu^3 \right) + \frac{1}{4} \mu^2 b_2 B + \frac{1}{8} \mu^3 a_1 \right] \quad [17]$$

En l'equació [8] es relaciona la capacitat sustentadora del mecanisme rotor (T) amb els paràmetres de funcionament de l'aeronau (velocitat de translació "V" i velocitat angular de les pales al voltant de l'eix de la caixa "Ω"), per mitjà de dues variables sobradament conegudes en el camp de l'aeronàutica d'ales giratòries μ i λ les quals es defineixen com:

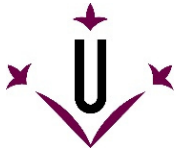
$$\mu = \frac{V \cdot \cos \varphi_R}{\Omega \cdot R_R} \quad [18]$$

λ: Variable que relaciona la component tangencial del flux d'aire, degut a la translació de l'aeronau (V), que incideix en el pla del rotor (amb normal inclinada "φ_R" respecte a la direcció d'avanç), amb la velocitat en la punta de les pales deguda a la rotació.

$$\lambda = \frac{V \cdot \sin \varphi_R}{\Omega \cdot R_R} \quad [19]$$

μ: Variable que relaciona la component normal del flux d'aire, a causa de la translació de l'aeronau, que incideix en el pla del rotor (per la part inferior), amb la velocitat en la punta de les pales deguda a la rotació.

A més, l'equació 1 necessita la introducció dels paràmetres geomètrics exposats en la figura 1, els quals es denoten en l'expressió com a:



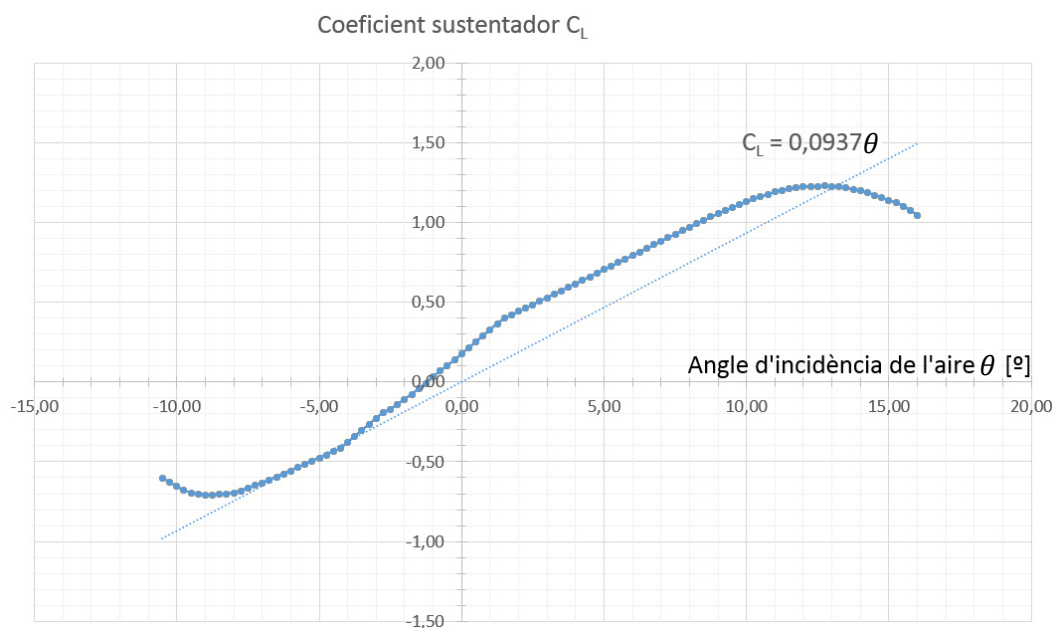
taula 4 – Repercussió en l'equació [8] dels paràmetres de funcionament del rotor

		Repercussió en l'equació 1
b:	nombre de pales del rotor	L'equació depèn de manera lineal del nombre de pales (3 pales), sempre i quan l'estela d'una no ocasionin interferències en el flux incident d'una altra
ch:	corda de les pales	Fitada en 40 mm, intervé de manera lineal en l'equació sempre que no s'ocasionin interferències en el flux d'unes pales a altres
R_R:	dimensió radial de les pales	El radi, o dimensió longitudinal de les pales intervé de manera cúbica en l'expressió, essent el paràmetre més influent en la sustentació resultant (T)
Ω:	velocitat angular de les pales	Intervé en l'equació de manera quadràtica, essent el segon paràmetre més influent en la sustentació
θ:	angle de pas fix de les pales respecte al pla de rotació	Intervé de manera lineal en l'equació, essent un dels paràmetres més importants per garantir l'autorotació del mecanisme

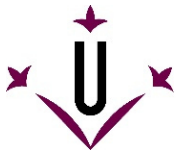
També, per a la utilització de l'equació 1 és necessari determinar el factor "B" de pèrdua en la punta de les pales ($B=0,992$), el qual queda definit en aquests tipus d'aeronaus (d'ales giratòries) per l'expressió $B \cdot r = r - c$.

El funcionament de la citada equació es basa en una analogia de tot el conjunt rotor a la teoria d'element d'ala, essent doncs fruit d'una integral que contempla la direcció i magnitud de les velocitats incidents en el perfil de les pales en totes les possibles situacions i en qualsevol punt de la pala. Per aquest fet és necessari aproximar el coeficient de la força sustentadora (C_L) mitjançant una equació lineal que passa per l'origen (sustentació nul·la per a angle d'incidència zero), de la forma:

$$C_L = k \cdot \theta \quad [20]$$



gràfica 2 – Aproximació lineal de la corba del coeficient de sustentació



Essent el paràmetre "k" el pendent de la recta que cal introduir en l'equació 1 ($k=0,0937$) i ϕ l'angle d'incidència del flux d'aire.

Cal remarcar però, que l'expressió desenvolupada per l'enginyer John B. Wheatley no contempla amb fidelitat els fenòmens de batiment i d'arrossegament de les pales (rotació al voltant de la unió entre la pala i la caixa tant en la direcció continguda en el pla de rotació com perpendicular a aquest, respectivament). Per tal d'aproximar els efectes d'ambdós moviments es defineixen els dos últims sumands de l'equació 1, fruit d'un desenvolupament en sèries de Fourier truncat al 3r grau, que depenen dels factors "a₁" i "b₂".

Així, en aquesta primera definició, s'ha estipulat una velocitat de translació de l'aeronau (velocitat de vol "V") de 36 Km/h, el que comporta una velocitat angular de les pales "Ω" d'unes 1115 rpm per tal de garantir la sustentació de l'aparell, la massa del qual s'ha fitat en 2,2 Kg.

Es defineix també una longitud de corda necessària de les pales "c" de 5 cm, un angle de pas fix "θ" de 7° respecte el pla de rotació i una dimensió radial total del disc descrit per les pales "R_R" de 0,44 m, sempre que el conjunt caixa del mecanisme no sobrepassi "∅"= 5 cm, per tal de garantir la sustentació de l'aeronau i l'autorotació del mecanisme.

taula 5 – Resum paràmetres de funcionament escollits

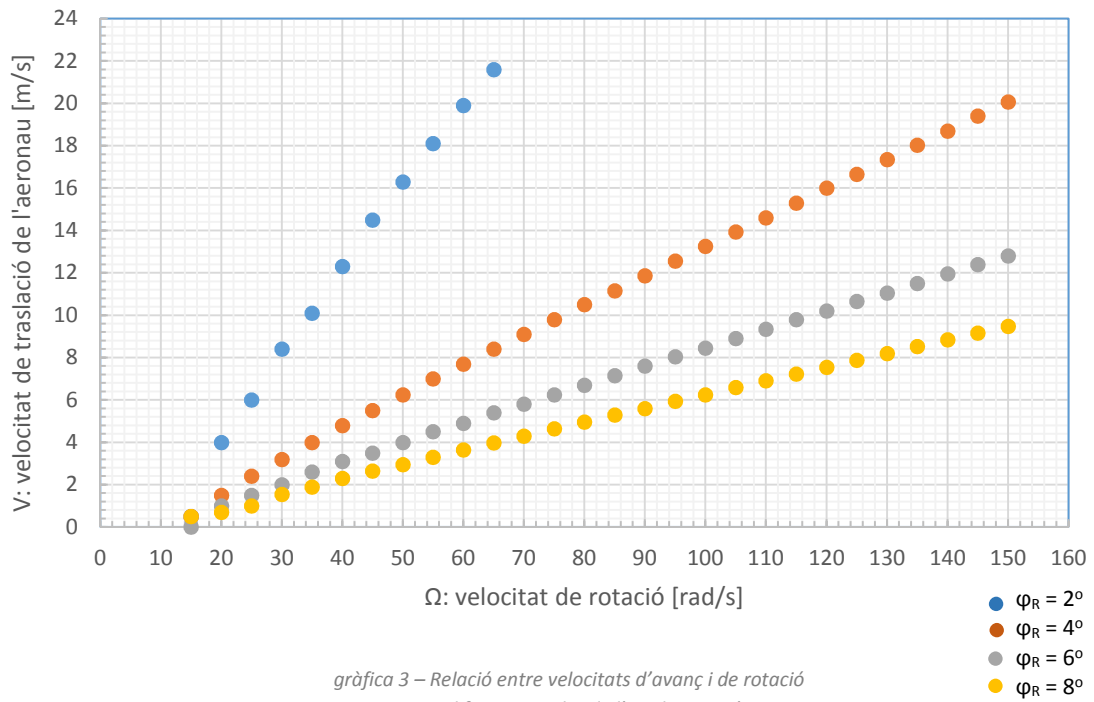
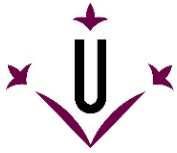
ϕ_R	B	k	V	Ω	M	c	θ	R _R	\emptyset
Angle inclinació del pla del rotor	Coefficient de pèrdua en punta de pala	Constant de proporcionalitat entre C _L i l'angle d'incidència	Velocitat de translació de l'aeronau	Velocitat angular de rotació de les pales	Massa total de l'autogir	Corda de les pales	Angle de pas fix de les pales	Radi del pla de rotació	Diàmetre de la caixa
[°]	[]	[]	[Km/h]	[r.p.m.]	[Kg]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]
6	0,992	0,0937	31,32	1115	2,2	50	7	440	50

8.2. Autorotació i règims de funcionament en funció de la inclinació de l'eix de rotació

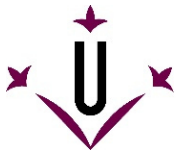
Considerant la geometria del rotor expressada en la taula 5, es realitza un càlcul discret de les forces aerodinàmiques que actuen en diverses seccions de la pala. Aquest càlcul suposa una primera aproximació que ofereix una relació entre la velocitat d'avanç de l'aeronau i la velocitat angular del rotor a causa d'aquesta translació. Un cop realitzat el càlcul discret se'n realitza un de nou, mitjançant l'entorn matemàtic MATLAB, en què s'aproxima la integral de totes les forces que actuen sobre la pala mitjançant mètodes numèrics, corroborant els resultats del càlcul discret.

S'entén que si la suma de moments sobre la caixa és nul·la, la velocitat angular (Ω) roman constant i el mecanisme preserva el seu moviment de rotació de manera perpètua fins que les forces externes es modifiquin. Cal però, tenir en compte que al marge de tot el conjunt de les forces que actuen sobre les pales, existeixen també altres factors que tendeixen a descelerar el rotor tals com la fricció entre els elements mòbils o les anomenades resistències passives. Per tant, es pot entendre el moviment d'autorotació com un equilibri en què una part del pla de rotació entrega potència al mecanisme, una altra consumeix aquesta potència i l'utilitza per generar sustentació i, pel camí, el moviment relatiu entre els sòlids del rotor i la resistència a l'avanç en dissipa l'excident.

Així, avaluant la força resultant que actua sobre totes les seccions, per a totes les possibles posicions de les tres pales contingudes en el pla de rotació ($\psi=[0, 360^\circ]$), i calculant el moment resultant que cada pala efectua sobre la caixa es pot establir una relació d'equilibri que suposi un règim d'autorotació.



El conjunt de tots els punts que apareixen en la *gràfica 3* representa la relació entre la velocitat d'avanç de l'aeronau (V) i la velocitat angular del rotor (Ω), per a diferents angles d'inclinació del pla de rotació (ϕ_R), segons la definició de paràmetres de la *taula 5*.



9. Estudi de velocitats en el conjunt rotor principal

Per realitzar l'estudi de velocitats incidents en les pales, s'inicia l'anàlisi sense considerar ni l'articulació de batiment ni la d'arrossegament. D'aquesta manera es determina de manera clara com es projecten les velocitats degudes al vol de translació i a la rotació de les pales en el pla del perfil (secció de pala). Posteriorment es determina la repercussió, del fet d'implementar aquestes articulacions, sobre les velocitats incidents.

9.1. Rotor rígid

Com s'explica en l'apartat 6.3, la diferència entre un rotor totalment rígid i un de semirígid rau en el nombre de graus de llibertat que la pala posseeix respecte a la caixa. Per l'estudi de velocitats d'un rotor rígid es considera que la pala no és capaç de bate (ni gràcies a una articulació ni per flexió).

S'estudien, per a un element de pala qualsevol, allunyat una distància r respecte a l'eix de rotació, la velocitat deguda a la rotació (Ωr) i la produïda per la translació de l'aeronau (V) (figura 9).

Per a l'anàlisi es consideren uns eixos de coordenades x , y i z solidaris a la secció d'estudi i es projecta sobre ells la suma de totes les velocitats incidents, de manera que la velocitat total de l'aire que impacta sobre el perfil es pugui desglossar en les seves components tangencials (eix x), perpendicular (eix z) i radial (eix y).

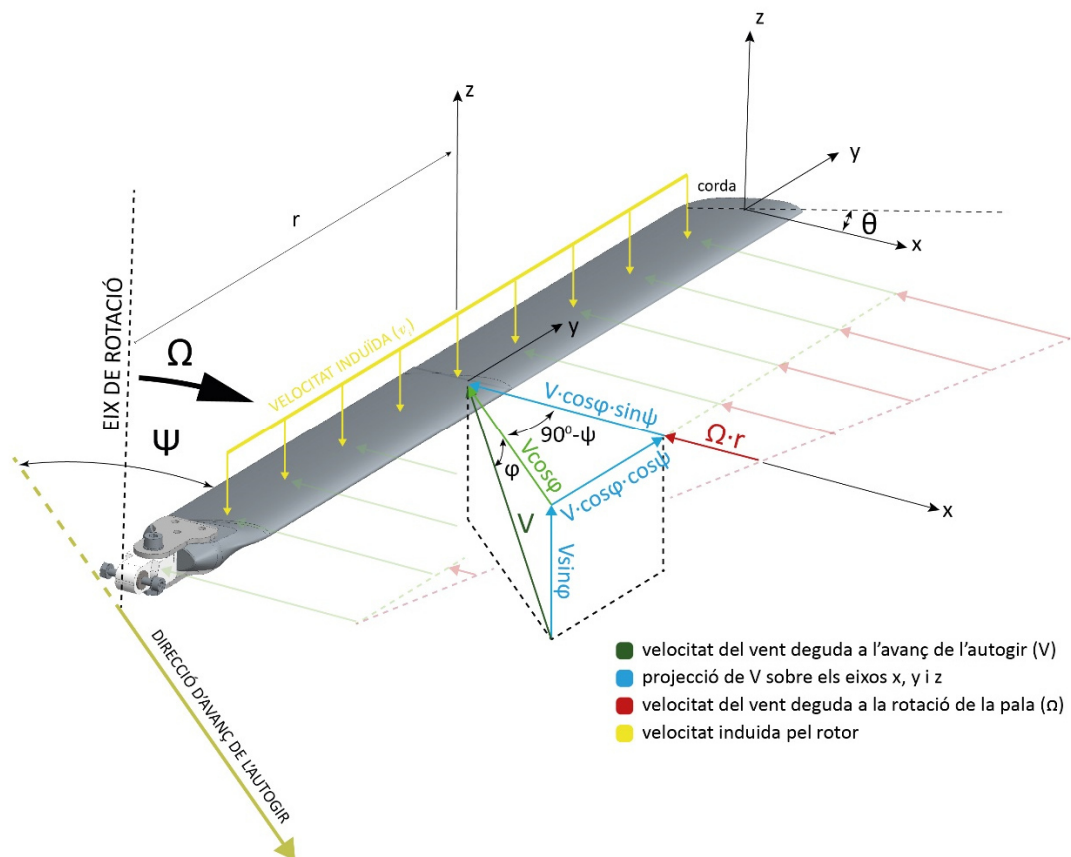


figura 10 – Diagrama de les velocitats incidents en una pala d'un rotor rígid

D'aquesta manera, queda definida la velocitat incident en una secció qualsevol del perfil d'una pala d'un rotor rígid com:

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_T \\ U_R \\ U_P \end{pmatrix}_{xyz} = \begin{pmatrix} \Omega r + V \cos \phi_R \cdot \sin \psi \\ V \cos \phi_R \cdot \cos \psi \\ V \sin \phi_R - v_i \end{pmatrix}_{xyz} \quad [21]$$

9.2. Rotor semirígid

En canvi l'anàlisi de velocitats pertinent d'un rotor semirígid resulta un pèl més tediós.

Un rotor semirígid és aquell dotat d'articulacions de batiment a més de les d'arrossegament. Les articulacions de batiment permeten el moviment de capcineig lliure de la pala, amunt i avall del pla de rotació, segons el valor que pren la força sustentadora que efectua un parell sobre l'articulació. L'equilibri entre el moment que produeix el pes de la pala (constant), el que produeix la força centrífuga (que és màxim per a $\beta=0$), el de la força sustentadora (que depèn de l'angle azimut ψ) i l'acceleració angular $\ddot{\beta}$ provoca un moviment oscil·lant de la pala amb un rang inferior a $\beta=[-10,10]$, per als paràmetres de l'autogir considerat (taula 5).

Per determinar les velocitats tangencial, perpendicular i radial, es projecta la velocitat del vent en els eixos solidaris a la secció de la pala: x' , y' i z' . De fet les velocitats resultants no són més que les d'un rotor rígid projectades sobre una base rotada β^0 respecte la solidària a la caixa x , y i z .

Es considera que l'angle β que la pala és capaç de bate és prou petit per considerar que el $\cos(\beta)=1$ i que el $\sin(\beta)=\beta$, hipòtesis que es corrobora en el següent apartat.

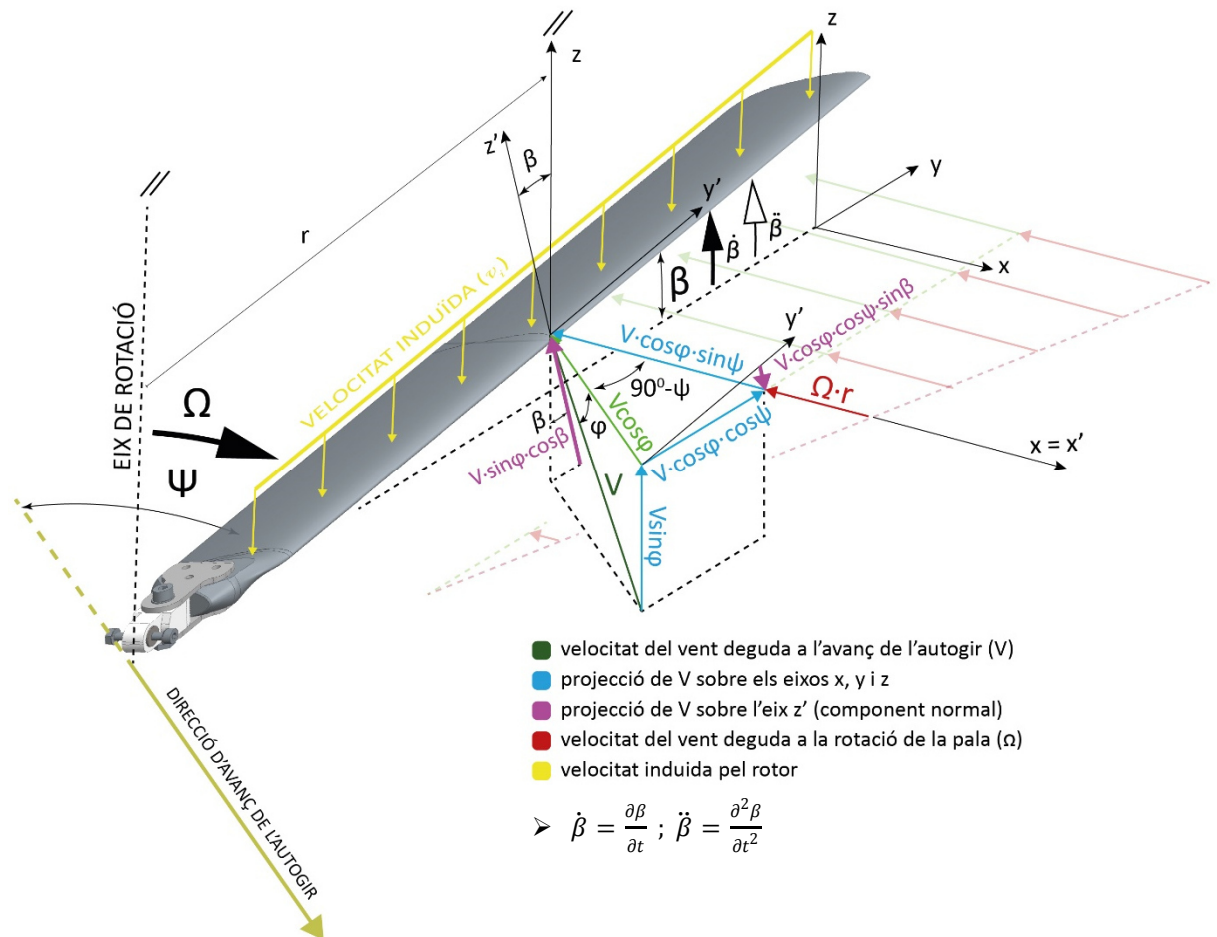
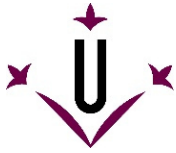


figura 11 – Diagrama de les velocitats incidents en una pala d'un rotor semirígid

D'aquesta manera, queda definida la velocitat incident en una secció qualsevol del perfil d'una pala d'un rotor semirígid com:

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_T \\ U_R \\ U_P \end{pmatrix}_{x'y'z'} = \begin{pmatrix} \Omega r + V \cos \varphi_R \cdot \sin \psi \\ V \cos \varphi_R \cdot \cos \psi + (V \sin \varphi_R - v_i) \cdot \beta \cdot \cos \psi \\ V \sin \varphi_R - v_i - r \frac{d\beta}{dt} - V \cos \varphi_R \cdot \beta \cdot \cos \psi \end{pmatrix}_{x'y'z'} \quad [22]$$



Un cop determinades les expressions de les velocitats incidents en la pala, se'n poden calcular els valors. En la *figura 11* es detallen els valors del mòdul de la velocitat incident en la pala per a diferents distàncies de l'eix de rotació (r) i per cada 30° d'avanç de la pala (ψ):

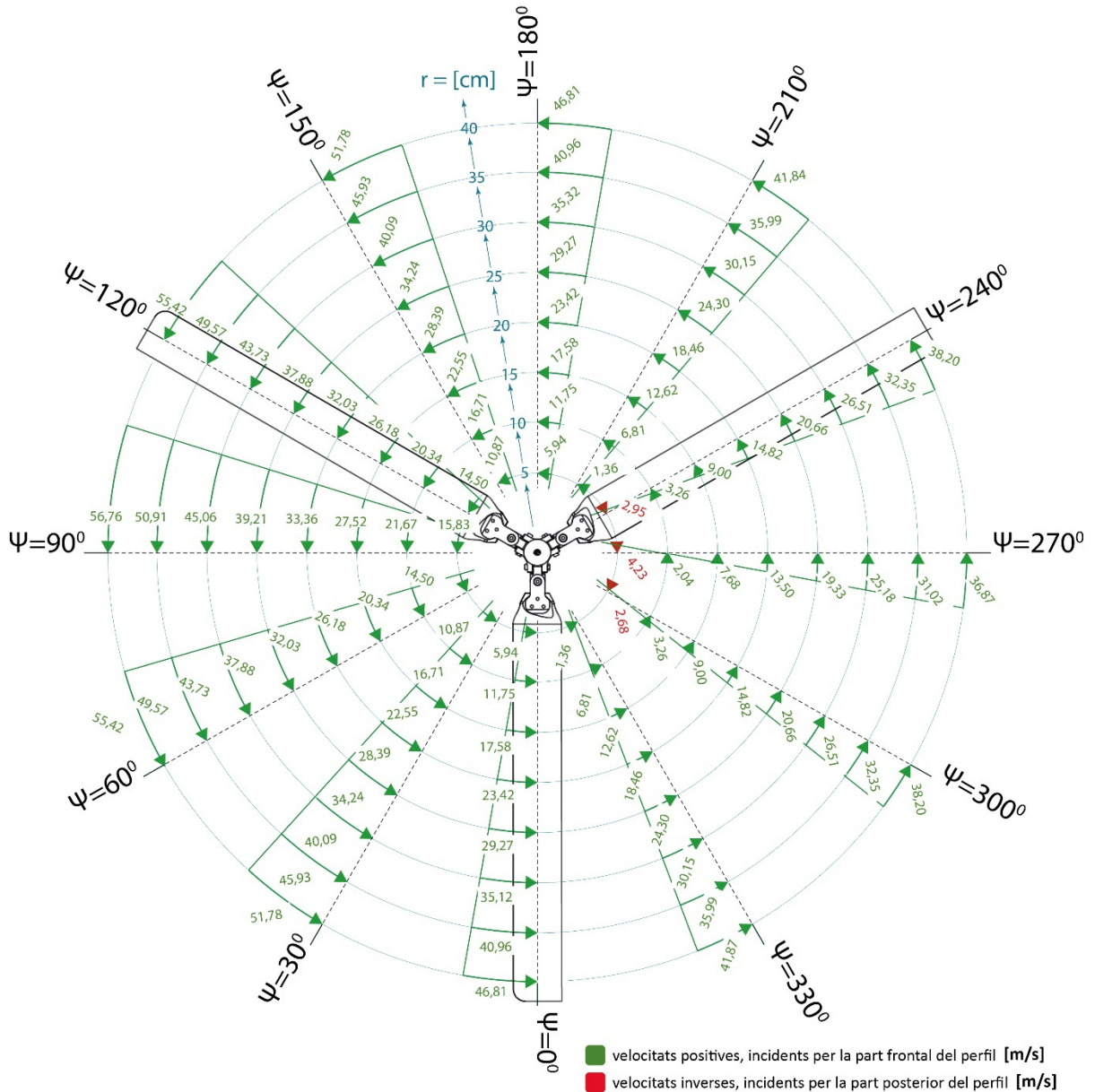
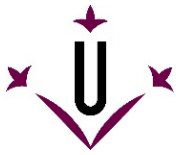


figura 12 – Diagrama del mòdul de les velocitats incidents en una pala cada 30°

En el diagrama de la *figura 12* es mostren els mòduls de les velocitats incidents en una pala que recorre tota la circumferència del pla del rotor. El càlcul ha sigut realitzat de manera discreta per diferents distàncies respecte a l'eix (increments de r de 5 cm), per a diferents angles girats (increments de ψ de 30°) i tenint en compte l'expressió:

$$U = \sqrt{U_T^2 + U_P^2} \quad [23]$$



9.2.1. Determinació de l'angle, velocitat i acceleració de batiment

Per tal de determinar amb exactitud com es produeixen els esforços en els diferents sòlids, cal determinar l'angle, la velocitat i l'acceleració de batiment. D'aquestes variables en dependrà el disseny mecànic, ja que tenen un paper molt rellevant en la distribució de les forces sobre la pala i en les reaccions que es produeixen entre els elements del rotor.

Com s'explica en l'apartat 9.2., les velocitats incidents en la pala es poden expressar en una base solidària a la secció d'eixos x' , y' i z' , segons [22]:

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_T \\ U_R \\ U_P \end{pmatrix}_{x'y'z'} = \begin{pmatrix} \Omega r + V \cos \varphi_R \cdot \sin \psi \\ V \cos \varphi_R \cdot \cos \psi + (V \sin \varphi_R - v_i) \cdot \beta \cdot \cos \psi \\ V \sin \varphi_R - v_i - r \frac{d\beta}{dt} - V \cos \varphi_R \cdot \beta \cdot \cos \psi \end{pmatrix}_{x'y'z'} \quad [22]$$

Per analitzar la dinàmica del mecanisme rotor es planteja el Teorema del Moment Cinètic [24] aplicat sobre l'articulació de batiment. Les forces que intervenen en el moviment de la pala són la força centrífuga, la força sustentadora (lift) i el pes del conjunt pala i enganxall (figura 13).

$$\Sigma \vec{M}_{(O)} = \vec{OK} = I_{(O)} \cdot \ddot{\beta} \quad [24]$$

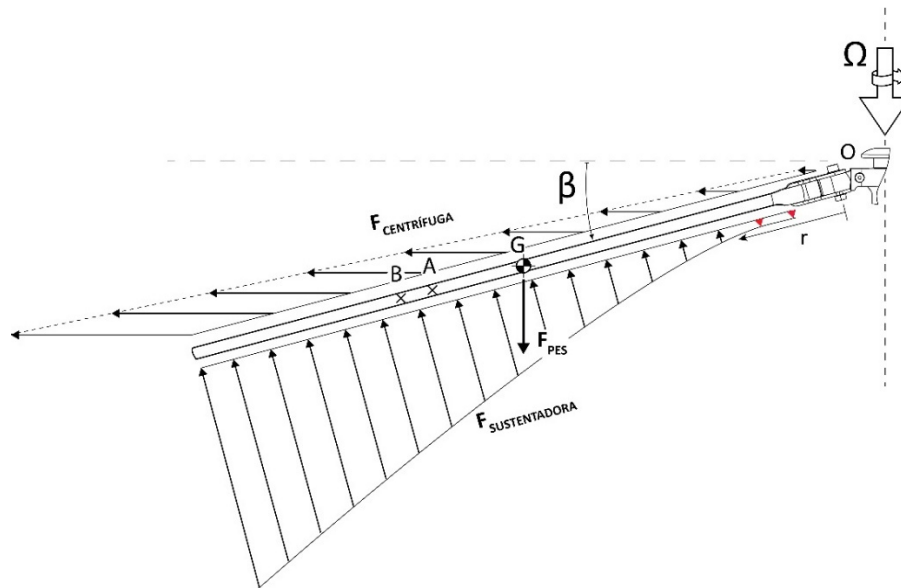


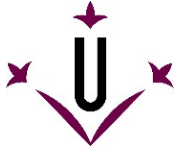
figura 13 – Diagrama sòlid lliure pala i conjunt porta pala

El mètode de càlcul es basa en la integració de totes les forces elementals que actuen sobre una secció de la pala situada a una distància r de l'articulació de batiment, per així avaluar el moment resultant que actua sobre ella i obtenir els valors de β , $\dot{\beta}$ i $\ddot{\beta}$ en funció de l'angle azimut ψ . S'adopten però un seguit de simplificacions (hipòtesis) que simplifiquen la resolució del problema:

Hipòtesis adoptades:

- $H_1: C_L = k \cdot (\theta + \varphi)$
- $H_2: \begin{cases} U_T = U \\ U_P = \varphi \cdot U \end{cases}$; només en quan a mòdul, les direccions es respecten
- $H_3: \beta \leq 10^\circ \rightarrow \begin{cases} \sin \beta = \beta \\ \cos \beta = 1 \end{cases}$

Llavors el moment que provoquen les tres forces (figura 13) es descriu mitjançant:



$$M_{PES(0)} = mg \frac{L}{2} \cdot \cos \beta \approx mg \frac{L}{2} \quad [25]$$

$$M_{FCENTRIF.(0)} = \int_0^L \Omega^2 \cdot \frac{m}{L} r^2 \cdot \sin \beta \cdot dr \approx \int_0^L \Omega^2 \frac{m}{L} \beta r^2 \cdot dr \quad [26]$$

$$M_{FSUST(0)} = \int_0^{L-ch \frac{1}{2}} \rho \cdot ch \cdot U_{tot} \cdot C_L \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot dr = \int_0^{L-ch \frac{1}{2}} \rho \cdot ch \cdot a (\sigma + \varphi) r \cdot U_{TOT} dr = \int_0^{L-ch \frac{1}{2}} \rho \cdot ch \cdot a \cdot r (\sigma U_{TOT}^2 + U_N \cdot U_T) dr$$

Com en tots els apartats anteriors cal però tenir en compte el flux invers, que apareix prop de la caixa i en la porció del disc de rotació $\phi = [180^\circ, 360^\circ]$ (apartat 7.4. pàg. 18).

$$R_L = \frac{V \cos \varphi_R \cdot \sin \psi}{\Omega} \quad [13]$$

El treball sobre l'articulació de batiment provocat per la força sustentadora és:

$$M_{FTRACT(0)} = \left[\frac{1}{2} \rho \cdot ch \cdot a \right] \left[\sigma \int_0^{BR} U_{TOT}^2 \cdot r \cdot dr + \int_0^{BR} U_N \cdot U_T \cdot r \cdot dr - 2\sigma \int_0^{R_L} U_{TOT}^2 \cdot r \cdot dr - 2 \int_0^{R_L} U_N \cdot U_T \cdot r \cdot dr \right]$$

$$M_{FTRACT(0)} = \left[\frac{1}{2} \rho \cdot ch \cdot a \right] \left(\sigma \left(\frac{\Omega^2}{4} (B^4 R_R^4 - 2R_L^4) + V^2 \cos^2 \varphi_R \sin^2 \psi \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} + 2\Omega V \cos \varphi_R \sin \psi \frac{\beta^3 R_R^3 - 2R_L^3}{3} \right) \right. \\ \left. + \frac{\beta^3 R_R^3 - 2R_L^3}{3} (\Omega V \sin \varphi_R - \beta V \Omega \cos \varphi_R \cos \psi - V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi) - \Omega \frac{\partial \beta}{\partial t} \frac{\beta^4 R_R^4 - 2R_L^4}{4} \right. \\ \left. - \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} V^2 \cos^2 \varphi_R \sin \psi \cdot \beta \cos \varphi + \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} V^2 \cos \varphi_R \cdot \sin \varphi_R \cdot \sin \psi \right) \quad [27]$$

Essent:

$$\int U_{TOT}^2 \cdot x \cdot dx = \left[\frac{\Omega^2 \cdot r^4}{4} + V^2 \cos^2 \varphi_R \sin^2 \psi \cdot \frac{r^2}{2} + 2\Omega V \cos \varphi_R \sin \psi \cdot \frac{r^3}{3} \right]$$

$$\int U_N \cdot U_T \cdot x \cdot dx = \left[x (\Omega x V \sin \varphi_R - \Omega x^2 \frac{\partial \beta}{\partial t} - \Omega x V \cos \varphi_R \beta \cos \psi - x V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi - V^2 \cos^2 \varphi_R \sin \psi \beta \cos \psi) dx = \right]$$

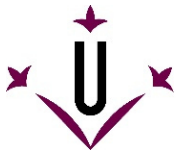
$$= \int \Omega x^2 V \sin \varphi_R - \Omega x^3 \frac{\partial \beta}{\partial t} - \Omega x^2 V \cos \varphi_R \beta \cos \psi - x^2 V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi - V^2 x \cos^2 \varphi_R \sin \psi \beta \cos \psi dx + x V^2 \cos \varphi_R \sin \psi \sin \varphi_R$$

$$= \int \Omega x^2 (V \sin \varphi_R - \beta V \cos \varphi_R \cos \psi) - \Omega x^3 \frac{\partial \beta}{\partial t} - x^2 V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi - x V^2 \cos^2 \varphi_R \sin \psi \beta \cos \psi dx + x V^2 \cos \varphi_R \sin \varphi_R \sin \psi$$

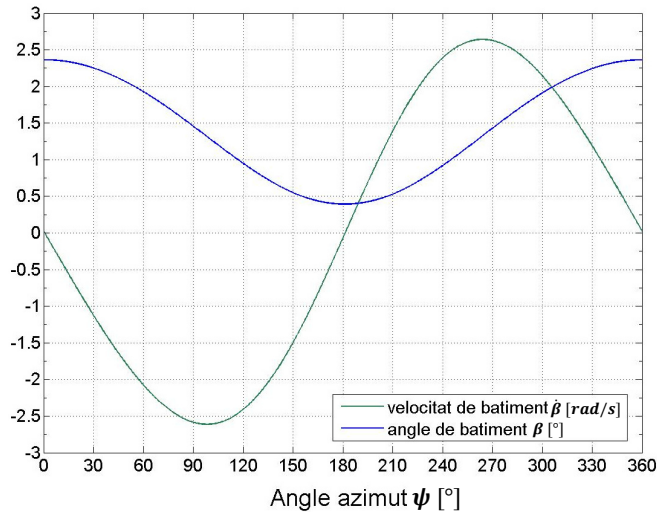
$$= \left[\frac{x^3}{3} (\Omega V \sin \varphi_R - \beta V \Omega \cos \varphi_R \cos \psi - V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi) - \frac{\Omega x^4}{4} \frac{\partial \beta}{\partial t} - \frac{x^2}{2} V^2 \cos^2 \varphi_R \sin \psi \beta \cos \psi \right] + \frac{x^2}{2} V^2 \cos \varphi_R \sin \varphi_R \sin \psi$$

El treball segons [24], l'equació que governa el moviment de batiment de la pala és:

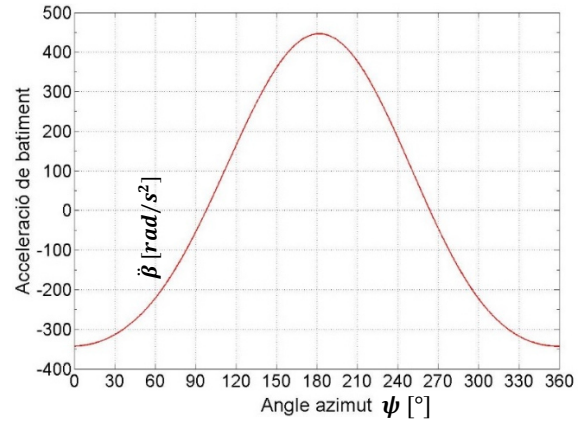
$$\left[\frac{1}{2} \rho \cdot ch \cdot a \right] \left(\sigma \left(\frac{\Omega^2}{4} (B^4 R_R^4 - 2R_L^4) + V^2 \cos^2 \varphi_R \sin^2 \psi \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} + 2\Omega V \cos \varphi_R \sin \psi \frac{\beta^3 R_R^3 - 2R_L^3}{3} \right) \right. \\ \left. + \frac{\beta^3 R_R^3 - 2R_L^3}{3} (\Omega V \sin \varphi_R - \beta V \Omega \cos \varphi_R \cos \psi - V \frac{\partial \beta}{\partial t} \cos \varphi_R \sin \psi) - \Omega \frac{\partial \beta}{\partial t} \frac{\beta^4 R_R^4 - 2R_L^4}{4} \right. \\ \left. - \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} V^2 \cos^2 \varphi_R \sin \psi \cdot \beta \cos \varphi + \frac{\beta^2 R_R^2 - 2R_L^2}{2} V^2 \cos \varphi_R \cdot \sin \varphi_R \cdot \sin \psi \right) - \Omega^2 \frac{m}{L} \beta \frac{R_R^3}{3} \\ - mg \frac{L}{2} = I_0 \frac{d^2 \beta}{dt^2} \quad [28]$$



La metodologia emprada per a la resolució del problema s'ha dut a terme en l'entorn matemàtic MATLAB, mitjançant una interpolació amb el mètode de Runge-Kutta de 4t ordre per tal de resoldre l'equació diferencial ordinària [28], que dona com a resultat l'angle la velocitat i l'acceleració de batiment:



gràfica 4 – Angle i velocitat de batiment en funció de l'angle azimut girat



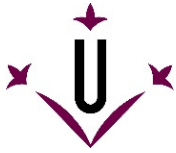
gràfica 5 – Acceleració de batiment en funció de l'angle azimut girat

En vers als autogirs tripulats, s'observa que l'angle de batiment de les pales de l'autogir contemplat en aquest treball és força inferior (gràfica 4). Per a aeronaus tripulades, l'angle de batiment s'espera que tingui un rang de moviment d'aproximadament 15° per sobre i sota del pla de rotació. Però donat que, en reduir la longitud de les pales (R_R), la seva velocitat de rotació cal que augmenti notablement per aconseguir velocitats en la punta de la pala ($V=\Omega \cdot r$) suficients per garantir la sustentació i assimilables als autogirs de majors dimensions, s'augmenta de retruc el valor de la força centrífuga de manera quadràtica ($F_c = m \cdot \Omega^2 \cdot r/2$). En canvi, l'acció de la gravetat es veu minvada per tenir les pales menor massa. La juxtaposició d'aquests dos fenòmens provoca que les pales girin massa ràpid (1150 r.p.m) i pesin massa poc ($m_{pala}=0.1$ Kg) per poder batre lliurement tal com la diferència de sustentació de les pales provocaria.

Es corrobora llavors que l'angle de batiment no supera el $2,5^\circ$, essent menyspreable per a l'estudi d'inèrcies del conjunt boixa més pales i sòlids auxiliars (apartat 7.1.).

9.2.2. Articulació d'arrossegament

L'articulació d'arrossegament fou un altre enginy d'en Juan de la Cierva, per tal de minimitzar els efectes de fatiga que es produïen en l'encastament de la pala a la boixa, com a conseqüència de les oscil·lacions originades en azimut per les pales batents i dels canvis sobtats de sentit del vent incident en les pales al travessar les posicions $\psi=0$ i $\psi=180^\circ$. En els rotors rígids, les vibracions produïdes per aquestes oscil·lacions són d'especial interès, donat que generen problemes de ressonància amb el sòl. De la Cierva va dissenyar l'articulació d'arrossegament i amb això, va crear el rotor de dues articulacions (batiment i arrossegament), que defineixen un rotor semirígid i que ha sigut àrduament utilitzat en els rotors tant d'helicòpters com d'autogirs fins al dia d'avui.



10. Forces originades en les pales degudes al vol

Com s'explica en l'apartat 9.2., les velocitats incidents en la pala es poden expressar en una base solidària a la secció d'eixos x' , y' i z' , segons [22]:

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_T \\ U_R \\ U_P \end{pmatrix}_{x'y'z'} = \begin{pmatrix} \Omega r + V \cos \varphi_R \cdot \sin \psi \\ V \cos \varphi_R \cdot \cos \psi + (V \sin \varphi_R - v_i) \cdot \beta \cdot \cos \psi \\ V \sin \varphi_R - v_i - r \frac{d\beta}{dt} - V \cos \varphi_R \cdot \beta \cdot \cos \psi \end{pmatrix}_{x'y'z'} \quad [29]$$

10.1. Resistència a l'avanç del rotor

En avaluar la resistència a l'avanç total generada pel rotor, el mètode més directe resulta comptabilitzar la pèrdua d'energia en el rotor. Aquesta dissipació d'energia es produeix per dos factors, la resistència a l'avanç de la pala i la generació de sustentació. Definint l'energia perduda com $D_R \cdot V$, i igualant el terme a l'energia dissipada pel flux induït en el rotor (apartat 7.2. pàg. 14) i amb el mateix procediment per quantificar la resistència a l'avanç de la pala que l'utilitzat per calcular la tracció del rotor (tenint en compte les velocitats inverses) (apartat 7.4., eq. [15] i [16], pàg. 18) es defineix l'expressió:

$$D_R V = v_i T + \frac{b}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{BR} \frac{\rho \cdot ch \cdot \delta \cdot U_T^3}{2} dr - \frac{b}{\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{R_L} \frac{\rho \cdot ch \cdot \delta \cdot U_T^3}{2} dr \quad [30]$$

Per tal de simplificar el càlcul, a diferència que en el càlcul de la sustentació del rotor, es considera un factor mitjà per al coeficient resistent C_d , el qual es denota amb la lletra grega δ (constant i independent de l'angle d'atac del perfil). La bondat d'aquesta simplificació rau en el fet que aquest càlcul no és de vital importància, en el present treball tan sols s'utilitza per quantificar els esforços que cal que el rotor suporti, així una bona aproximació un pèl sobredimensionada és suficient.

Un cop integrada l'expressió [24] en resulta:

$$D_R V = v_i T + \frac{b \cdot ch \cdot \rho \cdot \delta \cdot \Omega^3 \cdot R^4}{2} \left(\frac{3}{16} \left(\frac{V \cos \varphi_R}{\Omega R_R} \right)^2 + \frac{3}{32} \left(\frac{V \cos \varphi_R}{\Omega R_R} \right)^4 \right) \quad [31]$$

Llavors es considera un força, que el rotor efectua sobre l'autogir, en resistir-se a la translació d'avanç de l'aeronau:

De l'equació [7] de la pàgina 15, es pot calcular la velocitat induïda

$$v_i = 1,4543 \text{ m/s}$$

Llavors:

$$\delta = 0,0319$$

$$D_R = 3,27 \text{ N}$$

Però, cal tenir en compte la component paral·lela a la direcció d'avanç de la força sustentadora (figura 13), que en estar l'eix de la caixa lleugerament inclinat cap endarrere també participa a oposar-se a l'avanç de l'aeronau. Considerant la màxima inclinació del rotor $\phi_R^{M\grave{A}X} = 15^\circ$:

$$D_{TOT} = D_R + T \cdot \sin \varphi_R^{M\grave{A}X} = 8,86 \text{ N} \quad [32]$$

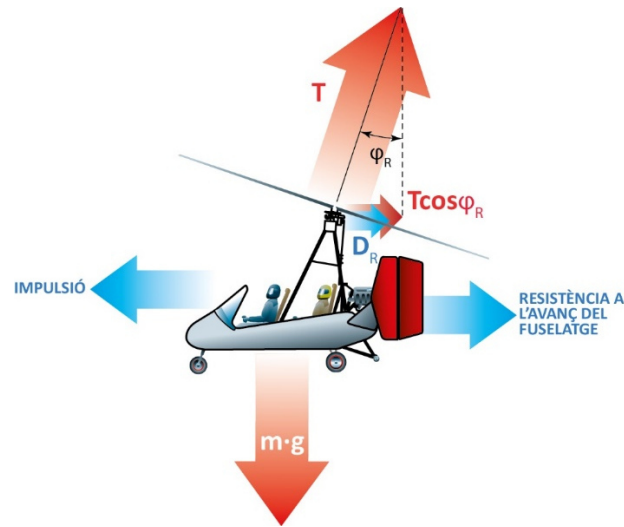
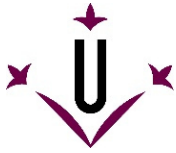
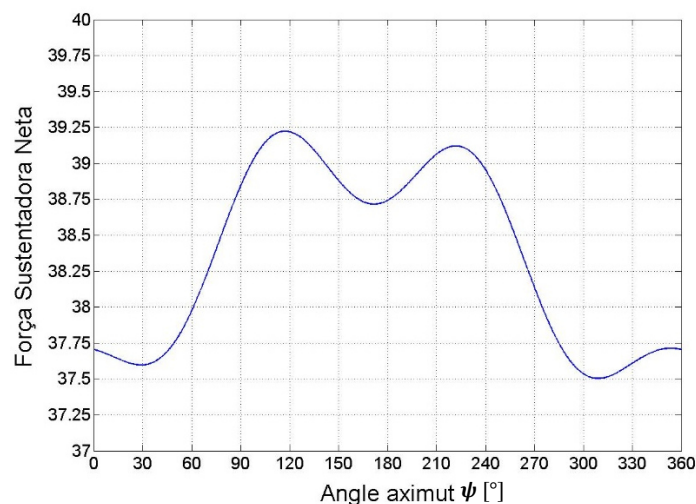


figura 14 – Diagrama de les forces principals que actuen sobre l'autogir

10.2. Força sustentadora neta total efectuada pel rotor

Mitjançant una lleugera modificació de l'algorisme MATLAB utilitzat en l'apartat 9.2.1. (per calcular el batiment), considerant ara les forces en comptes dels moments i integrant novament per a tota la seva longitud i per a totes les posicions possibles, és fàcil obtenir la força sustentadora neta (sustentació menys pes de la pala i força centrífuga) que produeix cada pala en tot instant, sumant la Força Sustentadora Neta que efectua cada pala en cada posició s'obté:

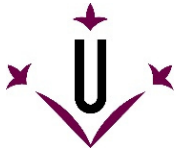
$$FSN = \sum_{pala\ i}^3 FSN_{pala\ i}(\psi) + FSN_{pala\ 2}(\psi + 120^\circ) + FSN_{pala\ 3}(\psi + 240^\circ) \quad [33]$$



gràfica 5 – Força Sustentadora Neta en funció de l'angle girat

10.3. Aixecament asimètric del rotor

Com s'ha mencionat amb anterioritat quan un rotor funciona en vol de translació, les pales produeixen un camp de velocitats asimètric (figura 12). La posició de cadascuna de les pales es pot descriure mitjançant l'angle azimut (ψ), que es defineix com a zero quan la pala apunta cap a la cua de l'autogir.



Òbviament, les forces originades en les pales que avancen en sentit oposat al vent relatiu de translació generen una sustentació major que les que retrocedeixen i aquest és el motiu de la necessitat d'implementar articulacions de batiment en el rotor. Així, durant el vol el pla de rotació es deforma donant lloc a una conicitat que tendeix a elevar les pales que veuen una major velocitat relativa.

LLavors, fruit del càlcul discret, es pot quantificar la sustentació diferencial o elemental (dL) en les seccions de pala considerades, i així traçar de nou la figura 7 (pàg. 18) de les regions conduïda, conductora i la que provoca l'entrada en pèrdua del perfil (figura 14):

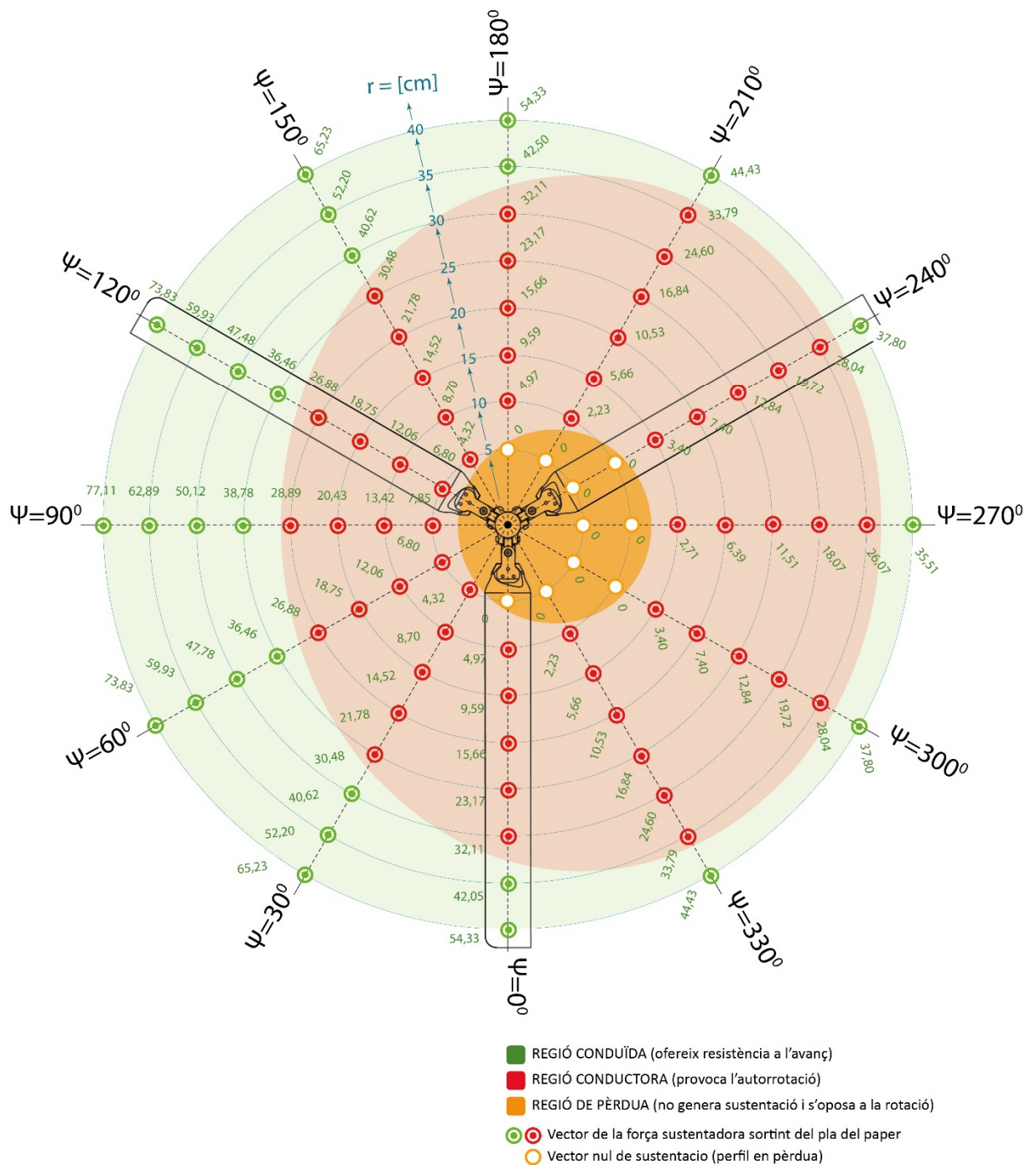
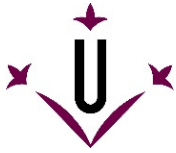


figura 15 – Sustentació elemental de les seccions considerades i regions conduïda, conductora i de pèrdua del disc de rotació



11. Anàlisi de requeriments del conjunt mecànic del rotor

11.1. Derivats de les capacitats productives i restriccions de muntatge

Les capacitats que es demana que compleixi el mecanisme rotor, se centren a procurar un disseny capaç de ser muntat en una aeronau (o bé substituït pel de sèrie) i garantir-ne la sustentació.

Més enllà d'aquest condicionant, cal tenir en compte que el disseny ha de ser adaptat a alguna aeronau en concret pel que fa a la massa i dimensions principals. L'autogir proposat és una rèplica a escala de l'Arrow coopter AC-10 feta per l'empresa asiàtica Unique Model Tech, un aparell a ràdio control les dimensions característiques del qual són:



figura 16 – Unique Model Tech AC-10

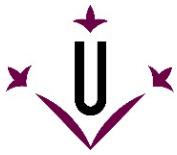
L'objectiu consisteix a dissenyar un rotor semirígid (amb articulacions de batiment i d'arrossegament), de tres pales, totalment funcional per ser muntat en l'autogir de la figura 16.

Els requeriments per haver escollit aquest autogir són del tipus funcional:

- $m \leq 2,2 \text{ Kg}$: Massa total del conjunt muntat (autogir i rotor) que ha de ser capaç d'enlairar-se.
- $2 \cdot R_R \leq 1320 \text{ mm}$: Dimensió diametral del disc descrit per les pales (per evitar col·lisions amb l'aeronau).
- $\varphi_{\text{BALANCEIG}}$ i $\varphi_{\text{CAPCINEIG}}$ queden pendents de mesurar un cop es posseeixi l'autogir, per ara es fixen ambdós en 30° .

Tanmateix també existeixen condicionants del tipus de fabricació

- Cal que el mecanisme rotor pugui ser muntat sense excessiva dificultat:
 - $\varnothing_c \geq M2$: Mètrica mínima per als caragols del rotor.
 - $\varnothing_b \geq 2 \text{ mm}$: Dimensió diametral mínima dels bulons.
- Restriccions imposades per les capacitats productives.
- Materials disponibles per a la fabricació del rotor Alumini mecanitzat i polímers mecanitzats o impresos.



11.2. Derivats de l'estudi de forces

Un cop feta aquesta definició primera de requeriments, sorgeixen nous condicionants que cal que el disseny proposat compleixi. Aquest deriven principalment de les forces originades a causa del vol de l'aparell i es descriuen en la figura 5:

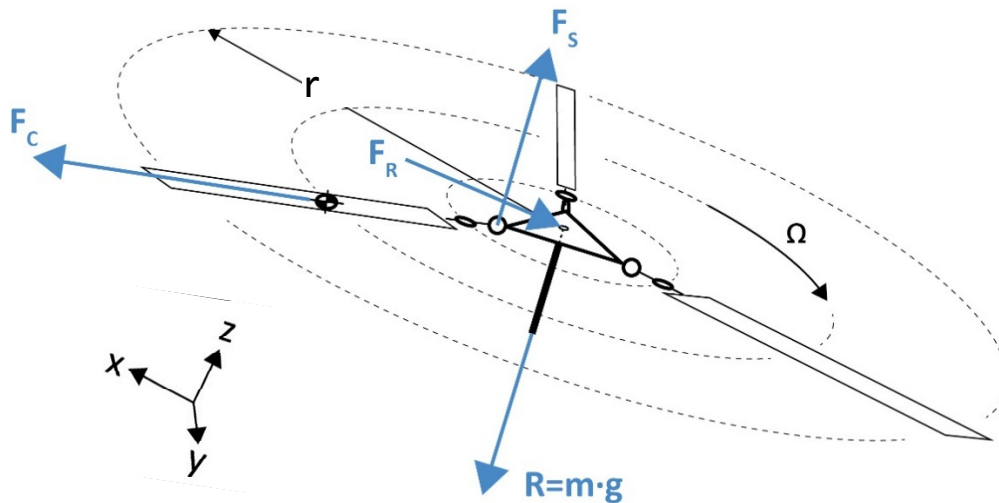


figura 17 – Esquema unifilar i distribució de forces externes del mecanisme

Com es pot veure en la figura 17, les principals forces que actuen sobre el mecanisme rotor són: El pes ($m \cdot g$) de l'aeronau annexa a ell, que es contraresta per la suma de les forces sustentadores (F_S), una per cada pala i ubicades sobre l'articulació de batiment. La força centrífuga (F_C) fruit de la rotació de les pales (Ω) i la força de resistència (F_R) produïda pel frec amb l'aire que s'oposa a l'avanç en direcció x del rotor.

Quantificar aquestes forces no és senzill. Per una banda, la força sustentadora resultant que ha de produir el rotor tan sols pren el valor " $m \cdot g$ " en condicions de vol estacionari, essent variable en situacions dinàmiques. Per l'altra, la sustentació de cada pala (F_S) i la resistència a l'avanç del rotor (F_R) depèn de la integral per a totes les posicions de les tres pales i de la distribució de velocitats originada sobre elles (apartats 9 i 10).

taula 7 – Forces sobre el rotor

FORÇA	F_i	Coefficient de Majoració	$C_M \cdot F_i$	Valor objectiu
F_R (pàg. 30)	8,86	$C_M = 1,5$	13,29	$F_R = 15$
$R \approx m \cdot g + m \cdot a$	32,58	$C_M = 1,5$	48,87	$R = 50$
$F_S = \frac{2}{3} FSN$ (pàg. 29)	26,17	$C_M = 4/3$	38,89	$F_S = 35$
$F_C \approx m \cdot \Omega^2 \cdot r/2$	301,16	$C_M = 5/3$	501,66	$F_C = 505$

$$\begin{aligned}
 a &= 5 \text{ m/s}^2 \\
 m_{pala} &= 0,1 \text{ Kg} \\
 \Omega &= 117 \text{ rad/s.} \\
 r &= 0,44 \text{ m}
 \end{aligned}$$

¹⁾ La sustentació efectuada per cada pala és la força que té una magnitud més variable donat que, a més de la posició i distribució de velocitats en la pala, depèn també de l'angle de batiment (veure pàg. 17). El valor considerat pel dimensionament dels sòlids és una sobreestimació basada en el fet que en moltes situacions una sola pala és la que genera la major part de la força sustentadora.

²⁾ Per al càlcul de la força centrífuga es menystingui la massa del conjunt porta pala (figura 18), considerant tan sols la massa de la pala



12. Disseny mecànic del rotor, anàlisi de les solucions adoptades

Un cop escollit el perfil alar, s'ha pogut iniciar el disseny mecànic de l'aparell. El material de tots els elements del mecanisme ha estat definit, reservant l'alumini o bé polímers mecanitzats per les peces més sol·licitades dinàmicament i projectant les altres per ser produïdes mitjançant impressió 3D, amb posteriors proves experimentals de resistència efectuades, o bé mitjançant el mecanitzat de materials polimèrics.

Per motius obvis, es prefereix comprar tots els caragols necessaris per muntar el mecanisme a una empresa d'aparells de ràdio-control. D'igual manera, s'ha optat per dotar de coixinets de producció industrial a gairebé totes les articulacions, per assegurar-ne el funcionament sense excessives friccions.

El dimensionament dels sòlids integrants s'ha dut a terme considerant la resistència mecànica necessària de la qual cal dotar a cadascun dels elements i a la totalitat del conjunt, i buscant l'equilibri entre la lleugeresa de l'aparell muntat i la facilitat de muntatge. S'ha fixat una mètrica mínima de 2 mm per a tots els caragols i femelles (\varnothing_c) i passadors (\varnothing_b) que formen part del mecanisme per no fer-ne tediós el muntatge, essent els caragols i femelles d'acer, mentre que els bulons es projecten en alumini. Amb aquesta restricció imposada, s'han dissenyat tots els sòlids necessaris per materialitzar el mecanisme sense abandonar el compromís necessari amb la lleugeresa de l'aparell.

Els principals elements integrants del disseny de l'aparell es detallen en els següents apartats. Es mostra una vista del conjunt rotor per referenciar cadascun dels sòlids integrants en la *figura 6*:

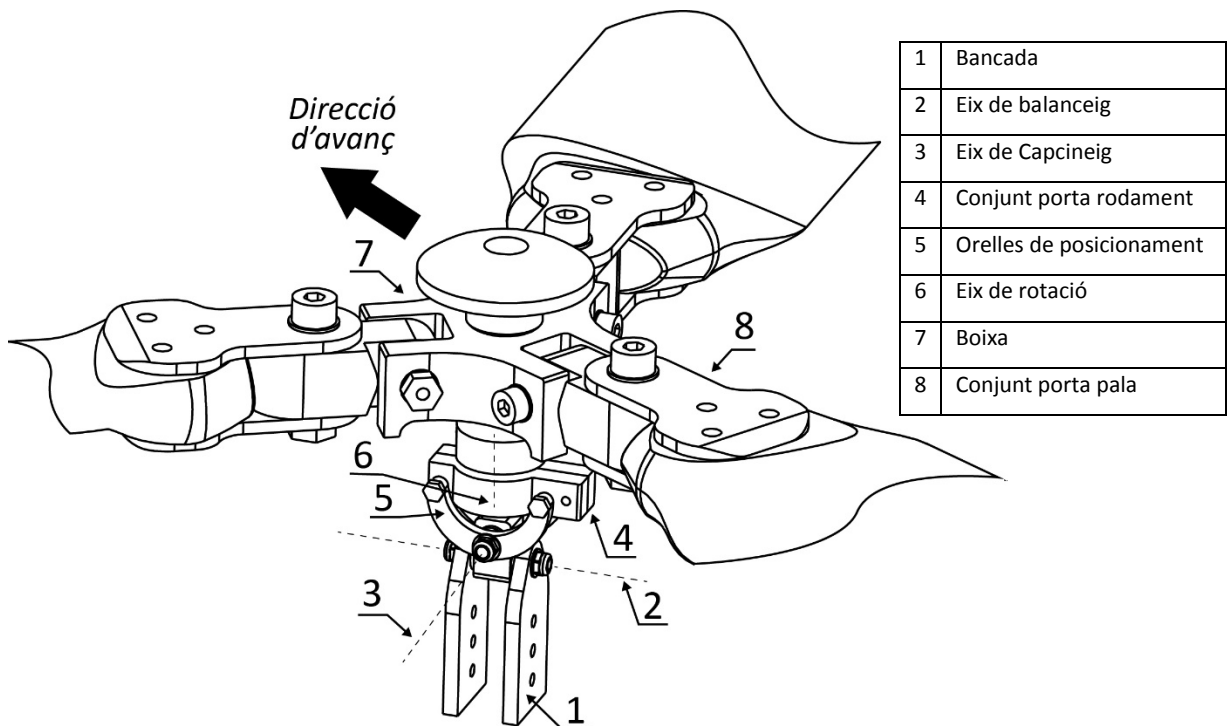
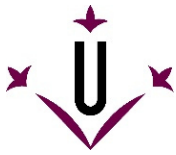


figura 18 - Conjunt rotor amb referència dels sòlids integrants



12.1. Conjunt Bancada

La primera solució de disseny implementada consisteix en l'anomenada bancada (1) (figura 18), integrat per dues orelles que abracen al buló que té com a funció materialitzar l'articulació de balanceig. Aquest conjunt ha estat dissenyat per complir la funció de nexa entre el mecanisme rotor, focus d'aquest treball, i l'aparell volador de manera que en permeti un moviment relatiu amb un sol grau de llibertat al voltant de l'eix de balanceig, posicionant el pla de rotació 25° a banda i banda respecte a la direcció d'avanç. La unió entre la bancada i l'aeronau es realitza mitjançant tres parelles de caragols de mètrica M2 que es caragolen a la columna de l'autogir. El gruix de les orelles, o diferència entre el forat que allotja el passador de balanceig i el perímetre es projecta de manera que no pugui existir col·lisió entre les pales i la cua de l'autogir quan el pla de rotació es posiciona en el punt més desfavorable.

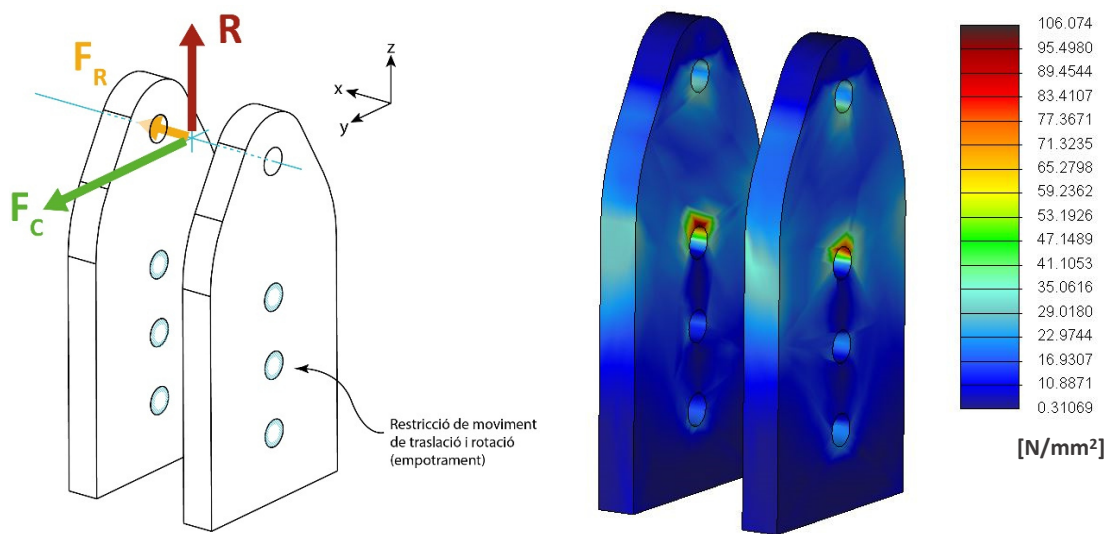


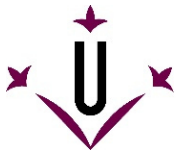
figura 18 – Diagrama de forces i simulació de resistència (PTC CREO)
esforços de l'equivalent de Von Misses en la bancada

En el diagrama de forces de la figura 18, es pot observar que també es considera la força centrífuga. Durant el funcionament normal del rotor, la força centrífuga de cada pala es compensa per les altres dues, però s'ha volgut considerar la força centrífuga per dotar al conjunt de la robustesa suficient com per a no desmembrar-se per complet si alguna de les pales es despregués del rotor.

La sol·licitació màxima que s'origina en la bancada és $\sigma_{\max} = 106,074 \text{ N/mm}^2$. La solució que dona el programa de simulació és irreal, la distribució d'aquest esforç seria d'esperar que fos equitativa entre les tres parelles de forats anàlogues, atès que la deformació del material ho permetria (fet que no té en consideració el programa de simulació). Tot i així, es pren aquest límit com a límit per corroborar el bon disseny de la bancada.

El material en què es projecta la bancada és alumini, ja que a banda de proporcionar una bona resistència estructural a l'element, és el material de què està feta la columna de l'autogir contemplat (Rèplica R/C de l'Arrow coopter AC-10).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Al2014-T4}}{\gamma_{seg}} = \frac{275}{1,5} = 183 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{\max} = 106,074 \frac{N}{mm^2}$$



12.2. Creueta articulada, eixos de Balanceig i de Capcineig

El següent sòlid definit, en ordre ascendent cap a la caixa, consisteix en l'encarregat de garantir els dos graus de llibertat angulars que fan possible el posicionament del pla de rotació. Aquest moviment queda limitat per un con imaginari de 25° d'obertura entre el seu eix (eix de rotació del rotor en la posició de repòs) i la seva generatriu (eix de rotació en qualsevol de les seves posicions extremes) (figura 19).

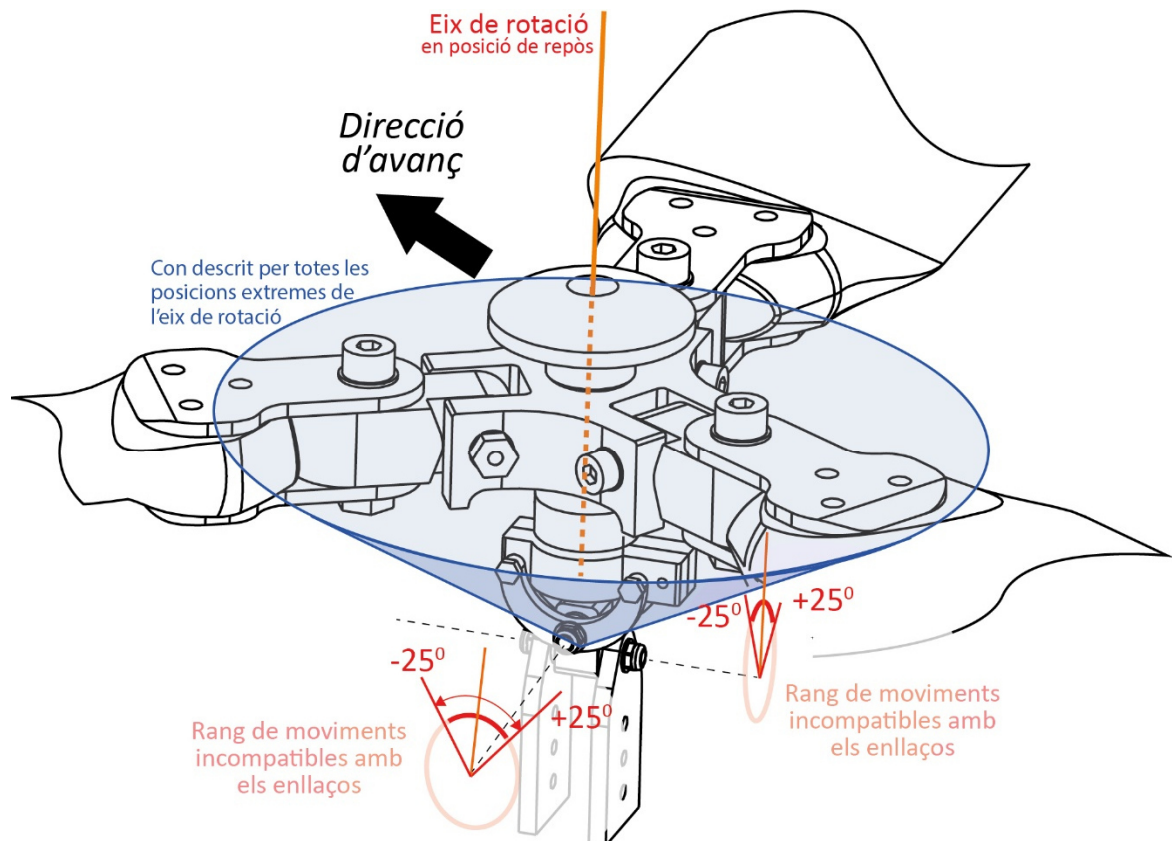


figura 19 – Con descrit per totes les posicions possibles de l'eix de rotació

Per al correcte posicionament del pla de rotació és necessària una nova articulació, a banda de la de balanceig, la de capcineig. El disseny proposat (posició relativa entre les dues articulacions) és fruit de l'anàlisi de l'esforç necessari que cal que realitzin les barres de comandament, que orienten el pla de rotació. Aquestes, estan obligades sempre a realitzar un major treball per posicionar el pla de rotació endavant i endarrere, sobretot considerant que treballen a compressió i podrien patir de vinclament en el moviment més desfavorable, que és el canvi d'orientació del pla de rotació contra el vent incident fruit del vol d'avanç.

El moviment relatiu entre la bancada, solidària a l'autogir, i el pla de la caixa es resol mitjançant el sòlid auxiliar que es plasma en la figura 20.

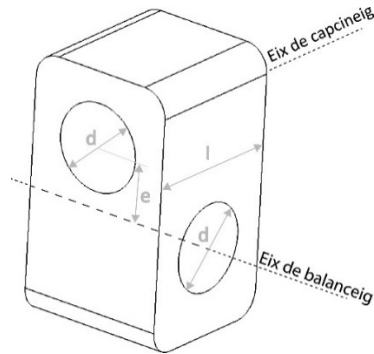
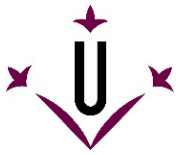


figura 20 - Creueta articulada

Aquest sòlid, inspirat en les juntes del tipus Cardan possibilita la unió entre els sòlids adjacents garantint els dos graus de llibertat descrits amb anterioritat (balanceig i capcineig del pla de rotació). La dimensió diametral (d) dels allotjaments dels passadors que materialitzen les articulacions, queda fitada en 2 mm (més el gruix dels coixinets) pels motius ja exposats, essent la seva longitud (l) la necessària per assegurar el moviment del rotor sense col·lisió entre els seus membres. La distància perpendicular (e) entre els dos eixos articulats està definida, sempre complint les exigències de resistència, de manera que sigui mínima, per així procurar que el moment necessari per posicionar el pla de rotació sigui similar tant en el balanceig com en el capcineig.

Tot i que el disseny proposat respon més aviat a restriccions geomètriques no relacionades amb la resistència mecànica del sòlid, cal corroborar que és capaç de suportar els esforços que en ell s'imparteixen com a resultat del vol. Mitjançant el programa d'anàlisi de mecanismes s'observen les tensions produïdes en el sòlid creueta.

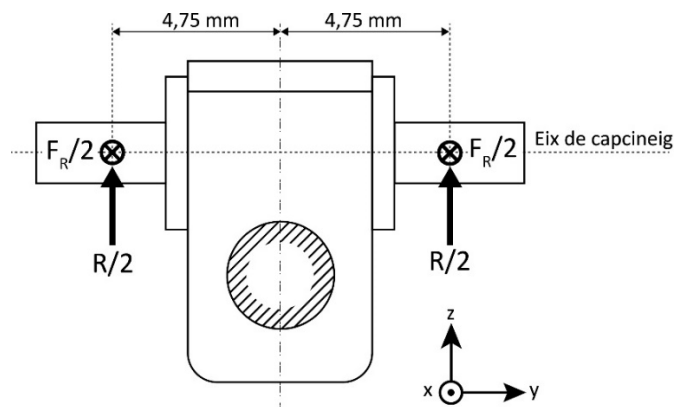


figura 21.1 – Diagrama d'esforços del conjunt creueta, coixinets i buló de capcineig

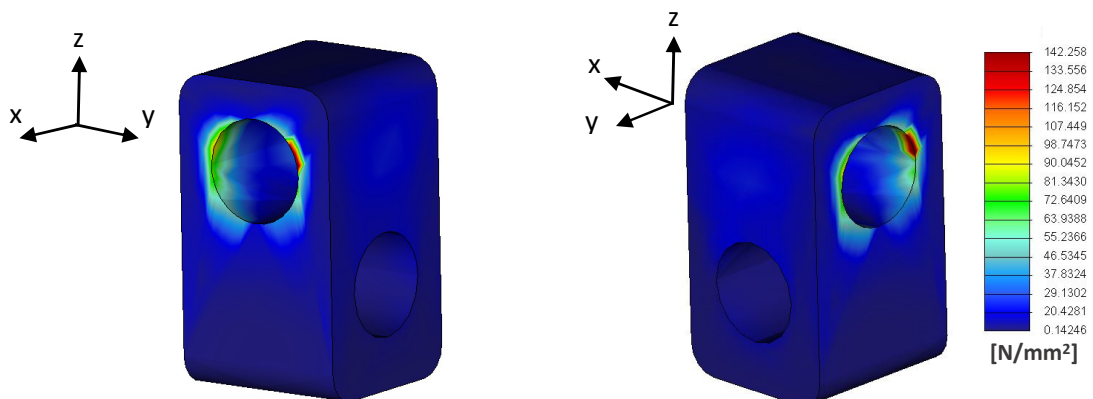
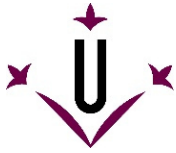


figura 21.2 – Simulació de resistència (PTC CREO) esforços de l'equivalent de Von Mises en la creueta

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Al2014-T4}}{\gamma_{seg}} = \frac{275}{1,5} = 183 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{m\grave{a}x} = 142,258 \frac{N}{mm^2}$$



12.3. Conjunt porta rodament

El següent subconjunt, en ordre ascendent cap a la caixa, és el format pels elements conjunt porta rodament (4) i les orelles de posicionament (5) (*figura 18*).

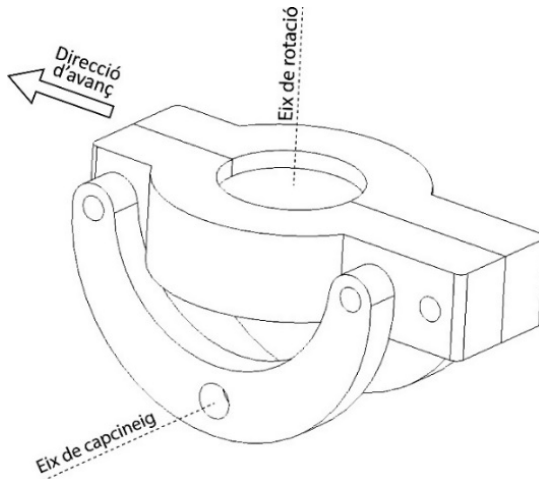


figura 22 - Orelles de posicionament i conjunt porta rodament

La relació que existeix entre els sòlids de la *figura 22* és fruit de la voluntat de dotar les orelles de posicionament d'una forma semicircular. Aquest fet troba el seu sentit en garantir un repartiment d'esforços equitatiu en els punts d'unió, participant en la lleugeresa del conjunt muntat.

La disposició dels caragols que mantenen units els sòlids ha estat detingudament estudiada i escollida entre dues solucions quant a senzillesa del muntatge i capacitat de resistir els esforços originats amb el menor pes possible.

El conjunt que es mostra en la *figura 22* és la solució escollida entre les dues expressades en la *figura 23*:

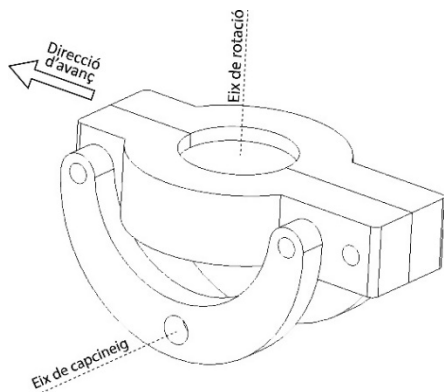


figura 23.1 - Solució escollida per al conjunt porta rodament

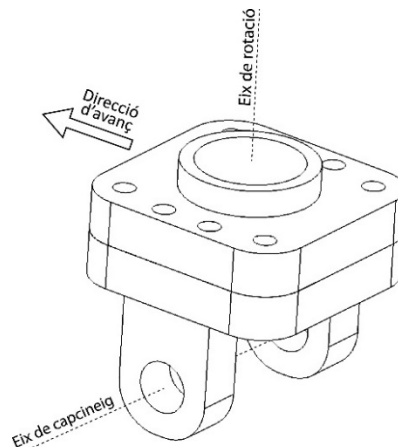
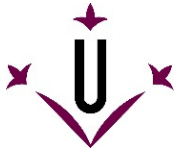


figura 23.2 - Solució descartada per al conjunt porta rodament

Els principals avantatges del conjunt escollit davant del muntatge descartat són:

- Pel que fa la compactació i lleugeresa, la solució escollida ofereix majors avantatges fruit de la combinació entre l'esveltesa del conjunt porta rodament, que té el seu gruix màxim en l'indret on s'allotja el rodament de l'eix de rotació i s'estreny a banda i banda seva, i el radi de la generatriu de les orelles que concorda amb aquest allotjament.
- Garanteix un millor repartiment dels esforços i un millor aprofitament de les propietats mecàniques de l'alumini.
- S'utilitzen per al muntatge dos caragols, que a la vegada d'unir les orelles amb el conjunt porta rodament, serveixen per mantenir unides les dues closques que subjecten el rodament. Menys caragols implica menys acer en el muntatge, i per tant, major lleugeresa del conjunt.
- Reduir el nombre de caragols i ubicar-los de manera transversal en facilita el muntatge.



Per tal de poder comparar de manera visual les dues solucions proposades, es mostra una simulació dels esforços originats en ambdues en situació de vol normal:

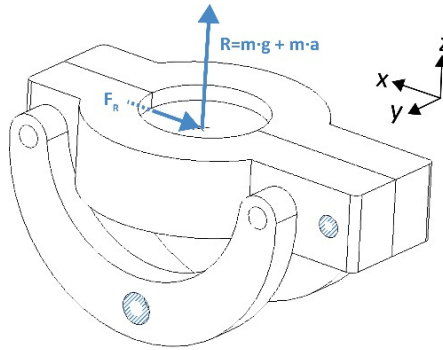


figura 24.1 – Diagrama d'esforços del conjunt orelles i porta-rodament

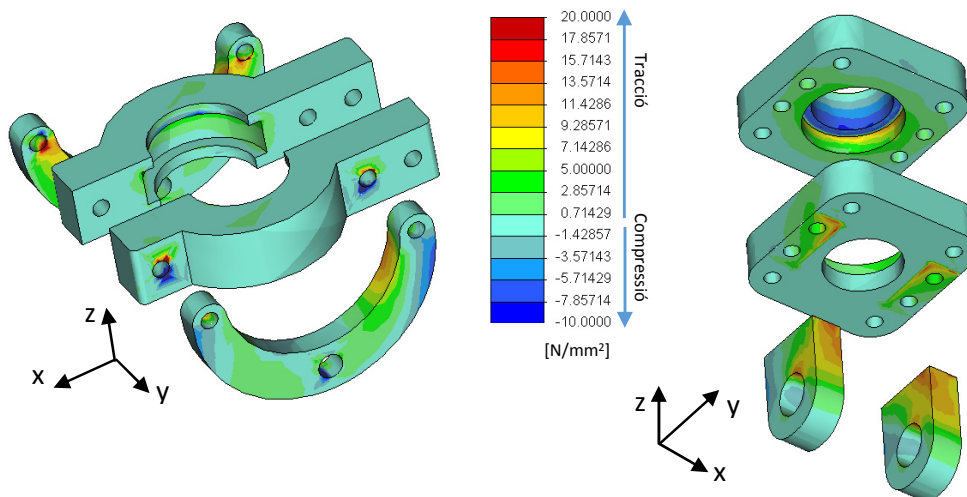


figura 24.2 – Simulació de la distribució d'esforços en direcció z d'ambdues solucions

La simulació mostra una reducció en termes generals dels esforços originats en les parts. Pel que fa a les orelles, que permeten el capcineig del rotor, la solució acceptada obliga al material a treballar menys a tracció. Per altra banda, per estar muntat amb menys caragols les unions pateixen més, tot i que els esforços originats ni s'apropen al límit de resistència acceptat pel material.

En pro de garantir un disseny isoressistent, es comprova que el conjunt porta rodament és capaç de resistir encara que una de les pales es desprengués (desequilibri de les forces inercials del rotor), llavors es considera els dos diagrames d'esforços següents (figura 25.1), i s'utilitza el valor més alt obtingut per corroborar la resistència del conjunt.

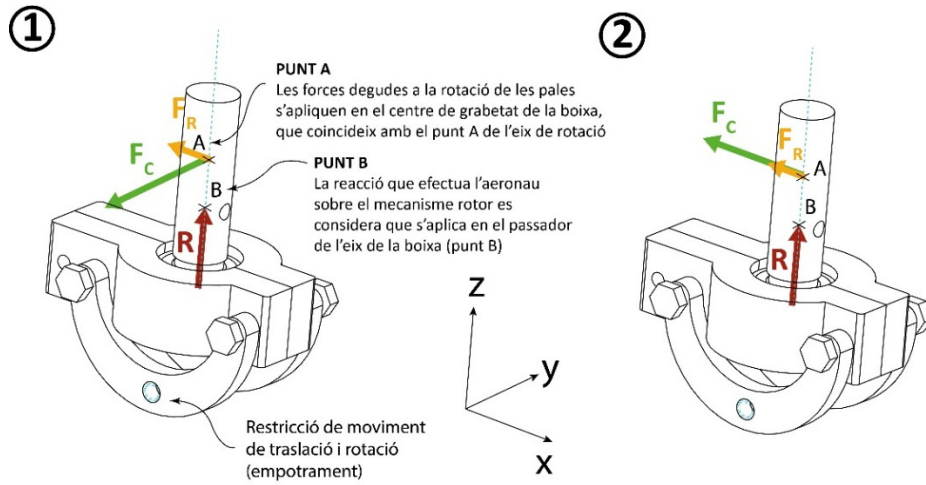
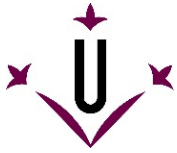


figura 25.1 – Diagrama d'esforços del conjunt porta rodament

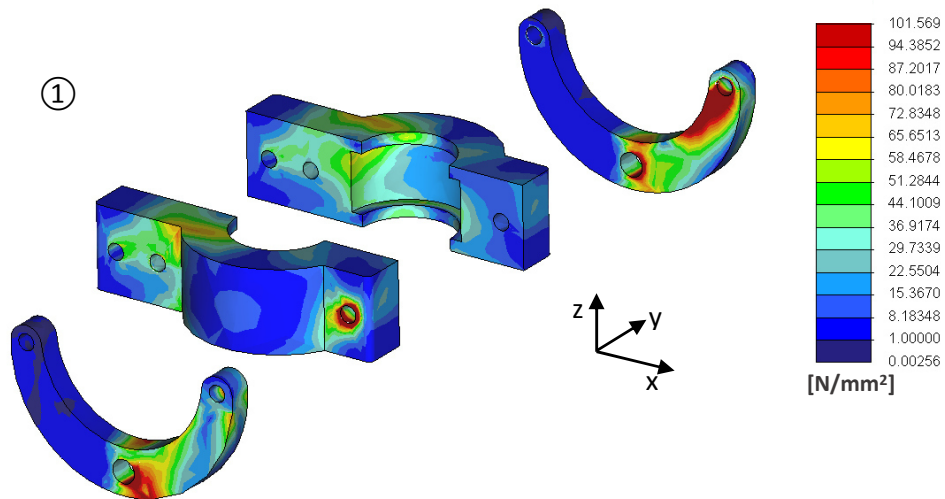


figura 25.2 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Mises en el conjunt porta rodament segones el diagrama 25.1.1

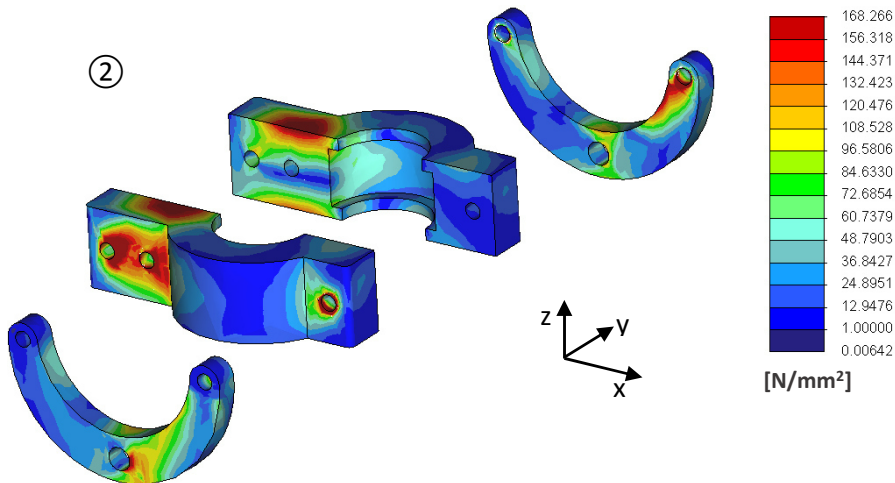
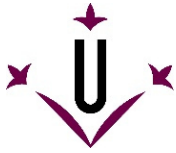


figura 25.3 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Mises en el conjunt porta rodament segones el diagrama 25.1.2



Llavors es demostra que el conjunt és capaç de suportar els esforços originats durant el vol amb escreix, fins i tot en el supòsit de què una de les pales es despregués (prop del límit admissible considerat).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Al2014-T4}}{\gamma_{seg}} = \frac{275}{1,5} = 183 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{m\grave{a}x} = 168,266 \frac{N}{mm^2}$$

Tanmateix, dotar d'un únic rodament al conjunt porta rodament, obliga a aquest a treballar al límit de la seva capacitat, havent de suportar grans esforços que s'oposen al moment produït pel desequilibri de les forces inercials del conjunt boixa, sòlids auxiliars i pales.

Aquest fet es veu agreujat si se segueix la premissa de què el conjunt rotor ha de ser capaç de conservar la seva integritat encara que una de les pales es despregués. Per això, es decideix dotar al sistema de dos rodaments que suporten els esforços que sobre ells imprimeix l'eix de rotació de l'aparell. Així s'augmenta la resistència del conjunt, a la vegada que es preveuen l'aparició d'esforços radials elevats en el rodament, en el supòsit del desequilibri inercial esmentat.

Llavors, el disseny definitiu del conjunt porta rodament, es modifica per donar cabuda a dos rodaments. El diagrama de forces i els esforços apareguts en els sòlids del conjunt, per al cas més desfavorable (*figura 25.1 cas 2*) són:

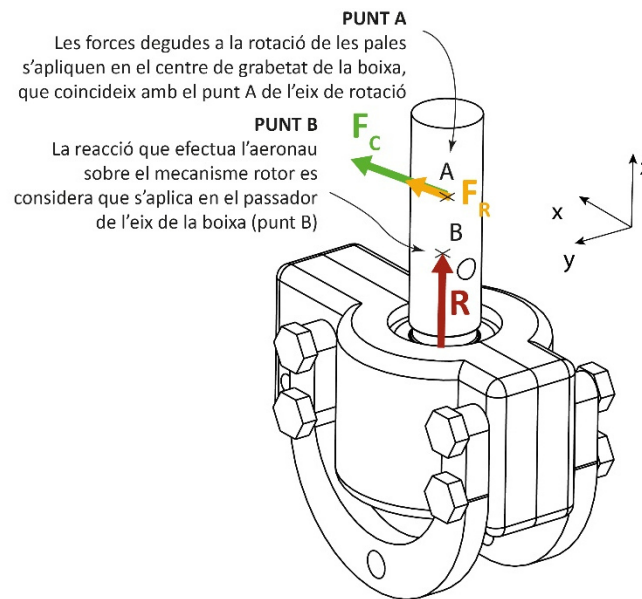


figura 25.4 – Diagrama d'esforços del conjunt porta rodament modificat (amb dos rodaments)

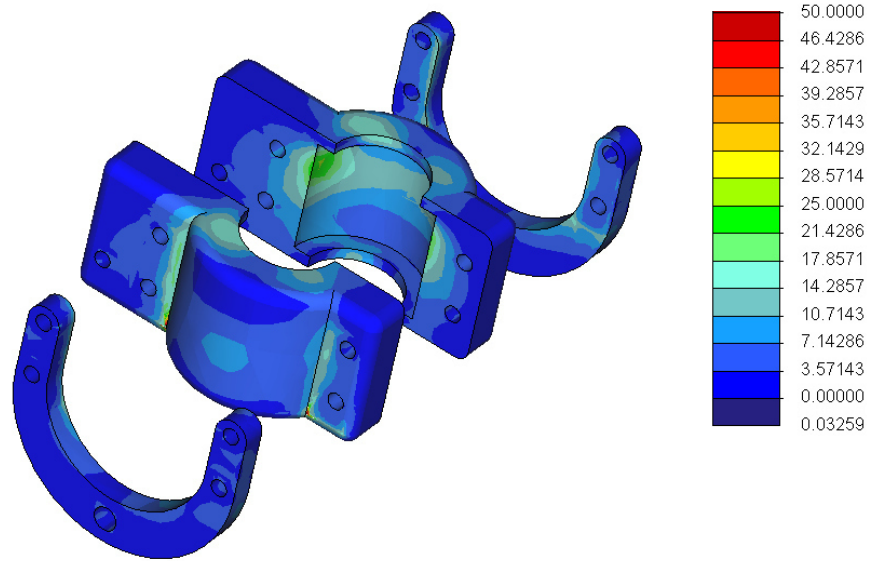


figura 25.5 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Misses en el conjunt porta rodament segones el diagrama 25.4

Es comprova també que les orelles de posicionament són capaces de suportar els esforços, i que la implementació de dos rodaments en comptes d'un no compromet la integritat del conjunt. De fet, com és d'esperar, en duplicar el nombre de caragols (àrea resistent) del muntatge, el conjunt es troba menys sol·licitat.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Al2014-T4}}{\gamma_{seg}} = \frac{275}{1,5} = 183 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{m\grave{a}x} = 46,43 \frac{N}{mm^2}$$

En aquest cas la voluntat de garantir que el sistema no es desmembrarà per complet si es desprèn d'una de les pales (implementant dos rodaments), provoca que el disseny perdi la condició d'isoresistència.

12.3.1. Elecció del rodament

Per a l'elecció del rodament, s'ha partit de dos axiomes: El primer, cal no comprometre la lleugeresa del conjunt rotor. En aviació és habitual utilitzar coeficients de seguretat reduïts, per tal de garantir que no s'enlairi més massa de la necessària. I el segon, cal que el rotor pugui suportar el sobreeforç que apareixeria si una de les pales es despregués, sense desintegrar-se, fet que podria ocasionar la projecció de les parts.

Llavors, el rodament escollit és del fabricant alemany Schaeffler, en concret el model de rodament rígid de boles 685-2Z, que presenta les següents especificacions:



taula 8 – Especificacions del rodament rígid de boles 685-2Z

	d	5 mm	
	D	11 mm	
	B	5 mm	
	D₂	9,9 mm	
	D_{a max}	10,2 mm	
	d₂	6,2 mm	
	d_{a min}	5,8 mm	
	r_{a max}	0,15 mm	
	r_{min}	0,15 mm	
	m	0,002 kg	Peso
	C_r	760 N	Capacidad de carga dinámica, radial
	C_{0r}	280 N	Capacidad de carga estática, radial
	n_G	71000 1/min	Velocidad límite
	n_B	61000 1/min	Velocidad de referencia
	C_{ur}	7,3 N	Carga límite de fatiga, radial

Com es pot observar en la fulla l'extracte de la fulla d'especificacions del rodament, la càrrega màxima radial (capacitat de càrrega estàtica) que poden suportar dos rodaments anàlegs muntats tal com es descriu en la *figura 38*.

12.3.2. Elecció dels coixinets

Per tal de garantir el moviment lliure de les articulacions de batiment, i de minimitzar la fricció entre els sòlids que materialitzen les articulacions de balanceig i de capcineig del rotor, es preveu dotar al mecanisme de coixinets. En el cas de les articulacions que posicionen el pla del rotor, els coixinets són d'utilitat per minimitzar l'esforç necessari del servomotor que controla l'articulació. En les articulacions de batiment, la implementació de coixinets és vital (sobretot tenint en compte les dimensions reduïdes de l'aparell), en el moviment batent de la pala es produeixen grans acceleracions fruit de la dissimetria de sustentació i com a conseqüència de l'elevat règim de rotació de la boixa considerat ($\Omega = 120$ r.p.m).

Els coixinets proposats per reduir la fricció en les articulacions són del fabricant IGUS, en concret els models estandarditzats J3 i X6.

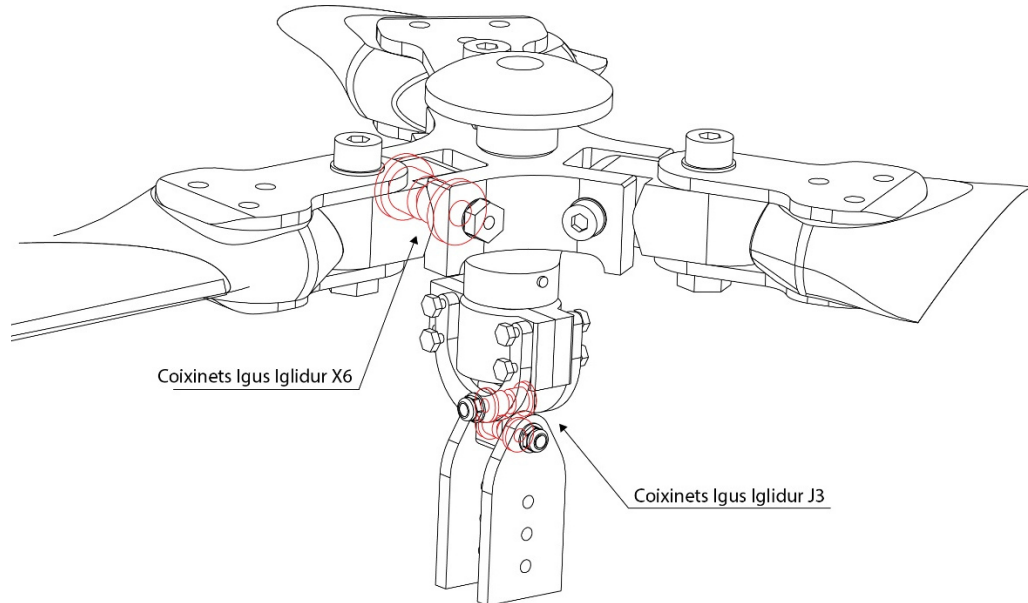
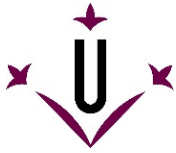


figura 26.1 – Coixinets del mecanisme rotor (articulacions de balanceig, capcineig i batiment)

La resistència requerida pels coixinets és la necessària per garantir el correcte funcionament del mecanisme en condicions de vol normal (figura 26). El supòsit de què s'originessin sobreesforços per culpa del despreniment d'una de les pales no es contempla en l'elecció dels coixinets, donat que no són un element estructural important del mecanisme, i la cohesió d'aquest no depèn de la resistència dels coixinets.

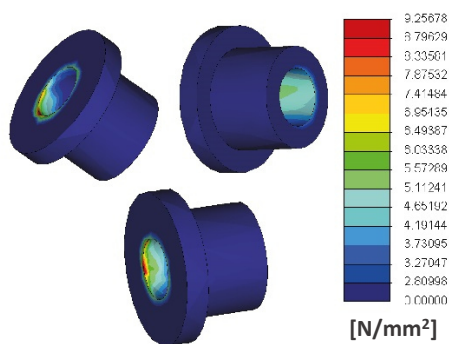


figura 26.2 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Mises del coixinet J3

$$\sigma_{adm}^{coixinet J3} = 35 \text{ N/mm}^2$$

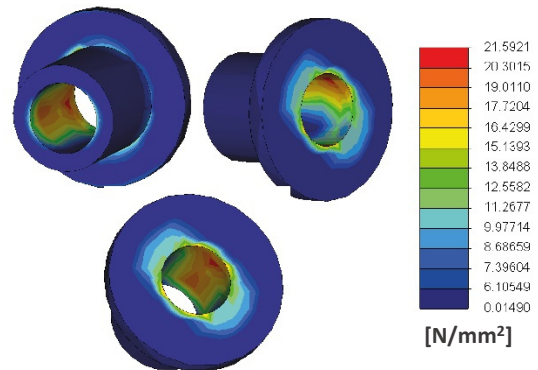
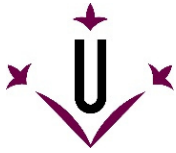


figura 26.3 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Mises del coixinet X6

$$\sigma_{adm}^{coixinet X6} = 180 \text{ N/mm}^2$$



12.4. Eixos de balanceig i de capcineig

Els passadors que materialitzen les articulacions de balanceig i capcineig, es projecten per ser fabricats mitjançant el torn, partint d'un bloc d'alumini massís de dimensions suficients. La dimensió radial d'ambdós passadors que materialitzen les articulacions principals del rotor queda fitada per un dels requeriments de muntatge ($\varnothing_b \geq 2 \text{ mm}$: Dimensió diametral mínima dels bulons), fet que provoca que els esforços originats ni s'apropin a la tensió màxima admesa pel material.

Se'n determinen a continuació els esforços originats durant el vol mitjançant el programa de simulació:

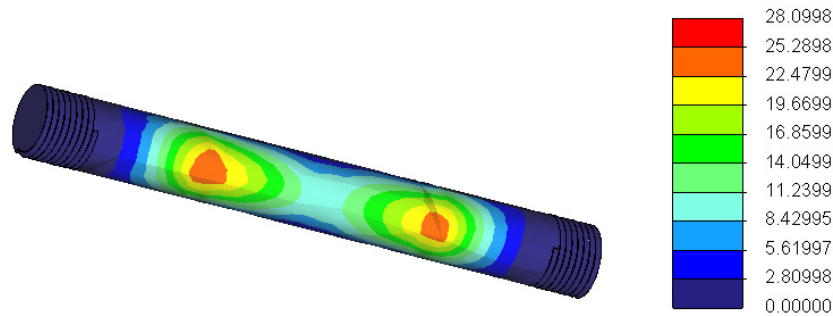


figura 27 – Simulació de resistència (PTC CREO) dels esforços de l'equivalent de Von Mises del passador de balanceig

12.5. Eix de rotació

L'eix de rotació gira de forma lliure i solidària a la pista interior del rodament que es troba allotjat en la cavitat central del conjunt porta rodament (veure figura 18). Es projecta per ser conformat en alumini mitjançant el procés de mecanitzat amb torn a partir d'un bloc massís i cilíndric de material.

La funció de l'eix de rotació és la de transmetre la velocitat angular de la caixa a la pista interior del rodament, permeten així una rotació lliure i minimitzant-ne la fricció entre les parts mòbils.

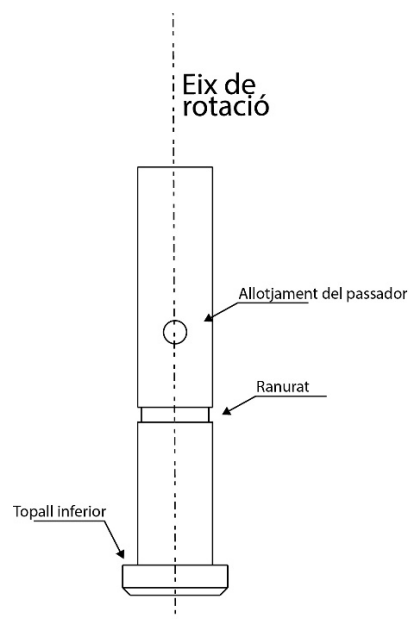
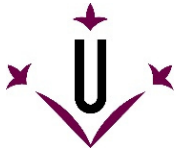


figura 27 - Eix de rotació

En la vista (figura 27) s'aprecia en la part inferior de l'eix un topall que té com a finalitat la de transmetre la força sustentadora produïda pel moviment de les pales al rodament, assegurant així la cohesió del mecanisme. En direcció ascendent es troben el ranurat destinat a allotjar l'anell elàstic que assegura la posició relativa entre l'eix i el rodament quan l'aparell està en repòs (aeronau a terra) i el passador, el qual té com a finalitat mantenir la caixa en la seva posició amb l'autogir aturat. A més, mitjançant el passador s'assegura la transmissió de tracció de les pales al conjunt de l'autogir i se n'evita el lliscament amb la caixa.



La dimensió radial de l'eix de la caixa queda fitada en 5 mm, fet que garanteix que suportarà els esforços amb escreix.

Tot i quedar corroborada la resistència en condicions de vol normal, per motius de seguretat esdevé vital corroborar que l'eix serà capaç de suportar els esforços que s'originarien en el cas que una de les pales es despregués. La simulació es realitza partint del diagrama següent, per ser el que implica una situació més desfavorable per l'element d'estudi:

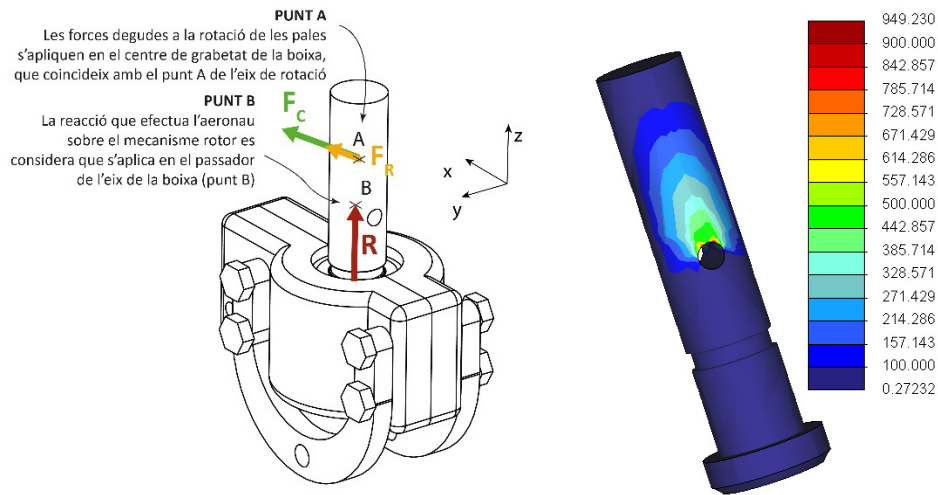


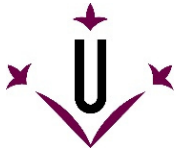
figura 30 – Diagrama i simulació d'esforços equivalents de Von Mises de l'eix de rotació en el supòsit que una pala es despregués

En aquest cas es pot observar com els esforços originats en el passador que manté unit la caixa amb l'eix (punt B) creixen exponencialment. L'explicació d'aquest fet rau en el desequilibri inercial del sistema rotor, que ara en perdre la seva simetria (en dos plans no particulars) origina grans esforços que promouen la flexió de l'eix, i castiguen l'allotjament del passador.

Ara bé, la simulació informàtica no contempla exactament la realitat en aquest cas. Els esforços són aplicats en un punt en comptes d'una superfície i no es té en compte la fricció existent entre l'eix muntat i els sòlids amb què es munta amb interferència, castigant el passador com si fos l'únic element que s'oposa a què eix i caixa se separin.

Tenint en compte aquest fet, i considerant que la dimensió diametral de l'eix ha estat presa d'un model d'autogir existent i funcional, realitzar un càlcul senzill es considera suficient per corroborar la bondat del disseny.

	<p>Secció crítica S1</p> $M_y _{S1} = (505 + 15) \cdot 20$ $M_y _{S1} = 10,4 \text{ Nm}$ $F_z _{S1} = 30 \text{ N}$ $I_y _{S1} = 0,49 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$ $\sigma_z _{S1} = 83,06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	<p>Secció crítica S2</p> $M_y _{S2} = (505 + 15) \cdot 30$ $M_y _{S1} = 15,6 \text{ Nm}$ $F_z _{S1} = 30 \text{ N}$ $I_y _{S1} = 0,49 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$ $\sigma_z _{S1} = 109,59 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
--	---	--



Llavors:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Acer S355}}{\gamma_{seg}} = \frac{355}{1,5} = 236 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{m\grave{a}x} = 109,59 \frac{N}{mm^2}$$

12.6. Boixa

Per estar el sòlid boixa sobredimensionat (per motius que responen als requeriments de facilitat de muntatge) és obvi que el sòlid suportarà amb escreix els esforços deguts al moviment del mecanisme. No obstant és vital estudiar-ne les tensions que apareixen durant el moviment, degudes a les forces centrífugues provocades per la rotació de les pales i a la força tractora que dóna lloc a la sustentació.

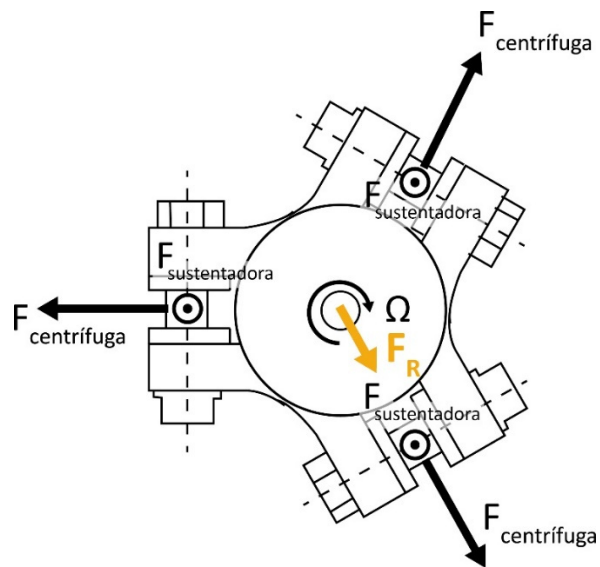


figura 31.1 – Diagrama de forces originades en la boixa durant el vol estacionari

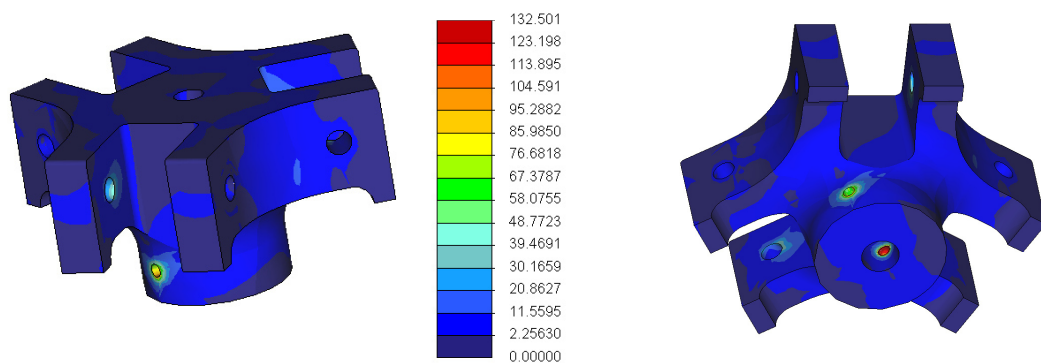
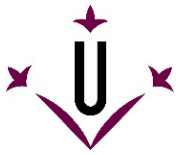


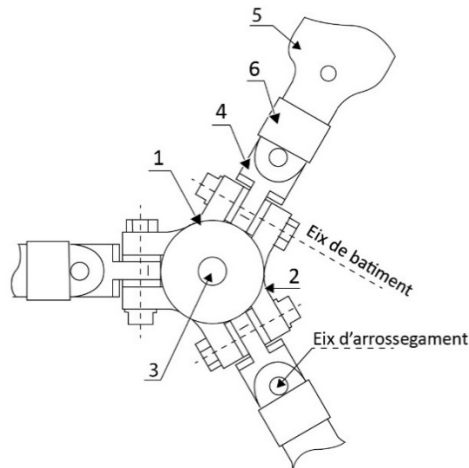
figura 31.2 – Esforços resultants de les forces originades en la boixa durant el vol estacionari

De la figura 31.2 se'n desprèn que l'esforç màxim originat pren un valor que queda per sota del líndar admissible considerat pel material. La zona més sol·licitada és l'allotjament del passador que manté units la boixa i l'eix, novament sense considerar la força de fricció que el muntatge amb interferència aporta al conjunt.



$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{elast}^{Al2014-T4}}{\gamma_{seg}} = \frac{275}{1,5} = 183 \frac{N}{mm^2} \geq \sigma_{m\grave{a}x} = 132,501 \frac{N}{mm^2}$$

Per altra banda se sap que el conjunt de la boixa, amb els sòlids annexos encarregats d'assegurar els graus de llibertat necessaris a les pales, no pot excedir-se dels 5 cm de diàmetre. Es plasma a continuació una vista en planta del conjunt:



1	Barret
2	Boixa
3	Caragol retenció
4	Sòlid de batiment
5	Sòlid d'arrossegament
6	Amortiment d'arrossegament

figura 32 – Boixa i conjunt porta pala

El cos de la boixa brinda subjecció a les tres pales que s'enllacen a ella a través dels sòlids auxiliars de batiment i d'arrossegament, articulant-se així al voltant d'ambdós eixos homònims respectivament (figura 32). La rotació al voltant de l'eix de batiment és teòricament lliure, de manera que és el propi funcionament normal del mecanisme el que gestiona el moviment de manera autònoma. No obstant cal preveure que, amb l'aparell aturat, les pales tendeixen a descendir per acció de la gravetat, fet que si no es té en compte, podria ocasionar col·lisions amb la cua de l'aeronau. És per aquest fet que es dota tant al sòlid de batiment com al cos de la boixa d'uns topalls que inhabiliten el descens excessiu de les pales (veure detall figura 33).

El fet de situar l'articulació de batiment més propera a la boixa que la d'arrossegament és intencionat, per així procurar una major massa batent, reduint-ne l'acceleració i rang de moviment.

En canvi, el moviment d'arrossegament al voltant de l'eix indicat és necessari per eliminar vibracions en el funcionament de l'aparell, però cal que aquest moviment sigui controlat (esmoreït) per evitar sotragades quan el vent incident en les pales canvia de sentit de forma sobtada (per exemple per a $\Psi=180^\circ$).

En la figura 33 es mostra el batiment d'una de les pales, on l'angle beta (β) en quantifica aquest moviment, i en vermell es resalta en la il·lustració la interferència entre el cos de la boixa i el sòlid de batiment, que n'impossibiliten un descens major de 20° .

A la vegada l'esmentada figura serveix per mostrar amb major claredat l'esmoreïment de l'articulació d'arrossegament, materialitzada per una junta de material dúctil que l'abraça i possibilita el moviment tot forçant-ne la suavitat.

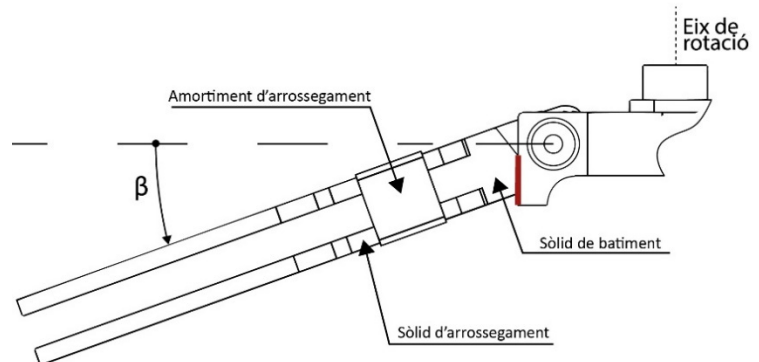
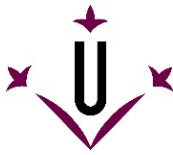


figura 33 - Detall batiment d'una pala en direcció descendent



12.7. Sòlids de batiment i arrossegament

Els sòlids de batiment i d'arrossegament són el nexa entre la boixa i la pala. Mitjançant aquests dos sòlids es permet el moviment que els hi dona nom, dotant de dos graus de llibertat angulars a cadascuna de les pales respecte la boixa. Per tractar-se d'un sistema senzill d'orelles i passadors, se'n determinen els esforços originats al marge de la simulació i es comprova la resistència dels caragols que cohesionen el conjunt.

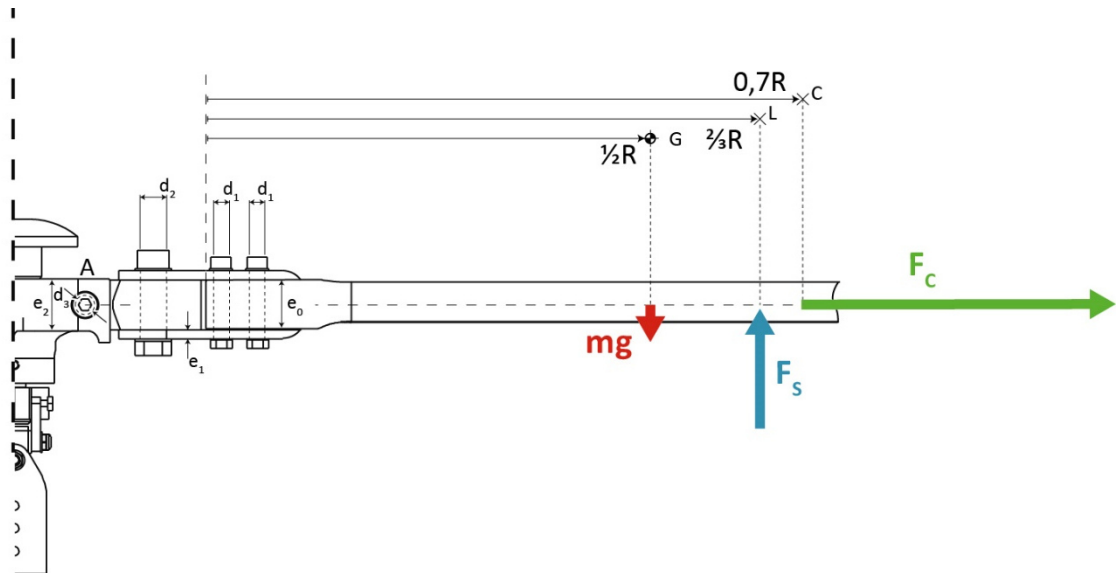


figura 34 – Diagrama de les forces provocades per la pala sobre els sòlids del rotor en el vol

De la figura 34 se'n desprèn que la força centrífuga (F_C) és notablement superior que l'originada pel pes de la pala i la resultant de la força sustentadora:

$$F_C = 505$$

$$F_S = 35$$

$$mg = 0,981$$

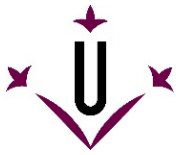
Del que s'extreu que la força centrífuga és un ordre de magnitud superior a la sustentadora, i 4 ordres superior al pes de la pala. Per aquest fet es negligeix el pes de la pala, però no es pot fer el mateix amb la força sustentadora. Si bé és cert que en el diagrama de forces (figura 34) sembla que no pugui originar grans esforços en el conjunt, com varia el seu valor en una revolució del rotor, produeix grans acceleracions de batiment ($\ddot{\beta}_{m\grave{a}x} = 450 \text{ rad/s}^2$). Llavors el valor a considerar és el producte d'aquesta acceleració per la inèrcia de la pala en el seu punt d'articulació:

$$M_A = I_A \cdot \ddot{\beta}_{m\grave{a}x} = 1,4895 \text{ Nm}$$

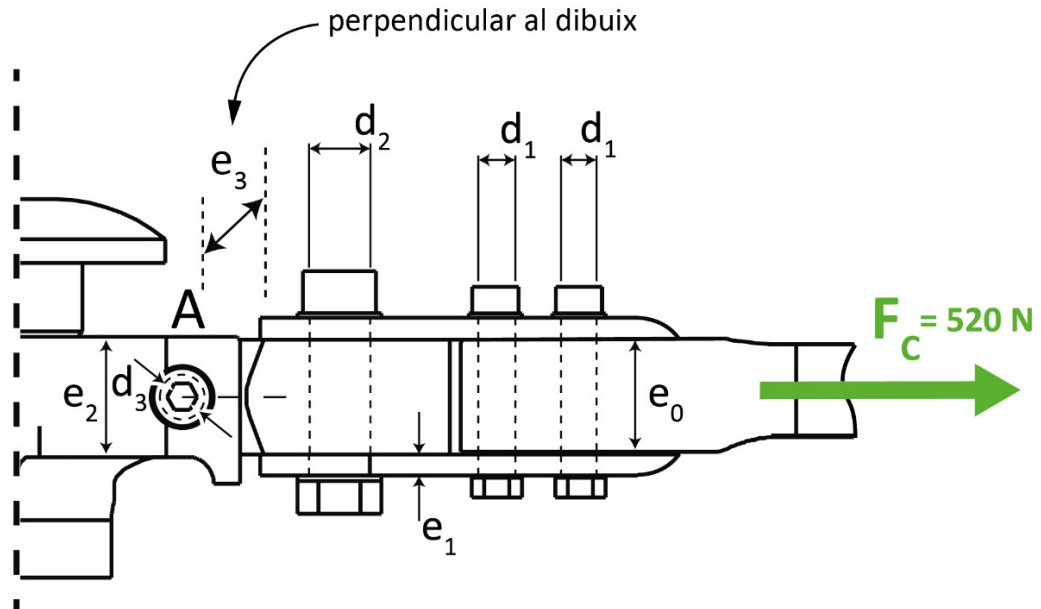
Tot i les grans acceleracions originades, s'aprecia a causa de la poca inèrcia (massa) de la pala, el moment resultant no és gaire significatiu. Aquest fet, lligat al fet que la dimensió radial (longitudinal) de la pala és inferior a un metre, són motius suficients per considerar tant sol la força centrífuga a l'hora d'avaluar la resistència dels sòlids del conjunt i dels caragols que fan de nexa.

També, per tenir la força de resistència a l'avanç sempre la mateixa direcció i sentit, en determinats instants es produeix la circumstància que la força centrífuga d'una pala, i la força de frec originada per l'aire sobre el conjunt del rotor s'oposin, provocant que la força efectiva que hagin de suportar els caragols i sòlids integrants sigui:

$$F_E = F_C + F_R = 520 \text{ N}$$



Llavors, prenent com a valor de 520 N per a la força centrífuga es determinen els esforços originats en les orelles i passadors del conjunt caixa, sòlids de batiment i arrossegament i l'enganxall de la pala.



➤ **SÒLID DE BATIMENT**

$$1 \text{ forat} \cdot A_R^{s.bat}$$

$$A_R^{s.bat} = d_3 \cdot e_3$$

$$A_{R.TOTAL}^{s.bat} = 3 \cdot e_3$$

$$\text{si } e_3 = 8,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{S.BAT} = \frac{520}{3e_3} = 20,4 \frac{N}{mm^2}$$

Llavors, la dimensió mínima per garantir la isoresistència del conjunt caixa i sòlid de batiment, la dimensió de les dues orelles (e_4) de la caixa que subjecten cada conjunt queda fitada en:

$$e_4 = 5,25 \text{ mm}$$

➤ **SÒLID D'ARROSSEGAMENT**

$$1 \text{ forat} \cdot 2 \text{ platines} \cdot A_R^{platina}$$

$$A_R^{platina} = d_2 \cdot e_1$$

$$A_{R.TOTAL}^{platina} = 8 \cdot e_1$$

$$\text{si } e_1 = 2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{PLETINA} = \frac{520}{8e_1} = 32,5 \frac{N}{mm^2}$$

➤ **SÒLID DE BATIMENT**

$$1 \text{ forat} \cdot A_R^{s.bat}$$

$$A_R^{s.bat} = d_2 \cdot e_0$$

$$A_{R.TOTAL}^{s.bat} = 4 \cdot e_0$$

$$\text{si } e_0 = 10 \text{ mm}$$

$$\sigma_{S.BAT} = \frac{520}{4e_0} = 13 \frac{N}{mm^2}$$

➤ **PALA**

$$3 \text{ forats} \cdot A_R^{pala}$$

$$A_R^{pala} = d_1 \cdot e_0$$

$$A_{R.TOTAL}^{pala} = 9 \cdot e_0$$

$$\text{si } e_0 = 10 \text{ mm}$$

$$\sigma_{PALA} = \frac{520}{9e_0} = 5,8 \frac{N}{mm^2}$$

➤ **SÒLID D'ARROSSEGAMENT**

$$3 \text{ forats} \cdot 2 \text{ platines} \cdot A_R^{platina}$$

$$A_R^{platina} = d_1 \cdot e_1$$

$$A_{R.TOTAL}^{platina} = 18 \cdot e_1$$

$$\text{si } e_1 = 2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{PLATINA} = \frac{520}{18e_1} = 14,5 \frac{N}{mm^2}$$

Imposant els diàmetres de caragols:

$$d_1 = M3$$

$$d_2 = M4$$

$$d_3 = M3$$

per provocar una aparició d'esforços equitativa entre els diferents sòlids implicats i garantir el requeriment de facilitat de muntatge (mínim M2).

figura 36 – Esforços originats i dimensionat dels sòlids del conjunt caixa, pala i sòlids auxiliars

Un cop realitzat els primers càlculs senzills, es corroboren els resultats mitjançant la simulació informàtica dels esforços originats per les forces descrites en la figura 34.

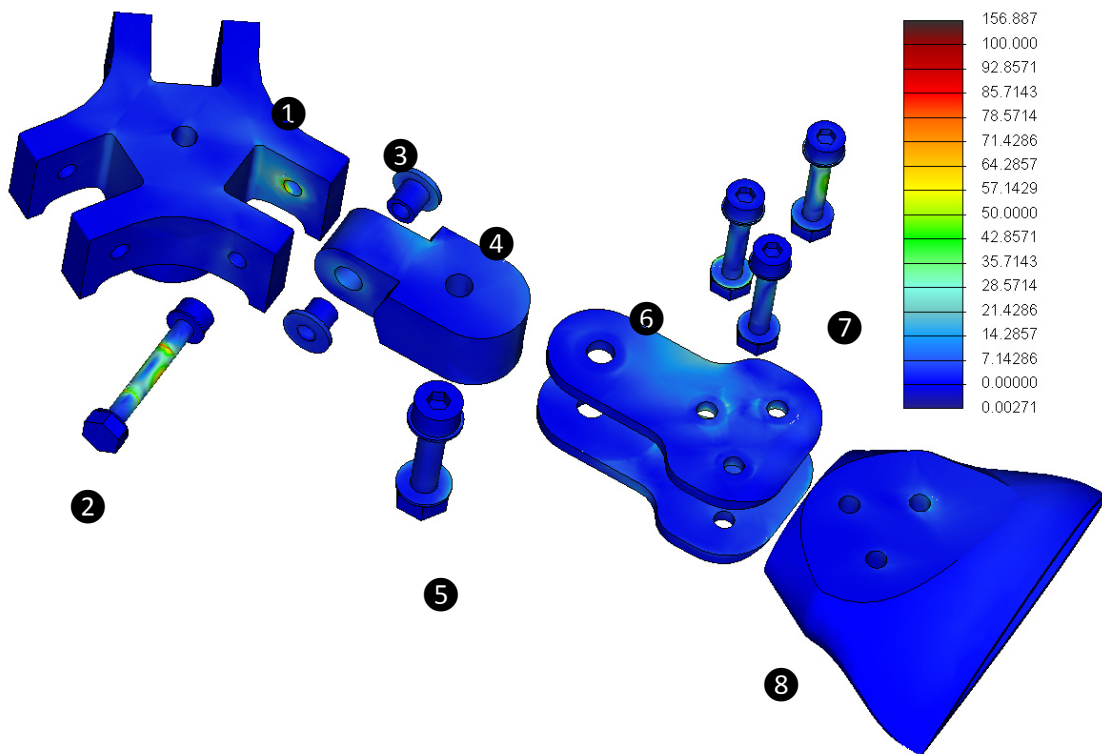
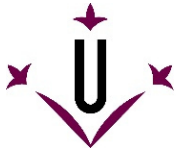
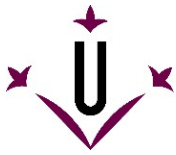


figura 36 – Simulació dels esforços originats sobre el conjunt caixa, pala i sòlids auxiliars fruit de les forces originades en el vol

Com es comprova per mitjà de la simulació, l'esforç màxim que apareix es produeix en l'articulació de batiment a causa de l'oscil·lació del conjunt al voltant d'aquest punt que participa en el cisallament del caragol encarregat de materialitzar l'articulació. Per la resta de sòlids es corrobora que no s'excedeix en cap cas la tensió màxima admissible acceptada per cada material:

SÒLID	Núm.	MATERIAL	TENSIÓ ADMISIBLE	TENSIÓ MÀXIMA
Boixa	1	Alumini 2014-T4	$\sigma_{adm} = 183 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 132,5 \text{ N/mm}^2$
Caragol de batiment	2	Acer caragols 6.8	$\sigma_{adm} = 320 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 156,9 \text{ N/mm}^2$
Coixinets de batiment (X6)	3	"iglidur"	$\sigma_{adm} = 150 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 21,6 \text{ N/mm}^2$
Sòlid de batiment	4	Poliacetat	$\sigma_{adm} = 33 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 21,4 \text{ N/mm}^2$
Caragol d'arrossegament	5	Acer caragols 6.8	$\sigma_{adm} = 320 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 23,2 \text{ N/mm}^2$
Sòlid d'arrossegament	6	Alumini 2014-T4	$\sigma_{adm} = 183 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 78,6 \text{ N/mm}^2$
Caragols de la pala	7	Acer caragols 6.8	$\sigma_{adm} = 320 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 92,9 \text{ N/mm}^2$
Pala	8	ABS imprès	$\sigma_{adm} = 30 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m\grave{a}x} = 28,6 \text{ N/mm}^2$

De la simulació informàtica d'esforços es dedueix que tots els sòlids són capaços de suportar els esforços que sobre ells s'imprimeixen. El sòlid més sol·licitat esdevé la pala, però donat que la tensió admissible del material és tan sols una estimació basada en assajos realitzats sobre peces impreses, que ofereixen una gran variabilitat, s'ha pres el valor mínim de 30 N/mm^2 per al dimensionat. No obstant això, els esforços apareguts no sobrepassen aquest llindar.



12.7.1. Determinació de la junta elàstica

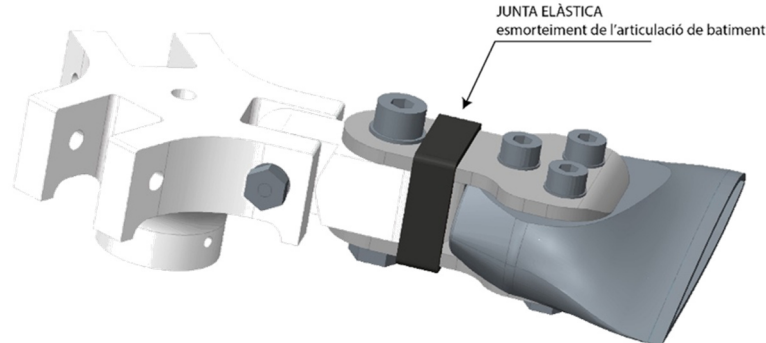


figura 37 – Junta elàstica (esmorteïment de l'articulació d'arrossegament)

Per tal de determinar el material més idoni per fabricar la junta elàstica, que esmorteïx el moviment d'arrossegament de la pala, es pren el valor de la resistència a l'avanç de la pala en creuar $\psi=180^\circ$, moment en què la pala és paral·lela a la direcció d'avanç, i la seva generatriu des de la caixa a la punta de la pala en té el mateix sentit.

Així si es pren $0,5^\circ$ abans i després del llindar $\psi=180^\circ$, la força de frec amb l'aire canvia de valor segons:

$\psi=179,5^\circ$	$F_R = 5,36 \text{ N}$
$\psi=180,5^\circ$	$F_R = 5,31 \text{ N}$

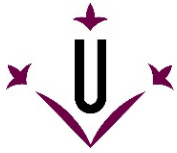
Llavors la variació de força de frec que veu la pala és de $0,05 \text{ N}$ en traspasar els $\psi=180^\circ$. Considerant aquesta variació en la força que s'oposa a la rotació de la pala, en resulta un moment que actua sobre l'articulació de batiment de $0,022 \text{ Nm}$. Així, el material idoni per fabricar la junta elàstica que recobreix l'articulació d'arrossegament és qualsevol que ofereixi certa resistència elàstica que n'esmorteïxi el moviment, sense atorgar excessiva rigidesa a l'articulació. Per aquest fet es proposa l'Elastollan C85A, un elastòmer amb base de polièster que ofereix unes bones prestacions en un ventall ampli de temperatures. Tot i el considerat en el present treball, per materialitzar la junta elàstica qualsevol material TPE que ofereixi un esmorteïment superior a 10 MPa tant en condicions normals com estàndards.

12.8. Disseny de la pala

Es proposa fabricar la pala mitjançant eines de prototipatge ràpid. Aquestes eines, a més de dotar l'element pala de la resistència necessària per suportar els esforços que s'originen durant el vol (escollint adequadament el material d'impressió: poliacetat), permeten l'elaboració de geometries complicades que amb altres processos productius són inabastables.

El disseny que es proposa és el descrit per la figura 38, mitjançant dues parts impreses per separat i unides en els seus extrems. Cadascuna de les parts es projecta com una closca de $0,8 \text{ mm}$ de gruix i buides per dins, amb una sanefa que en possibilita el procés d'impressió. L'enganxall de la pala amb el sòlid d'arrossegament, i de retruc amb el conjunt, es resol de manera que no es compromet l'aerodinàmica del perfil, i que el material emprat (poliacetat) sigui capaç de suportar els esforços que s'originen en els allotjaments dels caragols.

Donada la complexitat del disseny de la pala (disseny aerodinàmic), s'ha optat per facilitar els arxius CAD en comptes de plànols. Aquest fet respon a que elaborar pales per girodines mitjançant processos de mecanitzat (d'arrencada de material) esdevé una tasca tediosa quan es pretén produir pales ben equilibrades. Per aquest motiu, s'ha escollit utilitzar el sistema de prototipatge ràpid esmentat (impressió 3D), i senten que per la producció de les pales esdevé molt més pràctic tenir un model CAD (llenguatge de la màquina d'impressió) abans que un plànol, que depèn sempre de la



interpretació humana i, en teoria, esta més subjecte a petits errors de mecanitzat que en sòlids girants a altes revolucions, poden esdevindre fatals.

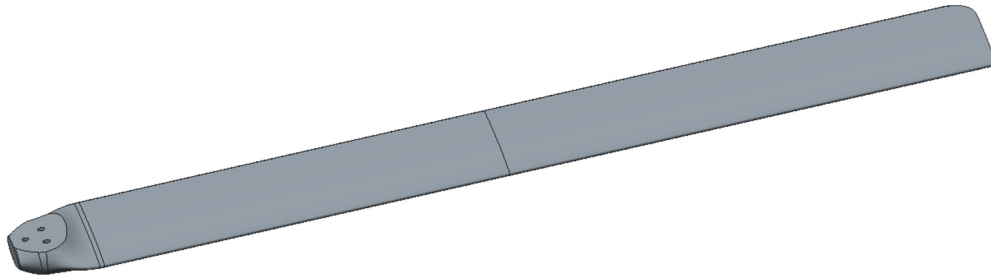


figura 38 – Disseny de la pala del rotor

12.9. Conjunt explosionat

Conjunt explosionat de tots els sòlids dissenyats que formen part del mecanisme rotor (exclosos caragols, femelles, coixinets i pales):

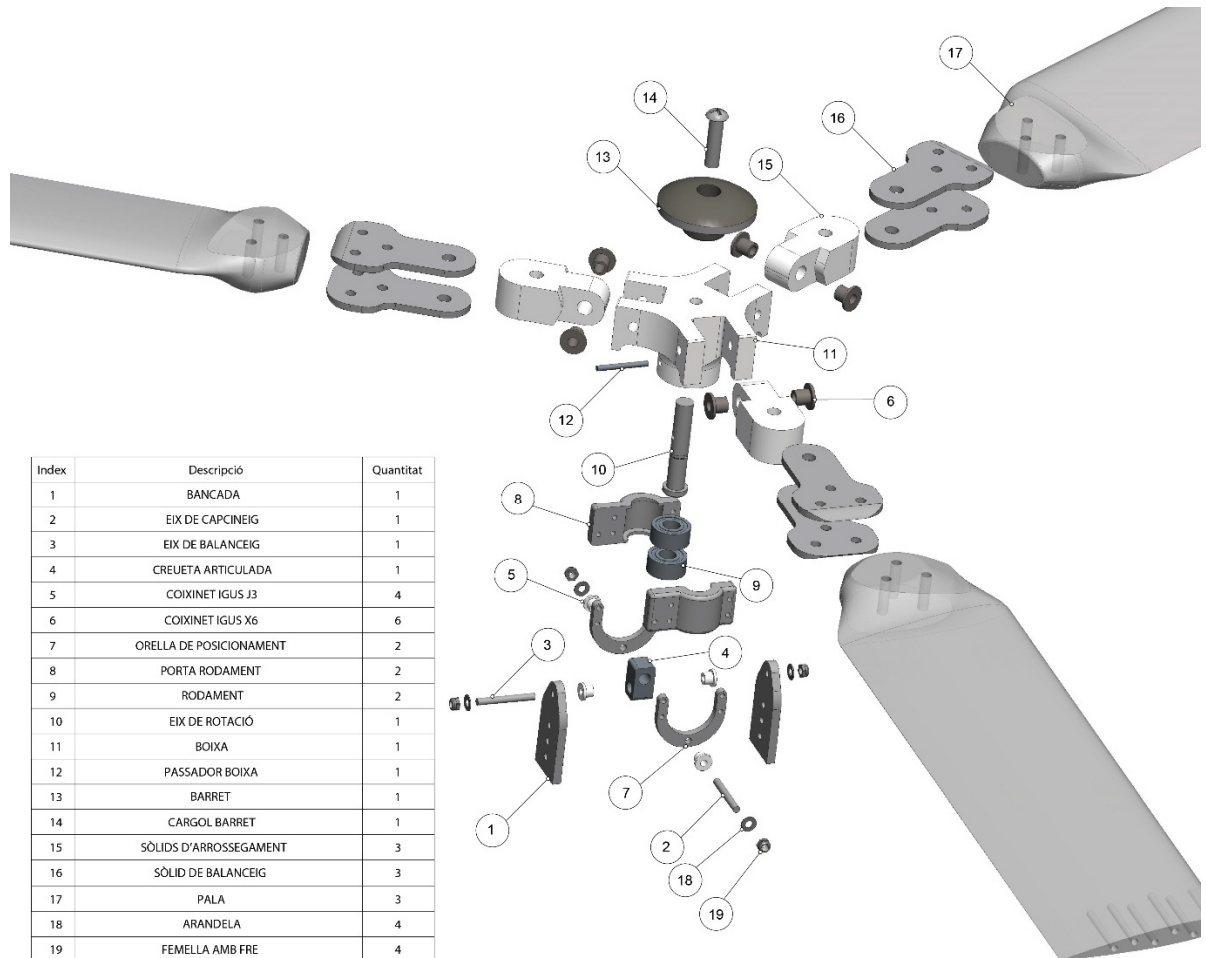



figura 39 – Conjunt rotor explosionat de tots els sòlids integrants (menys els caragols comercials)

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	<i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	
	Autor: Jaume Llaó Herrera	Data: juliol del 2017
	MEMÒRIA	Pàgina: 57 de 58

13. Conclusions

Del present treball se'n deriven un seguit de conclusions les quals es poden agrupar en dues famílies principals. La primera, l'elaboració del treball ha permès establir els paràmetres aerodinàmics que defineixen un rotor d'autogir. Mitjançant l'estudi aerodinàmic realitzat, s'ha establert quines variables són d'importància a l'hora de plantejar un nou disseny per a un rotor. A la vegada s'ha comprès, mitjançant la simulació informàtica, la interacció entre el sistema d'estudi (rotor) i l'entorn (flux d'aire incident sobre ell), fet que ha possibilitat determinar les principals forces aerodinàmiques produïdes en les pales transmeses als sòlids del rotor i així, definir tots els paràmetres per realitzar el disseny mecànic de l'aparell.

Duran l'elaboració de l'estudi aerodinàmic s'ha pres consciència de la magnitud del problema plantejat, fent necessària l'aproximació per mitjà de mètodes numèrics per donar solució a equacions derivades d'ordre 3 (posició, velocitat i acceleració). Les aproximacions numèriques han sigut realitzades mitjançant l'entorn matemàtic MATLAB, utilitzant mètodes d'aproximació d'edós, a més d'algorismes recurrents propis que convergeixen per trobar solució. En l'inici del projecte (l'autor), s'acceptà que no existia una extensa bibliografia sobre autogirs i el seu disseny, per la desconeixença "a peu de carrer" de l'aparell. Contràriament a aquesta percepció inicial, durant el transcurs del treball i en concret durant la redacció del mateix s'ha trobat força bibliografia sobre aquesta temàtica.

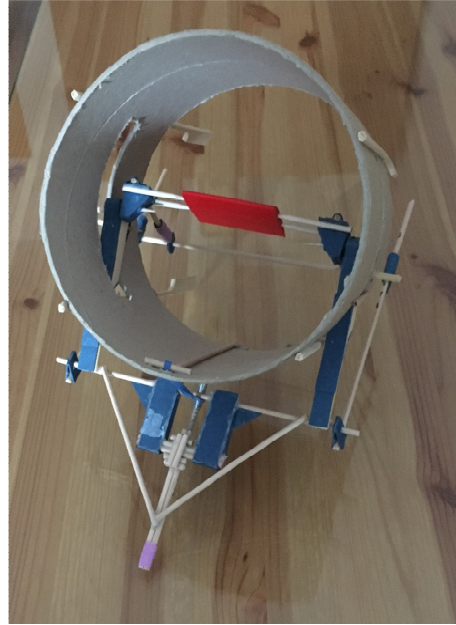
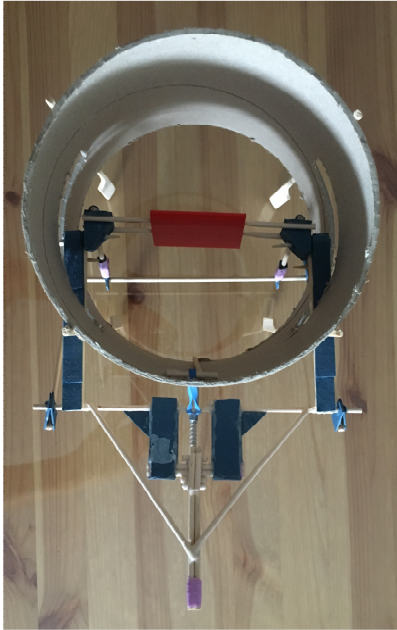
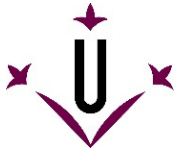
Han sigut de gran utilitat les fitxes de NACA (Associació Aeronàutica Americana) dels anys 30 i 40. Però, tot i els coneixements extrets d'aquest document, ha sigut necessària l'adaptació dels mètodes utilitzats als sistemes d'anàlisi més actuals, que aprofitant la potència de càlcul informàtica d'avui dia, han permès abandonar la consideració purament matemàtica del problema per un sistema de càlcul més senzill, eficaç i diligent.

Per altra banda, i per sorpresa del redactor d'aquest treball, actualment es troben nombrosos estudis sobre autogirs i la predicció del seu comportament mitjançant programes informàtics. Alguns exemples d'aquest fet són apunts i treballs de final de carrera de la facultat d'aeronàutica de la UPC, a més de nombrosos estudis, tesis i treballs d'universitats llatinoamericanes com les de Bogotà o Mèxic. Al final de tot, sembla que la bondat del disseny de l'autogir i l'adaptació del seu disseny per realitzar tasques concretes és un tema candent.

No obstant totes les eines disponibles, enfrontar-se a un problema aerodinàmic (no pas senzill) com el que planteja el rotor d'un autogir, ha esdevingut una tasca feixuga, sobretot per la disparitat entre els coneixements que es brinden als estudiants del nostre centre i les nocions necessàries per afrontar i solucionar un disseny d'autogir amb èxit. De fet, per aquest motiu, en la part primera del treball s'ha volgut descriure encara que fos a grans pinzellades les nocions necessàries per entendre el significat de les decisions de disseny preses.

Quant a la implementació d'una tercera pala en el rotor (dues pales com a configuració més habitual per un autogir), s'ha pogut corroborar la bondat d'aquesta decisió. Un rotor de tres pales, esdevé per definició un rotor simètric (aproximadament, negligint el batiment i arrossegament de les pales) i teòricament hauria d'aportar un grau significatiu de suavitat al moviment de rotació (eliminació de tensions i vibracions parasitàries en el sistema).

A tall de crítica, la falta de coneixement sobre les lleis de semblança que permetrien extrapolar els resultats obtinguts d'autogirs tripulats al dissenyat en aquest document, ha fet impossible determinar el grau d'importància de la velocitat induïda en el funcionament del rotor. En reduir tan dràsticament les dimensions de l'aparell (d'escala tripulada a escala RC), la formulació per al càlcul d'aquesta velocitat, retorna valors desorbitats i inacceptables. Tot just en els instants en què l'estudi assolia nivells interessants, s'ha hagut de truncar per poder-se emmarcar dins la planificació temporal del TFG. Un altre punt que quedà limitat per la disponibilitat temporal i recursos disponibles fou el discerniment entre la relació existent entre l'acabat superficial de les pales (o perfils alars) amb la seva facultat sustentadora. De fet, existeixen estudis que apunten en aquesta direcció, més enllà de l'aproximació mitjançant la teoria de Bernoulli, estableixen la sustentació com el resultat de diversos fenòmens físics en els quals la tardança del desprendiment de la capa límit en l'extradós i el canvi de velocitat de l'aire en ser pertorbat pel perfil, són tan importants com la diferència de pressions (consideració clàssica). Així, tot i quedar fora de l'abast del treball, es planteja un sistema d'assaig per corroborar la influència de l'acabat superficial de les pales en la sustentació. De fet, per a la correcta realització de les pales mitjançant eines de prototipatge ràpid (o eines de mecanitzat) esdevé vital establir les bases de la relació existent exposada per tal d'obtenir èxits en el disseny d'aeronaus. El sistema d'assaig implementat es descriu mitjançant les dues imatges ulteriors:



En les imatges, es pot apreciar el muntatge realitzat (de manera senzilla) que permet a la pala proveta (en vermell) pujar i baixar sense excessiu fregament gràcies a un sistema de rodes i rodaments en els laterals de l'enginy mostrat. El problema però rau en la no disponibilitat d'eines capaces d'insuflar un feix d'aire prou ràpid i dirigit per extreure'n conclusions. Tot i la realització d'algunes experiències senzilles, no s'ha sigut capaç d'extreure resultats concloents, part per la disponibilitat de material necessari i majoritàriament pel temps disponible, donat que per realitzar l'experiment en condicions caldria disposar de multitud de perfils amb varietat d'acabats superficials, el que es tradueix en una quantitat important de temps del que no es disposa. Tanmateix, la temàtica, més enllà de la redacció del present projecte es pretén dur a terme a tall personal per part del redactor.

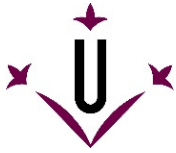
Per altra banda, i tenint present les limitacions temporals i productives expressades, el disseny proposat se centra en els perfils alars més utilitzats en autogirs, sempre de secció i angle de pas constant. Aquest fet des de bon principi s'intueix que limita les capacitats del mecanisme, i es plasma (encara que sigui a vista d'ocell) quan es comparen els resultats obtinguts amb i sense angle de pas variable de la pala. Resulta trivial deduir llavors que el tipus de pala implementada en el mecanisme no és ni de bon tros el més eficaç i es preveu que, els resultats obtinguts i de retruc el disseny del rotor, en resultaria notablement beneficiat d'unes pales més adequades a un autogir (pas amb progressió inversa a les dels helicòpters i corda variables).

No obstant això, la redacció del present projecte s'estableixen les bases per iniciar el disseny d'un rotor d'autogir (simulació de forces mitjançant CREO i predicció del moviment de les pales mitjançant MATLAB), i per estar definit el present document com un avantprojecte, es considera suficient.

L'altra família principal de conclusions es deriven del disseny mecànic.

La utilització d'alumini com a material predominant ha proporcionat al disseny la lleugeresa i resistència estructural necessària, a la vegada que es reserva els polímers (poliacetat) mecanitzats per a les peces menys sol·licitades. Els requeriments expressats a l'inici del treball han sigut acomplerts amb escreix, descrivint així les especificacions finals del mecanisme.

Tot el disseny mecànic realitzat es basa en els paràmetres de velocitat de vol i rotació de les pales fruit de l'aproximació matemàtica d'un fenomen físic complex com és l'autorotació. Els resultats obtinguts per aquests dos paràmetres de funcionament del rotor, es preveu que siguin sobredimensionats (per comparativa amb altres autogirs RC comercialitzats), però s'ha acceptat aquest valor com a límit superior per tal d'abordar el dimensionament dels sòlids integrants del mecanisme i assegurar-ne la seva resistència en condicions límit.



Per falta de temps, el disseny mecànic projectat no respon a les expectatives inicials. Però gràcies a la simulació informàtica dels esforços ocasionats en els sòlids integrants, recolzat amb la comparativa amb altres models comercials de rotors d'autogir, s'ha corroborat la resistència del conjunt i se'n garanteix la seva cohesió i correcte funcionament. Per al dimensionament de l'eix de la caixa, no s'han considerat efectes de fatiga. Aquest fet és atribuïble a l'equilibri de les forces inercials (tres pales ben equilibrades en rotació). Però donat que, totes les conclusions extretes de l'estudi aerodinàmic emprades per a l'elaboració del disseny mecànic es recolzen en un seguit d'aproximacions i simplificacions (en principi no influents significativament), caldria preveure un desequilibri inercial de les pales (sigui degut al propi batiment i arrossegament o bé a defectes de fabricació) que és fàcil que provoqui la fallada de l'eix per fatiga abans que s'assoleixi el límit resistent del material.

*Avantprojecte de disseny de la
part mecànica del rotor de tres
pales articulats d'un autogir
d'aeromodelisme*

PLÀNOLS

Jaume Llaó Herrera

CODIRECTORS

Joan Roca Enrich, Xavier Terribas Sala

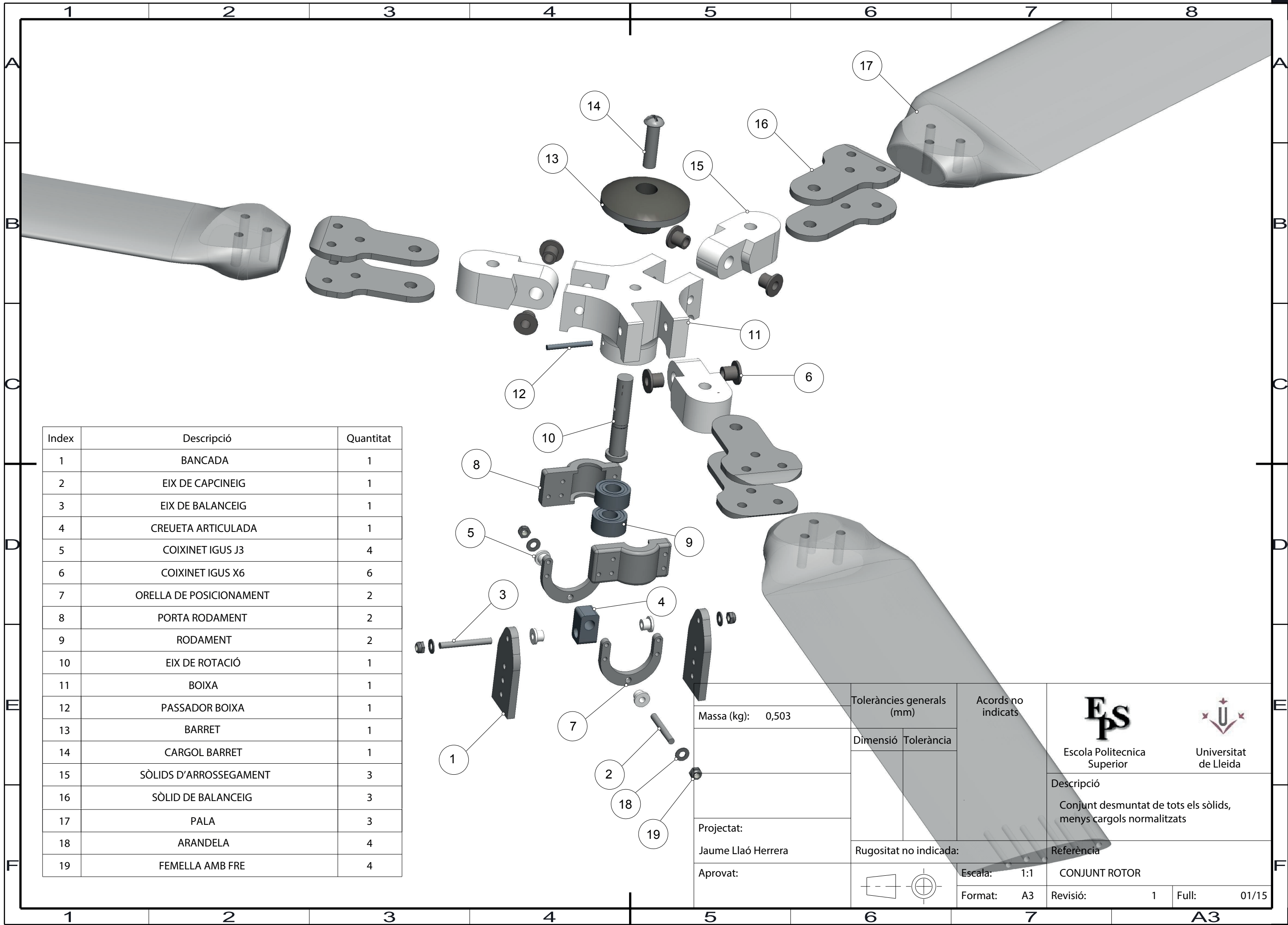
11 de Juliol del 2017

Grau en Enginyeria Mecànica



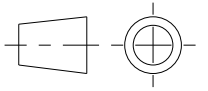


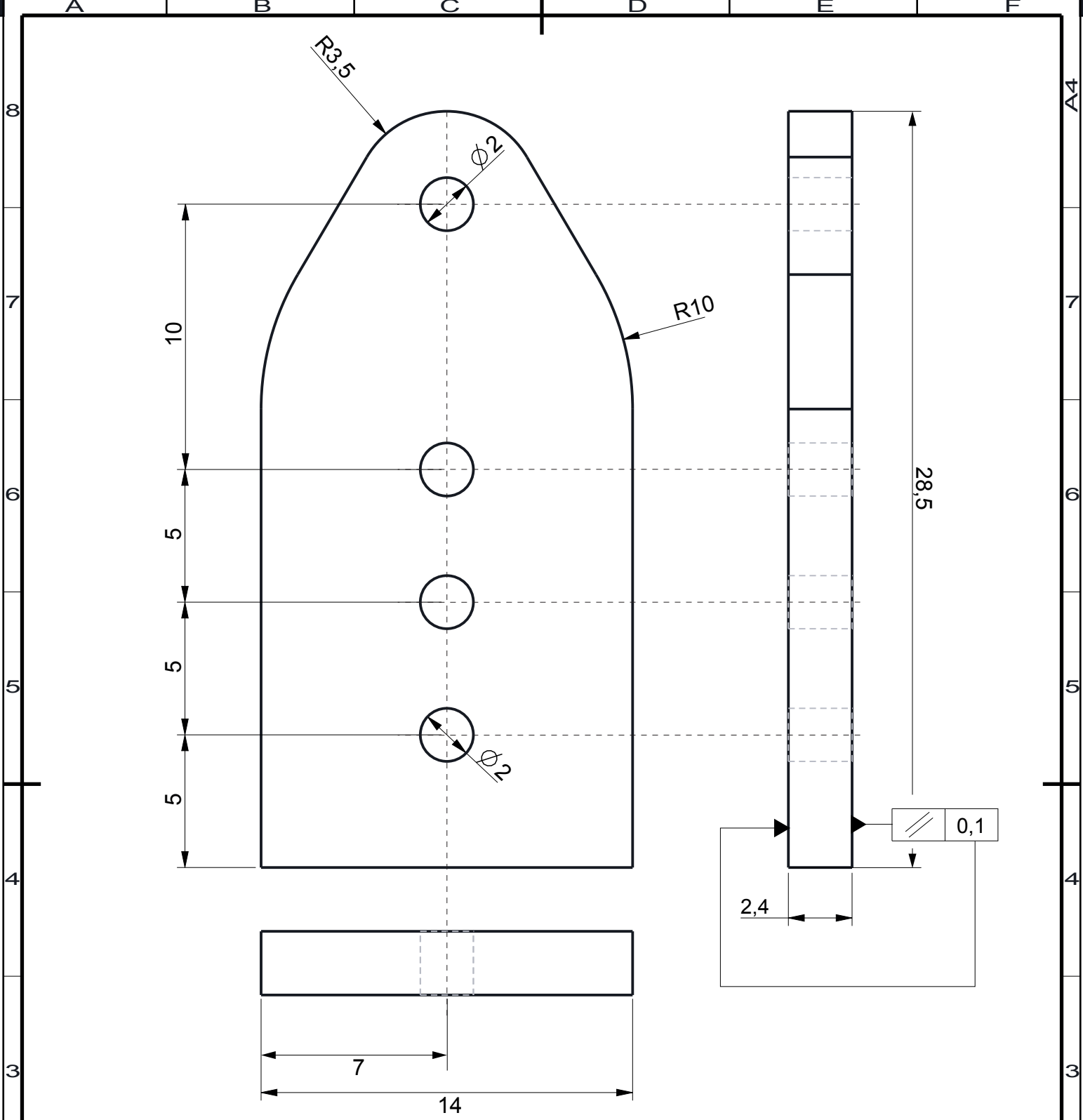
Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior





Index	Descripció	Quantitat
1	BANCADA	1
2	EIX DE CAPCINEIG	1
3	EIX DE BALANCEIG	1
4	CREUETA ARTICULADA	1
5	COIXINET IGUS J3	4
6	COIXINET IGUS X6	6
7	ORELLA DE POSICIONAMENT	2
8	PORTA RODAMENT	2
9	RODAMENT	2
10	EIX DE ROTACIÓ	1
11	BOIXA	1
12	PASSADOR BOIXA	1
13	BARRET	1
14	CARGOL BARRET	1
15	SÒLIDS D'ARROSSEGAMENT	3
16	SÒLID DE BALANCEIG	3
17	PALA	3
18	ARANDELA	4
19	FEMELLA AMB FRE	4

Massa (kg): 0,503	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats	 Escola Politecnica Superior  Universitat de Lleida
	Dimensió	Tolerància		
Projectat: Jaume Llaó Herrera	Rugositat no indicada:		Referència CONJUNT ROTOR	
Aprovat:		Escala: 1:1 Format: A3		Revisió: 1 Full: 01/15



Material: Alumini 2014
 Massa (g): 2,29
 Referència en plànol
 CONJUNT ROTOR: 1
 Projectat:
 Jaume Llaó Herrera
 Aprovat:

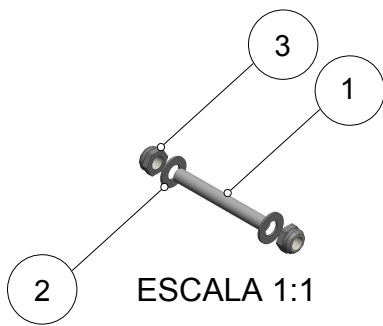
Toleràncies generals (mm)	
Dimensió	Tolerància
0 - 10	± 0,1
10 - 50	± 0,2
50 - 200	± 0,8
> 200	± 1

Rugositat no indicada:

Acords no indicats

Escala: 5:1
 Format: A4

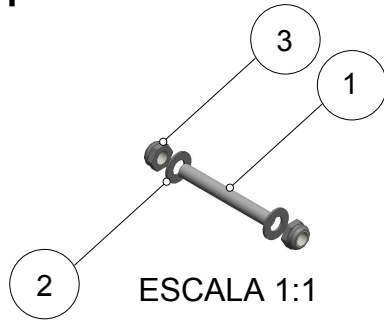
Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida
Unitats en el conjunt: 2	
Descripció Sòlid bancada	
Referència	
BANCADA	
Revisió: 1	Full: 02/15



ESCALA 1:1



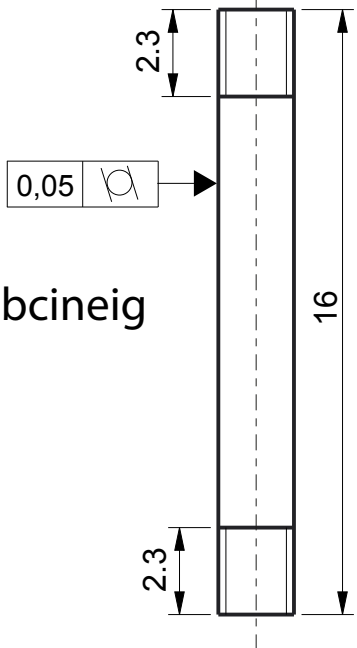
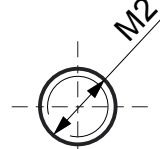
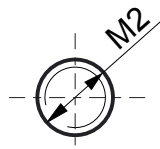
ESCALA 1:1



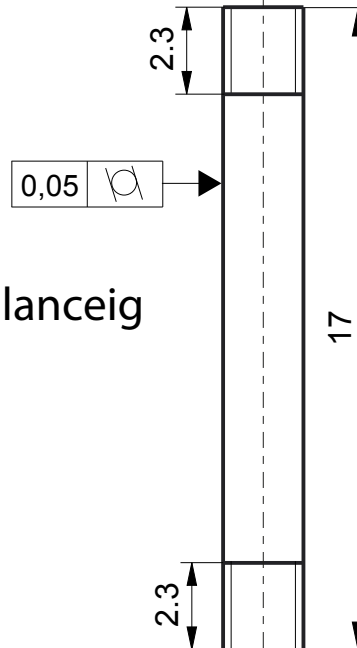
ESCALA 1:1



ESCALA 1:1



Eix de cabcineig



Eix de balanceig

Index	Descripció	Quantitat
1	Eix Cabcineig	1
2	Arandela	2
3	Femella amb fre	2

Index	Descripció	Quantitat
1	Eix Balanceig	1
2	Arandela	2
3	Femella amb fre	2

Material:	Alumini 2014
Massa (g):	2,288
Referència plànol	CONJUNT ROTOR: 2 i 3
Projectat:	Jaume Llaó Herrera
Aprovat:	

Toleràncies generals (mm)	
Dimensió	Tolerància
0 - 10	± 0,1
10 - 50	± 0,2
50 - 200	± 0,8
> 200	± 1

Rugositat no indicada:

Acords no indicats

Escala: 5:1

Format: A4

Escola Politecnica Superior

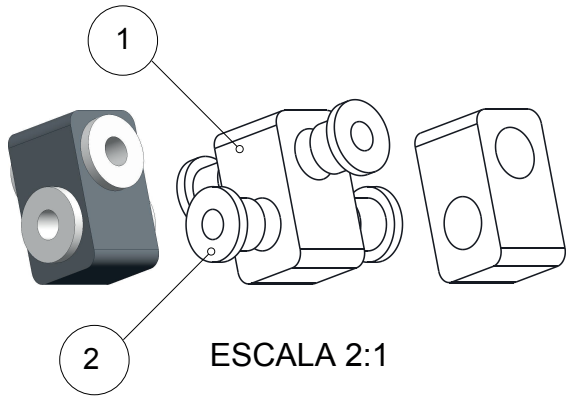
Universitat de Lleida

Unitats en el conjunt: 1

Descripció: Eixos de capcineig i balanceig

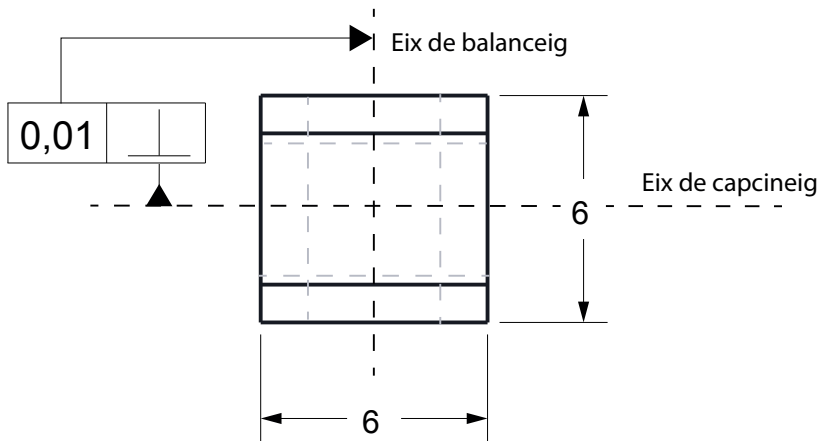
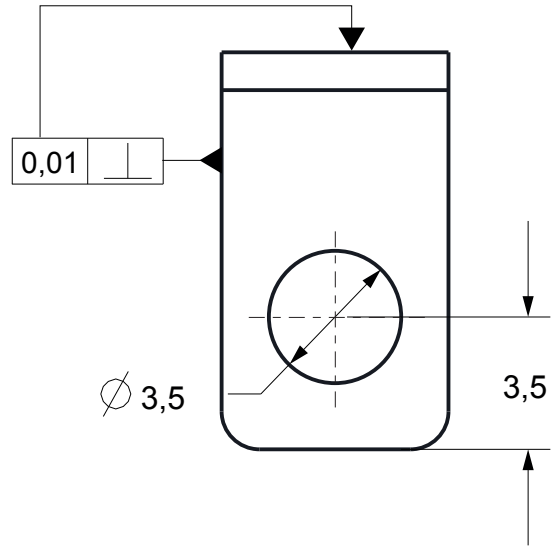
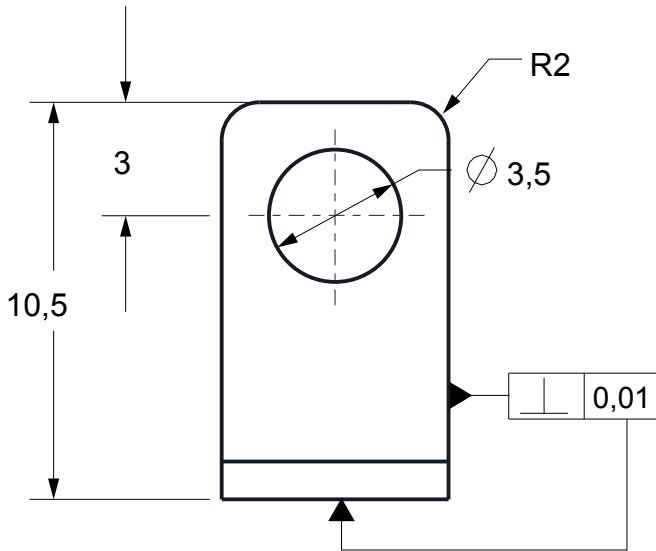
Referència: EIX DE CAPCINEIG, EIX DE BALANCEIG

Revisió:	1	Full:	03/15
----------	---	-------	-------

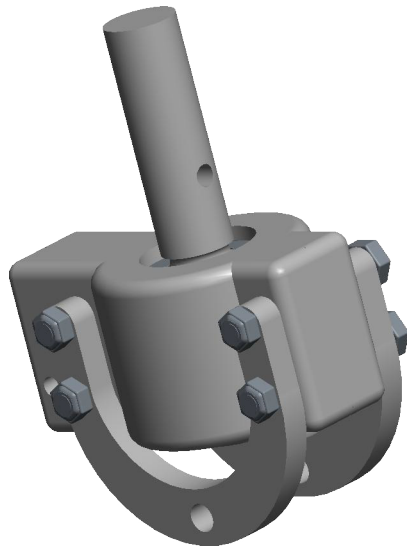


ESCALA 2:1

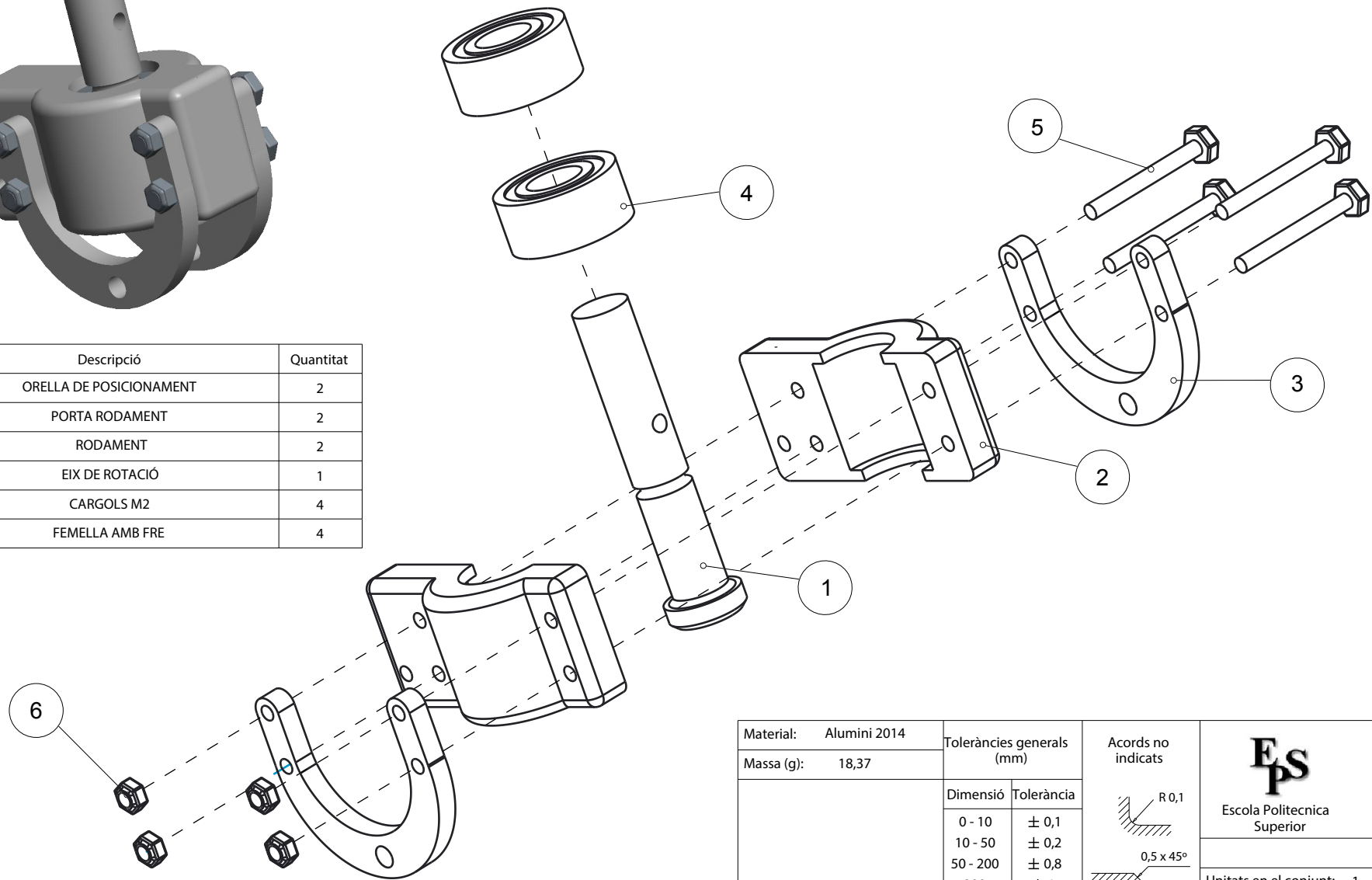
Index	Descripció	Quantitat
1	CREUETA	1
2	COIXINET IGUS IGLIDUR J3 FM-0203505-05	4


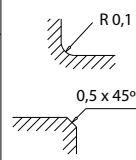


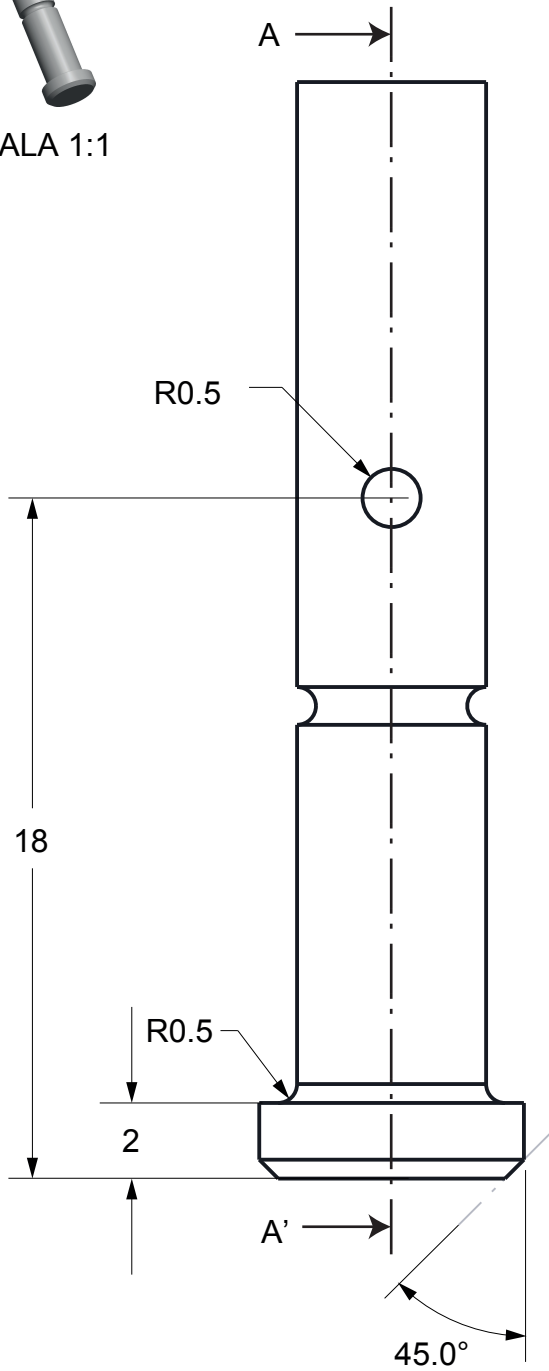
Material: Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats	
Massa (g): 0,71	Dimensió	Tolerància		
Referència en plànol CONJUNT ROTOR: 4	0 - 10	± 0,1		Unitats en el conjunt: 1
	10 - 50	± 0,2		
	50 - 200	± 0,8		Descripció Creueta articulada, allotjament dels eixos de capcineig i balanceig
	> 200	± 1		
Projectat: Jaume Llaó Herrera	Rugositat no indicada:			Referència CREUETA
Aprovat:				Escala: 5:1 Format: A4 Revisió: 1 Full: 04/15



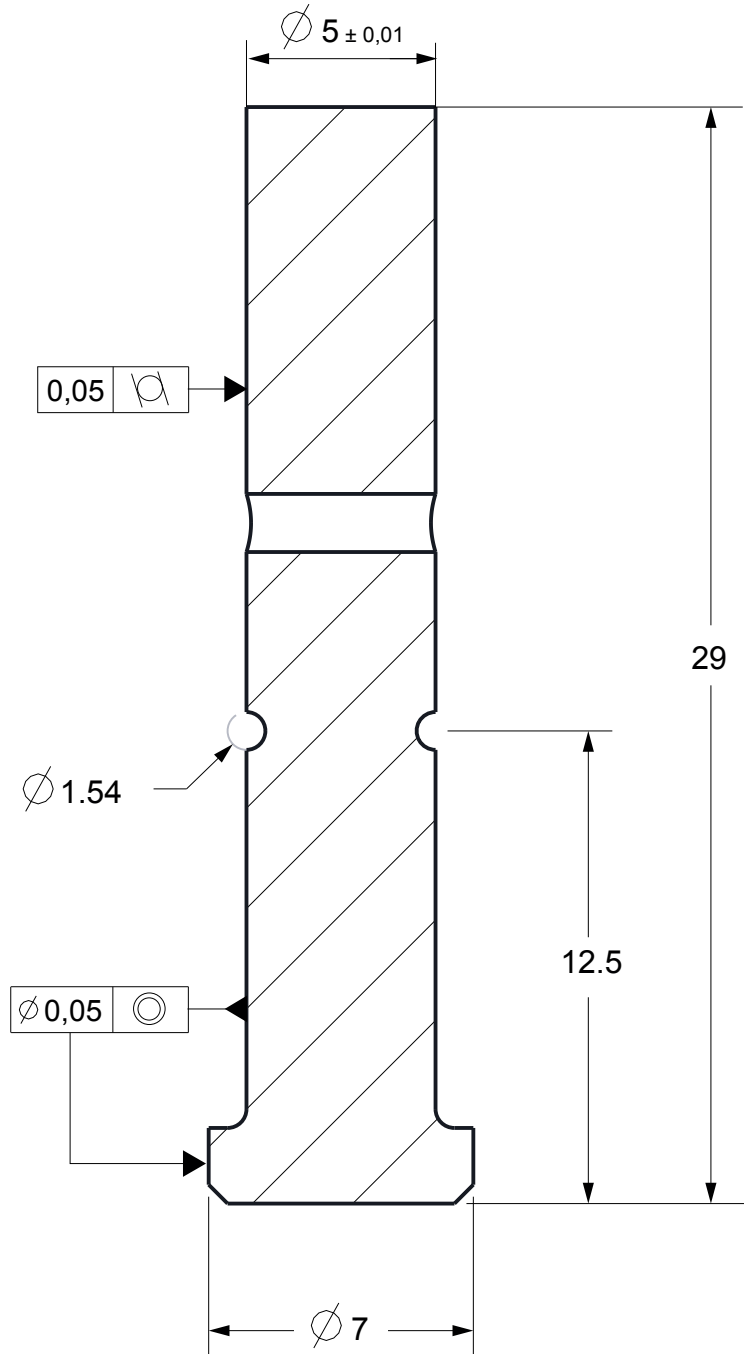
Index	Descripció	Quantitat
1	ORELLA DE POSICIONAMENT	2
2	PORTA RODAMENT	2
3	RODAMENT	2
4	EIX DE ROTACIÓ	1
5	CARGOLS M2	4
6	FEMELLA AMB FRE	4



Material:	Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)	Acords no indicats	
Massa (g):	18,37			
Projectat: Jaume Llaó Herrera	Aprovat:	Dimensió	Tolerància	
		0 - 10	± 0,1	
		10 - 50	± 0,2	
		50 - 200	± 0,8	
		> 200	± 1	
		Rugositat no indicada:		Unitats en el conjunt: 1
				Descripció Subconjunt de balanceig
				Referència
				SUBCONJUNT 1
		Escola:	2:1	Revisió: 1
		Format:	A4	Full: 05/15

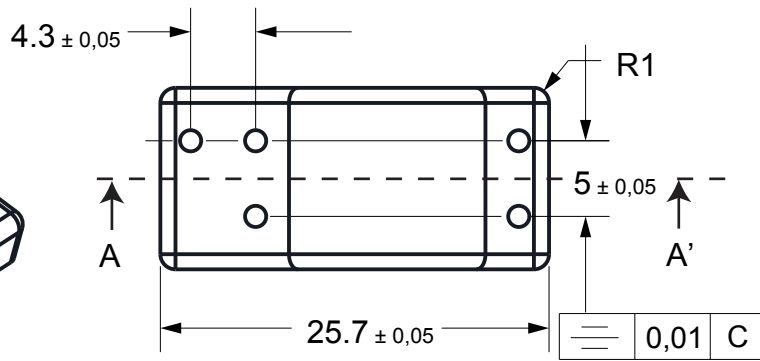
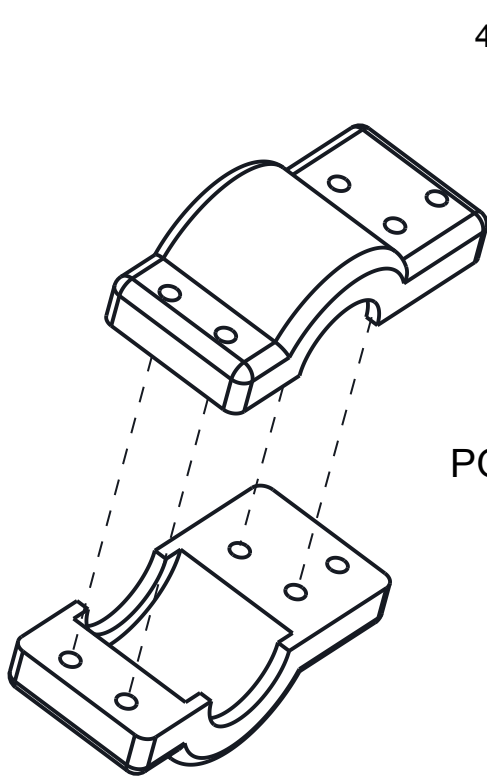


SECCIÓ A-A'

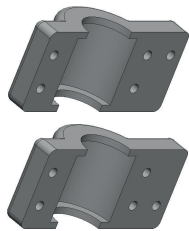
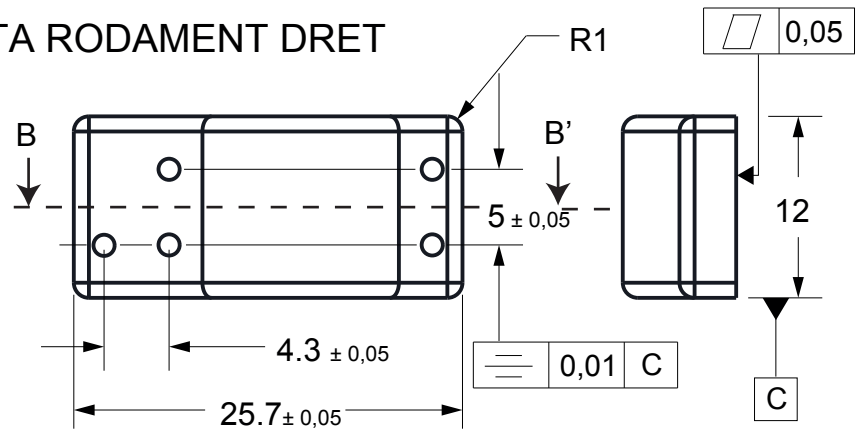


Material:	Acer S355	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats			
Massa (g):	4,62	Dimensió	Tolerància				
Referència en plànol		0 - 10	± 0,1	 	Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida	
CONJUNT ROTOR:	10	10 - 50	± 0,2		Unitats en el conjunt:	1	
SUBCONJUNT 1:	1	50 - 200	± 0,8		Descripció	Eix de rotació de l'enginy	
SUBCONJUNT 2:	1	> 200	± 1		Referència	Eix del rotor	
Projectat:		Rugositat no indicada:			Revisió:	1	
Jaume Llaó Herrera				Format:	A4	Full:	06/15
Aprovat:				Escala:	5:1		

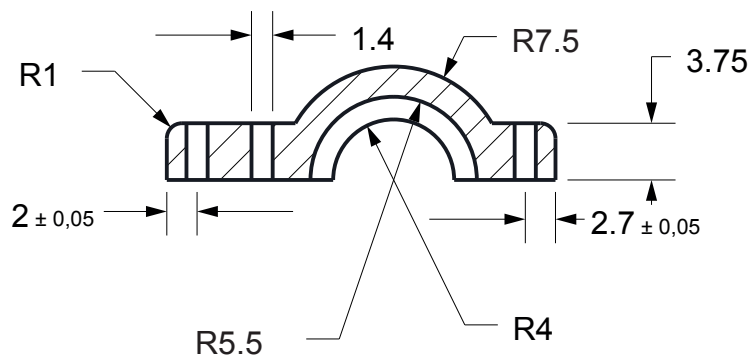
PORTA RODAMENT ESQUERRE



PORTA RODAMENT DRET

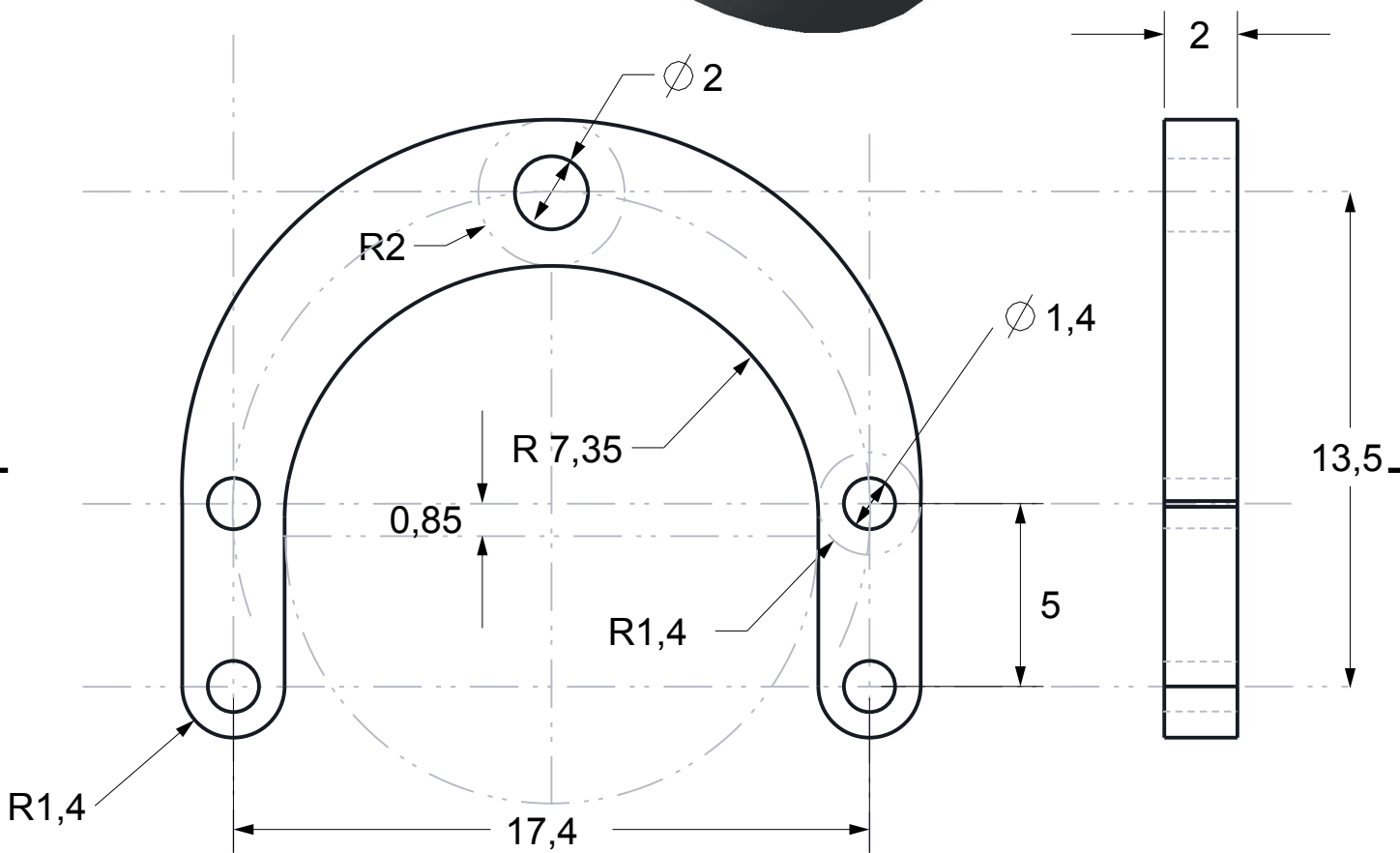


ESCALA 1:1

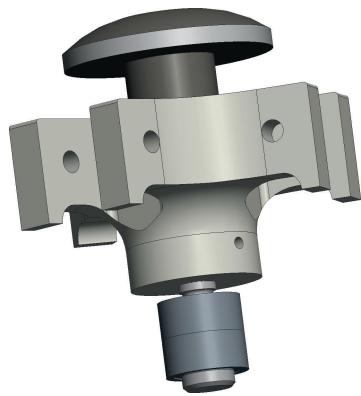


SECCIÓ AA' i BB'

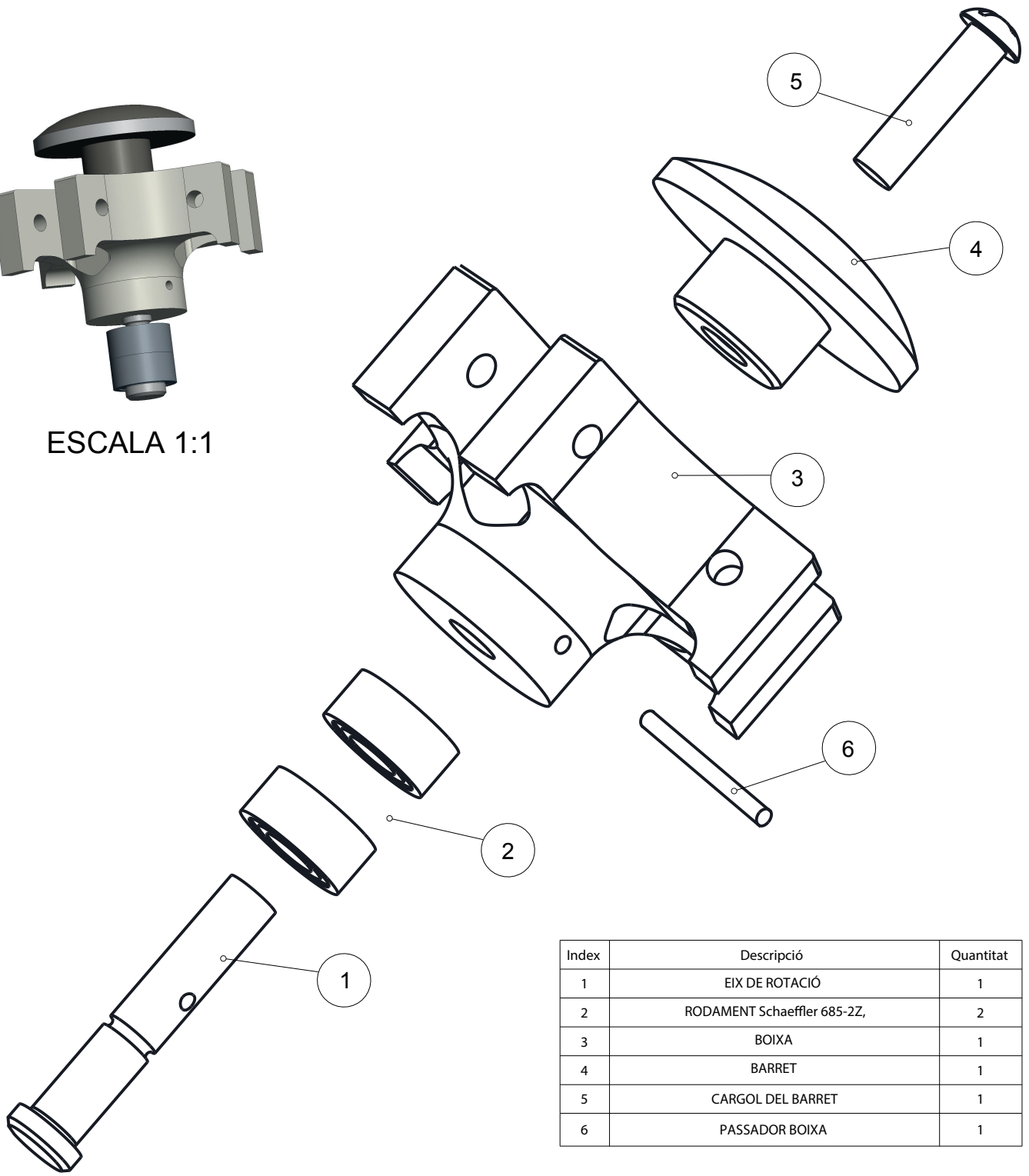
Material: Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats		
Massa (g): 2 x 2,78	Dimensió	Tolerància			
Referència en plànol CONJUNT ROTOR: 8 SUBCONJUNT 1: 2	0 - 10	± 0,1		Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida
Projectat:	10 - 50	± 0,2		Unitats en el conjunt: 1 (DRET) + 1 (ESQ)	Descripció Parella de sòlids que engaven els dos rodaments
Jaume Llaó Herrera	50 - 200	± 0,8	Referència	PORTA-RODAMENT	
Aprovat:	> 200	± 1	Format: A4	Revisió: 1	Full: 07/15



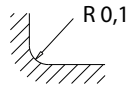
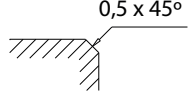


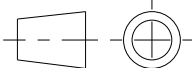
Material:	Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats					
Massa (g):	0,67	Dimensió	Tolerància						
Referència en plànol		0 - 10	± 0,1		Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida			
CONJUNT ROTOR:	7	10 - 50	± 0,2		Unitats en el conjunt:	2			
SUBCONJUNT 1:	3	50 - 200	± 0,8		Descripció	Orella de posicionament			
		> 200	± 1		Referència	Orella porta-rodament			
Projectat:		Rugositat no indicada:		ESCALA:	5:1	Revisió:	1	Full:	8/15
Jaume Llaó Herrera				Format:	A4				
Aprovat:									

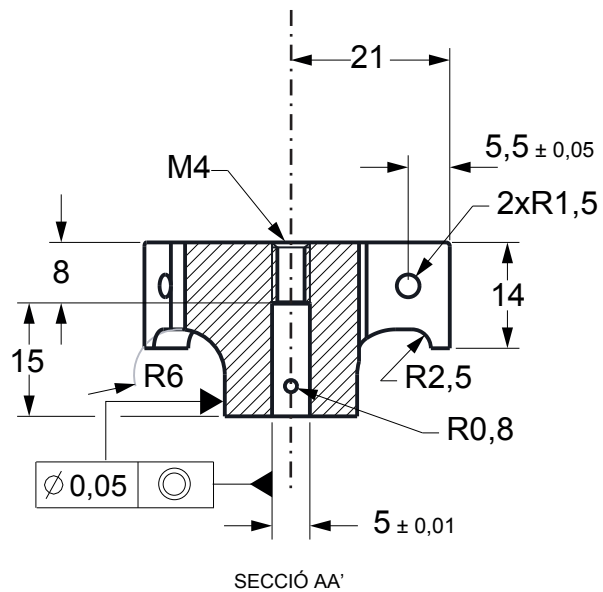
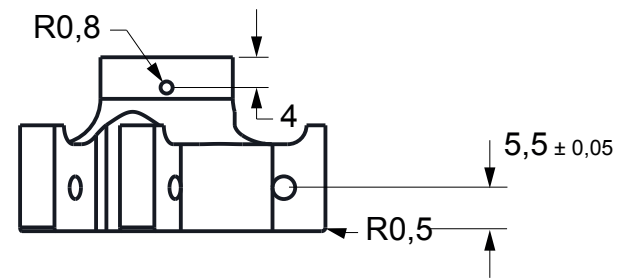
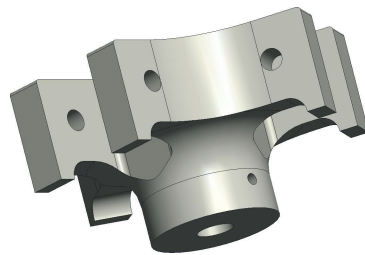
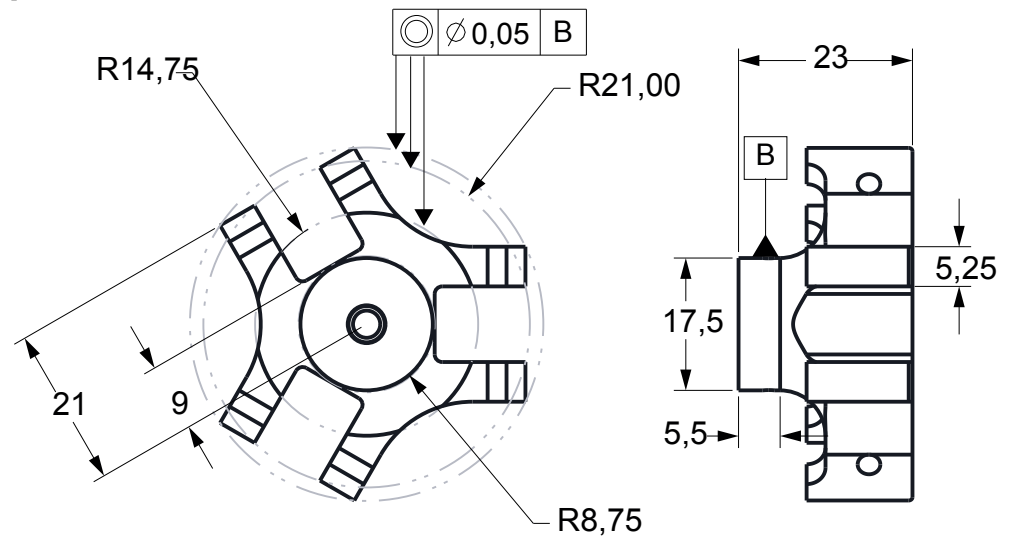
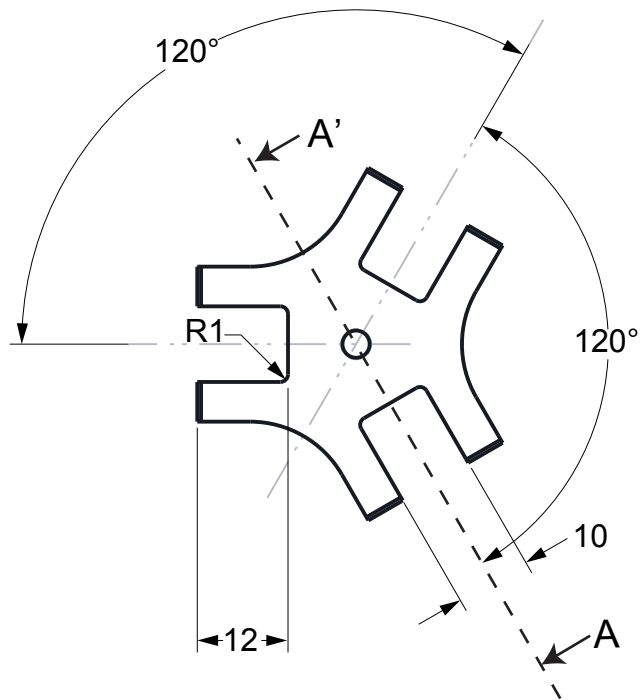




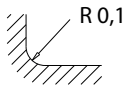
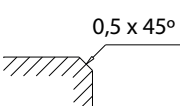

ESCALA 1:1

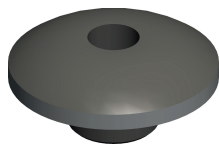


Index	Descripció	Quantitat
1	EIX DE ROTACIÓ	1
2	RODAMENT Schaeffler 685-2Z,	2
3	BOIXA	1
4	BARRET	1
5	CARGOL DEL BARRET	1
6	PASSADOR BOIXA	1

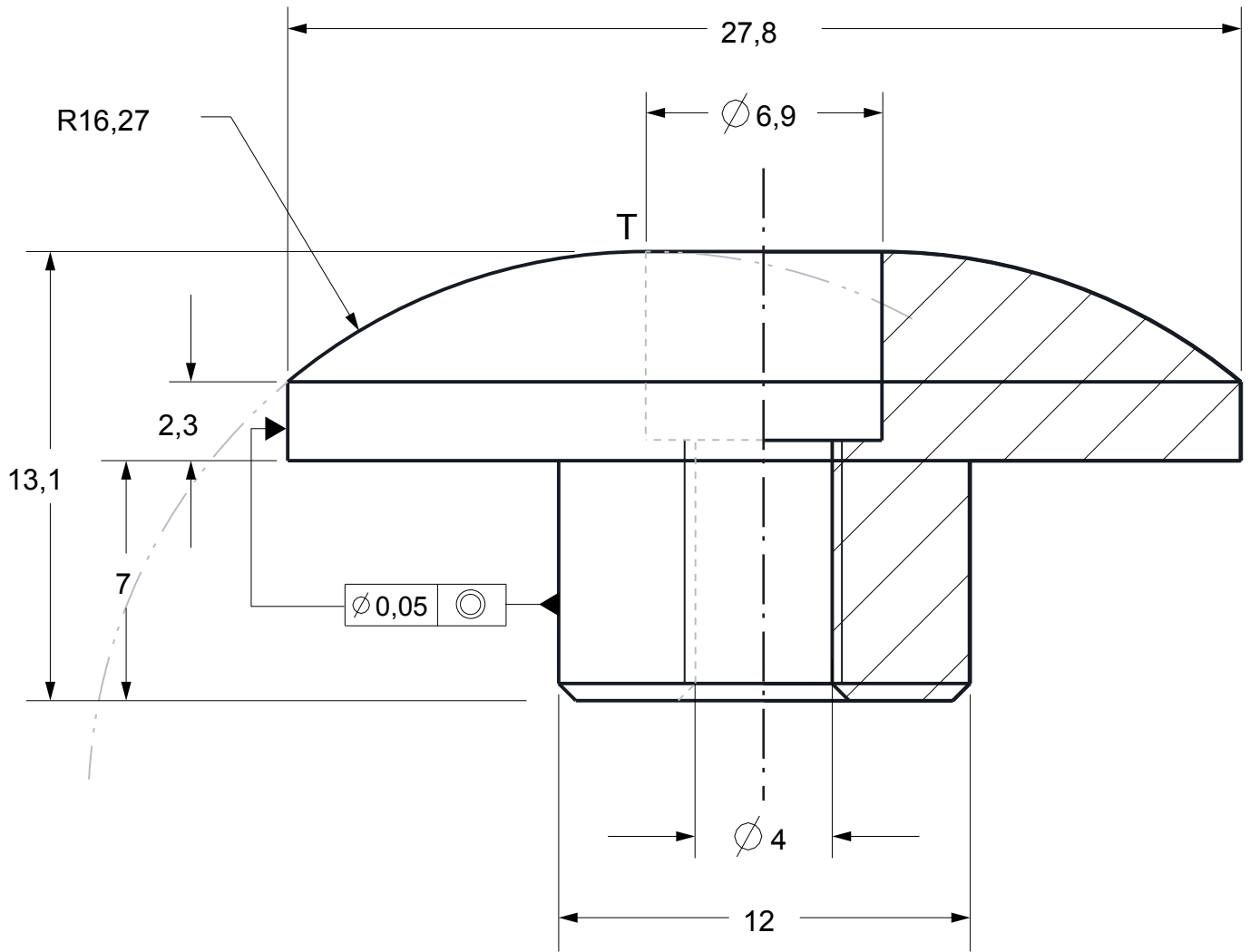
Material: Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats  	 Escola Politecnica Superior	 Universitat de Lleida
Massa (g): 18,37	Dimensió	Tolerància			
	0 - 10	± 0,1			
	10 - 50	± 0,2			
	50 - 200	± 0,8			
	> 200	± 1			
Projectat: Jaume Llaó Herrera	Rugositat no indicada:			Unitats en el conjunt: 1	Descripció Subconjunt de rotació
Aprovat:			Escala: 2:1 Format: A4	Referència SUBCONJUNT 2	
				Revisió: 1	Full: 9/15



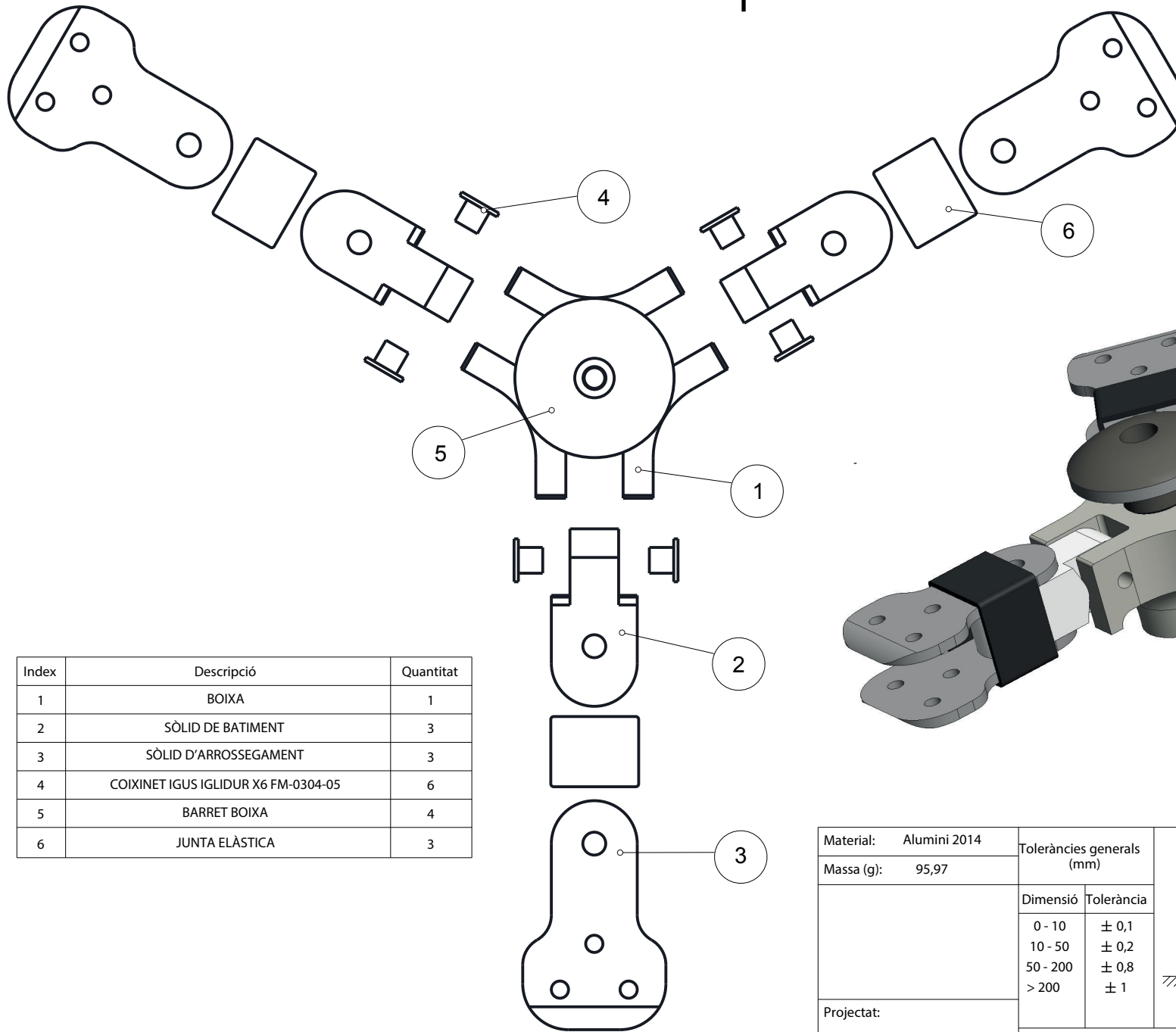
Material:	Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)	Acords no indicats	 	
Massa (g):	32,73				
Referència en plànol	CONJUNT ROTOR: 11 SUBCONJUNT 2: 3	Dimensió	Tolerància	 	Unitats en el conjunt: 1
Projectat:	Jaume Llaó Herrera	0 - 10	$\pm 0,1$		Descripció
Aprovat:		10 - 50	$\pm 0,2$	Rugositat no indicada:	Referència
		50 - 200	$\pm 0,8$		BOIXA
		> 200	± 1		Escala: 1:1
				Format: A4	Full: 10/15




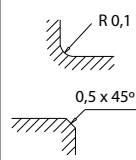
ESCALA 1:1

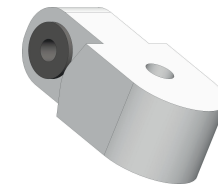
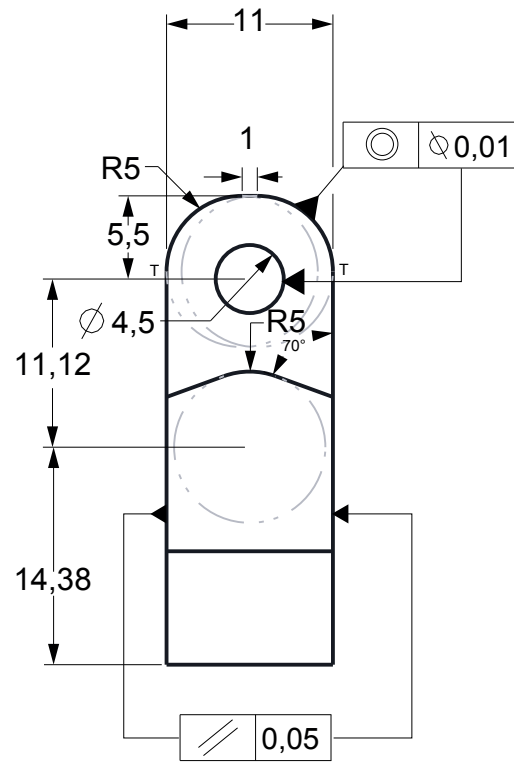
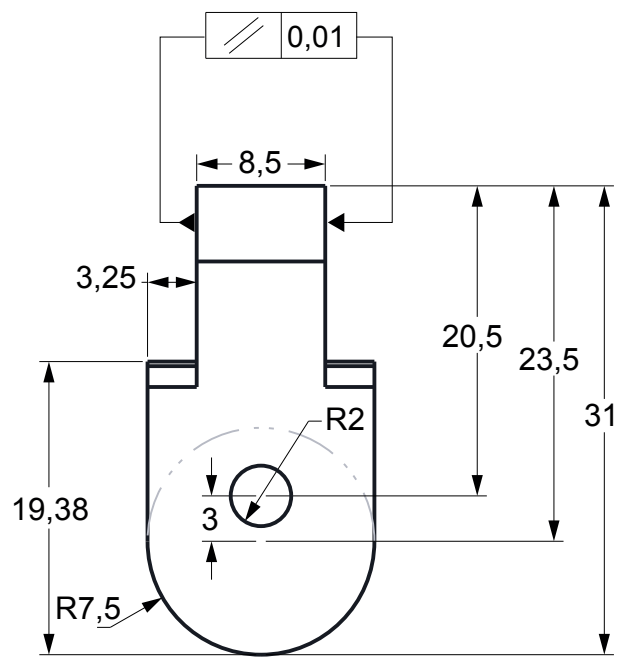


Material: Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats		
Massa (g): 9,19	Dimensió	Tolerància			
Referència en plànol			 	Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida
CONJUNT ROTOR: 13	0 - 10	± 0,1		Unitats en el conjunt: 1	Descripció Barret aerodinamic de la part superior de la caixa
SUBCONJUNT2: 4	10 - 50	± 0,2		Referència	
SUBCONJUNT3: 5	50 - 200	± 0,8		BARRET	
Projectat:	Rugositat no indicada:		Format: A4	Revisió: 1	Full: 11/15
Jaume Llaó Herrera			Format: A4	Revisió: 1	Full: 11/15
Aprovat:					



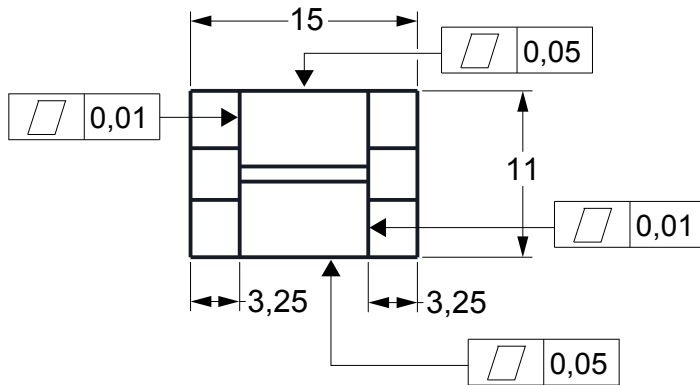
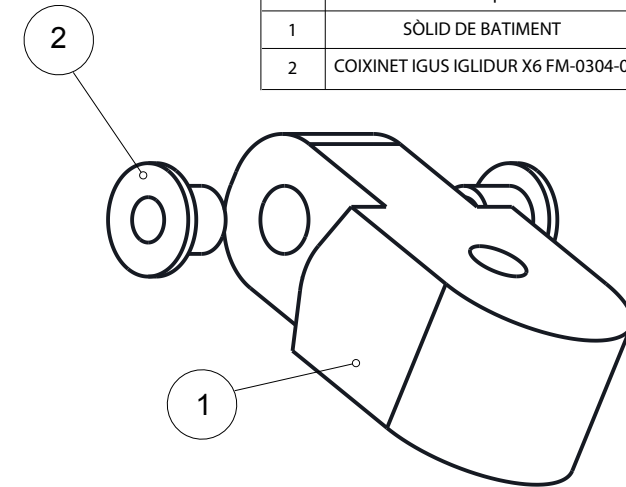
Index	Descripció	Quantitat
1	BOIXA	1
2	SÒLID DE BATIMENT	3
3	SÒLID D'ARROSSEGAMENT	3
4	COIXINET IGUS IGLIDUR X6 FM-0304-05	6
5	BARRET BOIXA	4
6	JUNTA ELÀSTICA	3

Material:	Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)	Acords no indicats	
Massa (g):	95,97			
Projectat: Jaume Llaó Herrera	Aprovat:	Dimensió	Tolerància	
		0 - 10	± 0,1	
		10 - 50	± 0,2	
		50 - 200	± 0,8	
Rugositat no indicada:		Escala: 1:1		Unitats en el conjunt: 1
		Format: A4		Descripció Subconjunt pla de rotació
Referència				
SUBCONJUNT 2				
Revisió: 1				Full: 12/15

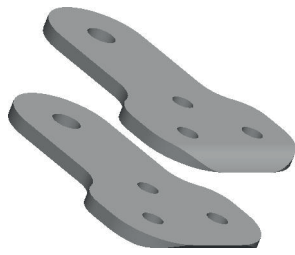


ESCALA 1:1

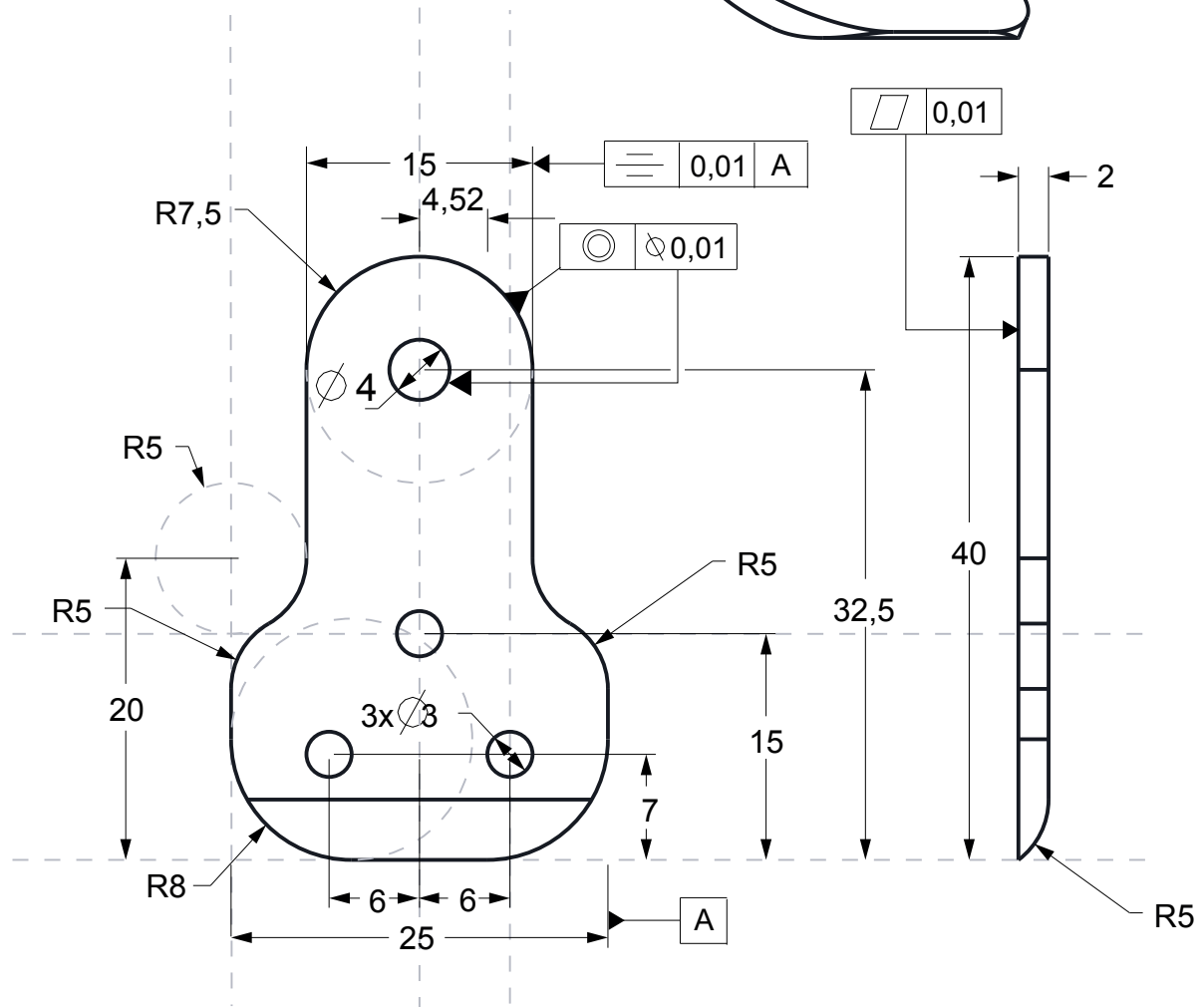
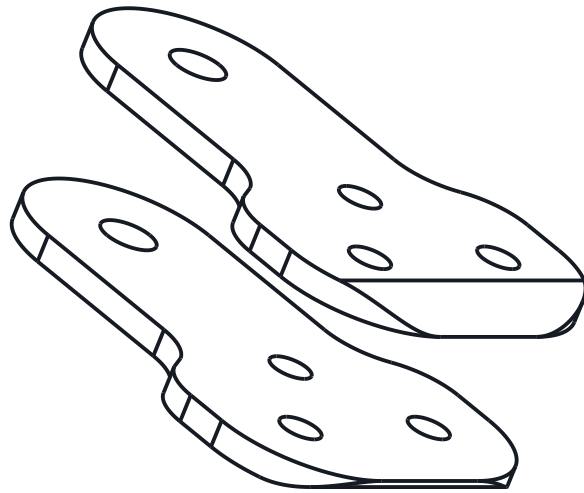
Index	Descripció	Quantitat
1	SÒLID DE BATIMENT	3
2	COIXINET IGUS IGLIDUR X6 FM-0304-05	6



Material:	Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)	Acords no indicats												
Massa (g):	10,07														
Referència en plànol	CONJUNT ROTOR: 10 SUBCONJUNT 1: 1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dimensió</th> <th>Tolerància</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 - 10</td> <td>± 0,1</td> </tr> <tr> <td>10 - 50</td> <td>± 0,2</td> </tr> <tr> <td>50 - 200</td> <td>± 0,8</td> </tr> <tr> <td>> 200</td> <td>± 1</td> </tr> </tbody> </table>	Dimensió	Tolerància	0 - 10	± 0,1	10 - 50	± 0,2	50 - 200	± 0,8	> 200	± 1	 	Escola Politecnica Superior	Unitats en el conjunt: 3
Dimensió	Tolerància														
0 - 10	± 0,1														
10 - 50	± 0,2														
50 - 200	± 0,8														
> 200	± 1														
Projectat:		Rugositat no indicada:		Descripció Sòlid que permet el batiment de les pales respecte el pla de rotació											
Aprovat:					Referència SÒLID DE BATIMENT										
				Escala: 2:1											
				Format: A4	Revisió: 1 Full: 13/15										

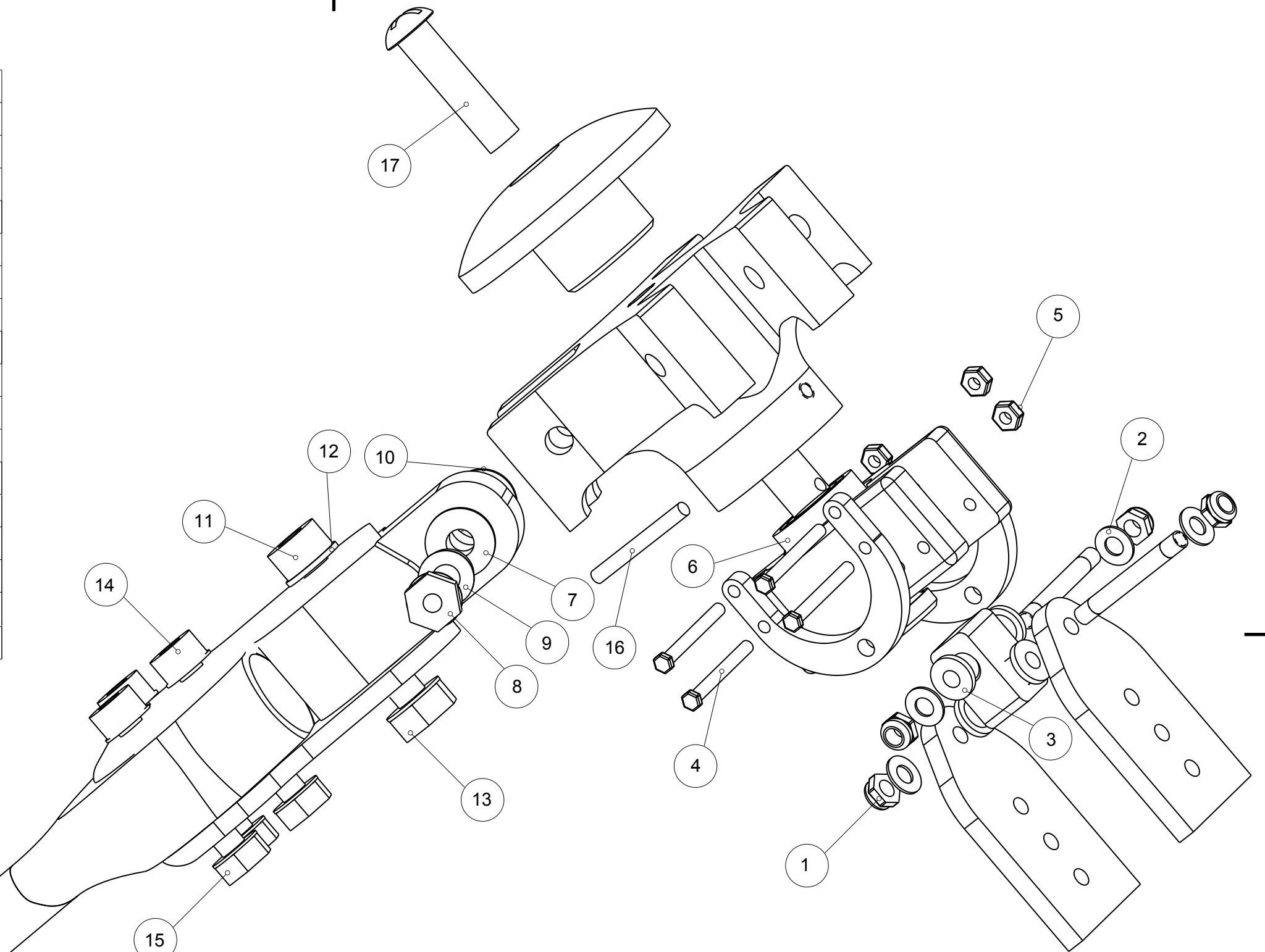




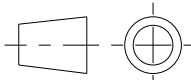

ESCALA 1:1



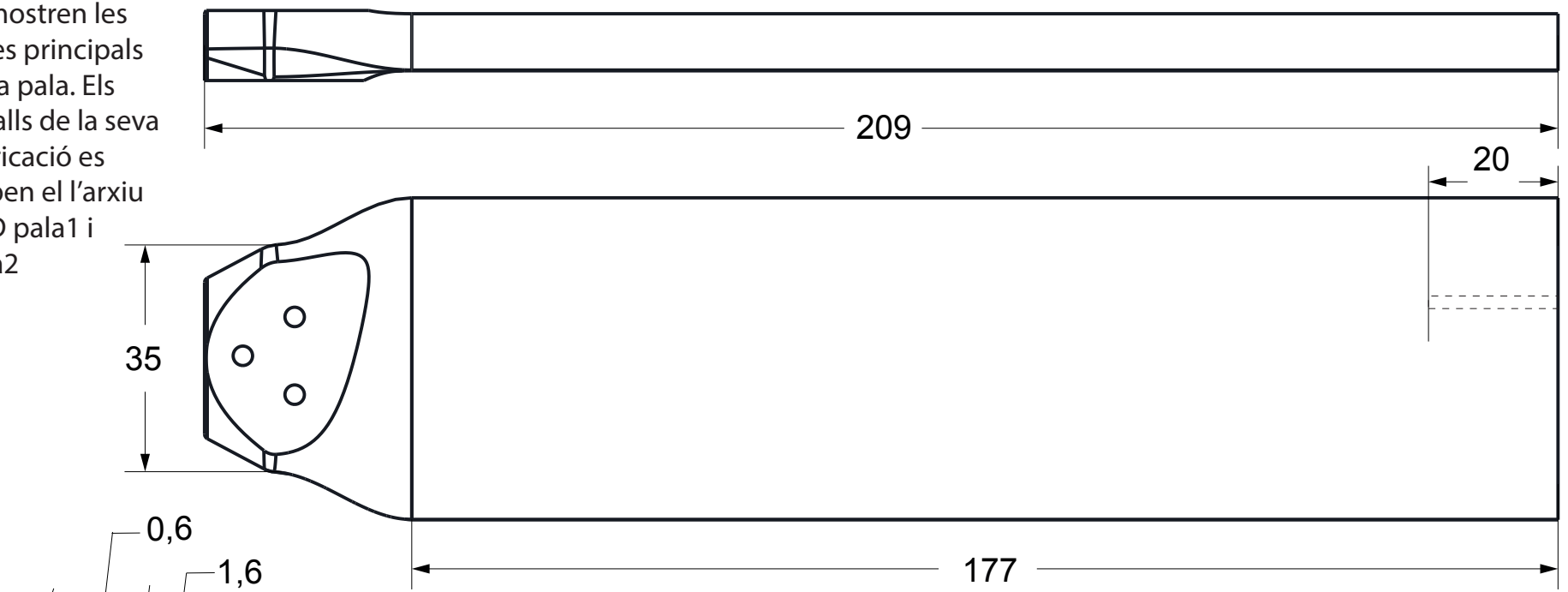
Material: Alumini 2014	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats		
Massa (g): 3,64	Dimensió	Tolerància			
Referència en plànol CONJUNT ROTOR: 16 SUBCONJUNT3: 3	0 - 10	± 0,1	 	Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida
Projectat:	10 - 50	± 0,2		Unitats en el conjunt: 3	
Jaume Llaó Herrera	50 - 200	± 0,8		Descripció Sòlid d'arrossegament	
Aprovat:	> 200	± 1		Referència	
	Rugositat no indicada:		Escala: 2:1	SÒLID D'ARROSEGAMENT	
			Format: A4	Revisió: 1	Full: 14/15

Index	Descripció	Quantitat
1	Femella amb fre M2 DIN985	4
2	Arandela M2 DIN6798 D2,2	4
3	COIXINET IGUS Iglidur J3 FM-0203505-05	4
4	Cargol M1,4x13 DIN933M	4
5	Femella M1,4 DIN934	4
6	RODAMENT Rígid de boles schaeffer 685-2Z	2
7	COIXINET IGUS Iglidur X6 FM-0304-05	6
8	Cargol M3x25 DIN912	3
9	Arandela M3 DIN6798 D3,2	6
10	Femella amb fre M3 DIN985	6
11	Cargol M4x16 DIN912	3
12	Arandela M4 DIN433 D4,3	6
13	Femella amb fre M4 DIN985	1
14	Cargol M3x17 ISO7380	9
15	Femella M3 DIN985	3
16	Varilla roscada M1,6x18	1
17	Cargol M4x10 ISO7380	1

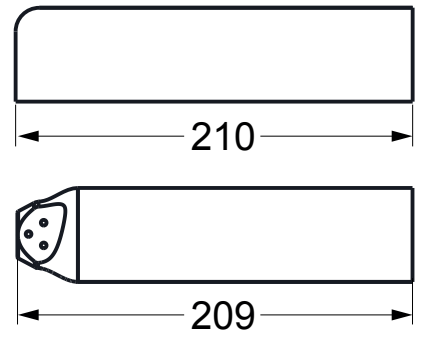
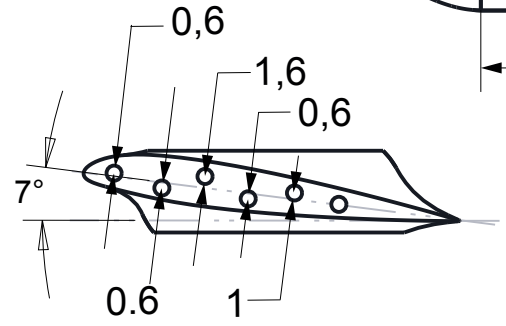


Massa (kg): 0,503	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats	 
	Dimensió	Tolerància		
Projectat:	Rugositat no indicada:		Escaleta: 1:1	Referència
Jaume Llaó Herrera			Format: A3	PLANOL MUNTATGE
Aprovat:	 		Revisió: 1	Full: 15/15

* En aquest plànol es mostren les cotes principals de la pala. Els detalls de la seva fabricació es troben en l'arxiu CAD pala1 i pala2



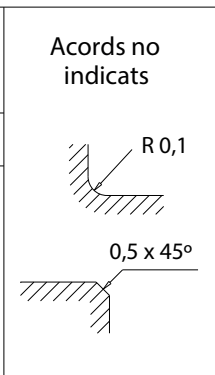
PERFIL NORMALITZAT: NACA 23012 (corda 50mm)



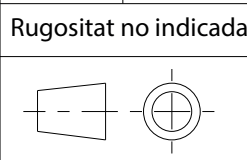
ESCALA 1:4

Material:	ABS
Massa (g):	100
Referència en plànol CONJUNT ROTOR: 17	
Projectat:	
Jaume Llaó Herrera	
Aprovat:	

Toleràncies generals (mm)	
Dimensió	Tolerància
0 - 10	± 0,1
10 - 50	± 0,2
50 - 200	± 0,8
> 200	± 1



Escola Politecnica Superior	Universitat de Lleida
Unitats en el conjunt: 3	
Descripció Pala de l rotor.	
Referència	
PALA	
Revisió:	1
Full:	15/15



Escala:	1:1
Format:	A4

*Avantprojecte de disseny de la
part mecànica del rotor de tres
pales articulad d'un autogir
d'aeromodelisme*

PLEC DE CONDICIONS

Jaume Llaó Herrera

CODIRECTORS:

Joan Roca Enrich, Xavier Terribas Sala

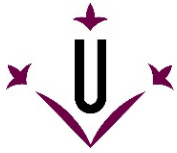
Juliol 2017

Grau en Enginyeria Mecànica



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior





1. Especificacions dels components del rotor

Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: BANCADA	Full 1 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: Unir l'aparell rotor dissenyat amb l'autogir. La unió es realitza per mitjà dels tres orificis de dos mil·límetres de diàmetre, existents en cada un dels sòlids bancada. La fixació del rotor a la columna de l'autogir, es soluciona amb dos sòlids bancada i 6 cargols de M2.

A la vegada, la parella de sòlids bancada defineix l'eix de capcineig de l'enginy, mitjançant un passador que travessa l'orifici (de diàmetre 2 mil·límetres) de la part superior de la parella de sòlids.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

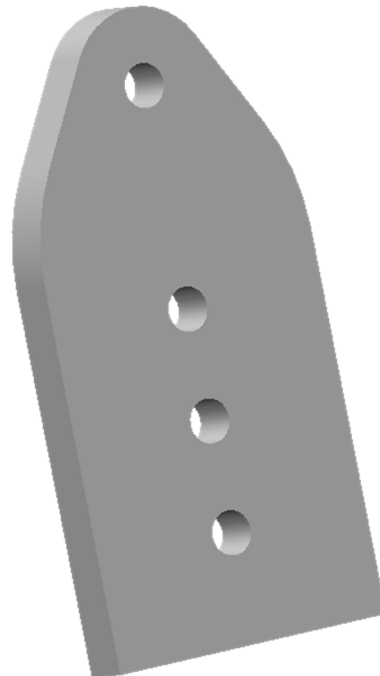
Dimensions principals: 28,5 x 14 x 2,4 mm

Pes estimat: 2,29 g

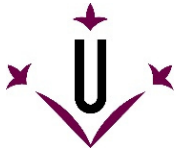
Esforç mínim requerit: 106,1 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 2

Representació:



La fabricació de la bancada es realitza mitjançant el fresat d'un bloc d'alumini de dimensions mínimes 29 x 14,5 x 3 mm. Posteriorment se'n practiquen, mitjançant un trepant de banc, els tres orificis que s'utilitzen per fixar el rotor a la columna de l'autogir, i el forat que allotja l'eix de capcineig.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: BULONS DE CAPCINEIG I BALANCEIG	Full 2 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: Els bulons de capcineig i balanceig es tracten de manera conjunta per la seva gran similitud. Aquest dos passadors de dimensions similars materialitzen els eixos homònims que possibiliten el posicionament del pla de rotació. Així, la caixa gira descrivint un pla que s'articula amb dos graus de llibertat respecte al cos de l'aeronau.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

Dimensions principals: L x Ø2 mm

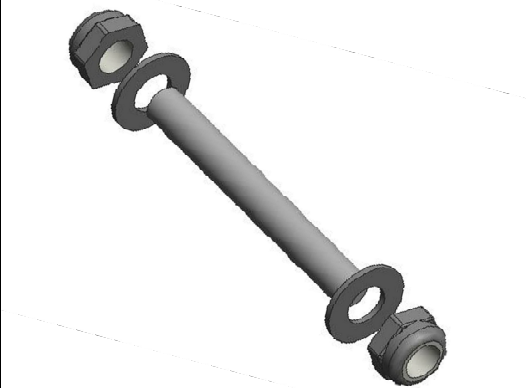
Pes estimat: 0,14 g

Esforç mínim requerit: 30 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 1 de capcineig i

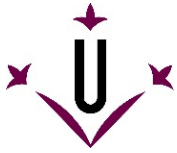
1 de balanceig

Representació:



EIX	L
Capcineig	16 mm
Balanceig	17 mm

La fabricació dels bulons de capcineig i balanceig es realitza mitjançant el cilindrada de dos peces d'alumini, de dimensions mínimes L+5% x 2,5 mm, en el torn. Posteriorment es realitza el roscat d'ambos extrems de 2,3 mil·límetres.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulat d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: CREUETA	Full 3 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: La funció de la creueta consisteix en allotjar els dos eixos de posicionament del pla de rotació (eix de capcineig i de balanceig). Mitjançant aquest muntatge, s'aconsegueixen dos graus de llibertat del pla del rotor al voltant de dos eixos tant propers com la resistència mecànica del material ho permet.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

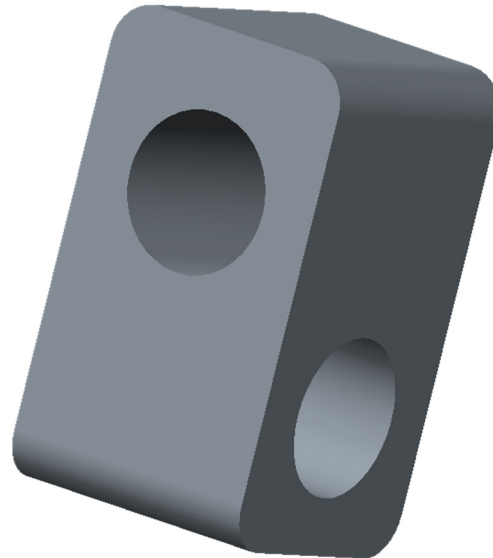
Dimensions principals: 10,5 x 6 x 6 mm

Pes estimat: 0,71 g

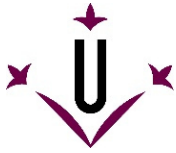
Esforç mínim requerit: 142,3 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 1

Representació:



La fabricació de la creueta es realitza mitjançant el fresat d'un bloc d'alumini de dimensions iguals o superiors a 11x6,5x6,5 mm. Posteriorment es realitzen els dos forats passants que allotgen els passadors de capcineig i de balanceig, els quals es vital que mantinguin la seva perpendicularitat amb una tolerància no superior a l'expressada en el plànol pertinent.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulat d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: EIX DEL ROTOR	Full 4 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: L'eix de rotació té com a finalitat la de transmetre el moviment de rotació provocat per les pales a la pista interior dels rodaments, procurant així un moviment suau i sense vibracions. De retruc, l'eix es el component que manté unides les parts del rotor gràcies al seu topall inferior i al passador que s'insereix en el forat passant de la seva part superior.

Dades tècniques:

Material: Acer S355

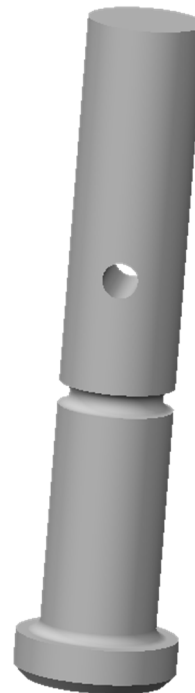
Dimensions principals: $\varnothing 7,5 \times 29,5$ mm

Pes estimat: 4,62 g

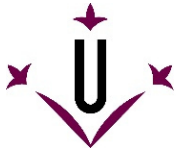
Esforç mínim requerit: 109,6 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 1

Representació:



L'eix es fabrica mitjançant el torn, partint d'un cilindre d'acer amb dimensions $\varnothing 8 \times 30$. Mitjançant cilindrats consecutius, per adequar els diàmetres de l'eix als estipulats. Posteriorment es realitza el ranurat que allotja l'anell elàstic i el trepanat passant on s'ubica el passador de la caixa.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: PORTA RODAMENTS ESQUERRE I DRET	Full 5 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: Com el seu nom indica, la funció dels porta-rodaments es la d'allotjar la parella de rodaments que possibilita el moviment suau del rotor. Aquest dos sòlids es munten units amb 4 cargols de mètrica M1,4 formant una gàbia dels rodaments simètrica respecte la seva superfície en contacte.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

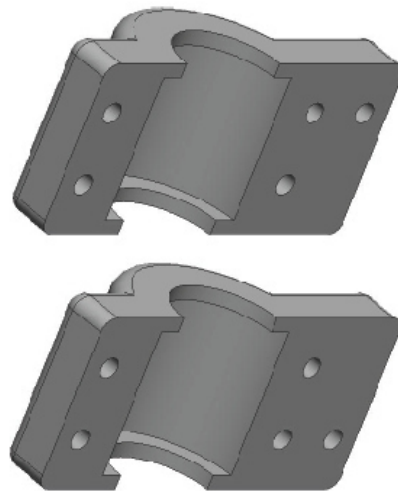
Dimensions principals: 25,7 x 12 x 3,75 mm

Pes estimat: 2,78 g

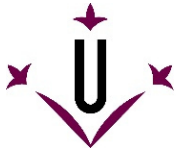
Esforç mínim requerit: 46,4 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 1 esquerre i 1 dret

Representació:



Els dos porta-rodaments, simètrics respecte el seu pla d'unió, es fabriquen mitjançant el fresat d'un bloc d'alumini de dimensions un 5% superiors a les indicades en el plànol. Posteriorment se'n realitzen els forats i el buidat interior per a allotjar els dos rodaments.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulat d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: ORELLA PORTA-RODAMENT	Full 6 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: Les dues orelles porta-rodament tenen com a funció mantenir units els dos porta-rodaments simètrics mitjançant 4 cargols de M1,4, a més de permetre el moviment de capcineig del pla de rotació.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

Dimensions principals: $\varnothing 18,5 \times 2$ mm

Pes estimat: 0,67 g

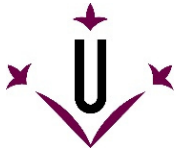
Esforç mínim requerit: 46,4 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 2

Representació:



Les orelles porta-rodament es fabriquen mitjançant el fresat d'un disc de 20 mm de diàmetre i 2 mm de gruix resseguint el contorn que es mostra en el pla pertinent. Posteriorment es realitzen els 4 trepanats superiors del sòlid ($\varnothing 1,4$ mm) i l'orifici inferior per allotjar el passador (eix) de capcineig ($\varnothing 2$ mm).



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: BOIXA	Full 7 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: La boixa del rotor es l'encarregada de posicionar les tres pales en el pal de rotació, mantenir-les unides al conjunt i transmetre el seu moviment de rotació a l'eix de l'autogir, i de retruc a la pista interior dels rodaments.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

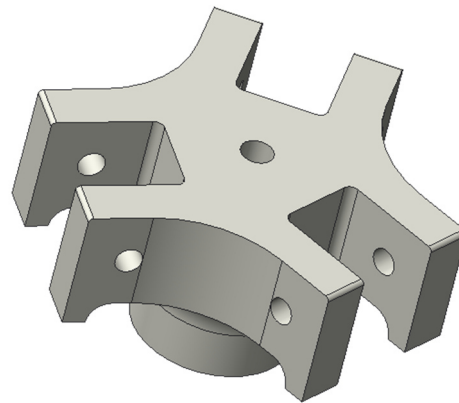
Dimensions principals: Ø21 x 23 mm

Pes estimat: 32,73 g

Esforç mínim requerit: 132,5 N/mm²

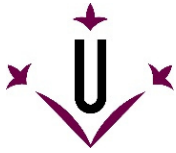
Unitats en el conjunt rotor: 1

Representació:



El procés de fabricació de la boixa és un dels més complexos de l'aparell. Es projecta per ser fabricat a partir d'un bloc macís d'alumini (de forma circular). La seva simetria permet realitzar les primeres accions de mecanitzat mitjançant el torn. El mecanitzat de les orelles és necessari realitzar-lo mitjançant la fresa, tot posicionant cap per avall la boixa. Posteriorment es realitzen els 6 orificis passants de les orelles disposades en parelles a 120°, una respecte l'anterior, que serveixen per allotjar el passador que manté unides les pales amb la boixa. A més a més, cal realitzar dos orificis en l'eix de simetria de la peça; un en la part inferior per allotjar l'eix del rotor, i un altre en la part superior (roscat) que s'utilitza per unir el barret aerodinàmic a la boixa.

Per últim, cal realitzar un últim orifici de M1,6 al tronc de la boixa (part inferior cilíndrica) que, mitjançant una varilla roscada manté units boixa i eix de rotació.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulat d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: BARRET	Full 8 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: La funció del barret en el mecanisme no és de vital importància. Bàsicament la seva finalitat consisteix en entregar certa aerodinàmica (disminució de la resistència a l'avanç de la caixa). Aquest element no té funció estructural dins del mecanisme.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

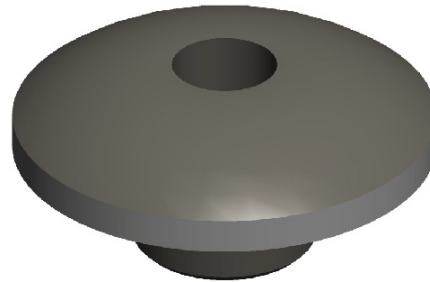
Dimensions principals: $\varnothing 27,8 \times 13,1$ mm

Pes estimat: 9,19 g

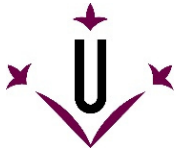
Esforç mínim requerit: 0 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 1

Representació:



El dimensionament del barret s'ha realitzat per similitud amb el d'un model en concret d'autogir. Es recomana que el barret de la caixa tingui les dimensions que es plasmen en el plànol homònim, però per existir-ne un gran nombre de comercials, és acceptable la substitució del dissenyat per un de dimensions similars.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: SÒLID DE BATIMENT	Full 9 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: El sòlid de batiment, juntament amb els dos coixinets Iigus X6, permeten el batiment de les pales (amunt i avall respecte el pla de rotació). La implementació dels coixinets es de vital importància, el rotor gira a altes velocitats, i cal que el moviment de batiment sigui prou lliure com perquè les pales siguin capaces de batre amb diligència (evitant vibracions parasitàries en l'aparell). El sòlid batiment realitza la funció de nexa entre la caixa i la pala, oferint el grau de llibertat angular necessari.

Dades tècniques:

Material: Poliacetat

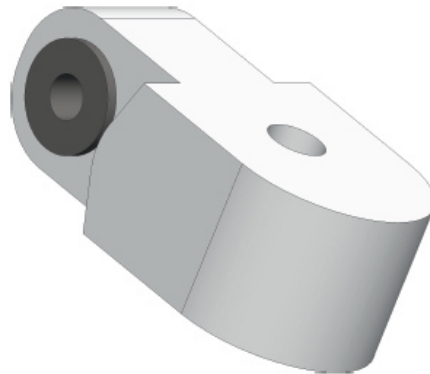
Dimensions principals: 31 x 15 x 11 mm

Pes estimat: 6,14 g

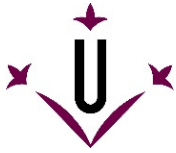
Esforç mínim requerit: 25 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 3

Representació:



La fabricació del sòlid de batiment es realitza mitjançant la fresa. Calen dos rotacions per poder realitzar la peça. Primer, partint d'un bloc del material de dimensions superiors a les principals, es realitza el rebaix (i posteriorment el forat passant) de la part de la peça que s'uneix amb la caixa i el respectiu arrodoniment. Posteriorment, es gira la peça 90°, i es dibuixa el perfil de la peça amb la fresa, i a continuació el forat passant de 4 mm de diàmetre.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: SÒLID D'ARROSSEGAMENT	Full 10 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: El sòlid d'arrossegament té com a principal funció proporcionar el segon grau de llibertat de la pala respecte la caixa, la rotació d'arrossegament. Mitjançant el forat de diàmetre 4 mm, aquest sòlid s'uneix amb el de batiment, quedant així fixat a la caixa. La unió amb la pala es realitza mitjançant 3 forats de diàmetre 3 mm.

Dades tècniques:

Material: Alumini 2014

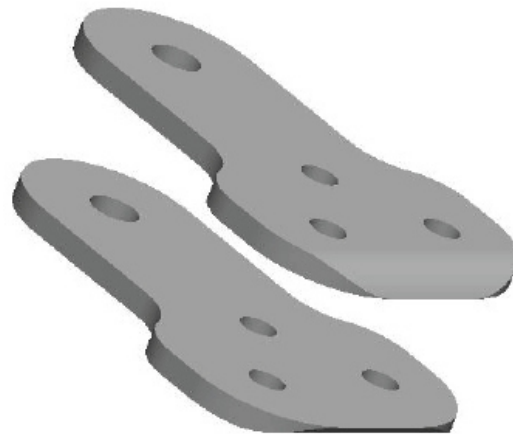
Dimensions principals: 40 x 25 x 2 mm

Pes estimat: 2 x 3,64 g

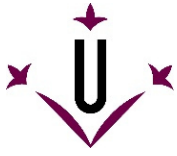
Esforç mínim requerit: 78,6 N/mm²

Unitats en el conjunt rotor: 2 x 3

Representació:



Per a la fabricació dels sòlids d'arrossegament, es parteix d'una xapa d'alumini de 2 mm i se'n dibuixa el perfil amb el torn. Posteriorment, es realitza l'arrodoniment de l'extrem del sòlid (costat de la pala) i es practiquen els quatre forats passants esmentats.



Projecte: <i>Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme</i>	Ítems: PALA	Full 11 de 15
		Data: 10-07-2017

Funció: La pala és la que dona la sustentació al rotor. Partint d'un perfil estandarditzat que provoca la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós de la pala, afegit a l'adherència de la capa límit en la part superior de la pala, es projecta la pala en una longitud suficient per poder enlairar l'aeronau. A la vegada, la funció de la pala es oposar resistència al seu avanç a través de l'aire, alimentant així el moviment d'autorotació. ,

Dades tècniques:

Material: ABS imprès

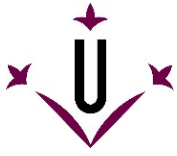
Dimensions principals: 450 x 50 x 20 mm

Pes estimat: 100 g

Representació:



El procés de fabricació de les pales es realitza mitjançant eines de prototipatge ràpid. Aquesta solució ofereix el control sobre la producció de pales ben equilibrades, amb una distribució de masses uniforme al llarg de la seva generatriu. Per tractar-se d'una peça difícil de mecanitzar sense aquesta tecnologia, en aquest projecte no s'ofereix plànol de la pala. En canvi, per poder ser elaborada mitjançant impressió 3D, s'ofereix el model CAD del disseny d'aquesta.



2. Especificacions dels materials

2014A Aluminium

Technical Datasheet

High Strength Aluminium Alloy

Service. Quality. Value.

Applications

- Structural applications
- High strength structural components
- Aerospace fittings
- Military vehicles
- Aircraft structures and truck frames

Product Description

Grade 2014A is a high strength aluminium alloy which retains its strength after heat treatment. It is a 4 - 5% copper alloy and is supplied in the fully heat-treated condition (solution heat treated & artificially aged). The material offers very good machinability. 2014A is used widely in the aerospace and defence sector in the manufacture of high strength components. 2014A aluminium alloy is normally stocked in the T651 condition and is produced in extruded bar or profile form.

Availability

Bar, plate

Key features:

- Heat treatable
- Good strength after heat treatment
- Easily plated
- Can be hard anodised

Related Material Specifications

- 2014A
- L168
- A92014
- AlCu4SiMg
- HE15
- BS H15
- W Nr. 3.1254 / 3.1255
- AMS 4121

Corrosion Resistance

Resistance to atmospheric attack is poor.

Machinability

Very good

Chemical Composition (weight %)

Weight (%)	Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	Ti	Others	Al
min.	0.50		3.90		0.40	0.20			Bal
max.	2.10	0.70	5.00	0.25	1.00	0.80	0.15	0.15	Bal

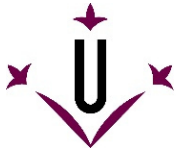
Physical Properties

Melting Point	535°C
Density	2.82 g/m ³
Thermal conductivity	138 W/m.K
Thermal expansion coefficient	23 x10 ⁻⁶ /K
Modulus of elasticity	71 GPa

Mechanical Properties

Elongation A50mm	6% min
Tensile Strength	415 MPa (min)
Proof Stress	370 MPa (min)

* Properties above for material in the T651 condition)



Acer S355

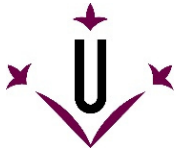
Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

3 Las siguientes son características comunes a todos los aceros:

- módulo de Elasticidad: E 210.000 N/mm²
- módulo de Rigidez: G 81.000 N/mm²
- coeficiente de Poisson: ν 0,3
- coeficiente de dilatación térmica: α $1,2 \cdot 10^{-5}$ (°C)⁻¹
- densidad: ρ 7.850 kg/m³



3. Especificacions dels coixinets

iglidur® J3 - material data

Materials table

General features

	Unit	iglidur® J3	test method
Density	g/cm ³	1,42	
Colour		yellow	
Max. humidity absorption at 23°C/50% R. H.	% weight	0,3	DIN 53495
Max. water absorption	% weight	1,3	
Coefficient of surface friction, dynamic, against steel	μ	0,06 - 0,20	
PV values max. (dry)	MPa x m/s	0,5	

Mechanical properties

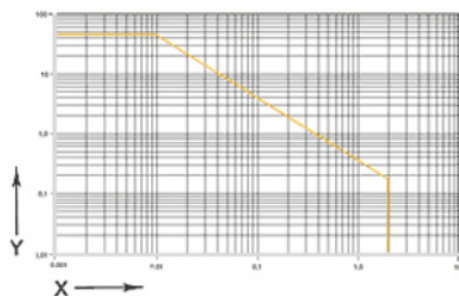
Bending E-module	MPa	2.700	DIN 53457
Tensile strength at +20 °C	MPa	70	DIN 53452
compressive strength	MPa	60	
Maximum recommended surface pressure (20° C)	MPa	45	
Shore D hardness		73	DIN 53505

Physical and thermal properties

Max. long term application temperature	°C	+90	
Max. short term application temperature	°C	+120	
Lower application temperature	°C	-50	
Heat conductivity	W/m x K	0,25	ASTM C 177
Coefficient of thermal expansion (at 23° C)	K ⁻¹ x 10 ⁻⁵	13	DIN 53752

Electrical properties

Specific forward resistance	Ωcm	> 10 ¹²	DIN IEC 93
Surface resistance	Ω	> 10 ¹²	DIN 53482



With respect to its general mechanical and thermal specifications, iglidur® J3 is directly comparable to our classic, iglidur® J.

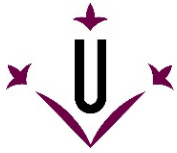


Figure 01: Permitted PV values for iglidur® J3 bearings with 1 mm wall thickness in dry operation against a steel shaft, at 20°C, installed in a steel housing.

X = Surface speed [m/s]

Y = Load [MPa]

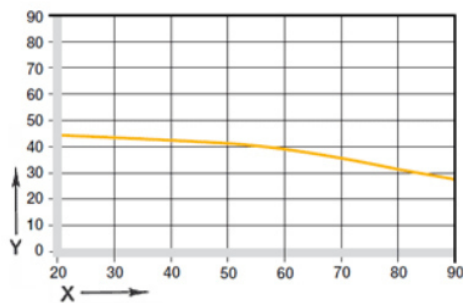


Figure 02: Maximum recommended surface pressure dependent on the temperature (45 MPa to +20 °C)

X = Temperature [°C]

Y = Load [MPa]

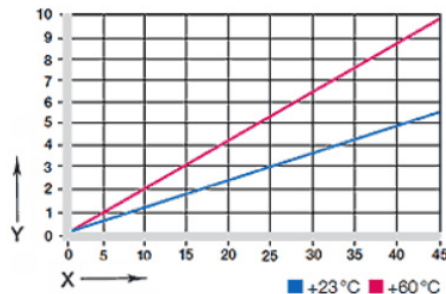


Figure 03: Deformation under load and temperatures

X = Load [MPa]

Y = Deformatio [%]

Mechanical properties

Maximum recommended surface pressure represents a mechanical material parameter. Tribological conclusions cannot be drawn from it. The compressive strength of iglidur® J3 bearings decreases with increasing temperatures. Fig. 02 clarifies this connection.

Figure 03 shows the elastic deformation of iglidur® J3 with radial loads. Under the maximum recommended surface pressure of 45 MPa, the deformation amounts to less than 6%. A potential plastic deformation depends, among other things, on the length of exposure.

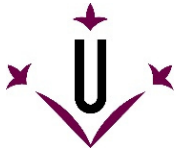
Maximum surface speed

m/s	Rotary	oscillating	Linear
Constant	1,5	1,1	8
Short-term	3	2,1	10

Table 02: Maximum surface speeds

Permitted surface speeds

igidur® J3 is also suitable for medium to high speeds; the limit values indicated in Table 02 can be achieved only at very low pressure loads. At the specified speeds, an increase in temperature up to the long-term permitted value can occur due to friction. In practice these limit values are not always reached.



iglidur® J3

Application temperature

Lower	-50 °C
Upper, long-term	+90 °C
Upper, short-term	+120 °C
Secure axially in addition	+60 °C

Table 03: Temperature limits

Temperatures

The temperatures prevailing in the bearing system also have an influence on the bearing wear. The wear increases with rising temperatures, and the influence is especially marked from 90°C temperature onwards. An additional securing is recommended at temperatures higher than +60°C.

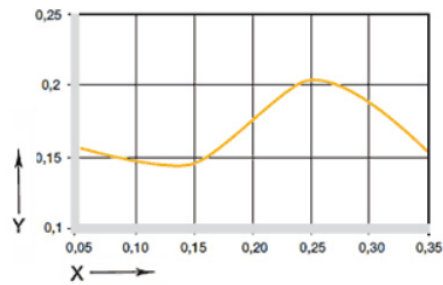


Figure 04: Coefficients of friction dependent on the surface speed, $p = 0,75 \text{ MPa}$

X = Sliding speed [m/s]

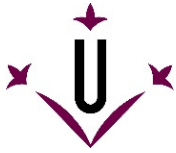
Y = Coefficient of friction μ

Friction and wear

Just like the wear resistance, the coefficient of friction μ also alters with the load (Fig. 04 and 05).

iglidur® J3	Dry	Grease	Oil	Water
Coefficients of friction μ	0,08–0,15	0,09	0,04	0,04

Table 04: Friction values against steel ($R_a = 1 \mu, 50 \text{ HRC}$)



iglidur® X6 - material data

Materials table

General features

	Unit	iglidur® X6	test method
Density	g/cm ³	1,53	
Colour		darkblue	
Max. humidity absorption at 23°C/50% R. H.	% weight	0,1	DIN 53495
Max. water absorption	% weight	0,5	
Coefficient of surface friction, dynamic, against steel	μ	0,09 - 0,25	
PV values max. (dry)	MPa x m/s	1,35	

Mechanical properties

Bending E-module	MPa	16.000	DIN 53457
Tensile strength at +20 °C	MPa	290	DIN 53452
compressive strength	MPa	190	
Maximum recommended surface pressure (20° C)	MPa	150	
Shore D hardness		89	DIN 53505

Physical and thermal properties

Max. long term application temperature	°C	+250	
Max. short term application temperature	°C	+315	
Upper short-term ambient temperature ¹⁾	°C	+315	
Lower application temperature	°C	-100	
Heat conductivity	W/m x K	0,55	ASTM C 177
Coefficient of thermal expansion (at 23° C)	[K ⁻¹ x 10 ⁻⁵]	1,1	DIN 53752

Electrical properties²⁾

Specific forward resistance	Ωcm	< 10 ⁵	DIN IEC 93
Surface resistance	Ω	< 10 ³	DIN 53482

1) Without additional load; no gliding movement; relaxation not excluded.

2) The high conductivity of this plastic can, under certain circumstances, favor

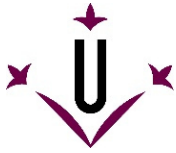


Table 01: Material Data

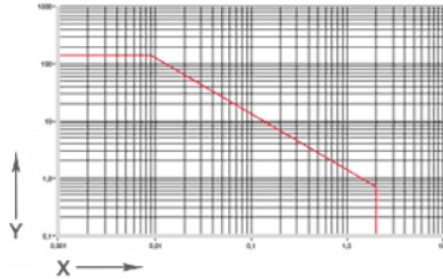


Figure 01: Permitted PV values for iglidur® X6 bearings with 1 mm wall thickness in dry operation against a steel shaft, at 20°C, installed in a steel housing.

X = Surface speed [m/s]

Y = Load [MPa]

With respect to its general mechanical and thermal properties, iglidur® X6 is directly comparable to our high-temperature classic, iglidur® X, and may even provide advantages, such as its wear behavior.

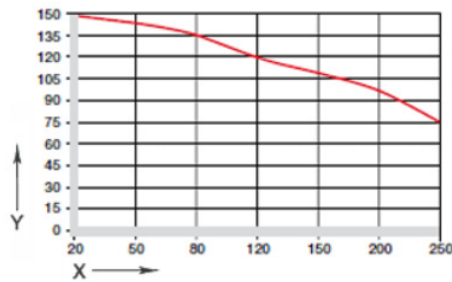


Figure 02: Maximum recommended surface pressure dependent on the temperature (150 MPa to +20 °C)

X = Temperature [°C]

Y = Load [MPa]

Mechanical properties

Maximum recommended surface pressure represents a mechanical material parameter. Tribological conclusions cannot be drawn from it. With increasing temperatures, the compressive strength of iglidur® X6 plain bearings decreases. Fig. 02 clarifies this connection.

Figure 03 shows the elastic deformation of iglidur® X6 with radial loads. At a surface pressure of 100 MPa, the deformation is less than 2%. A potential plastic deformation depends, among other things, on the length of exposure.

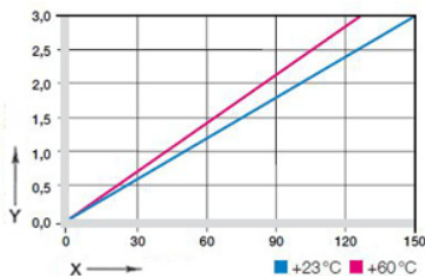


Figure 03: Deformation under load and temperatures

X = Load [MPa]

Y = Deformation [%]



m/s	Rotary	oscillating	Linear
Constant	1,5	1,1	5
Short-term	3,5	2,5	10

Table 02: Maximum surface speeds

Permitted surface speeds

iglidur® X6 is also intended for higher speeds due to its high temperature resistance and good thermal conductivity. At the specified speeds, an increase in temperature up to the long-term permitted value can occur due to friction. In practice these limit values are not always reached due to interactions.

iglidur® X6	Operating temperature
Lower	-100°C
Upper, long-term	+250 °C
Upper, short-term	+315 °C
Secure axially in addition	+165 °C

Table 03: Temperature limits for iglidur® X6

Temperatures

The ambient temperatures influence the properties of bearings to a high degree. In terms of temperature resistance, iglidur® X6 takes a top position among iglidur® materials. In many tests, a six times higher wear resistance than the established "high-temperature specialist" iglidur® X was determined. iglidur® X6 bearings require additional axial securing only above +165°C temperatures.

» [Temperatures, coefficient of thermal expansion](#)

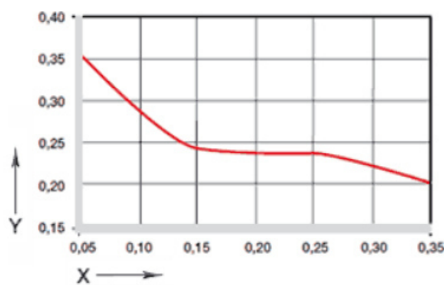


Figure 04: Coefficients of friction dependent on the surface speed, p = 0,75 MPa

X = Surface speed [m/s]

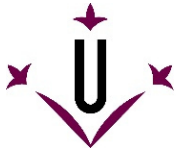
Y = Coefficient of friction μ

Friction and wear

Just like the wear resistance, the coefficient of friction μ , friction coefficient in short, also alters with the load. The friction coefficient of iglidur® X6 falls with the load and is more or less constant from about 30 MPa. The friction coefficient drops significantly also with the speed (Fig. 04 and 05).

» [Coefficients of friction](#)

» [Wear resistance](#)



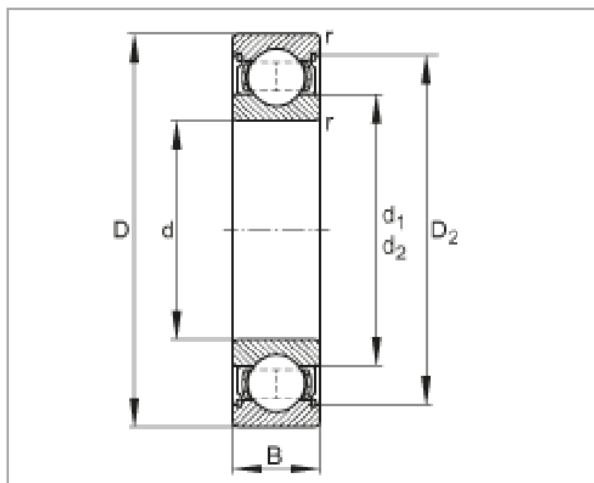
4. Especificacions dels rodaments



Rodamiento rígido a bolas 685-2Z (Serie 68..-2Z)

medidas principales según DIN 625-1, obturación por paso estrecho en ambos lados

Esta hoja de datos sólo es una vista general de medidas y capacidades de carga del producto seleccionado. Tenga en cuenta, sin falta, todas las indicaciones de estas páginas. Para muchos productos encontrará más información bajo el apartado "Descripción" del menú. Además puede solicitar amplio material de información a través de la Solicitud de catálogos (<http://www.fag.de/content.fag.de/en/mediathek/library/library.jsp>) o por teléfono +49 91 32 82 - 28 97.



d 5 mm

D 11 mm

B 5 mm

D₂ 9,9 mm

d₂ 6,2 mm

D_a 10,2 mm

max

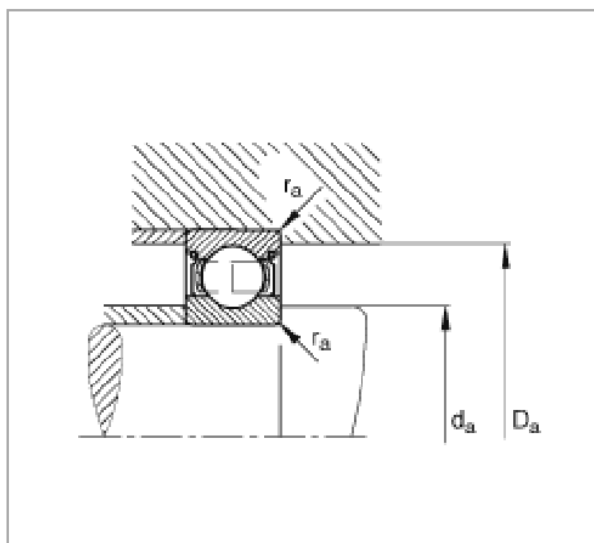
d_a 5,8 mm

min

r_a 0,15 mm

max

r_{min} 0,15 mm



m 0,002 kg Peso

C_r 760 N Capacidad de carga dinámica, radial

C_{or} 280 N Capacidad de carga estática, radial

n_G 71000 1/min Velocidad límite

n_B 61000 1/min Velocidad de referencia

C_{ur} 7,3 N Carga límite de fatiga, radial



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

Avantprojecte de disseny de la part mecànica del rotor de tres pales articulades d'un autogir d'aeromodelisme

Autor: Jaume Llaó Herrera

Data: juliol del 2017

PLEC DE CONDICIONS

Pàgina: 21 de 20

*Avantprojecte de disseny de
la part mecànica del rotor de
tres pales articulad d'un
autogir d'aeromodelisme*

PRESSUPOST

Jaume Llaó Herrera

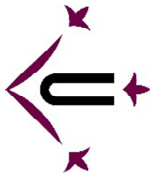
CODIRECTORS:

Joan Roca Enrich, Xavier Terribas Sala

Juliol 2017



Grau en Enginyeria Mecànica



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior

Id.	PARTIDA MATERIALS	unit.	preu/unit	TOTAL
1	Autogir Arrow coopter AC-10 Uniquemodels	1	340,02	340,02 €
2	coixinet igus iglidur J3FM-0203505-05	2	2,82	5,64 €
3	coixinet igus iglidur X6FM-0304-05	6	4,14	24,84 €
4	Femella amb fre M2 DIN985	4	1,03	4,12 €
5	Arandela M2 DIN6798 D2,2	4	0,16	0,64 €
6	Cargol M1,4x13 DIN933M	4	0,16	0,64 €
7	Femella M1,4 DIN934	4	0,24	0,96 €
8	Cargol M3x25 DIN912	3	0,21	0,63 €
9	Arandela M3 DIN6798 D3,2	6	0,15	0,9 €
10	10 Femella amb fre M3 DIN985	3	0,16	0,48 €
11	11 Cargol M4x16 DIN912	3	0,19	0,57 €
12	12 Arandela M4 DIN433 D4,3	6	0,12	0,72 €
13	Femella amb fre M4 DIN985	1	0,16	0,16 €
14	14 Cargol M3x17 ISO7380	9	4	36 €
15	15 Femella M3 DIN985	3	0,16	0,48 €
16	16 Varilla roscada M1,6x18	1	0,69	0,69 €
17	17 Cargol M4x10 ISO7380	1	3,5	3,5 €
18	RODAMENT Rígid de boles schaeffer 685-2Z	2	4,54	9,08 €
19	Alumini per a mecanitzar (preu Kg)	15	1,89	28,35 €
20	Poliacetat per a mecanitzar (preu kg)	2	0,5	1 €
			TOTAL PARTIDA :	459,42 €
Id.	PARTIDA ENGINYERIA	hores	preu/hora	TOTAL
Disseny i desenvolupament de producte				
21	autogir	60	32	1920 €
			TOTAL PARTIDA :	1920 €
Id.	PARTIDA MECANITZAT	hores	preu/hora	TOTAL
22	Hores de mecanitzat peces Alumini	5	18	90 €
			TOTAL PARTIDA :	90 €
Id.	PARTIDA IMPRESSIÓ 3D	hores	preu/hora	TOTAL
23	Hores de mecanitzat pales ABC imprès	34	12	408 €
			TOTAL PARTIDA :	408 €
			TOTAL PRESSUPOSTAT:	2877,4 €