

3 MODEL MECÀNIC DE LA POTA

3.1 Tipologia del robot i del mecanisme de pota escollits

L'objectiu principal d'aquesta tesi és el desenvolupament i la caracterització d'un accionament per a robots caminadors. L'accionament ha de donar resposta a les especificacions d'aquesta aplicació: elevat parell transmissible, lleugeresa, dimensions reduïdes, facilitat de control i elevat rendiment. Una vegada desenvolupat, aquest accionament ha de ser aplicable a diferents tipologies de robots.

Per tal de poder concretar i quantificar els requeriments de partida, l'estudi que aquí es presenta es basa en un robot hexàpode amb funcionament segons un criteri d'estabilitat estàtica. Aquesta tipologia és una de les més comuns en robots caminadors, doncs ofereix un bon compromís entre prestacions de mobilitat i simplicitat de disseny i control.

En un hexàpode estàtic es pot definir un mode de funcionament molt senzill, des del punt de vista del control, que és l'anadura de trípodos alternants. Seguint aquesta anadura les potes es mouen en grups de tres, definint cadascun d'aquests grups un polígon de suport, de manera que la funció de suport es va alternant entre els dos grups. Aquesta anadura ha estat l'escollida per a l'estudi dels requeriments i la caracterització de l'accionament. Tot i la senzillesa de la seqüència de moviments, els requeriments dels accionaments són comparables als que es tindrien amb altres modes de funcionament, i per tant els resultats de la caracterització són aplicables a altres anadures.

En un robot hexàpode que segueix l'anadura de trípodos alternants en condicions quasiestàtiques, de les tres potes que en fase de suport, la del costat que està sola, que és la del mig, suporta la meitat del pes del robot. Les altres dues de l'altre costat es reparteixen la meitat restant en proporcions que varien al llarg de la fase de suport, segons la proximitat de la projecció vertical del centre de masses del robot als diferents peus.

En un robot quadrúpede estàtic també són tres les potes en fase de suport. Les situacions més crítiques, en quant a càrrega en una pota, es donen al principi i al final de la fase de suport, quan la projecció del centre de masses és propera a un dels costats del triangle de suport. En aquesta situació les dues potes que defineixen aquest costat del triangle es reparteixen la major part del pes del robot. Així, si el disseny del robot és simètric, la càrrega màxima que haurà de suportar una pota del robot quadrúpede serà aproximadament la meitat del pes del robot. Per tant es té una clara

similitud entre les especificacions de parell màxim a transmetre pels accionaments de robots hexàpodes i quadrúpedes de dimensions i massa equivalents.

El mecanisme de pota en un robot de múltiples potes ha de tenir un mínim de tres graus de llibertat, per tal de poder moure el peu en qualsevol direcció de l'espai. Per a aquest estudi s'ha escollit un mecanisme en el que els tres graus de llibertat corresponen a tres articulacions. Els avantatges d'aquestes respecte a altres parells cinemàtics són evidents: facilitat d'implementació, precisió i regularitat de funcionament, fiabilitat i baix manteniment.

Un vegada decidit que es volen emprar únicament parells de revolució es tenen dues alternatives típiques de disposició dels membres de la pota: tipus mamífer i tipus insecte. La disposició tipus mamífer té l'avantatge de que durant la fase de suport fèmur i tibia poden estar pràcticament alineats, i per altra banda el peu sempre està pròxim al pla vertical sagital passant pel maluc corresponent, que és el punt d'unió de la pota amb el cos del robot (veure la Figura 3.1 (a)). La conseqüència és que els parells a exercir a les articulacions de la pota, per suportar el pes del robot, són menors.

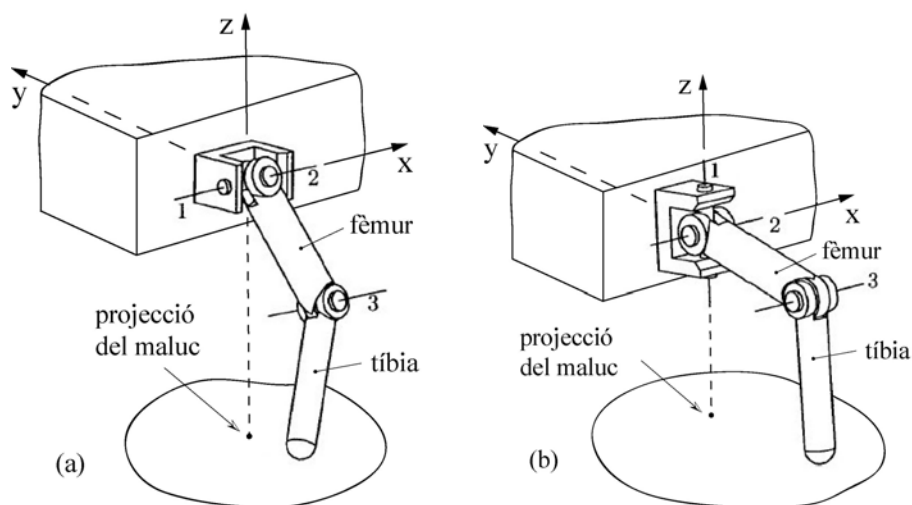


Fig. 3.1. Disposicions tipus mamífer (a) i tipus insecte (b) de la pota del robot

En la disposició tipus insecte fèmur i tibia descriuen un angle al voltant dels 90° i el peu sempre està allunyat de la projecció vertical del maluc sobre el terra. Llavors a l'articulació encarregada de pujar i baixar el fèmur s'ha d'exercir un parell bastant elevat per contrarestar el moment provocat per la reacció vertical del terra sobre el peu (veure la Figura 3.1 (b)). La disposició tipus insecte té el punt fort de que permet un espai de treball del peu, respecte al cos, amb recorreguts més semblants en les tres direccions de moviment: longitudinal, transversal i vertical. La conseqüència d'aquesta característica és que, en general, s'aconsegueix una major mobilitat del robot en terrenys difícils i una major capacitat de superació d'obstacles (Marhefka,

1997). Per aquest motiu s'ha escollit per a aquest estudi un mecanisme de pota en disposició tipus insecte.

Si el robot estigués pensat per a un funcionament dinàmic, a més alta velocitat, llavors probablement s'escolliria la disposició tipus mamífer, doncs amb els mateixos accionaments permet unes majors càrregues verticals a les potes. Els resultats obtinguts de la caracterització de l'accionament també són aplicables a aquesta configuració, però tenint en compte en cada cas la dinàmica del moviment de la pota corresponent.

3.2 Model cinemàtic del mecanisme

La grandària del robot en el que es basa aquest estudi s'ha plantejat pensant en un robot capaç d'operar en un entorn humà, tant en espais exteriors com a l'interior d'edificis. Per tant les dimensions es fixen pensant en que el robot es pugui moure per passadissos, obertures de portes i escales estàndards en edificis (veure la Taula 3.1 i la Figura 3.2).

Taula 3.1. Dimensions principals del robot

Longitud efectiva del cos	600 mm
Amplada del robot	520 mm
Longitud del fèmur, l_f	180 mm
Longitud de la tíbia, l_t	340 mm

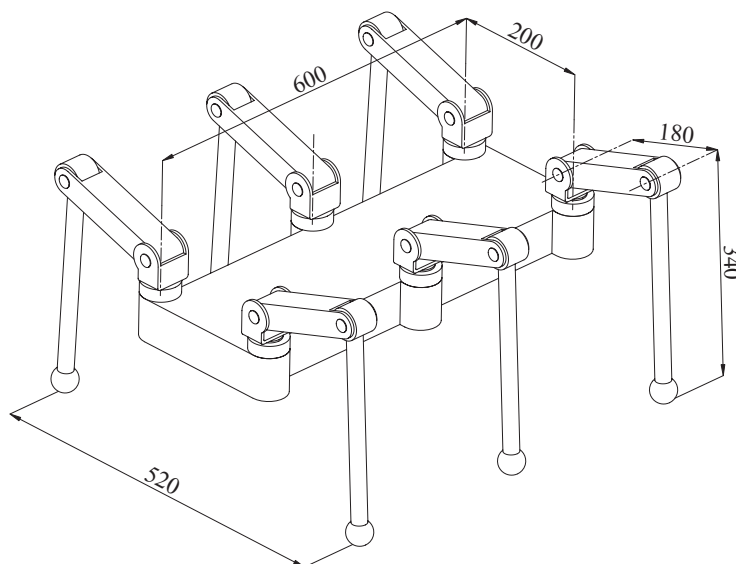


Fig. 3.2. Esquema i dimensions principals del robot

Les dimensions dels membres fèmur i tíbia s'han determinat en funció de les dimensions generals del robot. Les relacions entre les dimensions principals del robot i els paràmetres cinemàtics del mecanisme de pota s'han decidit segons les

recomanacions d'estudis existents d'eficiència energètica d'anadures en hexàpodes (Marhefka, 1997).

A la Figura 3.3 es presenta l'esquema cinemàtic del mecanisme d'una pota. El cas il·lustrat és una de les potes del costat dret del robot segons el sentit d'avanç. L'esquema cinemàtic de les potes de l'altre costat és simètric respecte al pla x-z. Cada pota està formada per un mecanisme de 3 graus de llibertat, permetent el moviment de cada peu, idealitzat com un punt de contacte, respecte al cos del robot en les 3 direccions de l'espai. El mecanisme està format per una cadena cinemàtica oberta de 4 membres: el cos del robot, el maluc, el fèmur i la tibia, units mitjançant articulacions.

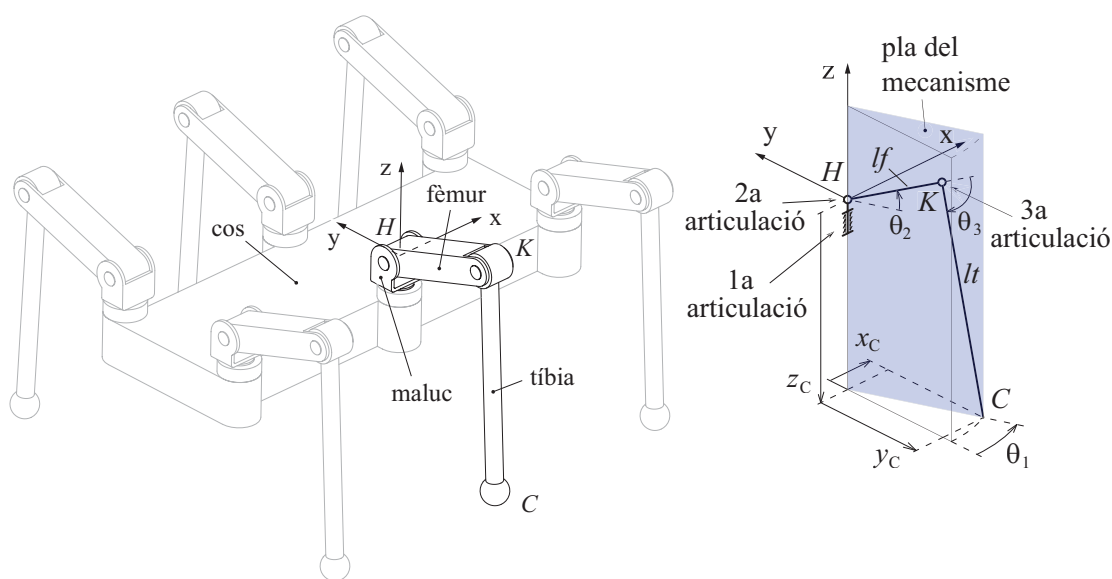


Fig. 3.3. Esquema cinemàtic del mecanisme d'una pota

La primera articulació, que uneix el cos amb el maluc, és segons l'eix z, vertical. La seva orientació queda especificada per l'angle θ_1 , definit entre el pla vertical que conté el fèmur i la tibia i el pla frontal. Aquesta articulació és l'encarregada de moure la resta del mecanisme de la pota endavant i endarrera.

La segona articulació uneix el maluc amb el fèmur i serveix principalment per moure el peu amunt i avall. L'angle θ_2 posiciona el fèmur respecte al pla horitzontal. Els eixos de les articulacions 1a i 2a interseccionen en tot moment al punt H (veure la Figura 3.3) que és el punt d'unió de la pota amb el cos.

La tercera articulació uneix el fèmur amb la tibia. L'orientació d'aquesta es descriu mitjançant l'angle θ_3 , definit respecte al fèmur. Les articulacions 2a i 3a són en tot moment segons eixos horitzontals i paral·lels entre ells. Així els membres de fèmur i tibia defineixen sempre un pla vertical.

Per a l'estudi cinemàtic i dinàmic del mecanisme de cada pota s'ha definit un sistema de referència fix al cos del robot amb origen al punt d'unió de la pota amb el cos (punt H a la Figura 3.3). Els eixos d'aquesta referència formen un trèdre directe amb l'eix x en la direcció i sentit d'avanç del robot, eix y en direcció transversal i sentit positiu apuntant a l'esquerra del robot i eix z en direcció vertical amb el sentit positiu cap a dalt.

Es pretén que l'espai de treball del peu del mig d'un costat interseccioni amb els espais de treball dels peus de davant i de darrera del mateix costat. Així es té la possibilitat de que, al anar avançant el robot, els tres peus d'un costat puguin pràcticament repetir els punts de petjada sobre el terra. D'aquesta manera es millora la capacitat de superació d'obstacles al minimitzar les zones requerides de suport sobre el terra.

El peu també ha de poder moure's transversalment, per possibilitar diferents punts de petjada al avançar, per desplaçar el cos lateralment o per caminar de costat com fan els crancs. A la Figura 3.4 es mostren dues vistes, en perspectiva i superior, dels espais de treball de cada peu d'un costat del robot considerant els valors extrems del angles a les articulacions indicats a la Taula 3.2.

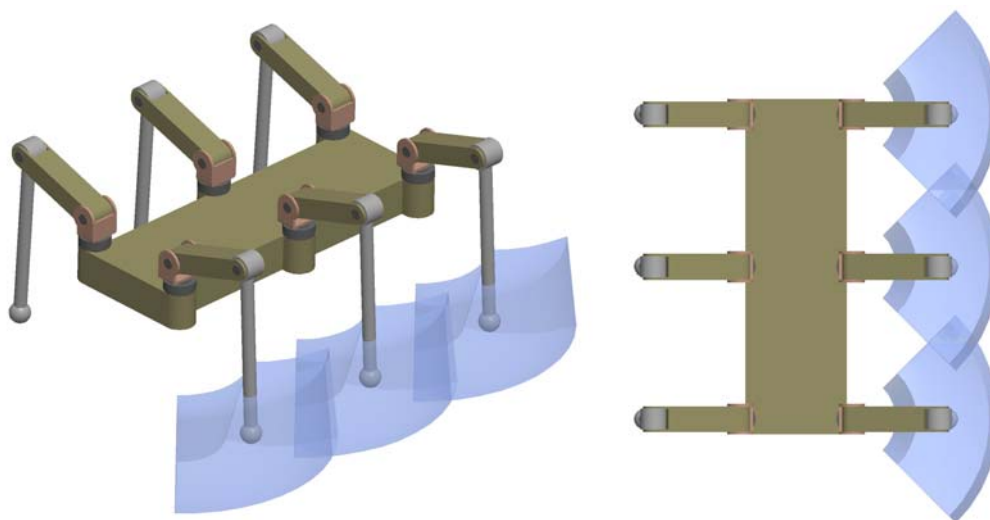


Fig. 3.4. Espai de treball dels peus del costat dret respecte al cos del robot

Taula 3.2. Valors extrems dels angles a les articulacions

Articulació	mín	màx
1a (θ_1)	-45°	45
2a (θ_2)	-15°	45°
3a (θ_3)	quan $\theta_2 = -15^\circ$	-55°
	quan $\theta_2 = 45^\circ$	-110°

3.3 Disseny mecànic de la pota

3.3.1 Implementació del mecanisme de la pota

Els components mecànics del robot, del mecanisme de cada pota i de l'accionament s'han dissenyat i modelat utilitzant el *Pro/Engineer*[®], que és un software de CAD paramètric en tres dimensions.

El disseny final ha estat el resultat d'un procés iteratiu de disseny, que inclou fases de simulació dinàmica del mecanisme, comprovació de la resistència i rigidesa dels elements principals i modificacions del disseny. Diferents mòduls del paquet de software *Pro/Engineer*[®] han estat utilitzats per a les diferents fases del disseny.

Un aspecte important a considerar en el disseny ha estat la possibilitat de construir les peces al taller de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida. Així totes les peces no comercials s'han previst per tal de poder ser fabricades per mecanització, amb torn o fresadora de control numèric, o mitjançant punxonat de xapa i amb unions soldades, reblonades o cargolades.

Disposició dels elements en el mecanisme

El disseny de totes les potes és idèntic, amb l'única diferència de que la disposició dels elements és simètrica entre les potes d'un costat i de l'altre. A la Figura 3.5 es mostra el model tridimensional de la pota del mig a la dreta del robot, indicant els diferents membres i parells cinemàtics que formen el mecanisme. En tots els casos la transmissió de cada accionament es situa directament a l'articulació corresponent, i el motor elèctric just al costat.

En el cas de la 3a articulació això implica una important inèrcia de la pota al moure's aquesta respecte al cos del robot. L'altra alternativa seria ubicar l'accionament al cos del robot i transmetre el moviment a la tibia mitjançant, per exemple, un mecanisme de barres articulades, però aquesta disposició tindria l'inconvenient de la limitació d'espai al cos per a la ubicació dels accionaments.

Un avantatge d'ubicar el reductor a la mateixa articulació és la reducció de components en el mecanisme, simplificant i minimitzant la massa del conjunt. Un altre avantatge de la disposició escollida per a l'accionament de la 3a articulació és que els esforços als accionaments 1r i 2n queden millor repartits entre les fases de suport i de transferència, al no incidir el pes del 3r accionament en el parells requerits a les articulacions 1a i 2a durant la fase de suport.

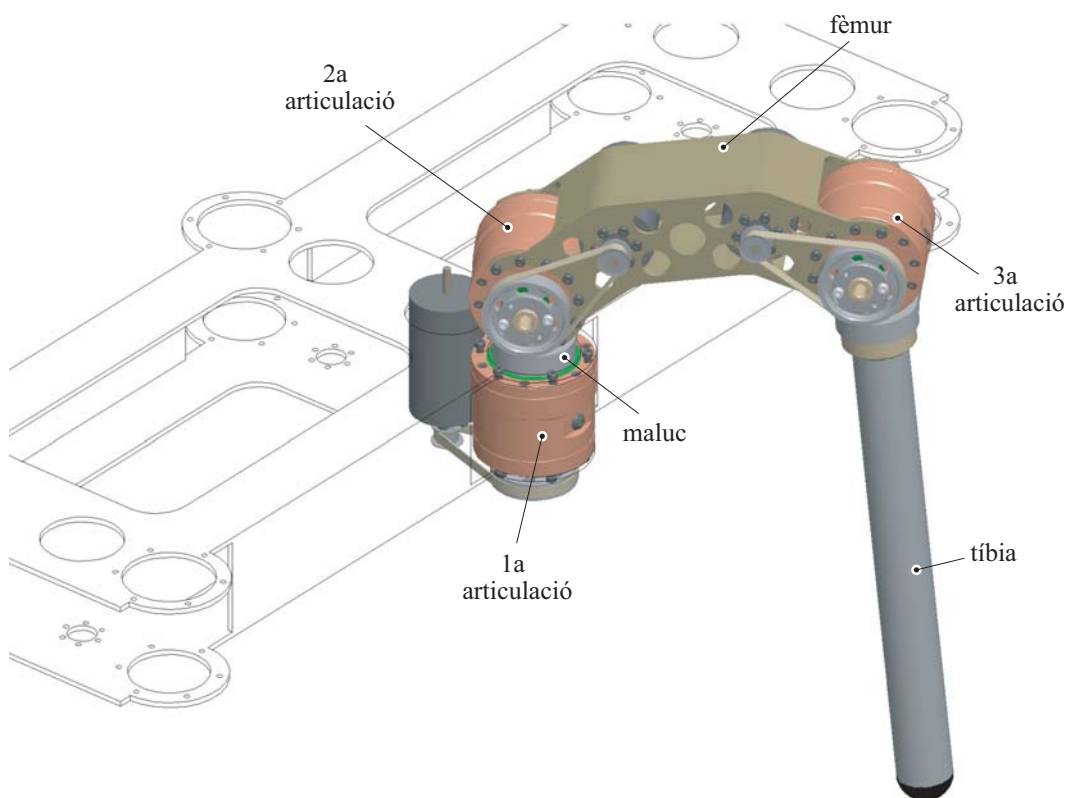


Fig. 3.5. Model tridimensional de la pota del mig a la dreta

Disseny dels components estructurals del mecanisme

La massa total del robot s'ha estimat en 40 kg, essent aquest un valor objectiu pel disseny de tot el conjunt complet del robot, incloent les bateries i els elements de control.

No és objectiu d'aquesta tesi l'estudi detallat de rigidesa i resistència de cada peça, ni per tant tampoc el seu dimensionat final. Tot i així els diferents components s'han dissenyat tenint en compte els esforços a suportar i preveient possibles modificacions de disseny que estudis més detallats o proves amb prototipus puguin suggerir.

En els casos de les dues peces de geometria més complexa s'ha realitzat una anàlisi estructural per elements finits per tal d'estudiar la distribució de tensions i la deformació de cada peça quan es sotmet a les càrregues resultat del funcionament del mecanisme.

Aquesta anàlisi s'ha portat a terme amb el mòdul *Pro/Mechanica*[®] del software *Pro/Engineer*[®] de modelat mecànic. L'objectiu no és optimitzar el disseny i el dimensionat, sinó únicament comprovar que les peces utilitzades en la simulació del mecanisme corresponen aproximadament a les que es tindrien en un disseny definitiu de la pota.

Xassís del robot

És l'element que dona forma i consistència al cos del robot. En la seva construcció s'utilitza xapa d'alumini 1050 H14, de 3 mm de gruix. Està format per dues xapes paral·leles i horitzontals unides lateralment mitjançant xapes verticals soldades a elles (veure la Figura 3.6). A les xapes horitzontals es tenen les sis zones destinades al muntatge sobre el xassís dels mecanismes de pota. El xassís és doblement simètric, longitudinalment i transversal.

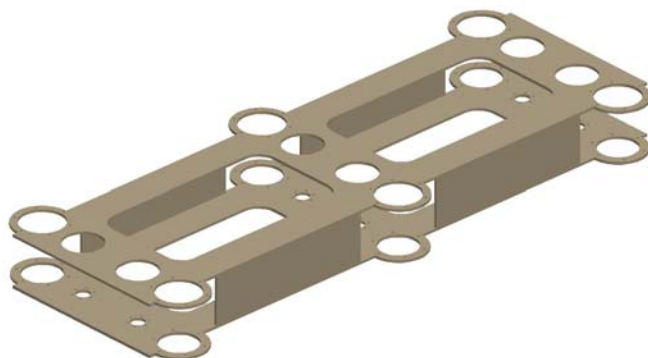


Fig. 3.6. Disseny del xassís del robot

Les potes s'uneixen al xassís a través del bloc del reductor de la 1a articulació, i la unió és mitjançant cargols. Al costat de cada reductor de la 1a articulació, i fixat sobre el xassís, s'hi munta el motor corresponent.

Els espais que longitudinalment queden lliures entre les fixacions de les diferents potes amb el xassís es destinarien a ubicar-hi les bateries i els elements de control i regulació. El disseny definitiu del xassís hauria d'incorporar els ancoratges o punts de fixació adequats per a tots aquests elements.

Escaire

En cada pota es tenen dues d'aquestes peces de disseny idèntic. Una d'elles uneix els arbres de sortida dels accionaments 1r i 2n, i l'altra uneix la tibia amb l'arbre de sortida del 3r accionament. Té una forma en angle recte per tal de definir els 90° entre les peces a unir (veure la Figura 3.7). Es construeix per mecanització a partir d'un bloc d'aliatge d'alumini 2011 T3. És una peça crítica en quant a dimensionat perquè està sotmesa a importants esforços, i cal evitar la interferència amb els reductors i amb el fèmur, aquest últim amb moviment relatiu respecte a les dues esquadres.

El comportament de la peça sota càrrega ha estat analitzat per elements finits. El cas estudiat és l'escaire de la tibia de la pota del mig en la configuració mitja de la pota durant la fase de suport. En aquesta situació la tibia rep una càrrega aproximadament en la seva direcció axial i de valor el corresponent a la meitat del pes del robot.

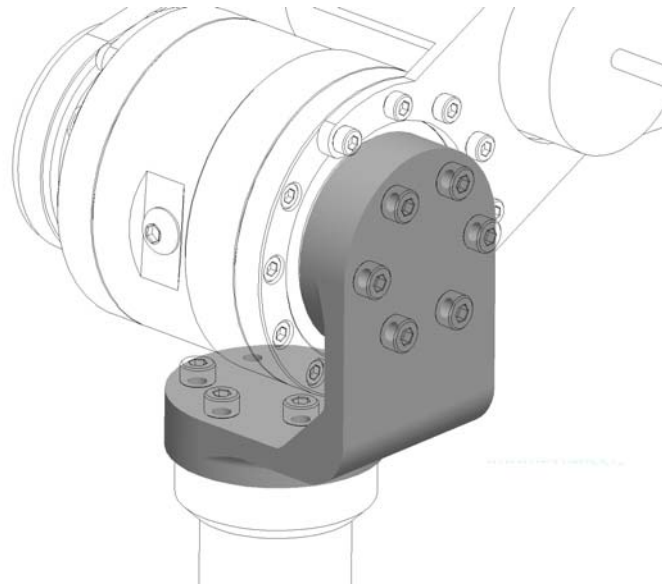


Fig. 3.7. Escaire que uneix la tíbia amb la 3a articulació

A la Figura 3.8 es mostren els resultats de la distribució de tensions, amb una tensió màxima equivalent, segons el criteri de Von Misses, de 66 MPa. Com el límit elàstic de l'alumini 2011 T3 és de 295 MPa s'ha considerat que el disseny és correcte en quant a resistència. La deformació màxima és de 0,26 mm (veure la Figura 3.9), que es considera acceptable per a aquesta aplicació.

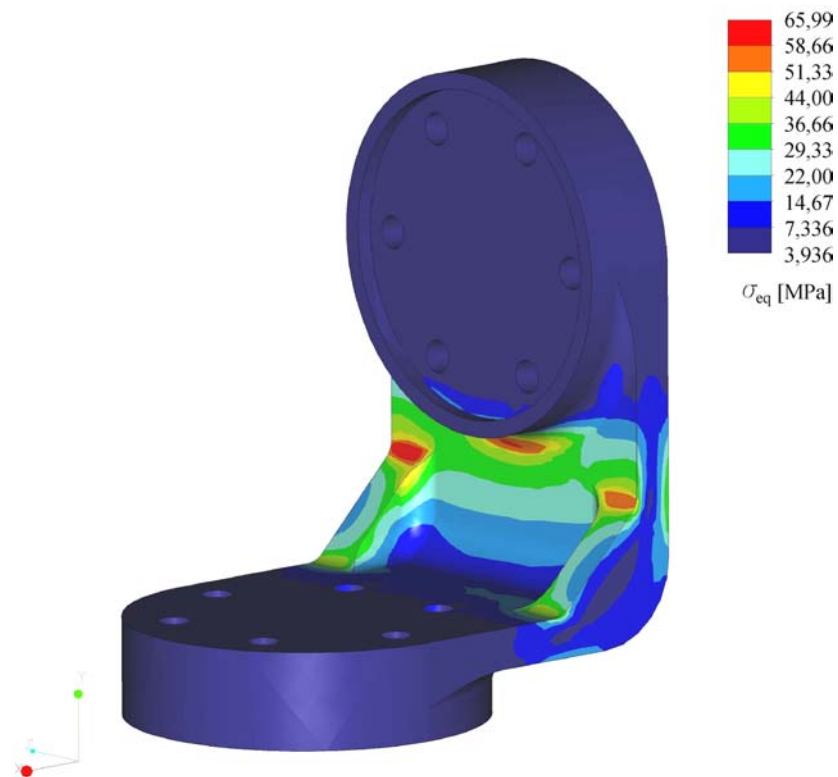


Fig. 3.8. Tensió equivalent segons Von Misses a l'escaire

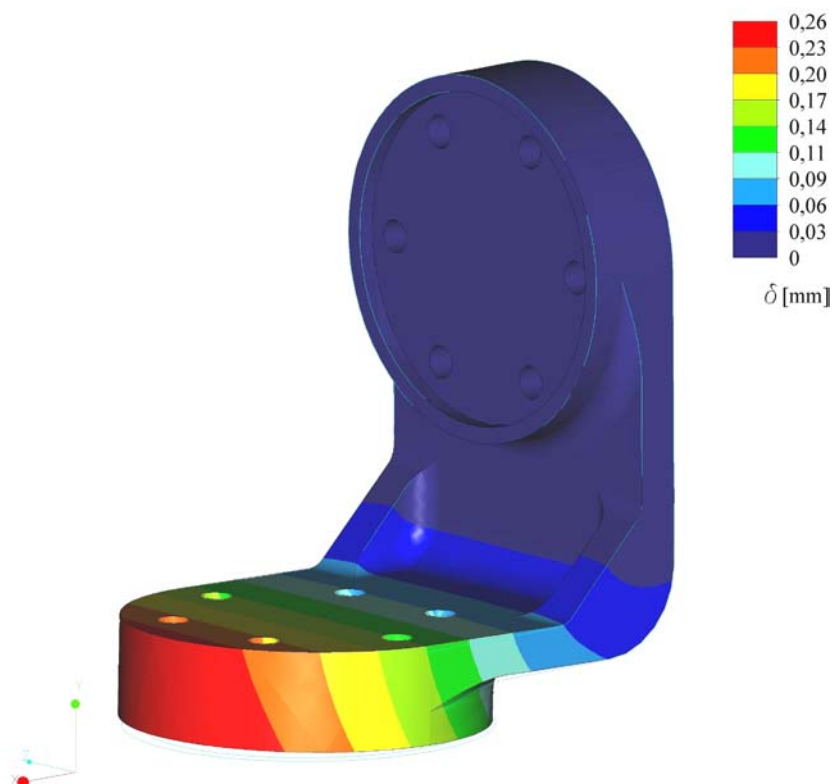


Fig. 3.9. Deformada de l'escaire sota càrrega

Fèmur

El fèmur uneix les articulacions 2a i 3a a través de les carcasses dels respectius reductors. La unió amb aquests és mitjançant cargols. La peça, en lloc de ser recta entre les dues articulacions a unir, descriu una forma corbada per tal d'evitar interferències amb les esquadres del maluc i de la tibia (veure la Figura 3.10). Està format per xapes d'alumini 1050 H14, de 3 mm de gruix, unides mitjançant soldadura de manera que formen un tub de secció rectangular. Dos forats de 42 mm de diàmetre en un dels laterals del fèmur permeten muntar els motors de les articulacions 2a i 3a al seu interior. A l'altre lateral una sèrie de forats fan que la deformació sota càrrega de la peça sigui més simètrica, a la vegada que l'alleugereixen.

El fèmur també ha estat analitzat per elements finits. La situació plantejada correspon a la mateixa configuració que en el cas de l'esquadra de la tibia: meitat del recorregut del peu durant la fase de suport. L'anàlisi s'ha plantejat considerant fixes les cares d'unió amb el 2n accionament i amb les càrregues aplicades a l'altre costat, repartides per igual entre les dues cares unides al 3r accionament.

La Figura 3.11 mostra els resultats de la distribució de tensions, amb una tensió màxima equivalent, segons el criteri de Von Mises, de 36,9 MPa. Al ser el límit

elàstic de l'alumini 1050 H14 de 100 MPa s'ha considerat que el disseny és correcte en quant a resistència. Tot i així cal tenir present que en l'anàlisi s'ha considerat la hipòtesi de que el material de la peça és completament homogeni. En realitat la peça inclouria zones soldades, amb característiques del material diferents i amb possibles tensions internes. Seria imprescindible per tant l'assaig de resistència sobre un prototipus de la peça. La deformació màxima és de 0,106 mm (veure la Figura 3.12), perfectament acceptable per a aquesta aplicació.

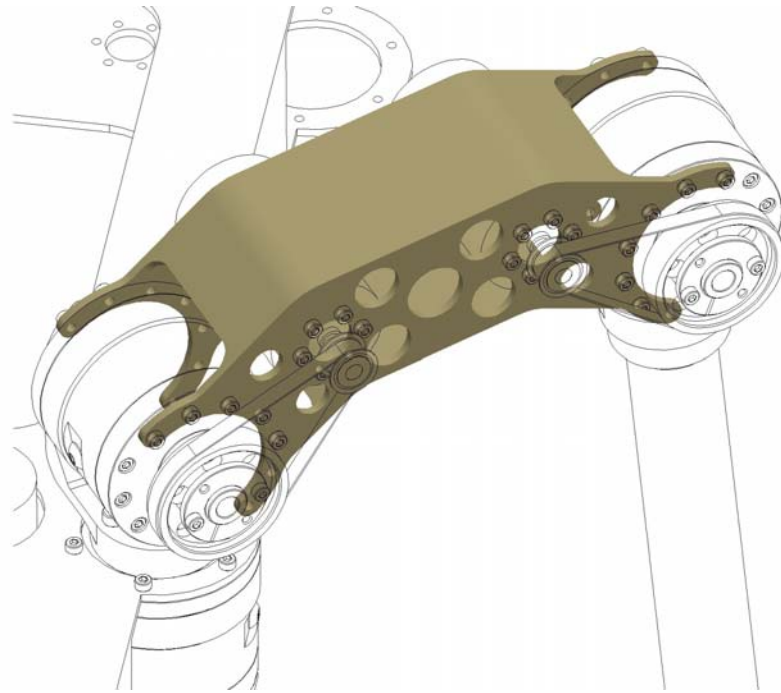


Fig. 3.10. Model del fèmur

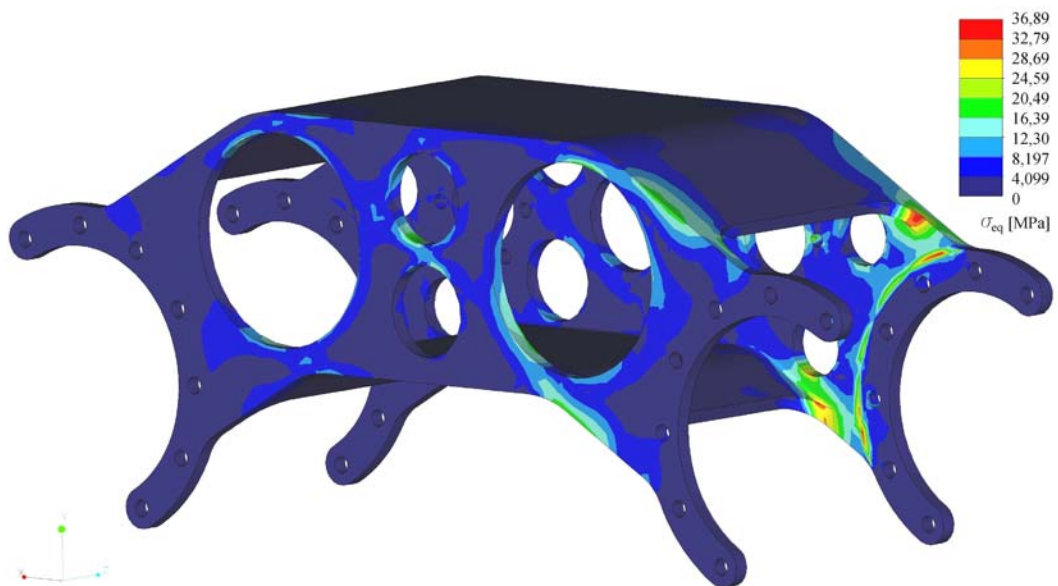


Fig. 3.11. Tensió equivalent segons Von Misses al fèmur

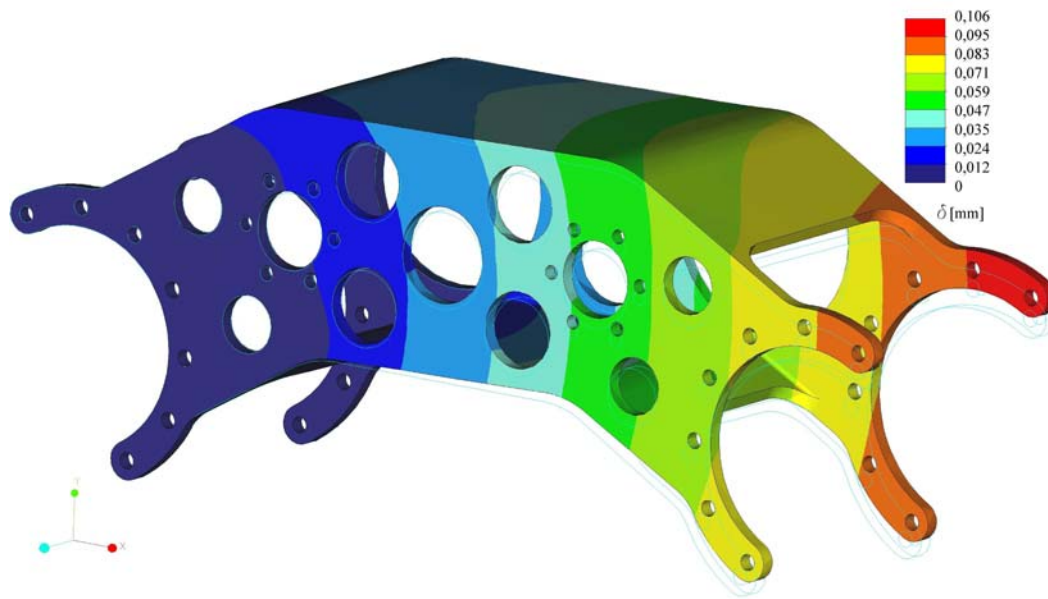


Fig. 3.12. Deformada del fèmur sota càrrega

Tíbia

L'últim membre de la pota està constituït per un tub circular d'aliatge d'alumini 6063 de 30 mm de diàmetre i 3 mm de gruix que va des del genoll fins al peu. En el costat del genoll es té un escaire per unir el tub de la tíbia amb la sortida del 3r l'accionament (veure la Figura 3.13). Una peça intermèdia, soldada al tub i muntada amb cargols a l'escaire, uneix el conjunt.

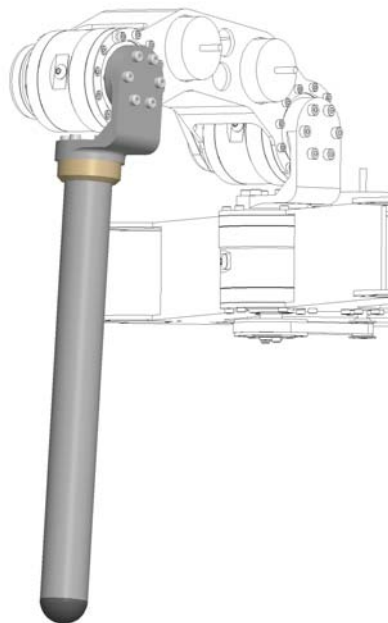


Fig. 3.13. Model de la tíbia

Peu

En l'extrem final de la tibia (veure la Figura 3.13) es té un tac de goma que fa les funcions de peu. Aquest defineix una zona de contacte que s'adapta a la superfície del terreny, suavitza l'entrada en contacte amb el terra i aporta la necessària adherència per evitar el lliscament.

3.3.2 Conjunt de l'accionament

Components de l'accionament

Si bé el treball presentat en aquesta tesi és l'eina adequada per tal de seleccionar i dimensionar individualment cada accionament del robot, l'objectiu no és aquest, sinó avaluar l'eficiència energètica dels accionaments. En aquest sentit és molt interessant poder comparar el mateix disseny d'accionament en diferents articulacions i per tant amb diferents requeriments. Per aquest motiu, i per simplificar l'anàlisi, s'ha decidit que tots els accionaments siguin iguals, a les tres articulacions i a totes les potes.

Com en la majoria de robots caminadors existents, el motor utilitzat és elèctric i de corrent continu. Com ja s'ha comentat al capítol de la introducció, la seva principal virtut per a aquesta aplicació és la facilitat de control. Un dels principals inconvenients és l'elevada massa d'aquests motors en relació al parell i a la potència desenvolupats. El motor triat, de la sèrie *RE* de *MAXON*[®], és un model de gamma alta que, muntant imants de *neodini*, ofereix una relació entre prestacions i massa i un rendiment dels més alts que es poden trobar actualment en motors elèctrics comercials. Les prestacions del motor escollit són semblants a les d'un motor sense escobretes equivalent del mateix fabricant. Aquest últim té els avantatges de l'absència de guspines i un menor manteniment, però la major facilitat de regulació del motor de corrent continu va ser clau en la seva elecció.

Els requeriments a cada articulació, en quan a parell i velocitat de gir, són totalment dispars amb les prestacions d'un motor elèctric de corrent continu. Per tant es necessita una transmissió amb una relació de reducció elevada per obtenir una velocitat de gir baixa i un parell elevat a la sortida de l'accionament.

La transmissió mecànica de cada accionament està formada per un reductor *Harmonic Drive*[®] de la sèrie *HFUC* i una transmissió de corretja dentada. El reductor *HD* combina els avantatges d'una elevada relació de reducció, lleugeresa i elevat parell transmissible. La transmissió de corretja dentada complementa la reducció i permet una millor ubicació, més compacta, de motor i reductor *HD* (veure la Figura 3.14). A la Taula 3.3 s'indiquen els models dels principals components de l'accionament i la relació de reducció de cada component de la transmissió.

Taula 3.3. Components mecànics de l'accionament

Component	Model	Reducció (i)
Reductor <i>HD</i>	<i>HFUC-17</i>	120 : 1
Corretja	<i>T2.5</i>	60 : 18
Motor CC	<i>MAXON RE-40</i>	-

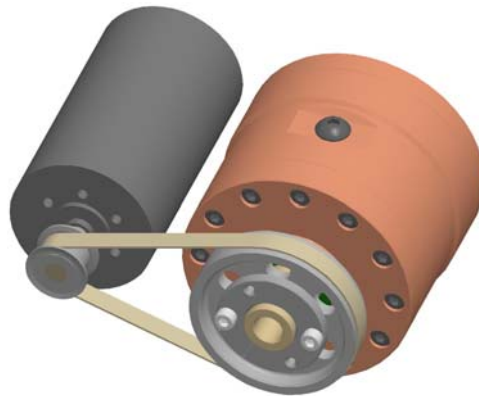


Fig. 3.14. Conjunt de l'accionament

Disseny mecànic del conjunt del reductor Harmonic Drive®

La part més complexa del disseny mecànic de l'accionament és el conjunt que integra el reductor *Harmonic Drive*®. Per tal d'assegurar un bon funcionament el muntatge dels tres elements principals –*wave generator*, *flexspline* i *circular spline*– i de tota la resta del conjunt ha de donar resposta a una sèrie de requeriments. El fabricant proporciona un llistat de pautes a tenir en compte en el disseny del conjunt, que queden il·lustrades a l'exemple de disseny de la Figura 3.15.

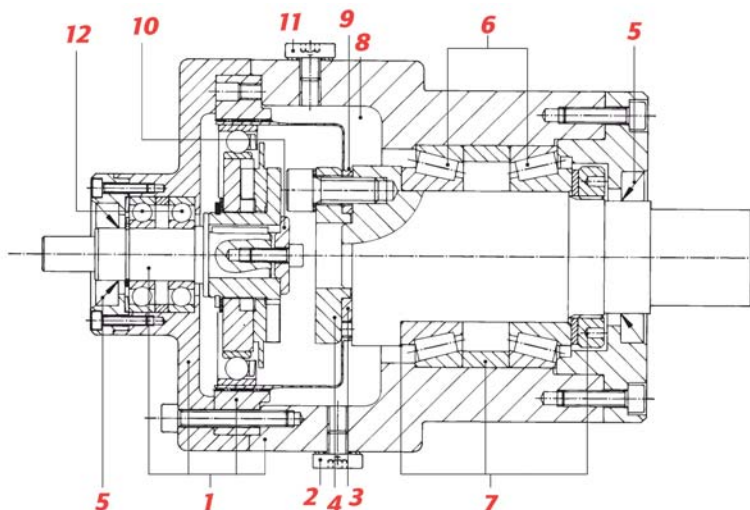


Fig. 3.15. Exemple de disseny del conjunt que integra els components principals de la sèrie *HFUC* del reductor *HD* (Harmonic Drive AG, 2003)

Pensant en l'aplicació del reductor *HD* a l'accionament d'un robot caminador, el disseny de la Figura 3.15 presenta els inconvenients de que és excessivament

voluminós, sobretot longitudinalment, i molt pesat. Per això ha estat necessari realitzar un disseny del conjunt del reductor *HD* expressament ideat per a aquesta aplicació (veure les Figures 3.16 i 3.17), de manera que es minimitzen les dimensions externes i la seva massa.

El bloc està constituït de tres peces, unides amb cargols, per tal de permetre el muntatge de tots els elements interiors. El material utilitzat per a la construcció de les tres peces del bloc és l'aliatge d'alumini 2011 T3. El *circular spline* és solidari al bloc del reductor, i per tant actua com a membre fix.

El guiatge entre *circular spline* i *flexspline*, o el que és equivalent, entre el bloc i l'arbre de sortida, el defineixen una parella de rodaments de boles de contacte angular, que a la vegada materialitzen el parell cinemàtic de l'articulació accionada. Així aquest conjunt de rodaments ha de suportar també les càrregues radials, axials i de moment flector sobre l'articulació del mecanisme de la pota.

L'arbre del *wave generator* subministrat pel fabricant ha estat substituït per un nou disseny, per tal de poder fixar-hi la polijta de la transmissió per corretja dentada que li transmet el moviment des del motor. La nova peça recolza en dos rodaments radials de boles, muntats amb una certa separació per tal de suportar millor el moment flector que provoca la tensió de la corretja sobre aquest eix. Un d'aquests rodaments s'ubica a l'interior del *flexspline* i així es redueix la dimensió en longitud del conjunt. La peça que fixa el *flexspline* a l'arbre de sortida té la funció a la vegada de suport d'aquest rodament.

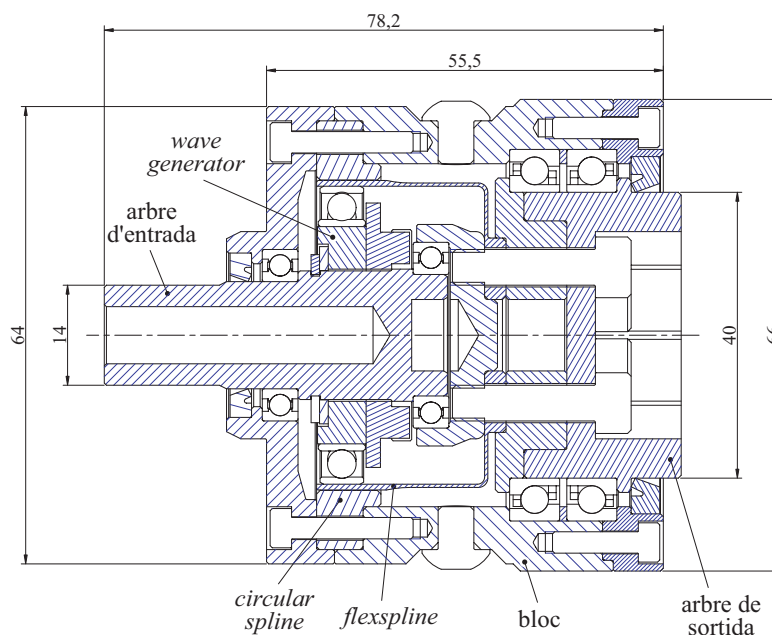


Fig. 3.16. Tall del conjunt del reductor *HD*

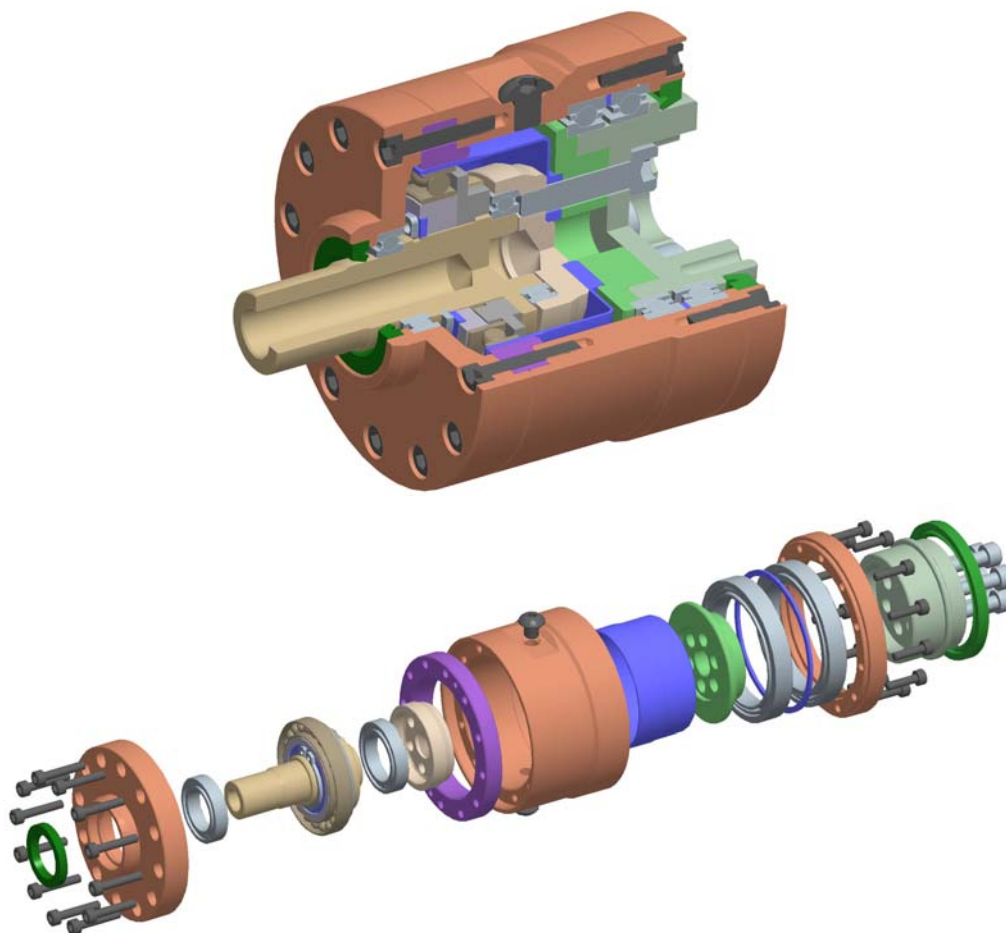


Fig. 3.17. Vistes seccionada i explosionada del conjunt del reductor *HD*

3.4 Característiques inercials del model

3.4.1 Modelització de les característiques inercials de les peces

En la majoria dels casos les característiques inercials de les peces, que després s'utilitzen en la simulació dinàmica del mecanisme, queden definides directament a partir de la seva geometria. Una vegada modelades en detall en CAD-3D, només ha calgut assignar a cada model la densitat del material en que es fabrica la peça.

En alguns casos, però, les peces no s'han modelat exactament igual a la realitat, per tal de no complicar excessivament la geometria dels models. A continuació es detallen aquests casos i la forma com ha estat modelitzada cada peça amb el programa de CAD.

Circular spline

La zona del dentat interior ha estat modelitzada com si fos circular i llisa, de diàmetre el mitjà entre el peu i la punta de les dents.

Flexspline

La zona del dentat també ha estat modelitzada obviant la geometria del dentat i considerant el diàmetre mitjà entre peu i punta de les dents. A més s'ha considerat que la peça és simètrica de revolució, sense tenir en compte la deformació radial que experimenta la peça quan es munta sobre el *wave generator*.

Wave generator

Tant el rodament com el botó del *wave generator* s'han modelat com peces de revolució, de radis els valors mitjans de les el·lipses corresponents.

Rodaments

En tots els rodaments, tant en els principals de contacte angular com en els radials i en el rodament el·líptic del *wave generator*, s'ha negligit la massa de les boles. Així cada rodament es modelitza com dos sòlids de revolució, els anells interior i exterior, amb moviment de rotació relatiu entre ells.

Anells d'estanquitat

Si bé les peces reals estan formades per cautxú i un anell de reforç metàl·lic, en la modelització s'ha considerat la hipòtesi de que tot l'anell està format per un únic material homogeni. La densitat s'ha fixat de manera que en cada cas la massa del model fos equivalent a la massa real.

Motor de corrent continu

El rotor s'ha modelitzat com un sòlid de revolució, format per tres cilindres concèntrics, i homogeni, de densitat la de l'acer (veure la Figura 3.18). El diàmetre del cilindre del mig, que representa el bobinat del motor, s'ha fixat de manera que el moment d'inèrcia del model igualés el moment d'inèrcia del rotor real.

L'estator s'ha modelitzat com un cilindre buit per dins i de forma externa igual a estator real. El gruix de les cares del cilindre i la densitat s'ha fixat de manera que la massa total sigui la mateixa que la del motor real.

En la modelització s'ha negligit la contribució de l'encòder a la massa i al tensor d'inèrcia del conjunt, així com també s'han negligit els cables d'alimentació del motor i els de connexió de l'encòder.

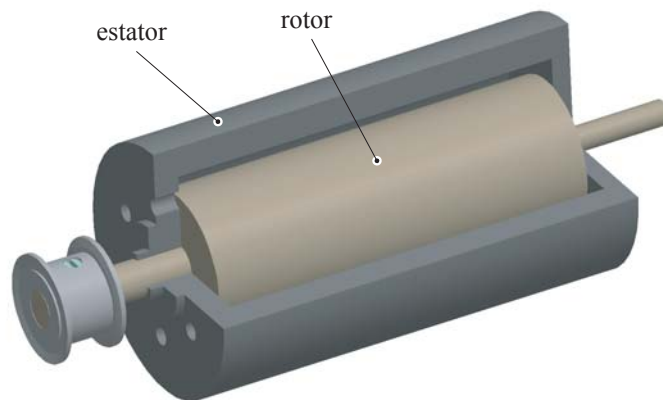


Fig. 3.18. Model seccionat del motor de corrent continu

Politges i corretja

Les zones del dentat de les politges han estat modelitzades com si fossin circulars i llises, de diàmetres els que resulten de considerar les mateixes masses que les politges reals. La contribució de la massa i inèrcia de la corretja ha estat negligida.

3.4.2 Massa resultant dels conjunts

A partir de la modelització de totes les peces s'ha determinat la massa de cada conjunt d'accionament i la massa del mecanisme de pota complet. A la Taula 3.5 es detalla la massa dels components principals que formen cada accionament i la massa total del conjunt.

Taula 3.4. Massa dels components de l'accionament

Component	Massa (g)
Conjunt del reductor <i>HD-HFUC-17</i>	608,3
Politja $z = 60$ i fixació	28,6
Motor <i>MAXON RE-40</i>	480,0
Politja $z = 18$ i presoner	3,5
Total	1 120,4

La massa total del mecanisme d'una pota, incloent els tres accionaments i els cargols de fixació al xassís, resulta ser de 3,991 kg, i la massa del xassís s'estima en 1,67 kg.

L'objectiu és no sobrepassar els 40 kg com a massa total del robot. Per tant la massa del conjunt format per les bateries i els elements de control i regulació haurà de ser igual o inferior a 14,4 kg.

3.5 Modelització de les articulacions

El parell cinemàtic d'articulació entre cada parella de membres del mecanisme de pota el constitueixen la parella de rodaments de boles de contacte angular inclosos en el conjunt del reductor *HD*.

En el model definit aquí i emprat per a la simulació dinàmica del mecanisme (descrita al capítol 4) es considera que les articulacions són ideals, i que per tant no oposen cap resistència a la rotació relativa entre els membres que enllacen. El motiu de no considerar el fregament a les articulacions és que aquest és un fenomen que depèn de les condicions de funcionament de l'articulació, és a dir, de la velocitat de gir i de les reaccions d'enllaç; i el software utilitzat per a la simulació del mecanisme no permet tractar aquesta dependència amb precisió.

És posteriorment, al analitzar en detall el comportament de tot l'accionament, quan s'ha tingut en compte el fregament provocat pels rodaments de l'articulació, doncs aquest és un component més dels que constitueixen les resistències passives de l'accionament. Cal recordar que és precisament un objectiu d'aquesta tesi arribar a obtenir un model que representi adequadament les resistències passives a l'accionament i l'articulació.