

TREBALL DE RECERCA



EL ROBOT CAMINADOR

*Estudi, disseny i construcció d'un robot dodecàpode
mogut pel mecanisme de Theo Jansen*






PSEUDÒNIM
TEÒFIL ROMANÍ






CURS
2n BATX 2015-2016

6 d'octubre de 2015

«L'enginy potser és al talent el que l'instint a la raó». –Jules
Renard

ÍNDIX DE CONTINGUTS

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓ..... | 6 |
| METODOLOGIA | 6 |
| CONSIDERACIONS GENERALS | 7 |
| AGRAÏMENTS..... | 7 |
| OBJECTIUS, RECURSOS I JUSTIFICACIÓ | 8 |
| 1. L'ART CINÈTIC ..... | 10 |
| 1.1 GEORGE RICKEY..... | 11 |
| 1.2 THEO JANSEN | 12 |
| 2. THEO JANSEN I EL PROJECTE STRANDBEEST ..... | 13 |
| 2.1 ELS INICIS..... | 13 |
| 2.1.1 La plataforma voladora o OVNI..... | 14 |
| 2.1.2 La màquina de pintar..... | 14 |
| 2.2 STRANDBEEST I L'ARRIBADA A LA FAMA | 15 |
| 2.2.1 L'evolució dels Animaris..... | 15 |
| 2.2.2 Els materials utilitzats..... | 16 |
| 2.2.3 El vent com a generador del moviment..... | 16 |
| 2.2.4 La supervivència a través de la intel·ligència artificial..... | 17 |
| 2.2.5 Obres de Theo Jansen..... | 17 |
| 3. CLASSIFICACIÓ DEL MECANISME..... | 19 |
| 3.1 SEGONS LA COMPLEXITAT EN EL MANEIG DEL MECANISME | 19 |
| 3.2 SEGONS EL MODEL BIOLÒGIC QUE ES POT SEGUIR O COPIAR..... | 19 |
| 3.3 SEGONS SI TENEN POTES O RODES..... | 20 |
| 4. DESCRIPCIÓ DEL MECANISME | 21 |
| 4.1 SIMPLIFICACIÓ DEL MECANISME | 22 |
| 5. ELS ROBOTS CAMINADORS | 23 |
| 6. ESTUDI DEL MECANISME  | 25 |
| 6.1 GEOMETRIA DEL MECANISME..... | 25 |
| 6.2 MOVIMENT DEL MECANISME | 26 |
| 6.2.1 Primera maqueta | 28 |
| 6.2.2 Segona maqueta | 30 |
| 6.2.3 Estudi digital..... | 32 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.2.3.1 | L'alçada de pas..... | 35 |
| 6.2.3.2 | El diàmetre de pas..... | 36 |
| 6.2.3.3 | L'efectivitat de la trajectòria..... | 37 |
| 6.2.3.4 | El nombre de potes..... | 39 |
| 6.2.4 | <i>Decisió de les mides.....</i> | <i>40</i> |
| 7. | DISSENY DEL ROBOT  | 41 |
| 7.1 | PRIMERS ESBOSOS..... | 41 |
| 7.2 | DISSENY 2D..... | 42 |
| 7.3 | DISSENY 3D..... | 44 |
| 7.3.1 | <i>Disseny de les peces del mecanisme</i> | <i>47</i> |
| 7.3.1.1 | Primer disseny | 47 |
| 7.3.1.2 | Segon disseny..... | 48 |
| 7.3.1 | <i>Disseny dels elements de suport.....</i> | <i>48</i> |
| 7.3.2 | <i>Disseny de les peces per a la transmissió de moviment.....</i> | <i>49</i> |
| 7.3.3 | <i>Unió dels diversos elements.....</i> | <i>50</i> |
| 8. | IMPRESSIÓ DEL MECANISME  | 51 |
| 8.1 | LA IMPRESSIÓ 3D..... | 51 |
| 8.1.1 | <i>Impressió per FDM.....</i> | <i>51</i> |
| 8.1.2 | <i>Procés d'impressió.....</i> | <i>52</i> |
| 8.2 | IMPRESSIÓ DEL DISSENY..... | 53 |
| 8.2.1 | <i>Problemes d'impressió.....</i> | <i>55</i> |
| 8.2.2 | <i>Peces obtingudes.....</i> | <i>56</i> |
| 9. | MUNTATGE  | 58 |
| 9.1 | NORMALITZACIÓ I MÈTRICA EN MATERIAL DE FERRETERIA | 58 |
| 9.2 | EINES I MATERIALS UTILITZATS..... | 59 |
| 9.3 | PROCEDIMENT SEGUIT | 59 |
| 10. | PROGRAMACIÓ..... | 61 |
| 11. | CONJUNT DE PROVES  | 63 |
| 12. | ROBOT DEFINITIU  | 64 |
| 12.1 | ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES..... | 64 |
| 12.2 | PRESSUPOST..... | 65 |
| 12.2.1 | <i>Impressió 3D.....</i> | <i>65</i> |
| 12.2.2 | <i>Ferreteria.....</i> | <i>66</i> |

| | | |
|--|--------------------------------|----|
| 12.2.3 | Kit Picaxe Imagina3dBot+ | 66 |
| 12.2.4 | Preu total..... | 66 |
| 13. POSSIBLES APLICACIONS..... | | 67 |
| CONCLUSIONS | | 68 |
| ÍNDIX DE FIGURES, TAULES I GRÀFIQUES | | 69 |
| REFERÈNCIES | | 74 |
| ANNEX I: PLÀNOLS..... | | 77 |
| ANNEX II: BLOG | | 78 |

INTRODUCCIÓ

Avui en dia veiem les impressores 3D i el software de disseny per ordinador a tot arreu. Qualsevol peça, prototip, pròtesi o idea que sigui difícil de realitzar s'imprimeix en 3D. És un món poc explorat per tots nosaltres però que segurament serà un dels temes de conversa en els propers anys. L'art i sobretot l'art basat en enginyeria també s'estan convertint en nous *trending topics* de l'actualitat. En aquest treball s'hi combinen art, enginyeria i impressió 3D per fer una síntesi de totes elles que culmina en un robot caminador mogut pel mecanisme d'un dels màxims exponents de l'art cinètic.

En el treball hi trobareu el recull d'experiències i el procediment que he seguit, des de la cerca d'informació fins a la programació i testos finals, per aconseguir un robot imprès amb tecnologia 3D que camina gràcies al mecanisme de Theo Jansen.

El tema escollit me'l va suggerir el tutor d'aquest treball. Va ser ell qui em va presentar Theo Jansen. Vaig quedar-ne bastant sorprès i fascinat i tot investigant a què es dedica i quina filosofia dóna a les seves obres, vaig decidir encaminar-me cap a l'aplicació del mecanisme de l'artista en un robot dissenyat expressament i imprès en 3D.

Amb el procés de creació de *El robot caminador* pretenc tenir contacte amb software poc usat en el meu dia a dia, com el GeoGebra –de simulació i càlcul matemàtic– o el SolidWorks –de disseny assistit per ordinador–, conèixer el món de les impressores 3D i fer un petit tastet de l'àmbit de la programació.

També tinc la intenció d'aportar el meu granet de sorra al gran món dels projectes col·laboratius –conegut com a comunitat *maker*– posant tot el material obtingut a l'abast de tothom a través d'Internet.


Metodologia

El treball s'ha dut a terme en diverses etapes:

Primerament, a la part teòrica, es realitza una recerca de la informació relacionada amb Theo Jansen, el seu mecanisme i la filosofia que aplica en cadascuna de les seves obres.

A continuació, a la part pràctica, s'estudia el mecanisme i es determinen les mides idònies pel seu moviment; es dissenya el robot, s'imprimeix en 3D i es remata tota la feina amb el muntatge i la posterior programació.

Consideracions generals

- Un símbol  indica que es complementa el material del capítol a l'annex II.
- Les notes de peu de pàgina que defineixen la informació sobre el programari només apareixen quan es tracta del software utilitzat durant el treball.

Agraïments

Aquest treball no hagués estat possible sense la col·laboració de diverses persones, a qui vull agrair la paciència i dedicació que m'han prestat i sobretot la motivació que moltes d'elles m'han transmès per aconseguir el meu propòsit.

Agrair-te a tu, A., amic i aficionat a la impressió 3D, el coneixement aportat en matèria de disseny per ordinador. També, la teva ajuda a l'hora d'imprimir la gran majoria de les peces.

Moltes gràcies també a tu, J., director d'Innova Didàctic, per imprimir-me els elements més complicats i posar-hi la dedicació que demanaven.

També gràcies a tu, E., professor de l'Institut i tutor d'aquest treball, per guiar-me i aconsellar-me en tot moment, i sobretot per donar-me la idea inicial de tot aquest projecte.

I finalment agrair-vos a vosaltres amics, companys i sobretot pares i germana la paciència que heu tingut, les eines que m'heu ofert i sobretot les ganes que m'heu aportat perquè pogués fer-lo una mica millor.

A tots vosaltres, moltes gràcies!

OBJECTIUS, RECURSOS I JUSTIFICACIÓ

L'objectiu pràctic del treball és confeccionar un robot imprès en 3D que camina gràcies a l'adaptació del mecanisme de Theo Jansen.

Per dur a terme el projecte es disposa d'un kit de robòtica de Picaxe anomenat Imagina3dBot. No es té a l'abast, però, cap impressora 3D, fet que dificulta bastant l'assoliment de l'objectiu proposat.

Les especificacions bàsiques que es vol que tingui el robot abans d'iniciar el projecte són:

- Que sigui capaç de caminar sobre terrenys irregulars.
- Que s'adapti a les mides del kit d'Imagina3dBot.
- Que pugui ser imprès en 3D.
- Que sigui controlat amb algun dispositiu sense fils.
- Que disposi de, com màxim, un grau de llibertat per pota.

Aquest robot serà dissenyat amb la intenció que es pugi aplicar en l'àmbit recreatiu i didàctic, però mai en l'industrial degut a la poca resistència dels materials utilitzats.

MARC TEÒRIC

1. L'ART CINÈTIC

L'art cinètic és un corrent artístic on les obres tenen o semblen tenir moviment. Va tenir el seu màxim



Fig. 1.1: Roue de bicyclette (1913) de Marcel Duchamp. FONT: C. Pompidou.

èxit durant la dècada dels 60, tot i que les primeres obres cinètiques daten del 1910 durant el moviment futurista, amb diverses composicions de Marcel Duchamp. Està majoritàriament representat en el camp de l'escultura, ja que les creacions escultòriques poden tenir components mòbils. També en trobem exemples en el món de la pintura, on es juga amb les il·lusions òptiques o la impossibilitat del nostre ull de mirar simultàniament superfícies de colors extremament contrastats.

L'escultura cinètica, en la qual es centra aquest treball, es caracteritza per tenir com a objectiu principal la recerca del moviment, que per estrany que sembli, és real i no pas virtual –és a dir, les escultures es mouen–. També per tenir la major part de les obres representades en el pla tridimensional; per utilitzar infinitat de recursos, tals com l'aigua, el vent, la llum, els motors o l'electromagnetisme per a generar moviment i; finalment, per buscar la integració entre l'obra i l'espectador, fent que aquesta existeixi en la ment i l'ull de l'espectador i no només en el lloc d'exposició.

Dins de l'escultura cinètica, segons com es produeix el moviment –o, en el seu defecte, la sensació de moviment–, podem dividir les obres en:

- Estables: els elements són fixes i l'espectador ha de rodejar-los per a percebre el moviment i concebre per si mateix una lectura de seqüència. En trobem l'exemple en l'artista veneçolà Jesús Soto.

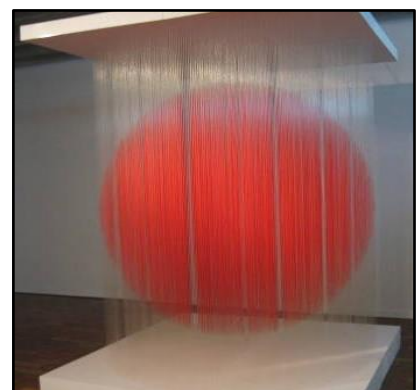


Fig. 1.2: La esfera Japón (1988) de Jesús Soto. FONT: venezuelatuya.com.

- Mòbils: es produeix un moviment real gràcies a alguns dels recursos que s'han comentat prèviament. L'escultura té, per tant, energia cinètica. Dos dels màxims exponent són George Rickey i Theo Jansen.

- Penetrables: normalment l'espectador ha d'entrar dins l'obra per poder-la percebre a mesura que la va recorrent i poder imaginar-se l'espai on està situat. Un dels representants més populars torna a ser, de nou, Jesús Soto, tot i que també és molt conegut l'artista nord-americà Richard Serra.



Fig. 1.3: The Matter of Time (1997) de Richard Serra al Guggenheim Bilbao. FONT: Minimalismn in Design.

1.1 George Rickey

George Rickey (EUA, 1907-2002), com ja s'ha comentat anteriorment, és un dels màxims exponents



Fig. 1.4: George Rickey ajustant el moviment d'una maqueta. FONT: Universitat de Notre Dame.

de l'art cinètic mòbil. Va iniciar-se al món de l'escultura d'una forma força curiosa: tot experimentant amb el metall i el filferro durant la Segona Guerra Mundial. Durant aquella època, tenia accés i contacte diari amb eines industrials de reparació d'avions.

Les seves primeres obres són clarament influenciades per la figura de l'artista –també nord-americà– Alexander Calder, tot i que Rickey, a diferència de Calder, acostuma a donar més importància al moviment de les obres que a la seva forma. Per aquest motiu les escultures en si són molt

simples: la gran majoria són rectangles, cubs i trapezis. Algunes, però, s'inspiren en la realitat imitant flors i plantes o fent al·lusió a l'astronomia.

L'espai i els elements exteriors són molt importants en totes les seves creacions perquè sense ells cap escultura gaudiria del moviment que li és essencial. Rickey utilitza la força dels corrents d'aire per generar aquesta agitació tan característica en les seves obres. Uns corrents que són creats de forma artificial per ventiladors –si l'exposició és a l'interior– o que provenen directament del vent –si la mostra té lloc a l'exterior–.

Durant el treball va ser possible visitar una exposició temporal d'aquest magnífic escultor a la galeria Marlborough de Barcelona. La mostra, que tenia lloc a l'interior, havia estat muntada pel seu fill, amb la intenció que els corrents d'aire provinents dels ventiladors instal·lats a les cantonades generessin el moviment de les escultures. Per desgràcia, estava prohibit realitzar fotografies en qualsevol de les tretze obres exposades, però algunes de les que s'hi podien veure eren les següents:

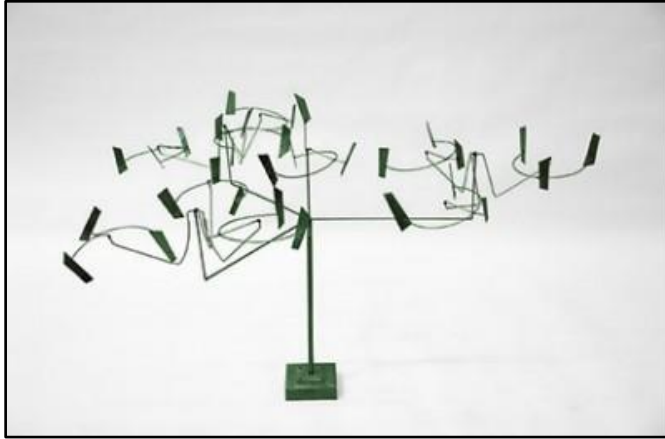


Fig. 1.5: Nebula III (1989) de George Rickey. Acer inoxidable. Peça única. 61x96,5x91,5 cm. FONT: Galeria Marlborough.



Fig. 1.6: Four Rectangles One Square (1979) de George Rickey. Acer inoxidable. 3 peces. 94x94x20,3 cm. FONT: Galeria Marlborough.



Fig. 1.7: Column of Six Cubes with Gimbal (1996) de George Rickey. Acer inoxidable i policromia. Peça única. 210,8x81,3x81,3 cm. FONT: Galeria Marlborough.



Fig. 1.8: Conversation-Mondrian Meets Malevich (1990) de George Rickey. Acer inoxidable. 3 peces. 76,2x24,1x30,3 cm. FONT: Galeria Marlborough.



Fig. 1.9: One Line Up with Gimbal (1990) de George Rickey. Acer inoxidable. Peça única. 223,5x25,41x25,4 cm. FONT: Galeria Marlborough.

1.2 Theo Jansen

Theo Jansen, de qui es parlarà extensament en el següent capítol, és un escultor d'origen holandès i, com George Rickey, és un dels màxims exponents de l'escultura cinètica mòbil.

2. THEO JANSEN I EL PROJECTE STRANDBEEST

Theo Jansen, ja presentat anteriorment, és un artista i escultor cinètic d'origen holandès, nascut a



Fig. 2.1: Theo Jansen. FONT: Flickr.

Scheveningen l'any 1948.

Jansen es dedica a desenvolupar els *Animaris* (animals de platja) tot imitant esquelets d'animals ja existents i els fa moure pràcticament de forma autònoma gràcies a un mecanisme que ha dissenyat, estudiat i perfeccionat.

L'artista es va donar a conèixer a través d'un anunci de la marca alemanya d'automòbils BMW i, com ell

mateix hi deia, transporta, en cada una de les seves creacions, l'enginyeria en la basant més artística:

«The walls between the art and the engineering exist only in our minds»¹

(«Els murs entre l'art i l'enginyeria només existeixen en la nostra ment»)

2.1 Els inicis

Des de ben petit Jansen ja mostrava una habilitat especial per l'art i la ciència, fet que el va portar a estudiar física a la Universitat de Delft.

A la Universitat va prendre la pintura i el dibuix com a afició i s'hi va dedicar durant gairebé cinc anys. Pràcticament ningú el coneix en aquesta vessant perquè malauradament no hi va destacar.



Fig. 2.2: Theo Jansen construint una de les seves "criatures". FONT: The New York Times.

Immers en la seva etapa universitària va estar involucrat en diversos projectes que combinaven art i tecnologia, incloent una màquina de pintar i una plataforma voladora –similar a un globus meteorològic–, que li van descobrir el món artístic que anys després l'acabaria meravellant.

¹ Cita extreta de: CarCommercialsTV (2013). *BMW Car Commercial Theo Jansen Kinetic Sculpture* [Vídeo]. 3 juliol 2015. Recuperat de <https://www.youtube.com/watch?v=IXwSwQ2HKZg>, (minut 0:46).

2.1.1 La plataforma voladora o OVNI

El projecte de la plataforma va iniciar-se l'any 1979. Consistia a confeccionar un objecte volador a



Fig. 2.3: Plataforma voladora. FONT: Strandbeest.

partir de tubs de PVC (degut al seu baix cost) que fos elevat gràcies a l'heli introduït dins el plat de quatre metres de diàmetre que conformava la seva estructura.

L'objecte va ser deixat anar a Delft l'any següent. Va generar cert desordre en la població i la policia perquè ningú podia identificar-ne la seva naturalesa

—per això s'hi referien com a OVNI—. Després d'uns minuts d'haver-se enlairat va desaparèixer entre els núvols i, tot i que no se'n té una certesa absoluta, es creu que va acabar aterrant a Bèlgica.

L'any següent Jansen va repetir la mateixa operació, però aquest cop la plataforma va sobrevolar París. Malauradament tampoc es va acabar de saber amb precisió quin havia estat el lloc d'aterratge de l'aparell.

2.1.2 La màquina de pintar

Entre l'any 1984 i l'any 1986, Theo Jansen es va dedicar a desenvolupar una màquina de pintar a la Universitat de Delft.

No es tractava d'una màquina qualsevol, sinó que constava d'una pistola polvoritzadora que es desplaçava per un marc de fusta (per tant, per dos eixos; x i y) i que estava controlada per un sensor fotosensible. Aquest sensor feia que la màquina pintés en absència de llum i que, per contra, s'aturés quan en detectava. Com que el sensor es trobava situat just al final d'un tub, només



Fig. 2.4: Màquina de pintar. FONT: Strandbeest.

percebia la llum que per allà entrava. D'aquesta manera es podia aconseguir una il·lustració bastant precisa i fidel a la realitat.

Les imatges obtingudes, pintades directament a la paret o al suport que s'hagués interposat entre aquesta i la pistola, eren similars a fotografies en blanc i negre, però sense cap mena de perspectiva, ja que l'aparell només permetia reproduir la silueta de la persona o objecte que es trobés davant seu.

2.2 *Strandbeest* i l'arribada a la fama

A partir del 1990 Theo Jansen va començar a desenvolupar exemples de vida artificial capaços de caminar i els va incloure dins el projecte anomenat *Strandbeest* (en neerlandès: *strand* = platja; *beest* = bèstia, criatura).



Fig. 2.5: Exposició de Theo Jansen al Museu d'Art d'Ōita, al Japó.
FONT: The Funambulist.

Inicialment el projecte era integrat per poques criatures. Més endavant, però, es va convertir en tot un conjunt d'éssers capaços d'interactuar amb l'ambient i fins i tot de sobreviure-hi. Explica el mateix Jansen en una exposició a TED² de l'any 2007:

*«amb el pas del temps, aquests esquelets s'han tornat considerablement millors en sobreviure a elements com les tempestes i l'aigua, fet que m'ha portat a decidir d'alliberar-los en ramats a les platges, de manera que puguin viure la seva pròpia vida».*³

Anys després d'haver iniciat aquest projecte, Theo Jansen va començar a ser conegut internacionalment per la dimensió artística de les seves creacions. Fins al moment ha exposat en ciutats com Tokyo, Seul o Ōita, al Japó, on van assistir-hi més de 140.000 persones.

2.2.1 L'evolució dels *Animaris*

Els *Animaris* no només són capaços de sobreviure en terrenys hostils com les platges neerlandeses, sinó que també evolucionen i modifiquen la seva morfologia per afavorir aquesta supervivència.

²Technology, Entertainment and Design és una societat de responsabilitat limitada estatunidenca que organitza un conjunt de conferències seguint el seu lema *ideas worth spreading* ("idees que val la pena difondre").

³ Cita extreta de TED Conferences, LLC. (2007). *Theo Jansen: My creations, a new form of life* [Vídeo]. 11 juliol 2015. Recuperat de http://www.ted.com/talks/theo_jansen_creates_new_creatures (minut 0:38).

Theo Jansen utilitza una espècie d'algorisme⁴ genètic per a permetre aquesta evolució. Aquest conjunt de regles consta de diversos criteris. El més bàsic, però, es regeix per la supervivència dels éssers a la platja, entre les fronteres de sorra humida propera al mar i de sorra seca al límit amb les dunes. Els dissenys que realitzin la tasca en una simulació –tant física, com virtual– amb major efectivitat seran els que s'utilitzaran en les construccions finals.

Gràcies a aquesta evolució han aparegut dissenys més complexes: amb potes articulades com les dels crancs, amb sistemes perquè el vent no els faci malbé o fins i tot amb aletes que els permeten el moviment aprofitant un suau corrent d'aire.

2.2.2 Els materials utilitzats

Theo Jansen utilitza majoritàriament tubs de PVC⁵ per conductes elèctrics com a material principal en les seves obres. Per la unió entre els tubs recorre, sovint, a brides de plàstic, tot i que més d'un cop ha fet servir cargols i femelles o els mateixos conductes de clorur de polivinil.

La curiositat es troba en el color dels tubs: podria semblar que són grocs per criteri de l'autor per donar un toc diferent a les seves construccions, però és simplement el color que s'utilitza al seu país per aquest tipus de canonades.

En alguns dissenys més avançats també fa servir ampolles de llimonada reutilitzades i tubs de plàstic, que serveixen com a magatzem d'aire en cas d'absència de vent.

2.2.3 El vent com a generador del moviment

Per poder moure els diversos *Animaris* Theo Jansen utilitza, com a generador principal del moviment, la força del vent. Aquesta és aprofitada per les aletes que incorporen els diferents dissenys i transmesa a l'eix OA⁶, que posa en marxa tot el conjunt.

Si es té en compte aquesta característica, els “animals” de Jansen només podrien moure's els dies ventosos, sense tenir la possibilitat de fer-ho durant tots aquells on el vent no fos prou intens com per

⁴ Segons el DIEC: “Algorisme. m. [IN] [MT] Conjunt de regles per a resoldre un problema en un nombre finit de passos”.

⁵ El clorur de polivinil és una resina sintètica obtinguda per polimerització del clorur de vinil utilitzada abastament pel sector de la construcció.

⁶ Veure la descripció del mecanisme al capítol 4.

activar el mecanisme. Per solucionar aquest possible problema l'artista neerlandès incorpora una sèrie d'ampolles de llimonada que s'omplen d'aire durant els dies ventosos.

Quan el vent escasseja, l'aire emmagatzemat a pressió dins les ampolles activa un seguit de pistons –fabricats també amb tubs de PVC– que posen en marxa tot el mecanisme.



Fig. 2.6: Animaris Siamesis i les seves aletes. FONT: Flickr.

2.2.4 La supervivència a través de la intel·ligència artificial

Els éssers de Theo Jansen tenen el seu lloc de residència a les platges d'Holanda. Al no estar guiats per



Fig. 2.7: Theo Jansen amb el control binari a les mans. FONT: Flickr.

cap sistema d'orientació fàcilment podrien acabar submergits dins l'aigua. Per minimitzar aquest risc l'artista ha afegit un sistema de control binari a tots els seus *Animaris*.

El sistema consisteix en una sèrie de tubs i pistons. Quan un tub es submergeix dins l'aigua canvia la pressió del pistó i en fa variar la seva posició, passant-lo de la 1 a la 0, o viceversa. Si més d'un pistó modifica la seva posició, s'inverteix el sentit de rotació de l'eix OA i es permet que el conjunt retrocedeixi i torni a la

sorra de la platja.

2.2.5 Obres de Theo Jansen

A continuació es mostren, per ordre cronològic, diverses obres que l'escultor neerlandès ha realitzat al llarg de la seva vida. L'escultura anomenada *Animaris Rhinoceros* és l'única que no utilitza només tubs de PVC per la seva estructura exterior.



Fig. 2.8: Animaris Currens Ventosa (1993) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.



Fig. 2.9: Animaris Sabulosa (1994) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.

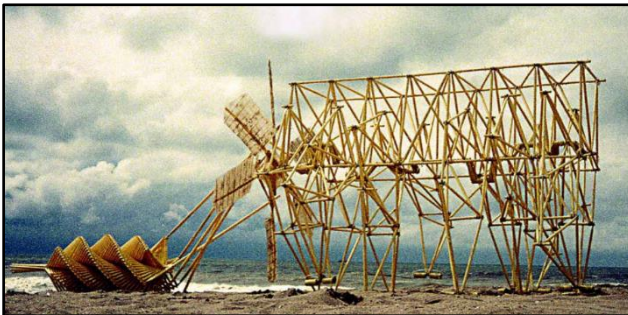


Fig. 2.10: Animaris Ancore (1997) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.



Fig. 2.11: Animaris Rhinoceros (2004) de Theo Jansen. Plàstic i fusta. Peça única. FONT: Flickr.



Fig. 2.12: Animaris Percipiere Recutus (2005) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.



Fig. 2.13: Animaris Umerus (2009) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.



Fig. 2.14: Animaris Gubernare (2011) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.

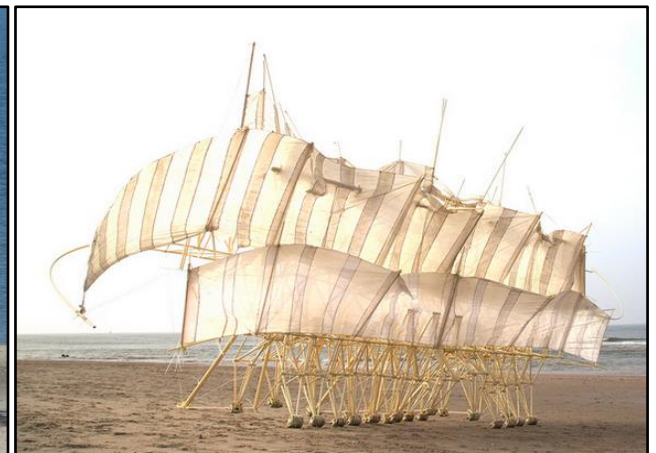


Fig. 2.15: Animaris Apodiacula (2013) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. FONT: Flickr.

3. CLASSIFICACIÓ DEL MECANISME

Els mecanismes es poden classificar de diverses maneres:

3.1 Segons la complexitat en el maneig del mecanisme

Classificar els mecanismes segons la seva complexitat és el mateix que classificar-los segons els graus de llibertat.

Cada grau de llibertat necessita un motor o actuador que l'activi. Els més simples, com és el cas del de Theo Jansen, són els que només necessiten un motor poder-se activar.

La gran majoria dels que s'integren en el grup dels mecanismes amb un grau de llibertat es basen en el de

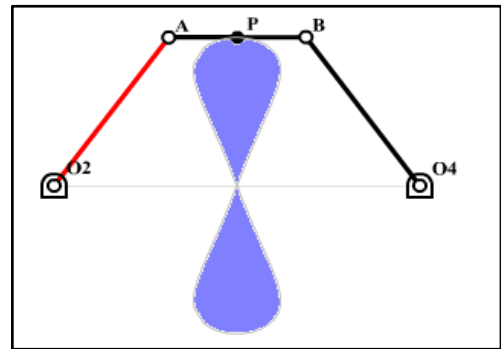


Fig. 3.1: Mecanisme de James Watt. FONT: UPC.

James Watt, al qual s'hi afegeixen barres amb la finalitat de variar-ne la trajectòria, però sense sumar-hi, per això, cap grau de llibertat.

3.2 Segons el model biològic que es pot seguir o copiar

Cada animal que coneixem es mou de manera característica. El món de l'enginyeria s'ha dedicat a intentar reproduir en diverses màquines els mecanismes de moviment dels animals i poder aprofitar, doncs, els avantatges que cada un d'ells ofereix.

Actualment hi ha infinitat de robots que recorden el món biològic per la manera de moure's, des de la



Fig. 3.2: RIMHO 2. FONT: CSIC.

imitació del cuc o de l'aranya fins a la de l'ésser humà –amb el conegut ASIMO del fabricant japonès Honda–. Molts són simples prototips, que algun dia s'acabaran convertint en màquines que realitzin tasques diverses. D'altres, com el model aranya, tenen una utilitat bastant important a dia d'avui. El RIMHO2, per exemple, que segueix el

model aranya, va ser concebut per l'Institut d'Automàtica Industrial-CSIC amb la finalitat de detectar mines antipersona gràcies al seu contacte puntual amb el terra.

3.3 Segons si tenen potes o rodes

Una forma fàcil de classificar els mecanismes és segons si disposen de potes o rodes per poder-se desplaçar.

Ambdós sistemes presenten diversos pros i contres: les rodes tenen molt bones prestacions en terrenys preparats, mentre que les potes tenen gran efectivitat en sols irregulars o amb molta inclinació. Pel que fa a la velocitat de translació, queda reduïda dràsticament en els mecanismes amb potes per culpa de les forces inercials presents en les que no toquen al terra; problema que no es troba en els artefactes moguts per rodes.

El mecanisme de Theo Jansen, que és el que s'ha utilitzat durant el treball, es pot classificar dins el grup dels mecanismes amb un grau de llibertat, que copien el model biològic imitant l'extremitat d'un animal i que utilitza potes per poder-se moure.

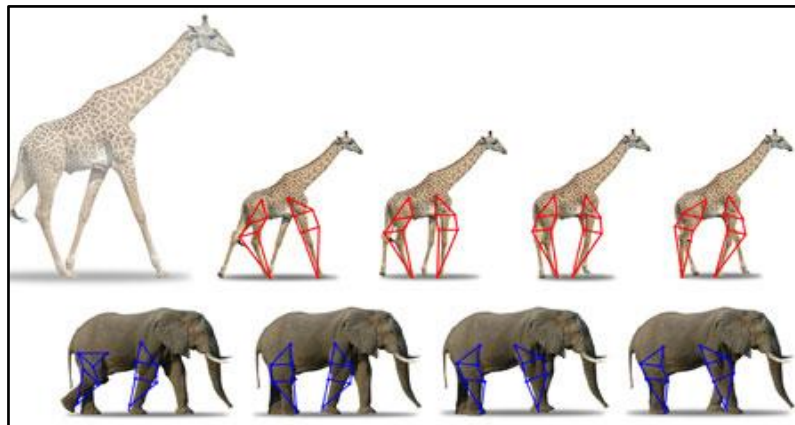


Fig. 3.3: Model biològic del mecanisme de Theo Jansen. FONT:Wikidot.com.

Com es pot veure a la imatge, el model de Jansen imita el moviment de la pota d'un animal de grans dimensions, com pot ser un elefant o una girafa, perquè s'articula d'una manera bastant similar. La tibia i el peroné conformen el triangle inferior, la unió fèmur-genoll és el quadrilàter central i la inserció del fèmur al cos acaba dibuixant el triangle superior.

4. DESCRIPCIÓ DEL MECANISME

El mecanisme va ser dissenyat per Theo Jansen just abans de començar a treballar amb les seves



Fig. 4.1: Primera maqueta de Theo Jansen. FONT: UPC.

primeres creacions. Gràcies a ell va aconseguir simular d'una forma senzilla el caminar de la pota d'un animal real. Com que el va utilitzar en els seus *Animaris*, va poder reforçar, encara més, la idea que tenen vida pròpia dins el món natural.

L'artefacte també s'inclou al grup dels anomenats mecanismes cinètics. En aquests, l'energia cinètica que aporten les potes que no es recolzen al terra és molt important i pràcticament capaç de moure el conjunt sense haver d'utilitzar cap font d'energia

externa. Per això les creacions de Theo Jansen tendrien a moure's per inèrcia gairebé infinitament sinó es veiessin afectades per les diverses forces de fregament que hi interactuen: ja siguin les que hi ha entre les mateixes unions, les que tenen lloc amb el terra o fins i tot les que provoca l'aire o el vent.

El mecanisme consta de dotze sòlids: deu barres, una roda o biela i un suport o bancada. Si s'agrupen els diversos elements pels llocs d'unió s'obtenen vuit punts diferents: dos són binaris (O i G); és a dir, s'hi uneixen dos sòlids; quatre són ternaris (A, B, D i F) i dos són quaternaris (C i E); si es tenen en compte tots els elements que conformen la pota dissenyada per Jansen.

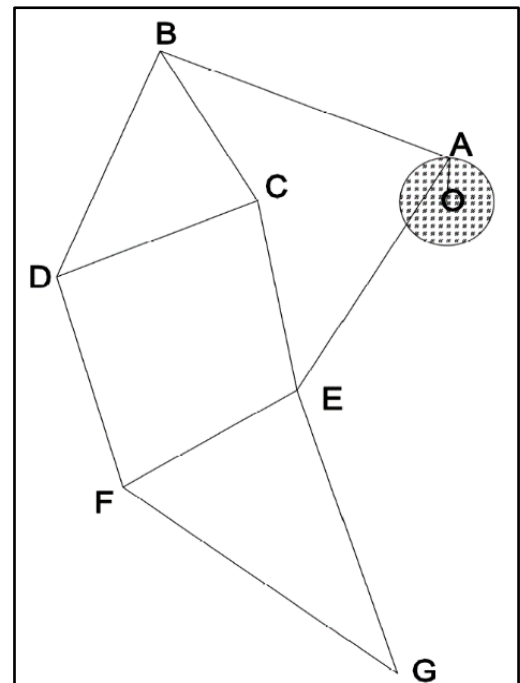


Fig. 4.2: Esquema del mecanisme inicial.

4.1 Simplificació del mecanisme

Si s'observa el mecanisme es pot veure com els punts BDC i EFG formen triangles rígids que no es deformen amb el pas del temps. Tenint en compte aquesta característica es va optar per unir-los. D'aquesta manera s'aconseguia simplificar el mecanisme, reduir el gruix de l'estructura resultant i estilitzar el disseny.

La unió es va dur a terme mitjançant la transformació del conjunt dels sòlids en triangles. Amb aquest

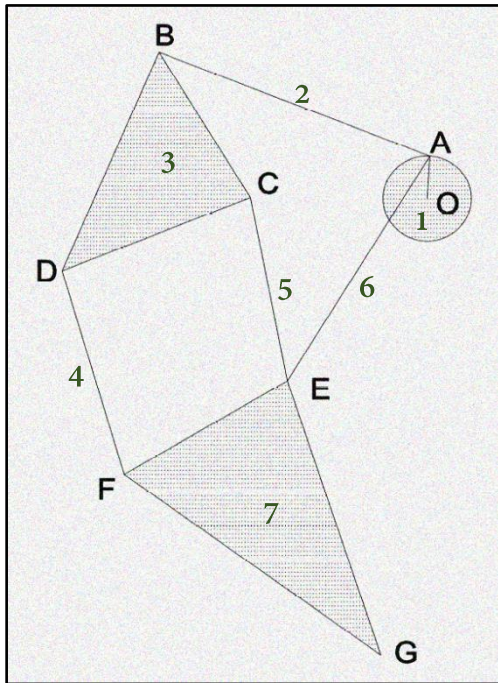


Fig. 4.3: Esquema del mecanisme simplificat. BCD i EFG passen a ser conjunts sòlids.

petit canvi es passa de tenir vuit punts d'unió a tenir-ne només set, ja que el punt G queda integrat dins el sòlid EFG. La composició final d'aquests punts queda repartida d'aquesta manera: quatre punts són binaris (B, D, F i O) i tres punts són ternaris (A, E i C).

Aquesta simplificació podria significar un augment en el pes del mecanisme, ja que es passa de tenir tres barres que formen cadascun dels triangles a tenir elements completament sòlids. Per resoldre aquesta problemàtica es va optar per buidar l'interior dels triangles, com s'explicarà al capítol 7.

En la següent taula queda resumida la simplificació del mecanisme:

| Sòlid | Nº de punts d'unió | Punts d'unió |
|---------|--------------------|--------------|
| Bancada | 2 | O-C |
| 1 | 2 | O-A |
| 2 | 2 | A-B |
| 3 | 3 | B-C-D |
| 4 | 2 | D-F |
| 5 | 2 | C-E |
| 6 | 2 | A-E |
| 7 | 2 | E-F-(G) |

Taula 4.1: Resum de les unions del mecanisme simplificat.
FONT: UPC. Elaboració pròpia.

5. ELS ROBOTS CAMINADORS

Aquest tipus de robots, bastant singular encara a dia d'avui, va començar a desenvolupar-se cap al 1870 amb un mecanisme dissenyat pel matemàtic rus Pafnuti Chebyshev. En aquell moment eren simples joguines que volien imitar les formes de locomoció de la naturalesa.

Cap al segle XIX van aparèixer les primeres patents de robots caminadors, com el cavall mecànic de L-A Rygg (1893) o el vehicle de Bechtolsheim (1913). Amb el perfeccionament del motor d'explosió es va perdre l'interès per aquest tipus de robots ja que les rodes presentaven una funcionalitat molt superior en aquell moment.



Fig. 5.1: Màquina Plustech, de Plustech Oy (2006). Realitza tasques forestals. FONT:UPC.

Tot i això, moure's mitjançant potes ofereix diversos avantatges respecte la forma tradicional: no es necessita un terreny continu per desplaçar-se, es poden sobrepassar obstacles d'altura considerable, s'aconsegueix major velocitat en terrenys molt irregulars, es causa menys dany a l'entorn i s'obté més rendiment energètic comparat amb vehicles de rodes de mida similar.

Malauradament, es va haver d'esperar que el desenvolupament tecnològic madurés per a poder construir màquines més complexes que es desplaressin mitjançant potes. L'any 1968, amb la creació del General Electric Walking Truck, es van començar a construir un nombre important de robots caminadors.

Actualment la majoria són destintats a tasques de manteniment de vaixells o conductes de cablejat elèctric o d'aigües fecals, però també n'hi ha algun que s'utilitza per a tasques forestals.

Amb el mecanisme de Theo Jansen encara no s'ha confeccionat cap robot que realitzi alguna feina específica de forma eficaç. Avui dia predominen els que fan servir diversos graus de llibertat per mitjà de pistons hidràulics, que deixen obsolets els més bàsics i simples, com el que s'ha utilitzat durant aquest treball.

MARC PRÀCTIC

6. ESTUDI DEL MECANISME

6.1 Geometria del mecanisme

Abans de començar a estudiar el mecanisme i el seu moviment es va voler passar per l'estudi de la seva geometria.

Si es mira l'esquema del mecanisme de forma ràpida sembla que estigui format per un conjunt de barres amb una llargada determinada, i realment és així. Quan es vol dibuixar, però, s'han de trobar altres recursos, ja que no es coneix l'angle que conformen les barres entre sí. Per determinar com es podia dibuixar tot el conjunt es va treballar amb regla i compàs sobre paper i aquests en són els resultats:

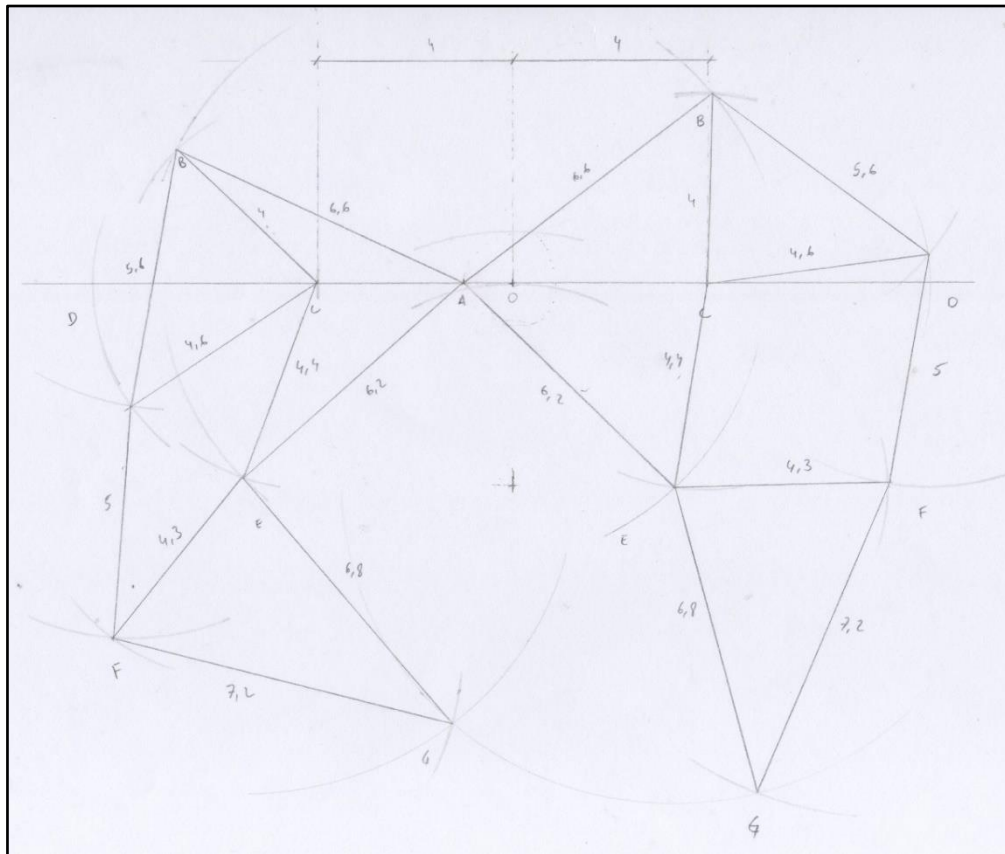


Fig. 6.1: Dibuix a llapis del mecanisme 2 a escala 1:50, format per dues potes.

Com es pot veure, l'únic recurs útil per poder dibuixar el mecanisme sense necessitar els angles que es formen entre sòlids és la circumferència. Per obtenir el dibuix que es veu a la imatge es van traçar arcs de circumferència amb el radi desitjat des de cadascun dels punts i es van unir les interseccions que s'anaven creant entre ells per mitjà de rectes. El dibuix en qüestió varia segons l'angle de rotació del punt A respecte del punt O. En aquest cas són 180 graus des de la horitzontal.

6.2 Moviment del mecanisme

A continuació es va començar l'estudi del moviment realitzat pel mecanisme de Theo Jansen. L'objectiu es centrava en determinar quines eren les mides idònies per tal d'aconseguir que l'alçada de pas del punt G del conjunt fos la més alta possible. El punt G, com es pot veure a la imatge, és l'única que té contacte amb el terra i per tant, és el que ens guia a l'hora de conèixer l'alçada dels objectes que la plataforma és capaç de superar.

Per fer-ho, es va agafar com a referència el projecte de final de carrera de la titulació d'enginyeria industrial de la UPC realitzat per l'alumne Nabil Khamashta Llorens i titulat: *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares*. En aquest treball es determinaven les mides idònies que havia de tenir el mecanisme si es volia aconseguir l'alçada de pas més elevada possible sense perdre, per això, efectivitat en el moviment.

Aquestes mides, com s'explicarà més endavant, permeten poques modificacions perquè, si es varien de forma significativa, la trajectòria del punt G acaba

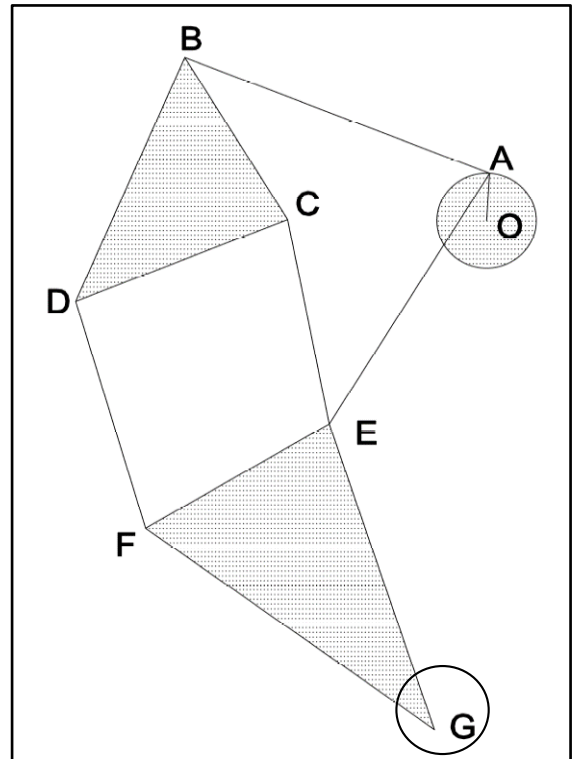


Fig. 6.2: Esquema del mecanisme i punt G destacat.

essent errònia. Per això el mateix Jansen els dona a conèixer com els “nombres sagrats” del seu mecanisme.

Seguint les mides que es detallaven al treball de la UPC (pàg. M40) i agafant les de la web de Theo Jansen (strandbeest.com) també com a referència, es van confeccionar dos tipus de maquetes –de metall i de fusta– per comprovar si es complia l'objectiu proposat al començament. Al no obtenir uns resultats massa precisos –tot i que eren prou clars i concloents–, es va recórrer al programari en última instància, aconseguint, d'aquesta manera, uns valors cent per cent exactes.

A continuació es mostra la taula on hi apareixen les mides de tots quatre conjunts. Aquestes reben la nomenclatura dels punts d'unió de la fig. 6.2. També s'han afegit els resultats de l'alçada i el diàmetre de pas de la trajectòria del punt G del mecanisme obtinguts en l'estudi digital.

| | Mides del treball de final de carrera de la UPC | | | | Mides de la web de Theo Jansen | | |
|-----------------|---|---------------|----------------|----------|-------------------------------------|---------|----------|
| | Mecanisme original | Maqueta final | Prototip final | | Mecanisme Theo Jansen (Strandbeest) | | |
| Nº | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 6 |
| Escala | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 5:8 | 1:1 | 10:3 | 100:19 |
| Sòlid | L. [mm] | L. [mm] | L. [mm] | L. [mm] | L. [mm] | L. [mm] | L. [mm] |
| OA | 50 | 50 | 80 | 50 | 15 | 50 | 78,95 |
| OCx | 250 | 200 | 320 | 200 | 38 | 126,67 | 200 |
| OCy | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,8 | 26 | 41,05 |
| AB | 350 | 330 | 528 | 330 | 50 | 166,67 | 263,16 |
| AE | 350 | 310 | 496 | 310 | 61,9 | 206,33 | 325,79 |
| BC | 200 | 200 | 320 | 200 | 41,5 | 138,33 | 218,42 |
| CD | 200 | 230 | 368 | 230 | 40,1 | 133,67 | 211,05 |
| BD | 250 | 280 | 448 | 280 | 55,8 | 186 | 293,68 |
| CE | 200 | 220 | 352 | 220 | 39,3 | 131 | 206,84 |
| DF | 200 | 250 | 400 | 250 | 39,4 | 131,33 | 207,37 |
| EF | 200 | 215 | 344 | 215 | 36,7 | 122,33 | 193,16 |
| EG | 300 | 340 | 544 | 340 | 49 | 163,33 | 257,89 |
| FG | 350 | 360 | 576 | 360 | 65,7 | 219 | 345,79 |
| Alçada de pas | 41,704 | 159,71mm | -- | 159,71mm | -- | 74,85mm | 118,26mm |
| Diàmetre de pas | 36,82mm | 90,18mm | -- | 90,18mm | -- | 73,76mm | 115,50mm |

Taula 6.1: Recull de les diverses mides que conformen el mecanisme i les respectives alçades i diàmetres de pas obtingudes durant l'estudi. En color, els mecanismes que han estat estudiats. FONT: UPC i Strandbeest. Elaboració pròpia.

Com es pot apreciar a la taula, les mides que consten a la columna *prototip final* són exactament les mateixes que les de la *maqueta final*, però ampliades a una escala de 8:5 respecte d'aquesta. Per això acaben essent tres conjunts de mides i no pas quatre: l'anomenat original i el de la maqueta final, tots dos del treball de final de carrera de la UPC, i el que dona com a referència la web oficial de Theo Jansen. Per simplificar l'explicació, s'ha decidit agrupar cada conjunt de mides amb un nombre, tal com figura a la taula.

El darrer conjunt, anomenat mecanisme Theo Jansen, està integrat per tres mides: les que es detallen a la web i les ampliades a 10:3 i a 100:19 respecte les originals. Aquestes ampliacions es duen a terme

tenint en compte que la distància OA (corresponent al radi de rotació de l'eix motor) sigui idèntica a la resta –igual a 50mm– en la primera ampliació i que la mida OCx sigui la mateixa que aquest segment en la maqueta final –igual a 200mm– en la segona ampliació. Aquest segon augment de mida es va dur a terme perquè, si es comparen les mides de la primera amb la resta, es pot veure que el mecanisme és clarament més petit, i per tant, no s'estudiava amb igualtat de condicions. Es va agafar el segment OCx a l'hora d'igualar perquè era el que permetia una transformació de mides més semblant a la dels altres mecanismes.

Per dur a terme la confecció de les diverses maquetes i el robot definitiu es van agafar com a referència les mides de la taula, totes elles reduïdes a una escala concreta, que s'anirà comentant en cada cas.

6.2.1 Primera maqueta

Les dues primeres maquetes es van obtenir modificant-ne una que havia realitzat prèviament el tutor d'aquest treball. Amb elles s'intentava aconseguir el traç del punt G del mecanisme i comprovar com variava en funció de la longitud de les barres que les conformaven. La primera maqueta corresponia a les mides de l'anomenat mecanisme original (1) a

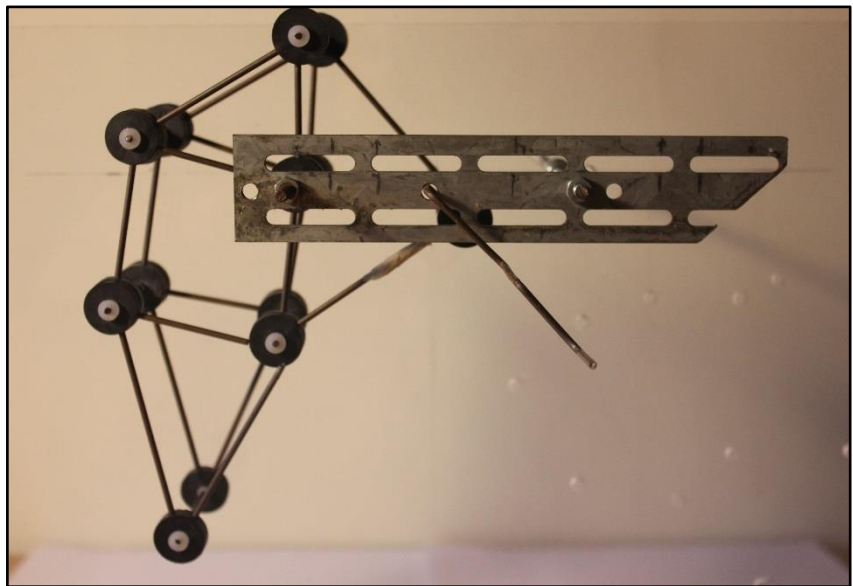


Fig. 6.3: Artefacte del primer tipus de maquetes segons les mides nº 2.

escala 1:50 de les mides que consten a la taula, mentre que la segona es regia per les dimensions de la maqueta final (2), també escalades a 1:50.

No es va realitzar cap més artefacte utilitzant aquest mètode pels problemes observats en els dos primers i per la poca precisió en resultats: les unions no eren prou rígides i només posar el mecanisme en marxa s'acabaven desmuntant.

Aquest primer conjunt de maquetes va ser confeccionat amb juntes tòriques (les típiques juntes d'aixeta), vareta de ferro pintada en color coure de 2mm de diàmetre i una espècie d'agafadors de plàstic. Pel suport es va emprar una planxa de metacrilat reutilitzada de l'aula de tecnologia i planxa de ferro perforada, també aprofitada. Per unir ambdues parts van fer-se servir dos talls de vareta rosca

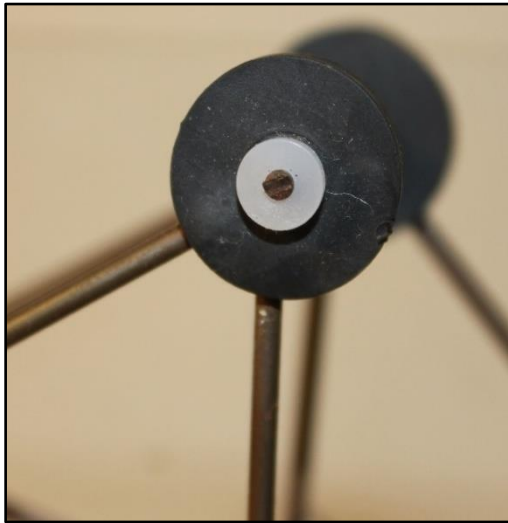


Fig. 6.4: Detall de la unió del primer tipus de maquetes.

de DIN975, volanderes de DIN125 i femelles de DIN439, tots ells amb un diàmetre corresponent al M4⁷.

El procediment a l'hora de construir-les va ser molt simple: primerament s'havien de tallar totes les varetes a la mida necessària amb l'ajut d'unes alicates, llavors s'havien de foradar els laterals de les juntes tòriques mitjançant un trepant i, finalment, unir les peces tot inserint les varetes a l'interior dels forats practicats a les juntes. Els agafadors de plàstic servien d'eix a les juntes,

com es pot apreciar a la fig. 6.4.

Les trajectòries es van dibuixar amb un bolígraf situat a la unió del punt G i van resultar ser les següents:

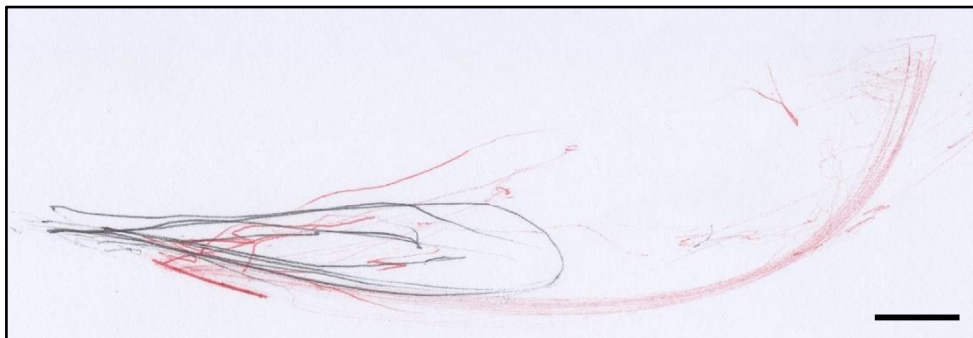


Fig. 6.5: Primer tipus de maquetes: trajectòria del conjunt de mides n°1 (en negre) i n°2 (en vermell). 1 cm

Com es veu a la imatge, ambdues trajectòries són molt imprecises i presenten molts errors. Tanmateix, ja es pot comprovar com les mides de la maqueta final (2) són molt més efectives que les del mecanisme original (1) a l'hora d'obtenir una alçada de pas el més alta possible.

⁷ Veure normativa en cargolaria al capítol 9.

6.2.2 Segona maqueta

Degut a les poques conclusions extretes amb l'estudi de les maquetes realitzades en metall, es va escollir un altre mètode per confeccionar els nous mecanismes.

Havia de ser completament rígid en les unions, ja que sinó, tal com passava en l'anterior, s'hauria d'anar refent l'estructura constantment. També havia de permetre dibuixar unes trajectòries amb el mínim d'errors i imprecisions possibles, encara que només s'obtinguessin de forma esquemàtica i sense cap valor exacte.

Es va escollir, finalment, la fusta com a recurs. Aquesta provenia de llistons de persiana reutilitzats. Per les unions entre els diversos sòlids es van fer servir cargols de DIN84, femelles de DIN439 i volanderes de DIN125, tots ells amb un diàmetre de M4. De suport es va utilitzar, novament, una planxa de metacrilat reutilitzada i planxa de ferro perforada. També es va repetir el tipus d'unió entre la maqueta i el suport.



Fig. 6.6: Detall de la unió del segon tipus de maquetes.



Fig. 6.7: Maqueta de fusta muntada al suport, segons les mides nº2.

El procediment a l'hora de muntar les estructures era força senzill: per començar s'havien de marcar les llargades i els forats de cada un dels llistons, els quals serien tallats amb una serra i perforats amb un trepant amb una broca de 4,25mm de diàmetre; llavors s'havien d'unir mitjançant els cargols i les femelles amb un tornavís pla i una clau fixa del número 6-7 i, finalment, s'havia d'unir el mecanisme al suport de metacrilat. Per minimitzar el fregament entre els llistons es van interposar volanderes entre cada un d'ells, permetent, d'aquesta manera, un moviment més fluid i sense tantes imperfeccions.

Es van realitzar quatre prototips amb aquest mètode, que seguien les mides estipulades a la taula 1 a una escala d'1:25; és a dir, el doble de grans que l'anterior recurs utilitzat. D'aquesta manera s'intentava aconseguir unes diferències més evidents entre les trajectòries del punt G de cada un dels mecanismes.

Els recorreguts del punt de contacte amb el terra es van dibuixar gràcies a un bolígraf inserit just per sota de la unió del punt G amb un forat practicat a la fusta amb una broca de 8mm de diàmetre.

Malauradament, la trajectòria del mecanisme nº 5 va obtenir-se de forma incompleta perquè no es



Fig. 6.8: Error en la maqueta nº 5 realitzada en fusta.

podia aconseguir la seva activació total. Aquest problema era degut a l'amplada dels llistons de fusta que el formaven, que acabaven topant amb l'eix del punt C quan s'intentava posar en marxa el mecanisme, tal com es mostra a la fig. 6.8.

Les trajectòries obtingudes finalment van ser les següents:



Fig. 6.9: Segon tipus de maquetes: trajectòria del conjunt de mides nº1 (en negre) i nº2 (en vermell).

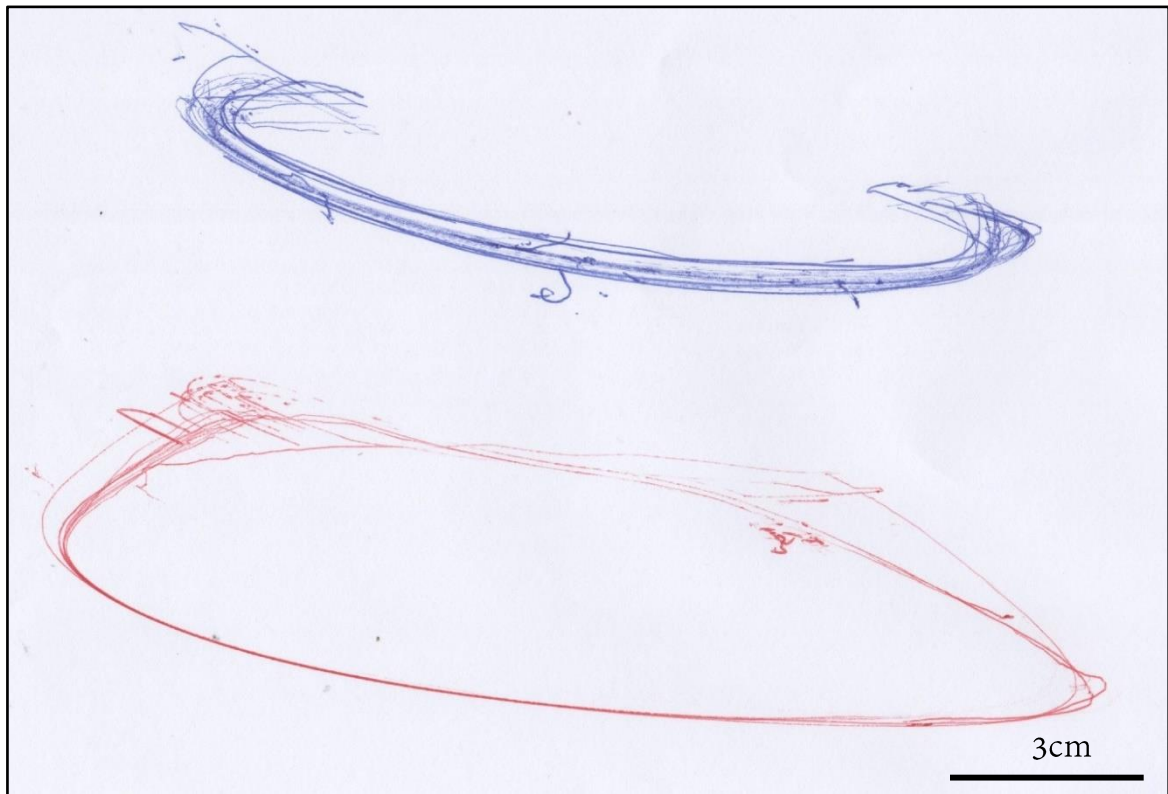


Fig. 6.10: Segon tipus de maquetes: trajectòria del conjunt de mides nº5 (en blau) i nº6 (en vermell).

Tal com es pots observar a les imatges de les diverses trajectòries, els conjunts de mides que permetien obtenir una alçada de pas més alta eren l'anomenat maqueta final (2) i l'ampliació a una escala de 100:19 de les mides de Theo Jansen (6). Era difícil d'afirmar quin era millor en aquest aspecte a través dels dibuixos perquè les maquetes van ser confeccionades manualment i sense la intenció d'obtenir-ne valors gaire exactes.

Si es comparen les trajectòries de les imatges amb les de la gràfica del proper apartat es pot veure com, tot i ser força semblants i apropar-se bastant al recorregut real, contenen forces errors i zones poc definides.

6.2.3 Estudi digital

Per acabar d'assegurar quines eren les mides idònies per aconseguir l'alçada de pas més elevada possible i poder obtenir, a través de valors precisos, uns resultats cent per cent exactes, es va passar a l'estudi digital mitjançant programari informàtic.

Es va voler començar l'estudi digital per la monitorització de la trajectòria del punt G de les quatre maquetes realitzades en fusta per mitjà d'un vídeo analitzat amb el programa MultiLab⁸. Per desgràcia, va resultar menys precís que els dibuixos traçats per l'aparell directament sobre el paper i es va acabar descartant aquest mètode.

Navegant per internet es va descobrir la possibilitat de confeccionar el mecanisme de Theo Jansen amb el programa GeoGebra⁹, el qual es podia animar i permetia obtenir punts fàcilment transformables en gràfics del lloc geomètric del punt G del conjunt.

Amb el procediment explicat a l'apartat 6.1 dut a terme a l'ordinador es van aconseguir els models que es mostren a la part inferior de la pàgina. Es van vincular barres lliscants a cadascuna de les circumferències perquè es poguessin anar variant les mides dels conjunts.

D'aquesta manera es va poder observar com de significatiu és per la trajectòria del punt G un petit canvi en la longitud d'un dels sòlids que conformen el mecanisme. També es van poder extreure conclusions numèriques dels recorreguts dels punts de contacte amb el terra de tots els grups estudiats.

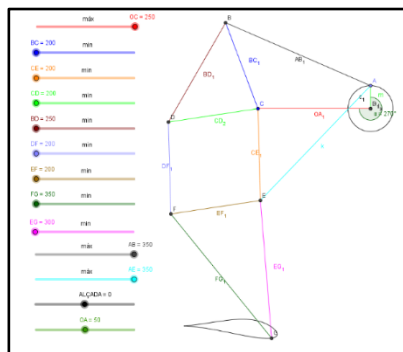


Fig. 6.11: Esquema amb les mides del mecanisme original (1). OA = 50mm.

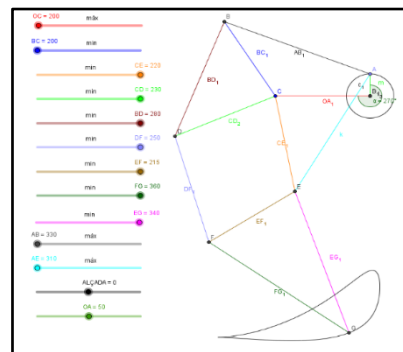


Fig. 6.12: Esquema amb les mides de la maqueta final (2). OA = 50mm.

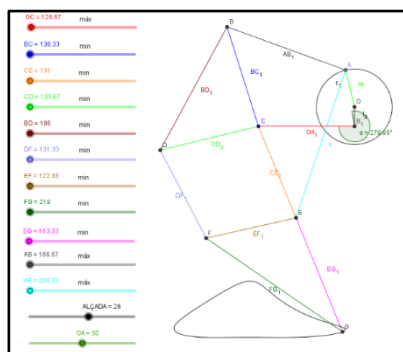


Fig. 6.13: Esquema amb les mides de Strandbeest (5). OA = 50 mm.

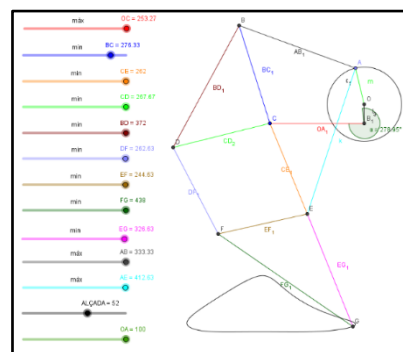
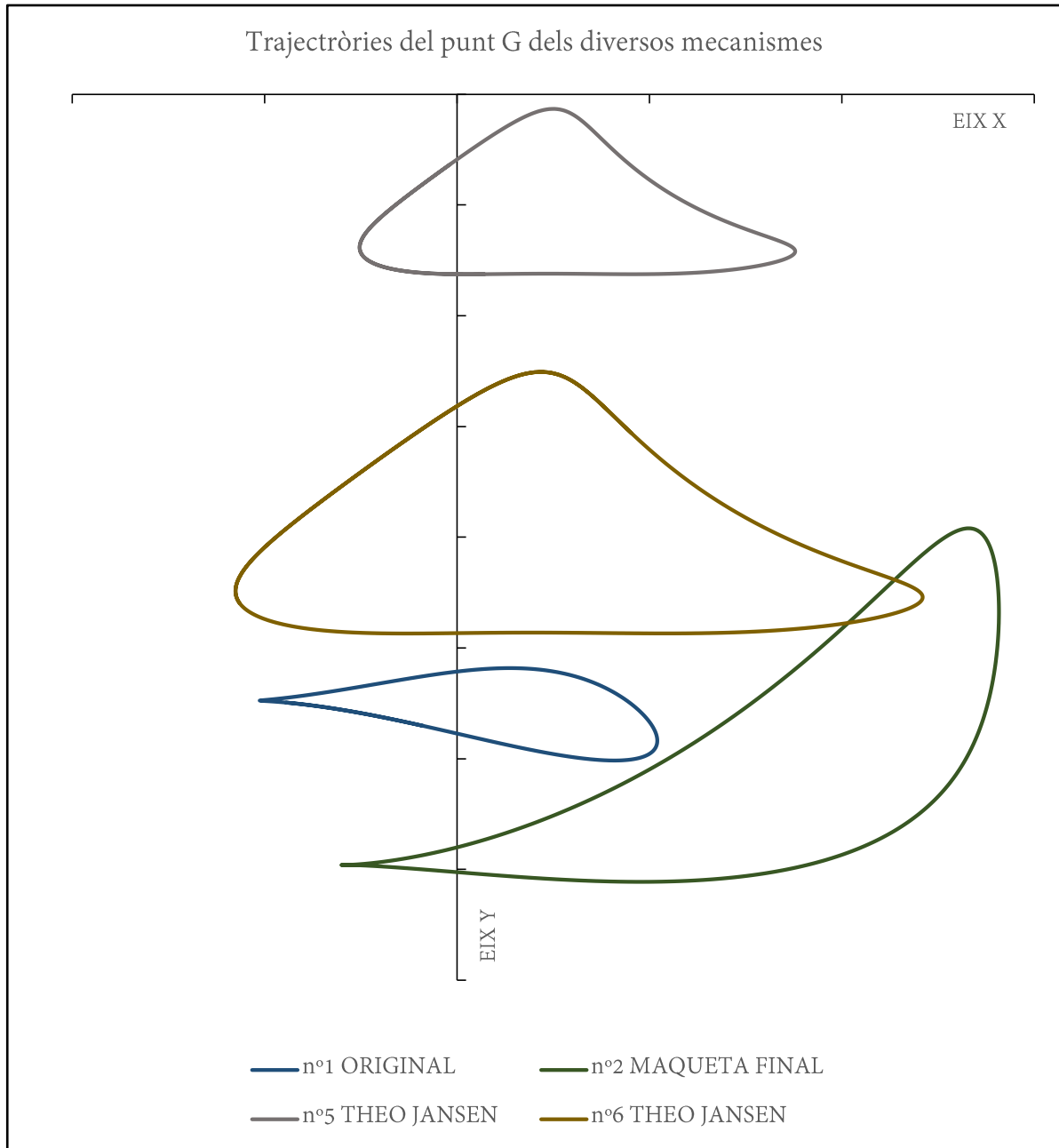


Fig. 6.14: Esquema amb les mides de Strandbeest (6). OCx = 200mm.

⁸ Programari lliure desenvolupat per Fourier Education.

⁹ Programari lliure desenvolupat per l'International GeoGebra Institute.

El GeoGebra permet animar el mecanisme i simular-ne el moviment i, ahora, dóna la possibilitat d'enregistrar les coordenades del punt que se li indiqui mentre l'artefacte està en marxa. Gràcies a aquesta característica va ser possible obtenir els punts x i y de cada instant de la trajectòria del punt que contacta amb el terra, exportar-los a Excel¹⁰ i transformar-los en gràfics clars i concisos, mostrats a continuació, que permeten estudiar-ne fàcilment el seu recorregut.



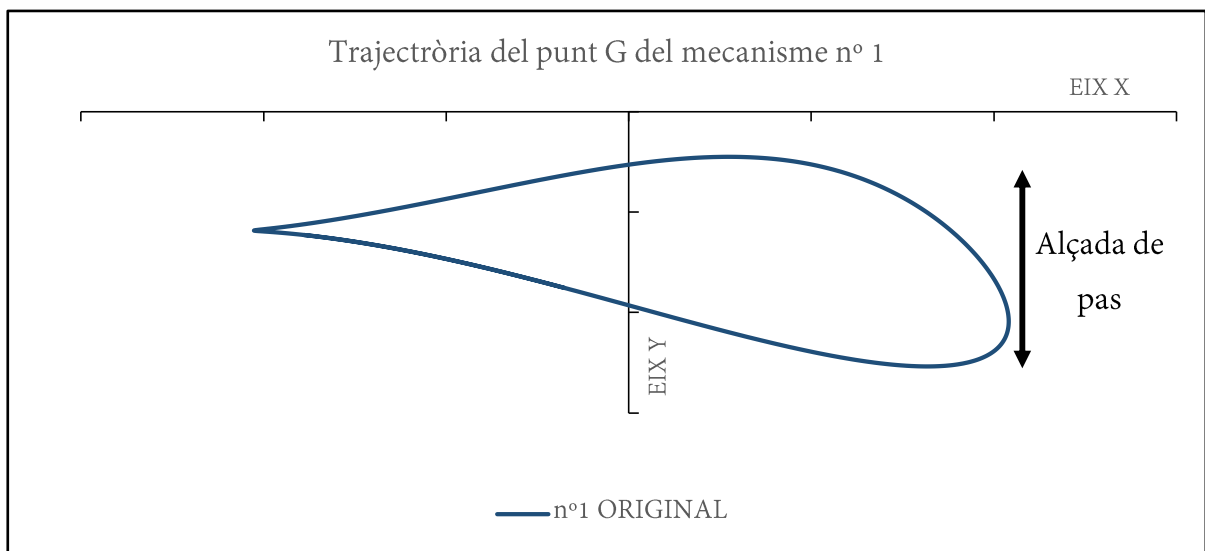
Gràfica 6.1: Trajectòria del punt G de tots els conjunts de mides estudiats. Elaboració pròpia.

¹⁰ Programari de pagament integrat dins el paquet d'Office desenvolupat per Microsoft.

Com s'aprecia a la gràfica anterior, els dos conjunts de mides amb una alçada de pas més elevada són el nº 2 i el nº 6, tal com ja s'ha comprovat prèviament amb les maquetes elaborades amb fusta. També es pot veure com varien de forma significativa les diverses trajectòries del punt G dels mecanismes segons la llargada dels sòlids que els conformen.

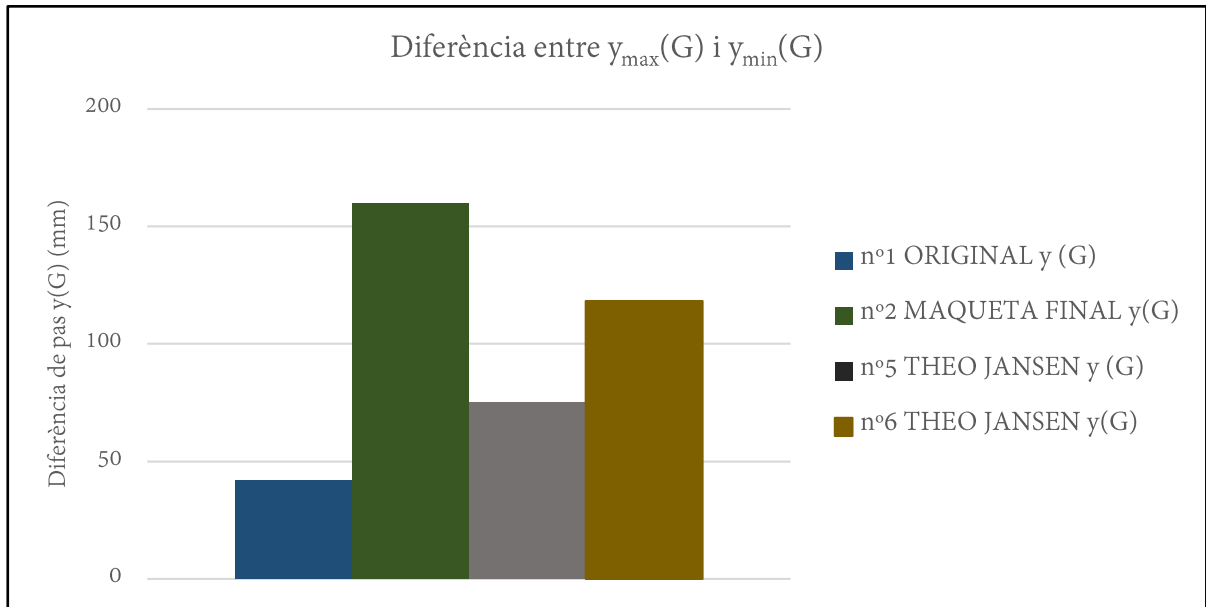
6.2.3.1 L'alçada de pas

L'alçada de pas correspon a la diferència entre els punts *y* inferior i superior de la trajectòria del punt G del mecanisme, és a dir, s'obté efectuant una subtracció entre ambdós valors de l'eix de les ordenades. El conjunt que obtingui el resultat més alt en la operació serà el que disposi d'un pas més gran, i per tant, serà també el capaç de desplaçar-se més fàcilment per terrenys irregulars.



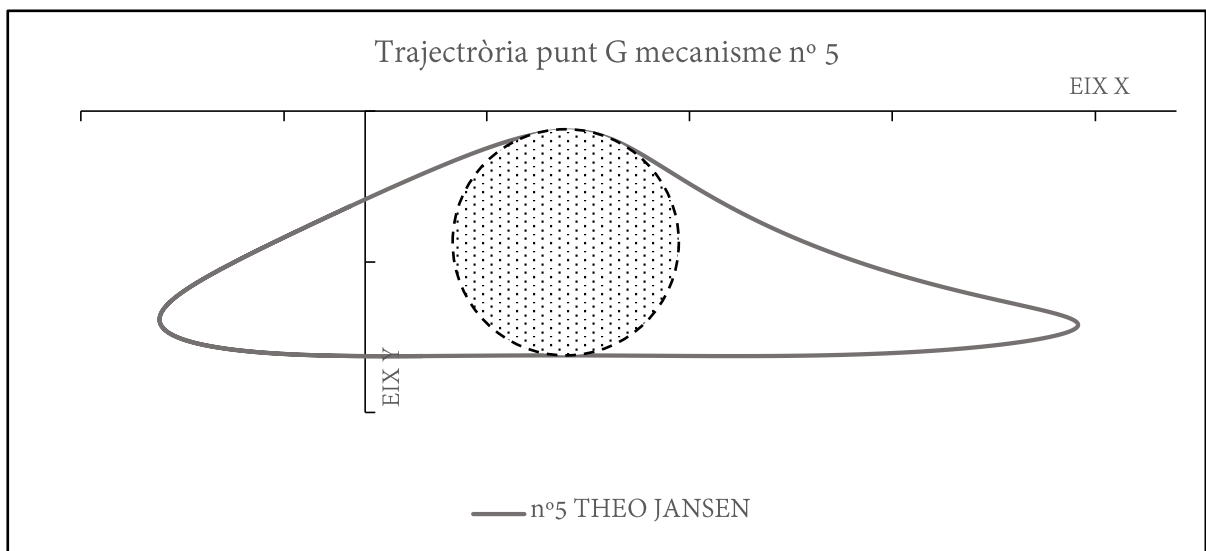
Gràfica 6.2: Explicació de com es mesura l'alçada de pas del mecanisme. Elaboració pròpia.

Un cop realitzades les operacions corresponents es va elaborar una gràfica amb la diferència d'alçada entre el punt *y* superior i el punt *y* inferior del recorregut del punt G de cadascun dels conjunts. Com s'hi pot observar, l'alçada de pas del mecanisme nº 2 és la més gran, ja que és la que presenta una diferència més evident entre els punts extrems del recorregut. Es veu, però, que la maqueta nº 6 hi queda bastant a prop, amb una diferència de només 41,46mm si s'agafen les mides estipulades a la taula de valors explicada anteriorment sense aplicar-hi cap escala.



Gràfica 6.3: Comparació de les alçades de pas del punt G dels diversos mecanismes. *Elaboració pròpia.*

6.2.3.2 El diàmetre de pas



Gràfica 6.4: Esquema d'explicació del diàmetre de pas. La circumferència circumscriu de línies discontinúes correspon al diàmetre de pas. *Elaboració pròpia.*

Es pot definir com el diàmetre de la circumferència circumscriu dins la trajectòria. Gràcies a ell es pot saber fàcilment quina alçada d'objectes pot superar cada maqueta sense topar-hi.

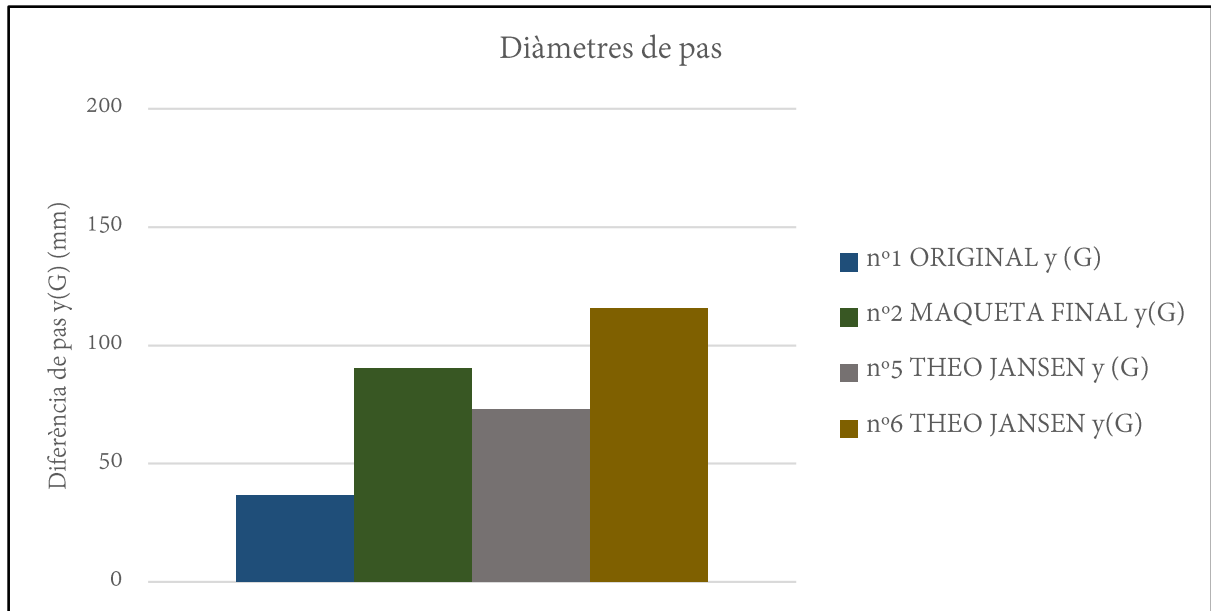
En el cas de la gràfica d'exemple té gairebé el mateix valor que l'alçada de pas, però no en tots els recorreguts del punt G del mecanisme passa el mateix. Per determinar-ho es van circumscriure

circumferències a cada un dels llocs geomètrics dels punts G dels arxius generats amb el GeoGebra i es va determinar el seu radi gràcies a l'equació de la circumferència donada pel programa del tipus:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

Per aconseguir el diàmetre de pas simplement s'havia d'efectuar, amb l'Excel, l'arrel quadrada del valor corresponent al radi al quadrat i multiplicar el resultat obtingut per dos. És a dir:

$$\text{Diàmetre de pas} = 2\sqrt{r^2}$$



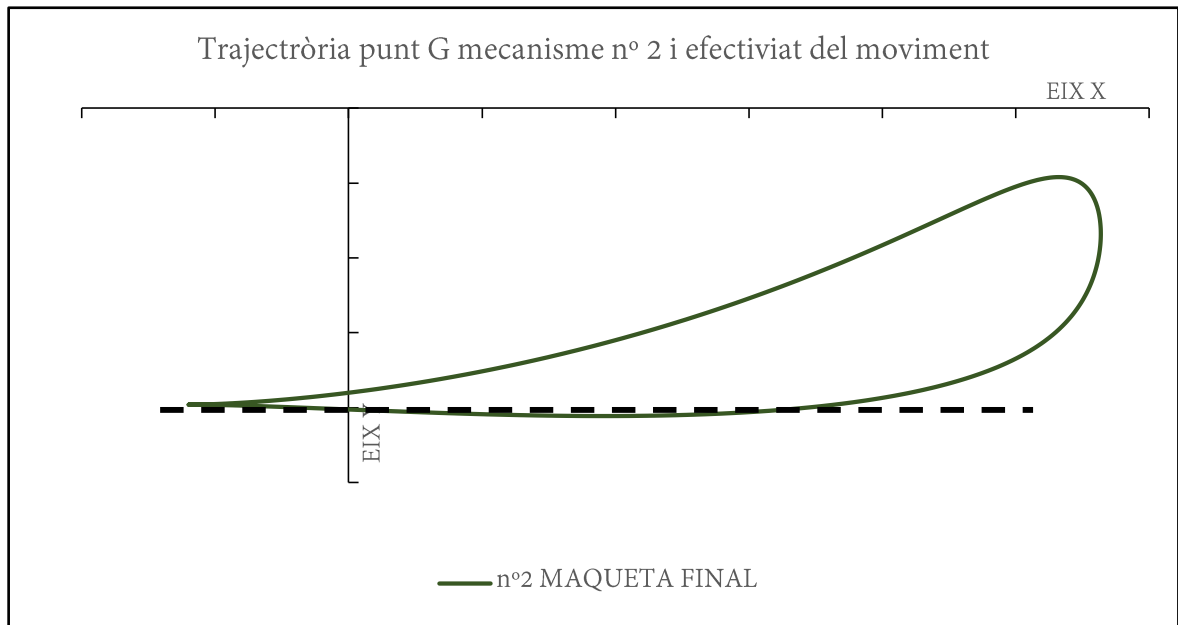
Gràfica 6.5: Comparació dels diàmetres de pas del punt G dels diversos mecanismes. Elaboració pròpia.

Com es pot apreciar a la gràfica, el diàmetre de pas més gran correspon al mecanisme n° 6. A només 25,32 mm –fent servir les mides explicades a la taula– hi queda la maqueta original o mecanisme n° 2, que és la segona en aquest aspecte entre conjunts estudiats.

6.2.3.3 L'efectivitat de la trajectòria

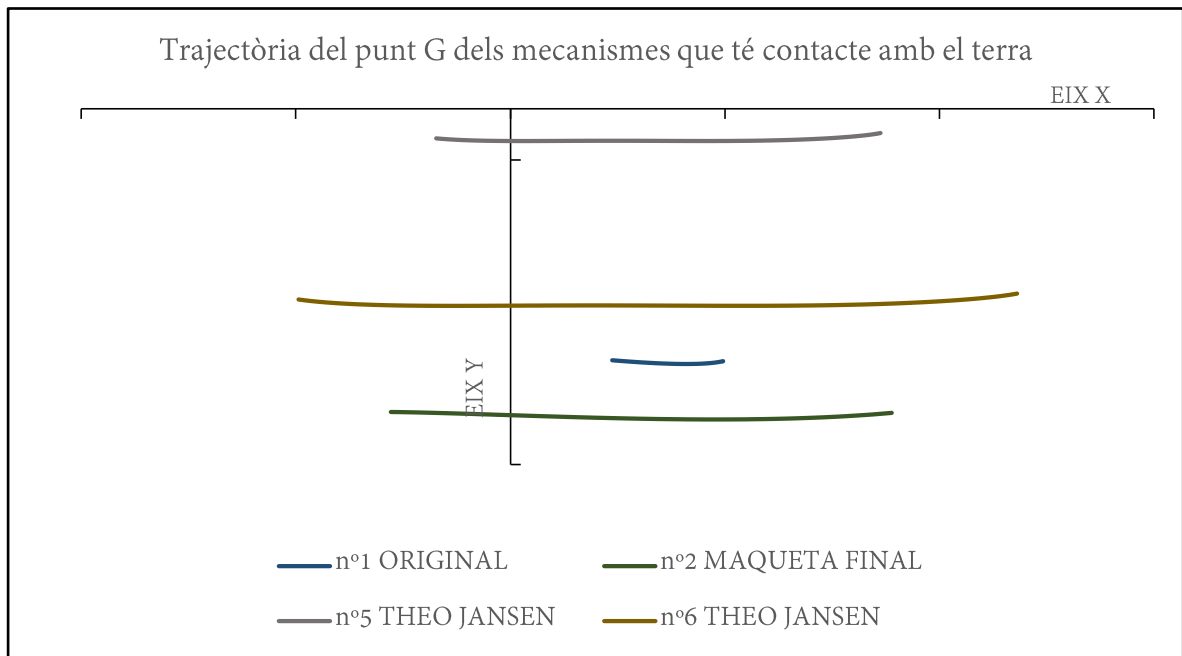
En aquest apartat es va intentar determinar quin era el tros de recorregut de la trajectòria que era efectiu en el moviment.

El segment efectiu és aquell que té un contacte més evident amb el terra. Gràcies a aquest contacte es transmet el moviment de la pota a la superfície de recolzament, permetent que el robot camini per l'efecte d'acció-reacció.



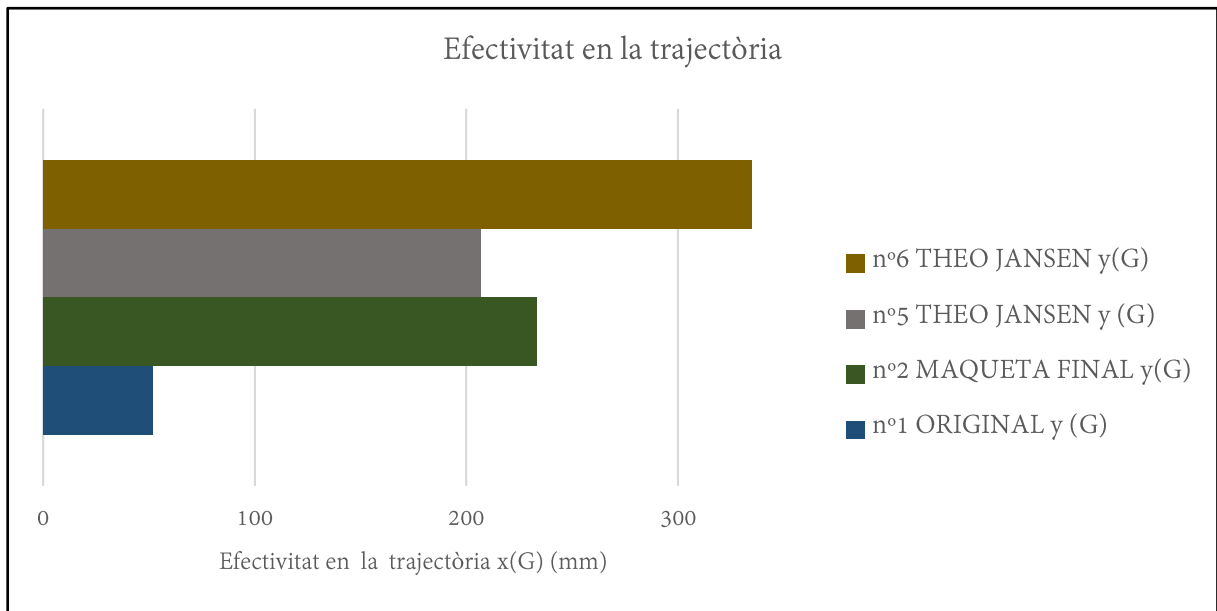
Gràfica 6.6: Esquema d'explicació de l'efectivitat de la trajectòria. Correspon al recorregut que queda per sota de la línia discontinua. Elaboració pròpia.

Per estudiar aquesta característica es van enregistrar, també amb el GeoGebra, el seguit de punts que tenen el major contacte amb el terra. Tot i que la mesura es feia de forma bastant visual, era prou acurada com per extreure'n conclusions determinants.



Gràfica 6.7: Recorregut de la trajectòria dels diversos mecanismes que té contacte amb el terra. Elaboració pròpia.

Finalment es va poder observar (gràfiques 6.7 i 6.8) que el mecanisme nº 6 és el que gaudeix d'un recorregut del punt G amb més contacte amb el terra o més extensió a l'eix de les abscisses.



Gràfica 6.8: Comparació del recorregut efectiu en l'eix de les abscisses dels diversos mecanismes. Elaboració pròpia.

Es pot pensar que tenir el major recorregut damunt el pla horitzontal pot resultar el més favorable, però és exactament el contrari, ja que es facilita la intersecció amb possibles obstacles del terra.

Així doncs, el millor en aquest característica és aquell que aconsegueix una millor relació entre extensió del recorregut i superació d'irregularitats del terreny. Amb les gràfiques 6.7 i 6.8 semblaria que el mecanisme n° 5 és l'òptim per aquest aspecte. Malauradament, però, juga amb avantatge degut a la seva reduïda mida. Per això, el n° 2 o maqueta final és el que gaudeix de la millor efectivitat en la seva trajectòria.

6.2.3.4 El nombre de potes

Finalment, tot i que no depenia de la mida dels diversos conjunts, es va analitzar, també amb el GeoGebra, el nombre de potes que havia de tenir el robot.

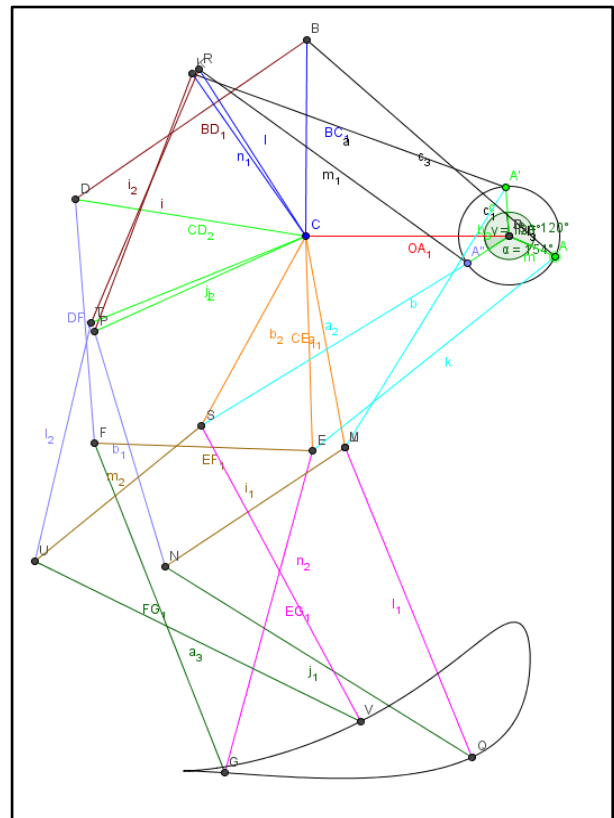


Fig. 6.15: Esquema amb les mides de la maqueta final (2) on s'estudia el nombre de potes del mecanisme.. $OA = 50$ mm.

Com s'aprecia a la fig. 6.14 calen tres potes per aconseguir que, com a mínim una, es recolzi sobre la superfície en cada instant del moviment. D'aquesta manera s'aconsegueix guanyar estabilitat en el robot i evitar que hi hagi excessiu desplaçament vertical, ja que es simula la rotació d'una roda sense tenir contacte permanent amb el terra.

6.2.4 Decisió de les mides

Després d'analitzar totes les característiques i comparar els mecanismes entre ells es poden extreure les següents conclusions:

- La maqueta final o mecanisme nº 2 és la que aconseguix una alçada de pas més elevada. Per tant seria la que ho tindria més fàcil a l'hora de desplaçar-se per terrenys irregulars.
- El mecanisme nº 6 és el que es mou amb un diàmetre de pas més gran. Gràcies a aquesta característica aconseguiria superar obstacles d'una alçada més gran que la resta de mecanismes.
- El mecanisme nº 2 és el que obté una efectivitat més evident en la trajectòria, ja que combina transmissió de força amb recorregut relativament petit, fet que li permetria evitar les irregularitats del sòl sense perdre, per això, velocitat de translació.

Finalment i seguint les conclusions exposades es va decidir utilitzar les mides detallades al treball de Nabil Khamashta Llorens i etiquetades com a “maqueta final” perquè, tot i no ser les millors en els tres aspectes, ho són en dos d'ells i queden a poca diferència del primer en el que resta: el diàmetre de pas. Per tant, les mides que s'utilitzaran durant el disseny del robot corresponen a les deduïdes prèviament per l'alumne de la UPC.

7. DISSENY DEL ROBOT

Un cop es va tenir el mecanisme estudiat i les mides decidides, es va passar a l'apartat del disseny.

Abans de començar a dibuixar, però, es van estipular alguns paràmetres bàsics referents al que es volia aconseguir: el principal era fer esment de la circumferència en el disseny atès que és la figura geomètrica que permet obtenir el dibuix del mecanisme de forma més ràpida i eficaç, com ja s'ha explicat. A més a més, la circumferència també aporta una estètica i una simplicitat que fan molt més visible i fàcil de realitzar el robot definitiu. L'altre punt important a l'hora de començar a dissenyar, però no determinant per a la confecció de les potes, va ser la facilitat d'incloure els components que conformaven el kit de robòtica de Picaxe que es va utilitzar.

7.1 Primers esbossos

Així doncs, un cop decidits els paràmetres bàsics i coneguda la geometria del mecanisme, es va començar per dibuixar petits esquemes a mà alçada.

Després d'un seguit de gargots sobre paper i amb algunes idees sobre la taula que seguien els requisits establerts al principi es van obtenir tres possibles dissenys. Per dibuixar-los es va fer servir una aplicació de l'iPad anomenada FiftyThree¹¹.

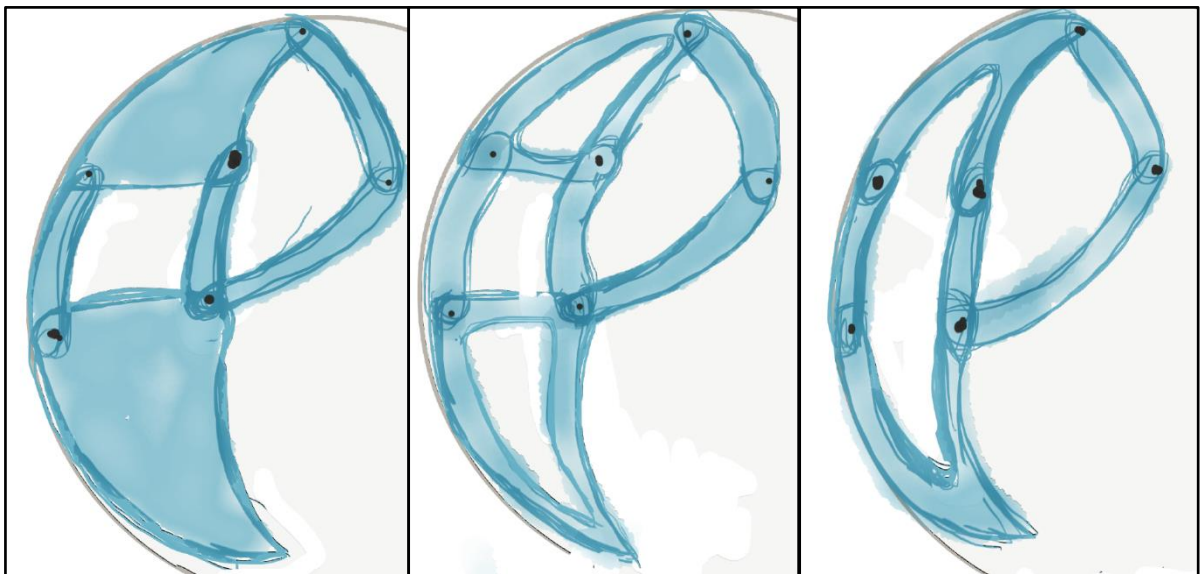


Fig. 7.1: Esbossos realitzats amb l'iPad. El primer, a l'esquerra; el segon, al mig i el tercer, a la dreta.

¹¹ Aplicació gratuïta desenvolupada per FiftyThree, Inc.

Tot i ser força semblants entre sí, els dissenys presentaven diverses diferències: el primer estava format per triangles completament sòlids entre els punts BCD i EFG. El segon, per la seva banda, constava igualment de triangles rígids entre aquests punts, però als quals se'ls havia suprimit el material intern. Així s'aconseguia alleugerir de forma considerable el pes del robot final. Amb el tercer s'intentava disminuir, encara més, la massa del conjunt, així com estilitzar-lo a través de l'eliminació de les barres CD i EF dels sòlids BCD i EFG.

El primer esbós presentava com a avantatges la rigidesa i la resistència a possibles trencaments dels triangles per la interacció amb les forces creades durant el moviment, però tenia un gran inconvenient: el pes. El segon aconseguia reduir aquest pes, mantenint la rigidesa, tot i que la resistència es veia una mica perjudicada. I el tercer, tot i ser el més lleuger de tots, perdia rigidesa i resistència i, tenint en compte que el prototip seria imprès en 3D, el podien acabar portant al trencament.

Amb totes aquestes característiques analitzades es va escollir, finalment, el segon esbós, ja que gaudia d'una disminució del pes mantenint gairebé la mateixa rigidesa que el primer. També va ser determinant per a l'elecció l'estètica del conjunt. Com es pot veure, la de l'esbós nº 2 és la més acurada.

7.2 Disseny 2D

Abans de començar a dibuixar amb l'ordinador es va estudiar, amb l'ajut del GeoGebra, quin era l'angle entre els punts A i O que permetia obtenir una circumferència més completa al contorn exterior de la pota, tenint en compte que l'amplada de cada sòlid seria de 8,8mm. Va resultar ser, finalment, un angle d'aproximadament 89° en sentit antihorari respecte la horitzontal.

Seguidament, per poder veure més o menys com quedaria i decidir l'escala que s'acabaria utilitzant, es va traçar, sobre paper, la geometria del mecanisme amb les mides que s'havien escollit prèviament a una escala d'1:50 respecte les de la taula.

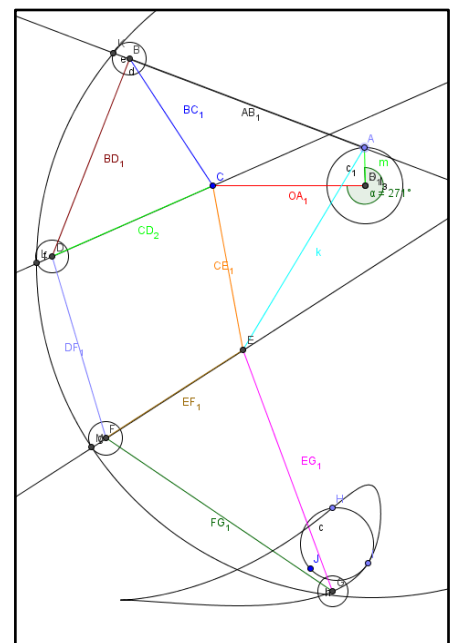


Fig. 7.2: Estudi de la possibilitat del disseny en circumferència en la maqueta nº 2.

Després es van engruixir i pintar els diferents sòlids a mà alçada. D'aquesta manera es va poder apreciar

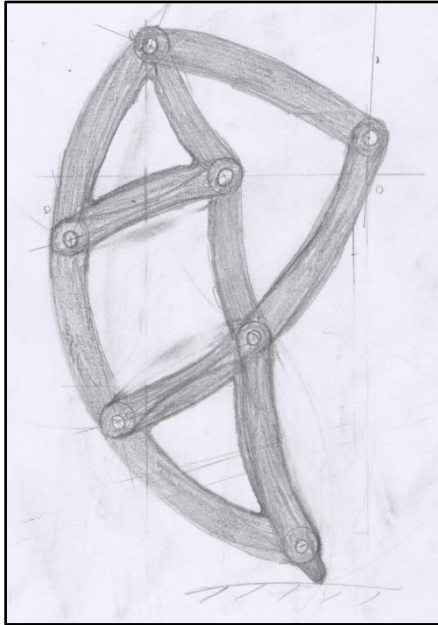


Fig. 7.3: Esbós previ a la realització del dibuix amb AutoCAD.

com quedaria el disseny definitiu. Tot i que era molt esquemàtic, es va veure que s'anava per bon camí i va servir per comparar la mida de la futura pota amb la del motor, comprovant que l'escala d'1:50 respecte les dades de la taula era l'adequada.

Amb la informació del disseny de la pota del mecanisme, de la seva l'amplada i en funció de quin angle es dibuixaria per aconseguir que els sòlids exteriors formessin un arc de circumferència gairebé perfecte, es va passar a treballar amb el programa AutoCAD¹².

L'AutoCAD disposa d'infinitat d'eines pel dibuix en dues dimensions assistit per ordinador –o CAD–. Les que més es van utilitzar, però, van ser les de línia i circumferència i la de retallar o allargar segments.

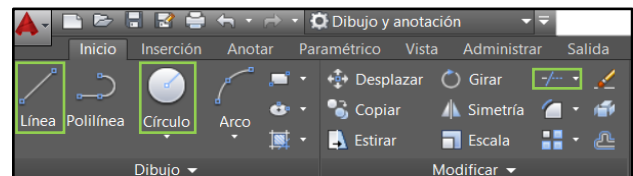


Fig. 7.4: Panell de l'AutoCAD i eines utilitzades.

El disseny definitiu va ser força ràpid d'aconseguir. El que va presentar més complicació va ser la confecció el punt G del mecanisme. Finalment es va optar per la utilització d'una el·lipse inscrita entre les quatre circumferències que formaven les barres dels sòlids EG i FG.

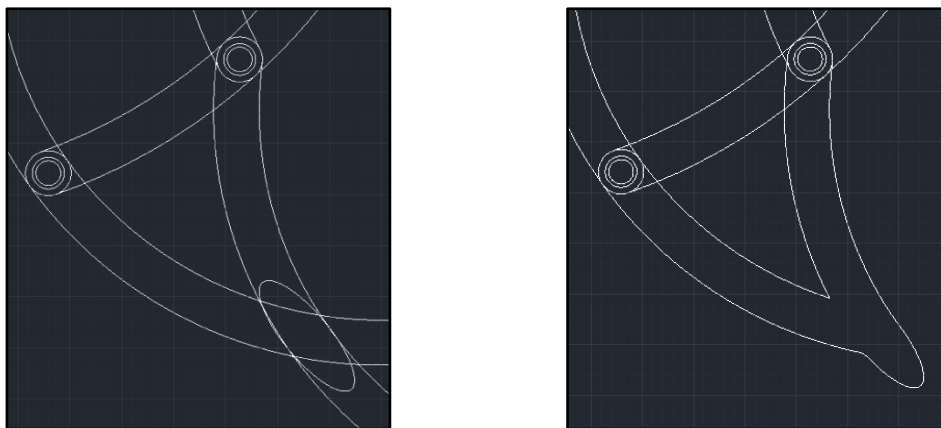


Fig. 7.5: Triangle EFG on es veu la construcció del punt G i com queda finalment un cop retallat.

¹² Programari de pagament desenvolupat per Autodesk, Inc.

Com que el dibuix s'havia dissenyat tenint en compte com seria un cop muntat i no peça per peça, es van haver de separar cadascun dels components en un nou fitxer.

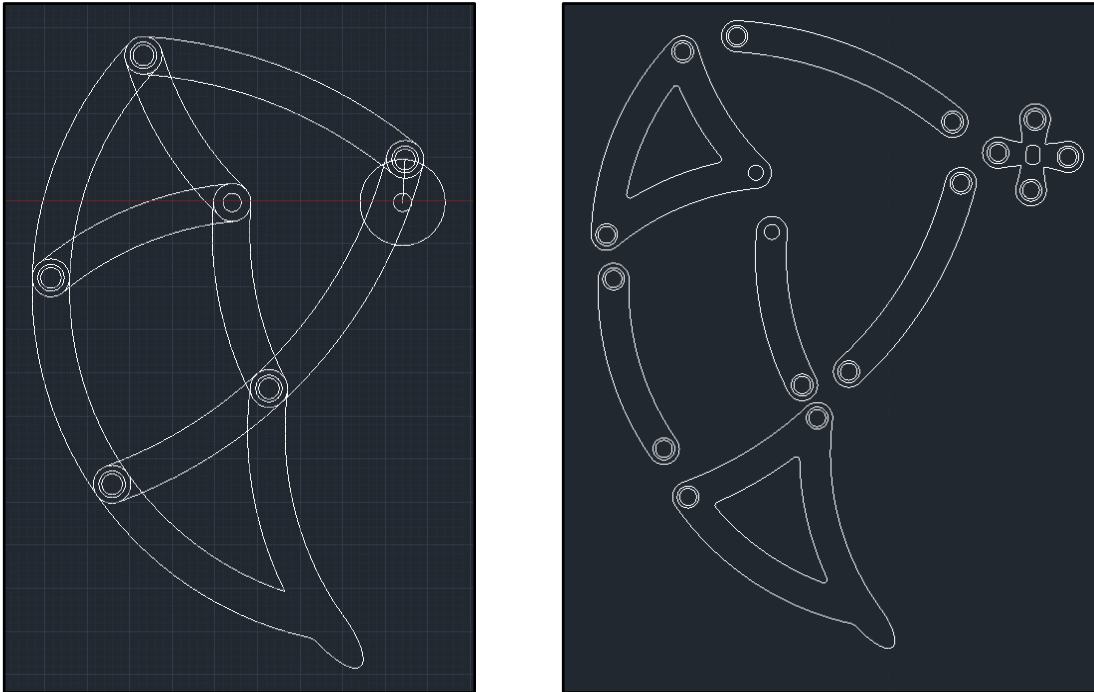


Fig. 7.6: Mecanisme 2D definitiu. A l'esquerra amb tots els components junts. A la dreta amb tots els components separats i una possible roda motriu ja generada.

Com es pot veure en les dues imatges, els radis de les barres BC, BD, CE, DF, EG i EF són els mateixos, mentre que els radis de les barres AB, AE, CD i EF també són idèntics entre ells. Es va decidir fer d'aquesta manera per distingir els elements verticals dels horitzontals i perquè el radi dels primers elements era massa petit per les barres AE i AB.

El plànol acotat i en dues dimensions es troba als annexos del treball.

7.3 Disseny 3D

Tot i que l'AutoCAD dona la possibilitat de treballar en 3D, és molt més fàcil de fer servir aquesta opció al SolidWorks¹³.

Per això, un cop es va tenir el disseny en dues dimensions acabat i escalat –es treballava seguint estrictament les mides de la taula– es van passar a confeccionar les peces en el pla tridimensional amb

¹³ Programari de pagament desenvolupat per Dassault Systèmes.

el SolidWorks. Per poder treballar amb aquest nou programa s'han d'exportar els arxius .DWG d'AutoCAD i obrir-los a través del següent procés:

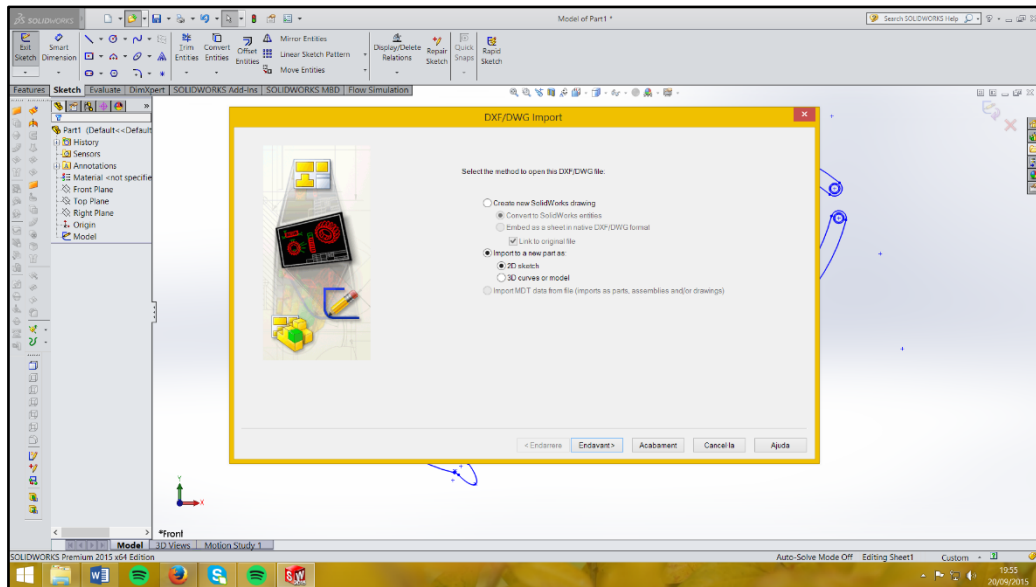


Fig. 7.7: Captura de pantalla de SolidWorks 1.

El primer pas és anar a la pestanya d'obrir un nou arxiu, clicar el fitxer desitjat i esperar que es mostri la finestra emergent que es veu a la imatge. Allà s'ha de seleccionar la opció que diu: *import to a new part as*, juntament amb la subopció *2D sketch*.

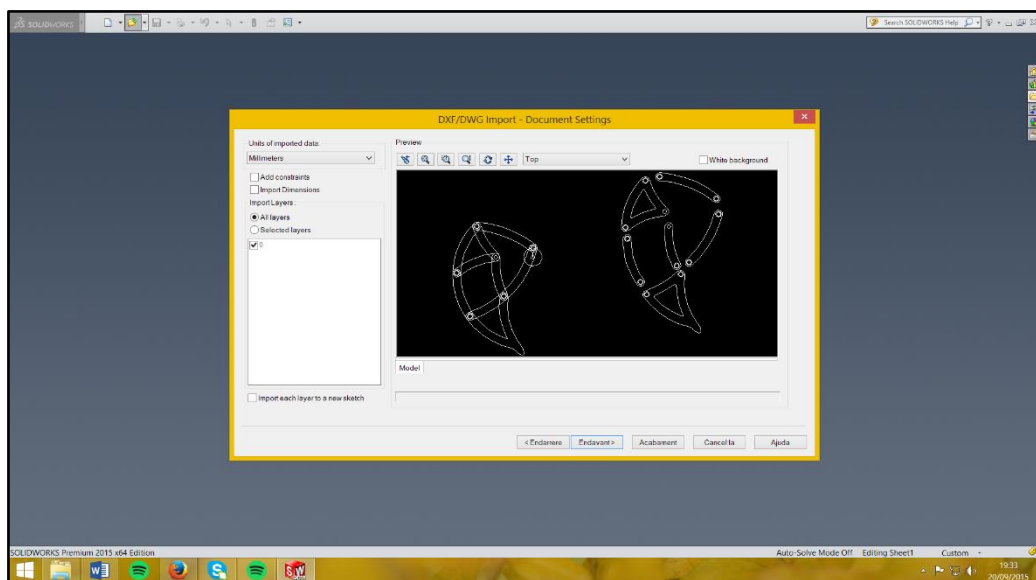


Fig. 7.8: Captura de pantalla de SolidWorks 2.

Seguidament cal prémer el botó *endavant* i tornar-lo a prémer fins que es visualitza la pantalla que mostra la fig. 7.8. En aquell moment s'ha de seleccionar *acabament*.

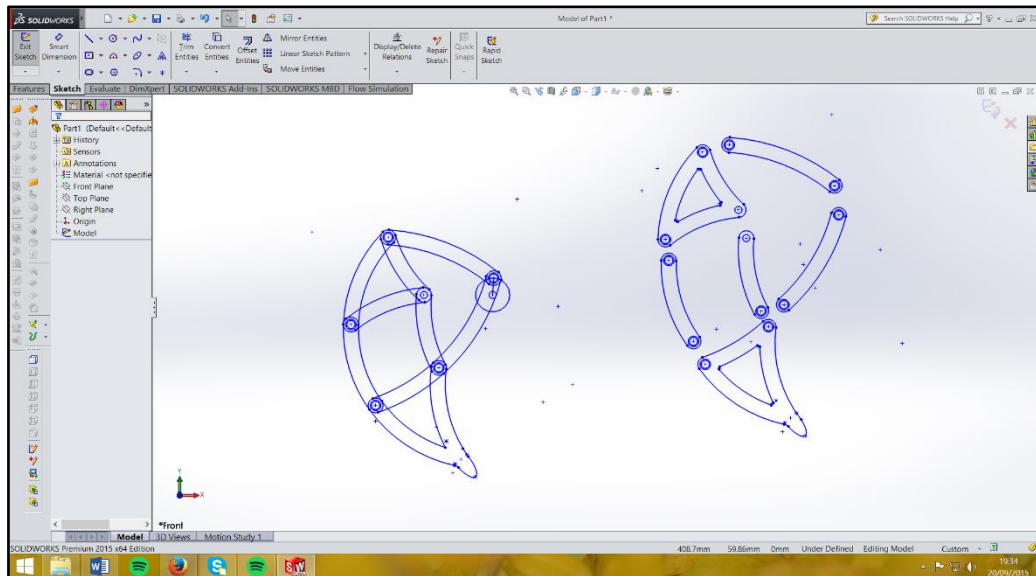


Fig. 7.9: Captura de pantalla de SolidWorks 3.

Finalment s'obre la pantalla anomenada *Sketch*, on ja es pot treballar.

Amb el SolidWorks només els fitxers d'*assembly* permeten treballar amb més d'una peça a la vegada. Per això el procediment d'obertura de l'arxiu provinent de l'AutoCAD es va haver de repetir tants cops com peces conformen el mecanisme; un total de sis.

El SolidWorks, igual que l'AutoCAD disposa de desenes d'eines, tant pel dibuix en dues dimensions com pel disseny en 3D. Les que més es van utilitzar durant el procés van ser les d'*Extruded cut* i *Extruded base* que es troben a la pantalla *Features* i que permeten afegir o suprimir material damunt el pla que s'hagi seleccionat.

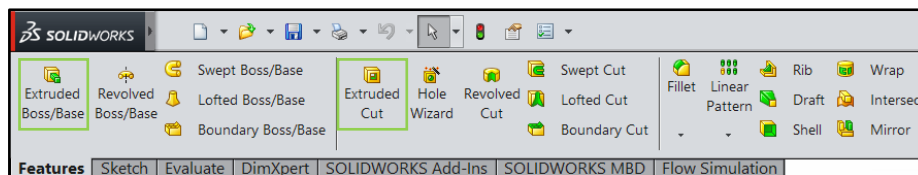


Fig. 7.10: Panell Features del SolidWorks i eines utilitzades.

A continuació s'explica el disseny de les diverses peces que componen tot el robot i les modificacions i canvis que es van anar fent en totes elles.

7.3.1 Disseny de les peces del mecanisme

7.3.1.1 Primer disseny

Abans de començar a dissenyar es va decidir d'utilitzar els pins tècnics de Lego per unir les diverses peces entre sí. Com que se'n necessitaven bastants, l'única opció vàlida era la d'imprimir-los en 3D (fig. 8.6). Malauradament no va funcionar, ja que es trencaven amb molta facilitat; fet que va motivar la modificació de totes les peces.

També es va establir el paràmetre del gruix dels sòlids que conformen el mecanisme: 4mm, però no dels que actuen com a transmissió o com a suport del conjunt, que es va decidir durant el procés.

El primer disseny de peces utilitzava els forats i les mides estipulades per Lego per tal de poder aconseguir una unió perfecta entre els pins i els diversos sòlids. Com es veu a la fig. 7.12, aquest disseny es basava en un forat de 4,80mm de diàmetre amb dos rebaixos de 6,20mm de diàmetre per 1mm de profunditat a cada costat del sòlid.

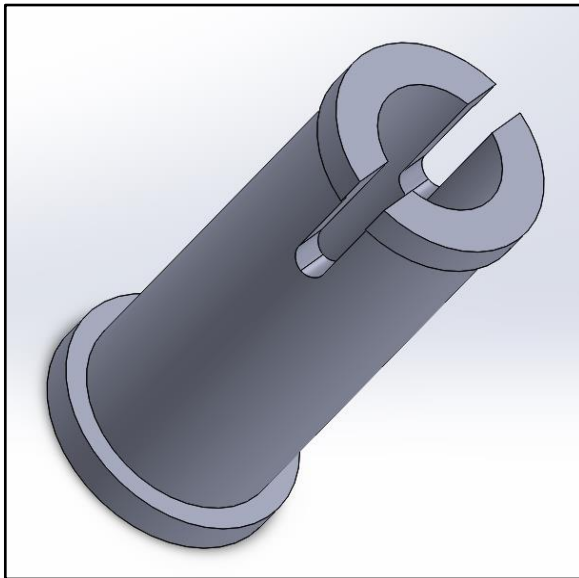


Fig. 7.11: Pin tècnic de Lego dissenyat amb el SolidWorks.

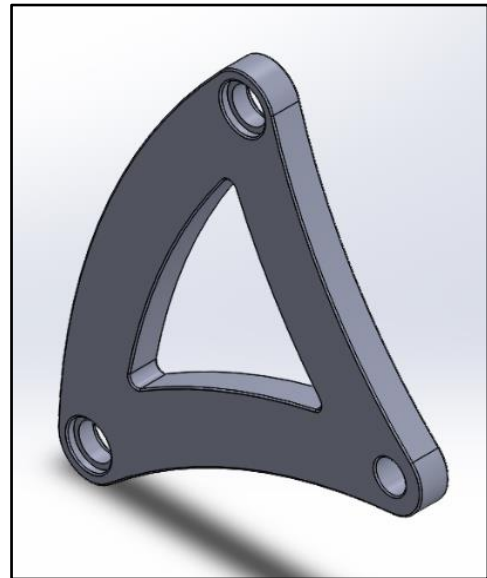


Fig. 7.12: Sòlid BCD per unir-lo mitjançant els pins tècnics de Lego.

7.3.1.2 Segon disseny

Degut als problemes d'impressió en 3D de la imitació dels pins de Lego (fig. 8.6) i la impossibilitat d'unir les diverses peces mitjançant aquest sistema, es van haver de redissenyar tots els sòlids que conformen el mecanisme.

Aquesta modificació va anar encaminada, bàsicament, a l'empetitiment del diàmetre dels forats i a l'eliminació dels rebaixos. Així doncs, els nous sòlids disposaven d'un forat amb un diàmetre de 3,25mm amb rebaixos de 7mm de diàmetre i 0,2 o 0,5mm de profunditat, depenent del costat on anessin muntats i on hi anirien col·locades les volanderes per a minimitzar el fregament entre els sòlids.

Tanmateix també es va aprofitar per millorar els sòlids AB i AE amb la finalitat de disminuir, de quatre a tres, els nivells d'unió de les parts que conformen el mecanisme. Per aconseguir-ho es va reduir a la meitat –de 4 a 2mm– el gruix de la part final de les barres AE i AB, tant dreta com esquerra, tal com es pot veure a la fig. 7.13. A més a més, com mostra la mateixa figura, es van fer orificis a dos dels sòlids perquè encaixessin amb les protuberàncies realitzades als altres dos. Es pot veure, a la fig. 8.5 i ja imprès, l'element AE que encaixa amb el de la imatge d'aquesta pàgina.



Fig. 7.13: Sòlid AE esquerra, on s'hi observa el rebaix i l'orifici d'encaix.

7.3.1 Disseny dels elements de suport

Tot i ja tenir l'essència del mecanisme dissenyada, calia confeccionar peces de suport que l'aguantessin i on s'hi poguessin acoblar els motors, la placa i el portapiles proporcionats per Picaxe.

Seguint les mides d'aquests elements i després d'haver modificat una vegada i una altra el disseny, es va obtenir, finalment, la taula de suport. Aquesta duu a terme diverses funcions: aguantar les potes, subjectar els motors, la placa impresa i el porta piles i, sobretot, permetre la transmissió del moviment entre el motor i la primera pota. Tot i la feina que va portar realitzar la peça virtualment, el resultat imprès, tal com es mostra al capítol 8, és plenament satisfactori.

A més a més, també es van dissenyar peces que actuen com a separadors de les potes, mantenen la distància OA i permeten la transmissió de moviment quan s'hi uneixen els elements destinats a fer-ho. D'aquests separadors n'hi ha dos a cada costat de la taula i un tercer, diferent de la resta, que serveix per mantenir la distància OA fins a l'últim punt del mecanisme i evita que l'última pota tingui una rotació errònia.

7.3.2 Disseny de les peces per a la transmissió de moviment

Com que el robot havia de disposar de tres parells de potes per banda, com s'ha explicat durant el capítol 6, s'havia de transmetre el moviment dels dos motors des de la primera extremitat fins a la darrera.

Per dur a terme aquesta tasca es van pensar moltes solucions possibles. La més efectiva i precisa és la

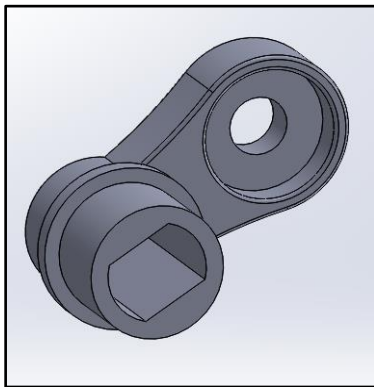


Fig. 7.14: Excèntrica motor-primera pota dissenyada amb SolidWorks.

que es va triar finalment. Consisteix d'un seguit d'excèntriques que, guiades pels elements de suport, giren amb un radi de rotació d'1cm i activen tot el conjunt de potes. Cada una de les bieles està desplaçada 120° respecte l'anterior i s'aconsegueix que hi hagi, com a mínim, quatre punts en contacte amb el terra en cada instant del moviment. Així doncs, la primera pota partirà dels 0°, la segona dels 120° i la tercera dels 240°; si s'agafa la taula de suport com a punt d'origen.

D'aquestes excèntriques n'hi ha de tres tipus: les que s'acoblen al motor, les que van transmetent el moviment d'una pota a l'altra i la final, que s'uneix al separador final i permet que la darrera pota tingui una rotació correcta.

El desplaçament de 120° i la transmissió de moviment entre les excèntriques que es recolzen al mateix separador es duu a terme mitjançant talls de clau Allen, de secció hexagonal i corresponents al M-4, ja que la peça dissenyada per aquesta funció en format imprès no oferia prou resistència. Es va triar la secció hexagonal perquè, sabent que un hexàgon té sis costats i que per tant, entre les diverses cares hi ha un desplaçament de 60°, es pot aconseguir una desviació de 120° respecte els altres costats si s'utilitzen els paral·lels com a recolzament.

Tots els plànols, les captures dels fitxers i els arxius .STL es troben als annexos del treball.

7.3.3 Unió dels diversos elements

El SolidWorks ofereix la possibilitat d'unir les peces de forma virtual. Per fer-ho, s'ha de crear un fitxer d'*assembly* i inserir-hi totes les peces. Perquè el procés es realitzi de forma correcta i es pugui simular l'activació del mecanisme s'han d'establir enllaços –o *mates*– entre les peces. Aquests enllaços poden ser de contacte, de tangència o fins i tot de coincidència en el punt central –o concèntrics–.

A continuació es mostren diverses imatges del robot muntat virtualment:

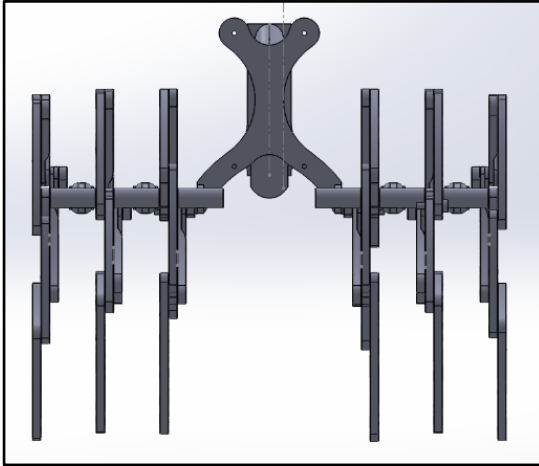


Fig. 7.15: Vista frontal.

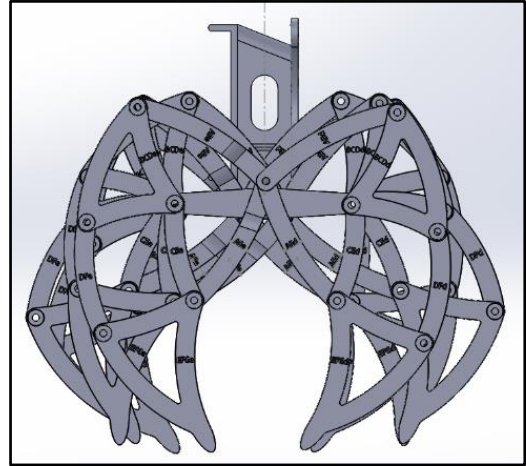


Fig. 7.16: Vista lateral.

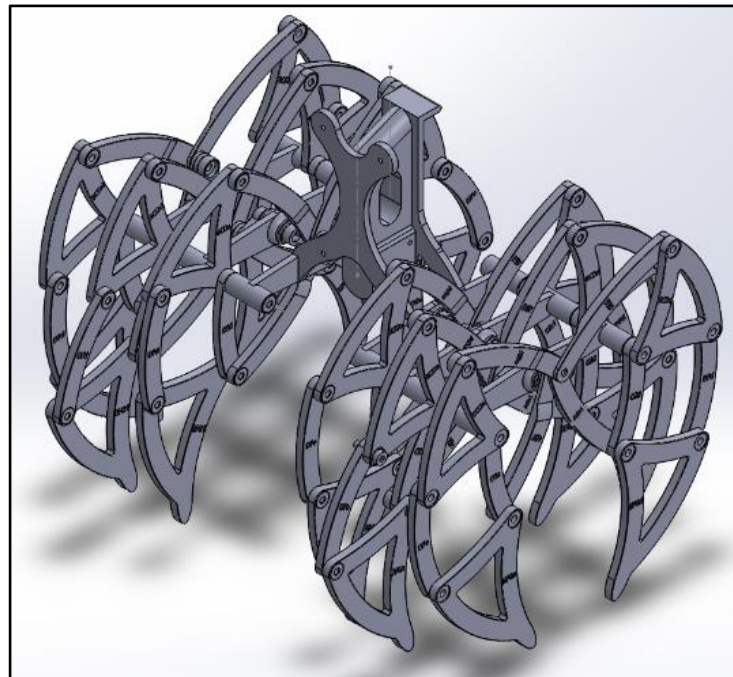


Fig. 7.17: Vista isomètrica.

8. IMPRESSIÓ DEL MECANISME

Quan es van tenir els dissenys en tres dimensions fets es van començar a imprimir en 3D. Així s'aconseguia convertir els dibuixos virtuals en material real.

8.1 La impressió 3D

La impressió 3D és qualsevol dels múltiples processos utilitzats per obtenir objectes tridimensionals. Té aplicacions en molts àmbits del món actual: des del prototipat de peces molt específiques fins a la confecció de pròtesis sanitàries.

A dia d'avui existeixen diverses tecnologies a l'hora d'imprimir en 3D, amb infinitat de materials com plàstics, aliatges, guix, paper o fins i tot materials comestibles, com la xocolata. El que s'ha utilitzat per aquest treball és l'anomenat FDM o modelatge per deposició fosa.

8.1.1 Impressió per FDM

La tecnologia d'impressió per FDM va iniciar-se al final de la dècada dels 80. La primera impressora que utilitzava aquest mètode per a generar objectes en tres dimensions va ser desenvolupada per S. Scott Crump. Tot i tenir gairebé trenta anys d'història, aquestes impressores no es van començar a comercialitzar al gran públic i en mida domèstica fins fa pocs anys, coincidint amb la caducitat de la patent del sistema d'impressió utilitzat.

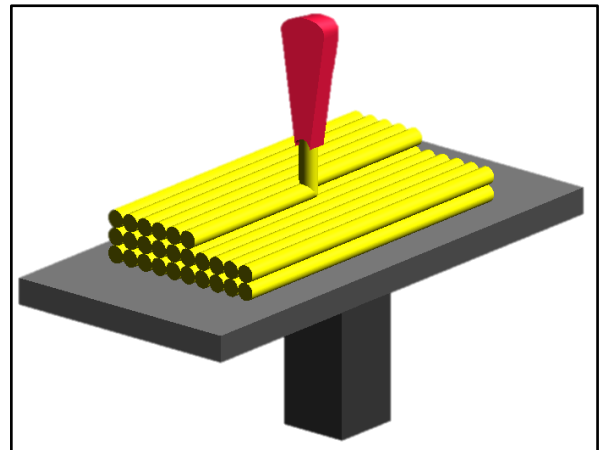


Fig. 8.1: Esquema de la tecnologia FDM. FONT: Wikipedia.

A Catalunya l'empresa BCN3D Technologies, creada a la Fundació Privada Centre CIM, ha desenvolupat una impressora seguint la patent caducada de Scott Crump. Així ha donat accés a la tecnologia 3D a escoles, instituts i a particulars en general, ja que la seva versió més avançada es comercialitza per un preu inferior a 750 euros.

La impressió mitjançant FDM consisteix en la deposició d'un fil de material fos amb un diàmetre inferior a 0,5mm seguint el traç del pla xy del dibuix introduït a l'aparell. Aquest fil, extret per

l'extractor, es solidifica només entrar en contacte amb els materials que tenen una temperatura més baixa que la seva. A mesura que es van superposant les diverses capes de filament va apareixent la dimensió z del dibuix.

El material que es fon, en general ABS¹⁴ o PLA¹⁵, es comercialitza en forma de fil d'entre 1,75mm i 3mm de diàmetre empaquetat en bobines d'1kg, per un preu inferior a 17 euros.

8.1.2 Procés d'impressió

Per imprimir en tres dimensions cal seguir el següent procediment:

En primera instància s'ha d'exportar el disseny fet amb els programes de CAD en format .STL. L'.STL

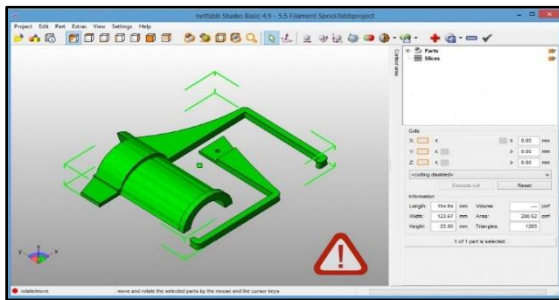


Fig. 8.2: Pantalla d'utilització del NetFabb. FONT: Airwolf 3D.

–de l'anglès “STereo Lithography”– és un format d'arxiu informàtic de disseny assistit per ordinador que defineix la geometria d'objectes 3D sense incloure aspectes com el color, la textura o les propietats físiques de la peça.

Llavors s'ha d'obrir el fitxer .STL amb un programa de comprovació, com pot ser el NetFabb¹⁶ o el Meshlab i assegurar que l'orientació per imprimir és correcta i que no cal reparar el fitxer; aspecte que es verifica automàticament en tots dos programes. També donen la possibilitat d'escalar els objectes i de simular la impressió per poder veure el temps que es tardarà a tenir la peça completament acabada.

Tot seguit, i també amb el .STL, s'ha de passar a un programa que creï el Gcode. El Gcode és el fitxer de text que conté tots els moviments i temperatures que la màquina ha d'executar. La placa que incorpora la impressora va llegint aquest arxiu i el converteix en impulsos i ordres elèctriques pels *drivers* i les resistències, que van imprimint la peça segons els comandaments rebuts. A Internet hi ha molts programes per a la creació de Gcode, però els més utilitzats són l'Slic3er¹⁷, l'Skeinforge i el

¹⁴ L'acrilonitril butadiè estirè és un termoplàstic molt resistent als cops que s'utilitza principalment en automoció.

¹⁵ L'àcid polilàctic és un polímer termoplàstic biodegradable derivat de l'àcid làctic. Té pràcticament les mateixes propietats que els plàstics provinents del petroli.

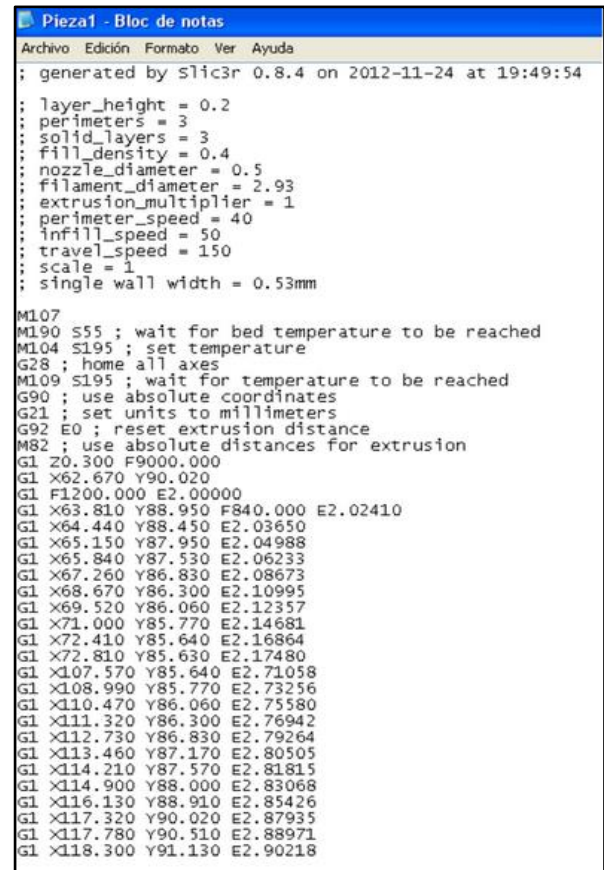
¹⁶ Programari de pagament desenvolupat per netfabb GmbH que disposa d'una versió de prova gratuïta.

¹⁷ Programari lliure desenvolupat per Alessandro Ranellucci en la seva primera versió.

Kisslicer. Amb aquest tipus de programes també es pot modificar el patró que traçarà l'extractor per omplir el disseny: de rusc d'abelles, de quadrat, de reixa...; així com la densitat de la peça creada.

Quan s'obté l'arxiu Gcode i s'han configurat els paràmetres de temperatura, altura de la capa, diàmetre del fil fos i diàmetre del fil proporcionat a la màquina es pot transmetre el fitxer a la impressora per mitjà d'una targeta SD o bé iniciar la impressió directament des de l'ordinador.

Abans de posar en marxa la impressió cal lacar la superfície de vidre on es disposa el fil fos per facilitar-ne la unió i esperar que el *hot bed* i



```

Pieza1 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
; generated by Slic3r 0.8.4 on 2012-11-24 at 19:49:54
;
; layer_height = 0.2
; perimeters = 3
; solid_layers = 3
; fill_density = 0.4
; nozzle_diameter = 0.5
; filament_diameter = 2.93
; extrusion_multiplier = 1
; perimeter_speed = 40
; infill_speed = 50
; travel_speed = 150
; scale = 1
; single wall width = 0.53mm

M107
M190 S55 ; wait for bed temperature to be reached
M104 S195 ; set temperature
G28 ; home all axes
M109 S195 ; wait for temperature to be reached
G90 ; use absolute coordinates
G21 ; set units to millimeters
G92 E0 ; reset extrusion distance
M82 ; use absolute distances for extrusion
G1 Z0.300 F9000.000
G1 X62.670 Y90.020
G1 F1200.000 E2.00000
G1 X63.810 Y88.950 F840.000 E2.02410
G1 X64.440 Y88.450 E2.03650
G1 X65.150 Y87.950 E2.04988
G1 X65.840 Y87.530 E2.06233
G1 X67.260 Y86.830 E2.08673
G1 X68.670 Y86.300 E2.10995
G1 X69.520 Y86.060 E2.12357
G1 X71.000 Y85.770 E2.14681
G1 X72.410 Y85.640 E2.16864
G1 X72.810 Y85.630 E2.17480
G1 X107.570 Y85.640 E2.71058
G1 X108.990 Y85.770 E2.73256
G1 X110.470 Y86.060 E2.75580
G1 X111.320 Y86.300 E2.76942
G1 X112.730 Y86.830 E2.79264
G1 X113.460 Y87.170 E2.80505
G1 X114.210 Y87.570 E2.81815
G1 X114.900 Y88.000 E2.83068
G1 X116.130 Y88.910 E2.85426
G1 X117.320 Y90.020 E2.87935
G1 X117.780 Y90.510 E2.88971
G1 X118.300 Y91.130 E2.90218

```

Fig. 8.3: Arxiu Gcode d'un disseny .STL. FONT: RepRap Venezuela.

l'extractor arribin a la temperatura indicada per cada tipus de material. Quan s'acaba la impressió cal introduir la peça uns instants al congelador per poder-la separar de la plataforma de vidre on s'ha confeccionat.

Per acabar la peça cal polir-la i retocar-la amb paper de vidre o petites moles amb diferents eines acoblables. Aquest pas és important, sobretot, en les peces amb orificis o ranures, com les que s'han imprès durant aquest treball.

8.2 Impressió del disseny

Un cop s'havien exportat les peces del SolidWorks en format .STL es va iniciar la impressió de totes elles.

Malauradament no es disposava d'una impressora 3D pròpia ni de l'institut. Per solucionar aquest problema hi havia dues opcions: o trobar algun amic o conegut que disposés d'aquesta eina i pogués realitzar la impressió o bé encarregar-la directament a una empresa especialitzada. Un lloc on és fàcil d'enviar-ho a imprimir i ells mateixos fan arribar el paquet a casa és a Picaxe, que a la província de

Girona té la seu a Vilafant. Aquesta opció, tot i ser interessant per la qualitat de les peces que s'obtenen,

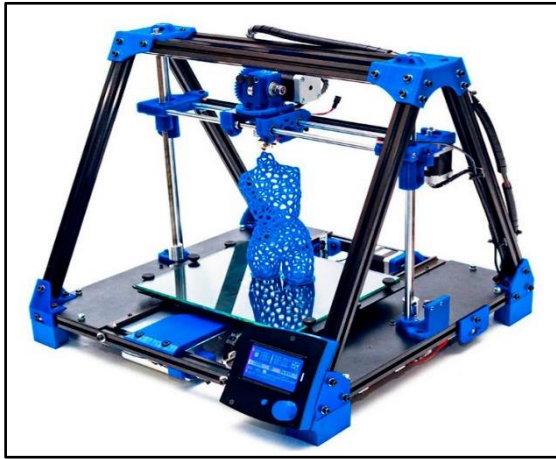


Fig. 8.4: Impressora BCN3D+. FONT: BCN3d Technologies.

sortia molt cara –6€ per hora d'impressió, més 7,5€ de transport, sense incloure l'IVA; segons la tarifa de Picaxe– i feia bastant difícil el propòsit final del projecte, ja que, només en la impressió, s'havien d'invertir més de 300 euros si es feia cas a les simulacions del programari de comprovació. Gràcies a l'A., un amic aficionat a la impressió en tres dimensions i creador d'interessants dissenys, es va

poder dur a terme aquest pas a un cost molt baix.

L'A. disposa d'una impressora 3D de BCN3d Technologies com la de la fig. 8.4 i fa servir bobines de PLA de 3mm de diàmetre en diversos colors: vermell, negre, verd, blau i blanc.

Se li van enviar els dissenys acabats en format .STL i a través del programari que ell disposa, es van comprovar i disposar correctament totes les peces abans de posar-les a imprimir. Després, transferint els arxius Gcode directament des de l'ordinador, es va començar el procés d'impressió de cada un dels objectes del mecanisme.

Pels sòlids que conformen les potes es va escollir un patró en quadrícula –línies paral·leles i perpendiculars– amb una densitat d'un 70% per alleugerir considerablement el pes del robot definitiu i permetre que els motors proporcionats per Picaxe poguessin activar-se sense dificultat, tot i la seva reduïda potència. Pels sòlids de transmissió, per la seva banda, es va utilitzar igualment un patró en reixeta, però augmentant la densitat fins al 100% per evitar possibles trencaments causats per les forces produïdes durant el moviment del mecanisme. Després d'hores i hores de tenir la màquina en funcionament es van aconseguir la majoria de peces del mecanisme. Algunes van haver de repetir-se, però la qualitat del gran gruix imprès era admirable.

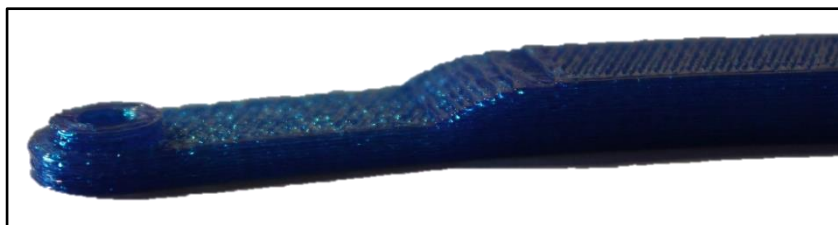


Fig. 8.5: Detall de la punta A del sòlid AE dreta.

8.2.1 Problemes d'impressió

Una de les limitacions més evidents de la tecnologia FDM és la impressió de peces amb molts voladissos o voladissos molts accentuats. Els voladissos són les zones de material que no tenen cap capa per sota seu i que es troben a una certa altura respecte el *hot bed* de la impressora. Per poder disposar el material que correspon a cadascun d'aquests nivells la màquina ha de crear material de suport. Aquest material de suport consisteix en petits pilars que aguanten les zones flotants del disseny fins que aquestes s'acaben ajuntant entre elles a mida que es va imprimint



Fig. 8.6: Unió tipus Lego impresa.

l'objecte. Un cop s'acaba la impressió el material sobrant pot ser fàcilment eliminat però és molt probable que s'hagi perdut precisió, resistència i sobretot qualitat al realitzar aquest pas.













Per evitar aquest problema es van encarregar les peces més difícils i que havien de tenir una resistència més gran a l'empresa Picaxe. Així doncs, la taula de suport (una unitat) i els separadors del mig (quatre unitats) es van enviar a imprimir a Vilafant. El resultat, tot i les limitacions presents en les seves impressores, també de tecnologia FDM, és molt satisfactori.

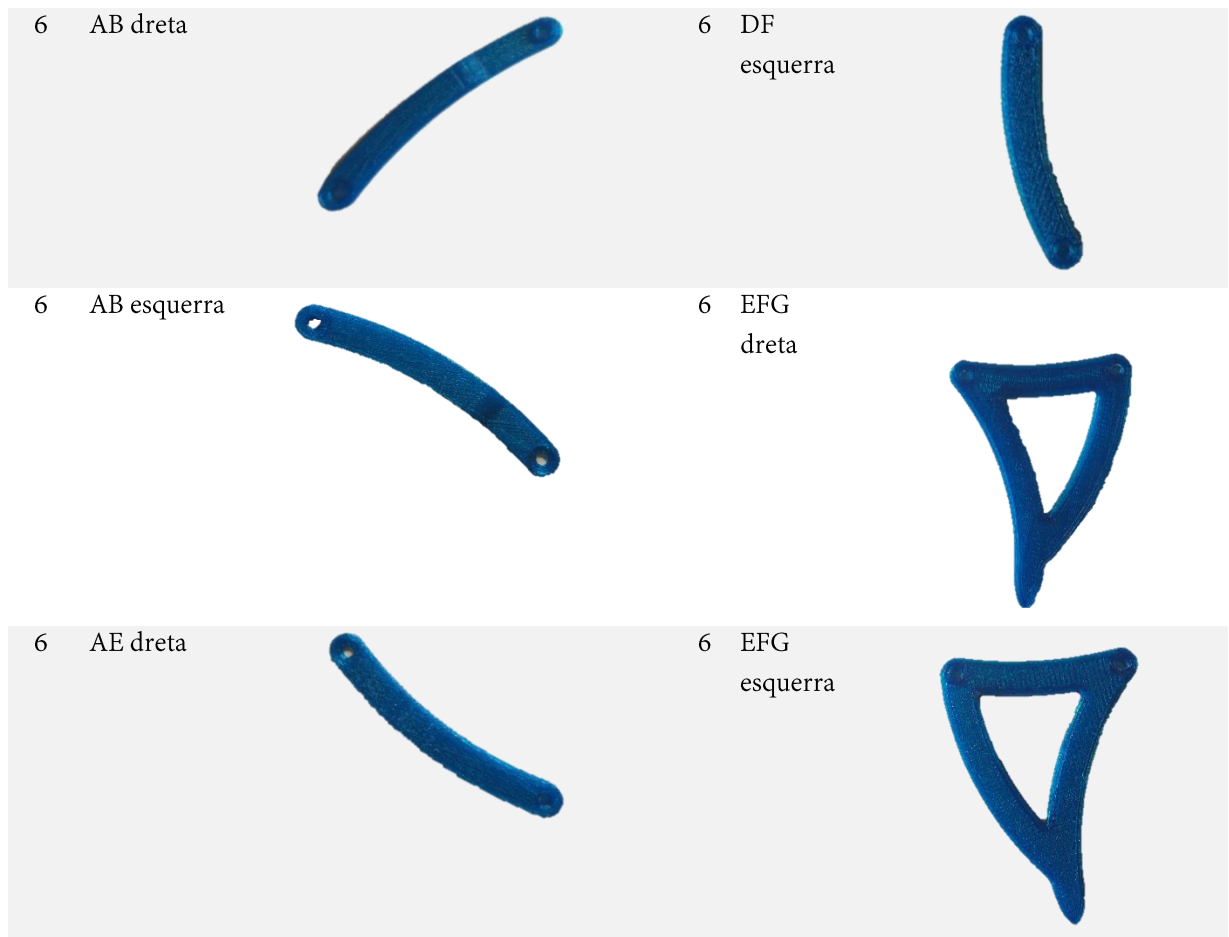
També hi ha problemes en la impressió de peces molt petites ja que es requereix precisió de centèsimes de mil·límetre que les impressores de deposició de material fos no poden oferir. A més, s'hi afegeix la problemàtica de la resistència del material.

Les peces d'unió que imitaven el sistema utilitzat per Lego van haver-se de descartar degut a aquest impediment i es van substituir per volanderes, cargols i femelles. A causa d'aquesta problemàtica, com ja s'ha explicat, van haver de reformar-se totes les peces.

Els elements destinats a la transmissió del moviment també es van descartar per la impossibilitat d'imprimir en mida tan petita i, com ja s'ha comentat, van ser reemplaçats per talls de clau Allen.

8.2.2 Peces obtingudes

| Qt. | NOM | IMATGE | Qt. | NOM | IMATGE |
|-----|--------------------|---|-----|--------------|---|
| 1 | Taula suport |  | 6 | AE esquerra |  |
| 4 | Separador mig |  | 6 | BCD dreta |  |
| 2 | Separador final |  | 6 | BCD esquerra |  |
| 2 | Excèntrica motor |  | 6 | CE dreta |  |
| 8 | Excèntrica hexàgon |  | 6 | CE esquerra |  |
| 2 | Excèntrica final |  | 6 | DF dreta |  |



Taula 8.1: Recull de les peces impreses amb la impressora 3D. Elaboració pròpia.

En total el robot està format per 91 peces impreses en 3D. Durant el procés, però, se'n van haver de repetir i reformar algunes, elevant considerablement el nombre de còpies realitzades.

9. MUNTATGE

Amb les peces a casa i les eines preparades es va passar al muntatge de tot robot. S'havien d'ajuntar, en total, noranta-una peces impreses en 3D, a les que calia sumar-hi els motors, el portapiles i la placa impresa del kit de robòtica proporcionat per Picaxe.

9.1 Normalització i mètrica en material de ferreteria

Per normalitzar les mides de fabricació de cargols, femelles, volanderes i tot el material de ferreteria i agrupar-les totes sota la mateixa normativa s'han elaborat, ja des de fa temps, diversos índex on s'especifiquen totes aquestes dimensions, gruixos i llargades. Els dos més coneguts actualment són l'estàndard ISO, on les peces s'anomenen amb les sigles ISO seguides d'un número; i l'A2/A4, on les peces reben el nom de DIN seguit del número al qual corresponen.

Pel que fa a la mètrica, tots els elements de ferreteria s'agrupen segons el seu diàmetre. Aquest es defineix per mitjà d'una lletra seguida d'un guió i el valor corresponent al diàmetre: M-4, per exemple.

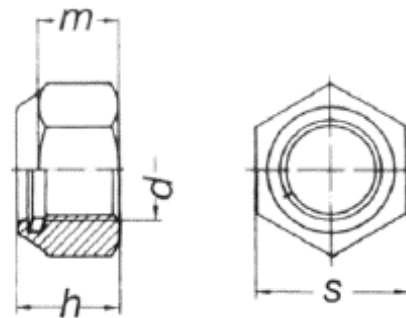
Pel muntatge del robot s'han utilitzat femelles autoblocants, volanderes, cargols i varetes roscades que responen als següents estàndards:

Femelles autoblocants de M-3 corresponents al
DIN985:

$$m_{\min} = 2,4\text{mm}$$

$$s = 5,5$$

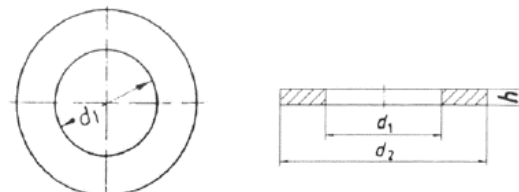
$$h = 4$$



Volanderes de M-3 corresponents al DIN125:

$$d_1 = 3,2\text{mm}$$

$$h = 0,5\text{ mm}$$



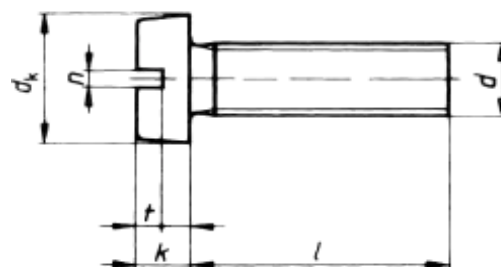
Cargols de cap cilíndric de M-3 corresponents al
DIN84:

$$k = 2\text{ mm}$$

$$l = 5\text{-}50\text{mm}$$

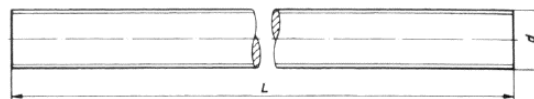
$$n = 0,8\text{ mm}$$

$$d_k = 5,5\text{ mm}$$



Vareta roscada de M-3 corresponent al DIN975.

$l = 1\text{ m}$



Taula 9.1: Mides i normativa de les peces de ferreteria utilitzades en el muntatge del robot. FONT: DISLAS Ferreterías. Elaboració pròpia.

Tot i que es necessitaven cargols amb una longitud de canya de 16 i 20mm, només s'han utilitzat els de 20mm degut a la falta d'estoc dels de 16mm a la ferreteria on es van comprar.

9.2 Eines i materials utilitzats

Per unir les diverses peces es van utilitzar tornavisos plans, alicates i claus fixes de 5,5mm d'obertura. També va ser necessària una serra de tallar ferro per tallar el tros de vareta roscada que es feia servir pel muntatge i paper de vidre per polir els orificis que no haguessin quedat prou definits durant la impressió. Per minimitzar el fregament entre les peces –sobretot entre les de transmissió i les de suport– es va recórrer a l'oli utilitzat per lubricar cadenes de bicicleta.

9.3 Procediment seguit

Abans de començar a muntar es va decidir d'interposar volanderes entre cadascun dels sòlids amb l'objectiu de millorar el rendiment del robot per mitjà de la minimització del fregament entre ells. També es van polir les peces que exerceixen rotació entre elles i s'hi va posar oli de cadena de bicicleta, per aconseguir el mateix objectiu.

Per dur a terme el muntatge es va seguir el següent procediment:

1. Muntar tots els sòlids que conformen la pota i unir-les entre elles formant parells.
2. Col·locar els motors a la taula de suport i unir-hi l'excèntrica que transmet el moviment a la primera pota.
3. Passar les varetes roscades als dos orificis de la taula de suport.
4. Unir, de forma intercalada, els parells de potes i els separadors a les barres que sobresurten de la taula.
5. Introduir el cap de les excèntriques a l'orifici dels diversos elements de suport, disposar-les a l'angle correcte amb el tall de clau Allen i unir l'altre punt amb els sòlids AE i AB del parell de potes.
6. Disposar el separador final al costat de la darrera pota.

7. Collar tots els elements a la barra del punt C amb femelles autoblocants.
8. Afegir la placa impresa i el portapiles a la taula de suport.

A continuació es mostren diverses imatges de la fase de muntatge:



Fig. 9.1: Muntatge de la pota.



Fig. 9.2: Pota muntada.

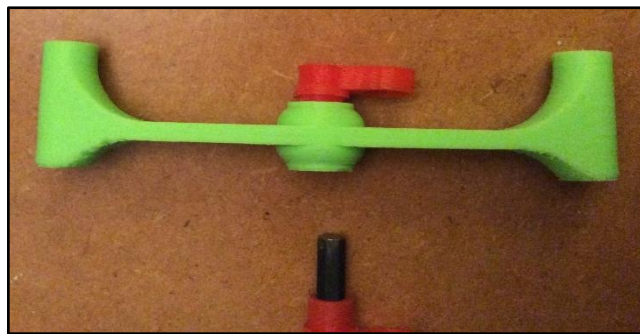


Fig. 9.3: Muntatge del sistema de transmissió de moviment.

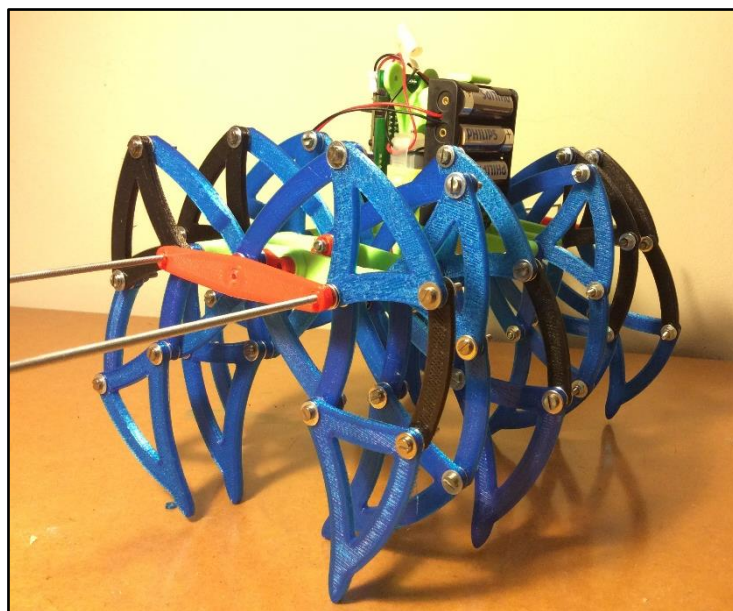


Fig. 9.4: Robot pràcticament acabat.

10. PROGRAMACIÓ

Per acabar d'arrodonir el treball ja fet i permetre que el robot es pogués moure es va dur a terme la programació de la placa que incorpora. Per fer-ho es va utilitzar el programa Scratch 2.0¹⁸.

Aquest pas es va realitzar de forma molt superficial perquè l'objectiu del treball no era centrar-lo en la programació; sinó que es volia aconseguir, simplement, que el robot es mogués i que fos controlat per algun dispositiu sense fils.

Al principi va costar decidir amb quin dispositiu es controlaria el robot perquè el kit de Picaxe n'incloïa forces: mòduls Bluetooth, comandaments d'infraroig, aparells d'ultrasons, seguidors de línies, comandaments amb *joystick*, etc.

Finalment es va utilitzar un dels mètodes més simples i que a més, complia el requisit proposat inicialment de poder controlar el robot sense fils: el comandament de la televisió (ref. bxl-rc001), que es comunica amb la placa Imagina mitjançant rajos d'infraroig.

El manual de programació del robot Imagina3dBot explica que:

*“A cada tecla li assignarem una funció. Per llegir la tecla polsada del comandament ho farem amb la instrucció wait for TV IR on input C.0. La instrucció s'espera a rebre un senyal d'infraroig per l'entrada C.0, que és on tenim connectat el receptor. Amb aquesta instrucció la tecla polsada coincideix amb la rebuda i es desa a IR”.*¹⁹

Per tant, per posar el sensor en funcionament es va haver d'indicar al programa que l'entrada C.0 correspon a un sensor d'infraroig. Llavors es va crear la funció bucle i s'hi van incloure les diverses excepcions que en formen part. Cada excepció realitza una sola tasca: anar endavant, endarrere, pivotar a la dreta...o la que se li vulgui assignar.

¹⁸ Programari lliure desenvolupat pel Lifelong Kindergarten Group del MIT Media Lab.

¹⁹ Cita extreta de *Activitats amb Imagina3dBot i Scratch2*. (pàg.27). INNOVA DIDÀCTIC. 24 setembre 2015. Recuperat de <https://dl.dropboxusercontent.com/u/13016054/MANUAL%20IMAGINA3DBOT-SCRATCH2%20REV2.0.pdf>

Les diverses tasques es van fer operar amb mòduls molt simples: només fan engegar el motor en un sentit, en l'altre o aturar-lo. Combinant aquests mòduls i les seves direccions s'aconsegueix tot el programa (fig. 10.1).



Fig. 10.1: Programa utilitzat pel funcionament del robot.

11. CONJUNT DE PROVES

Quan es va tenir el robot muntat i el programa en ple funcionament es van dur a terme un seguit de proves per verificar els paràmetres obtinguts en l'estudi i comprovar si s'havien pogut assolir els objectius del començament.

Per començar es va fer desplaçar el robot per una superfície regular, llisa, com una taula. D'aquesta manera es podia veure si el moviment era el correcte i si el programa llançat a la placa feia funcionar bé el mecanisme.

Lavors es va fer moure sobre una superfície irregular per comprovar si complia els atributs estudiats durant el capítol 6 i verificar si realment podia superar obstacles de gairebé 2mm d'alçada.

Els resultats van ser satisfactoris: el robot funcionava perfectament en ambdós tipus de sols, tot i que en el segon d'ells presentava alguna dificultat més. Per tant, es complia l'objectiu principal del treball, ja que, com es va comprovar, el robot té la capacitat de desplaçar-se per superfícies irregulars.



Fig. 11.1: Robot caminant per un terreny irregular.

12. ROBOT DEFINITIU

12.1 Especificacions tècniques

Robot amb potes capaç de desplaçar-se per terrenys irregulars.

1. Pes: 572g
2. Mides aproximades:
Amplada_{màx}: 20cm
Llargada: 27,5cm
Alçada: 19,5cm
3. Velocitat de desplaçament (sobre terreny regular no rel·liscent): $\approx 4,2\text{cm/s}$
4. Capacitat de sobrepassar obstacles d'un diàmetre inferior a 1,85 mm.



Fig. 12.1: Robot definitiu.

12.2 Pressupost

El pressupost s'ha realitzat tenint en compte la suma dels preus dels tres components que conformen el robot: les peces impreses, els elements de ferreteria i el kit Imagina3dBot.

12.2.1 Impressió 3D

PREU IMPRESSIÓ: 6€/h + IVA + TRANSPORT

| PEÇA | TEMPS (h) | CÒPIES | PREU |
|--------------------|-----------|--------|---------|
| Taula suport | 3,4 | 1 | 20,40 € |
| Separador mig | 1,2 | 4 | 28,80 € |
| Separador final | 1 | 2 | 12,00 € |
| Excèntrica motor | 0,1 | 2 | 1,20 € |
| Excèntrica hexàgon | 0,1 | 8 | 4,80 € |
| Excèntrica final | 0,1 | 2 | 1,20 € |
| AB dreta | 0,6 | 6 | 21,60 € |
| AB esquerra | 0,6 | 6 | 21,60 € |
| AE dreta | 0,6 | 6 | 21,60 € |
| AE esquerra | 0,6 | 6 | 21,60 € |
| BCD dreta | 0,8 | 6 | 28,80 € |
| BCD esquerra | 0,8 | 6 | 28,80 € |
| CE dreta | 0,5 | 6 | 18,00 € |
| CE esquerra | 0,5 | 6 | 18,00 € |
| DF dreta | 0,5 | 6 | 18,00 € |
| DF esquerra | 0,5 | 6 | 18,00 € |
| EFG dreta | 0,8 | 6 | 28,80 € |
| EFG esquerra | 0,8 | 6 | 28,80 € |

| | | | |
|------------------|------|----|----------|
| SUBTOTAL: | 13,9 | 91 | 342,00 € |
|------------------|------|----|----------|

| | |
|-------------------|----------|
| IVA (21%): | 71,82 € |
| TRANSPORT: | 7,50 € |
| TOTAL: | 421,32 € |

12.2.2 Ferreteria

| NOM | NORMATIVA | DIÀMETRE | LLARGADA (mm) | UNITATS | PREU/UNITAT | PREU TOTAL |
|-------------------------|-----------|----------|---------------|---------|-------------|------------|
| Cargols acer A2 | DIN7985 | M3 | 20 | 80 | 0,13 € | 10,46 € |
| Bareta roscada zinc | DIN975 | M3 | 1000 | 1 | 0,50 € | 0,50 € |
| Arandes inox | ISO7089 | M3 | -- | 300 | 0,01 € | 1,77 € |
| Femelles autobloc. zinc | DIN985 | M3 | -- | 64 | 0,01 € | 0,76 € |
| Clau Allen acer | -- | M4 | -- | 1 | 2,60 € | 2,60 € |

| | |
|-------------------|---------|
| SUBTOTAL: | 16,08 € |
| IVA (21%): | 3,38 € |
| TOTAL: | 19,46 € |

12.2.3 Kit Picaxe Imagina3dBot+

El kit que s'ha fet servir es troba disponible a la web de Picaxe per un preu de 115,89€ i inclou els següents components:

- Un suport 3D, rodes i juntes tòriques
- Una placa de control Imagina Android + cable de programació microUSB
- Una placa driver de motors L293D
- Una placa amb dos sensors de línia CNY70 + cable amb connectors
- Dos motors reductors cablejats
- Un portapiles pla 4xAA amb cables i connector
- Un brunzidor CY-3V o KY-012
- Un detector digital po1134 de 10cm d'abast
- Un comandament a distància d'infraroig ref. bxl-rc001
- Un Nunchuck Wii
- Un sensor ultrasò HC-SR04
- Un mòdul Bluetooth HC06
- Una caixa BOX de 3,6L

12.2.4 Preu total

Sumant el preu dels tres apartats anteriors obtenim el pressupost final de tot el projecte: 555,73€.

El preu real de la realització d'aquest robot, però, no supera els 100 euros, incloent totes les despeses, ja que la major part de les impressions van tenir un cost molt reduït perquè les va dur a terme l'A. i perquè el kit de robòtica de Picaxe és propietat de l'Institut.

13. POSSIBLES APLICACIONS

El robot que s'ha realitzat durant aquest treball de recerca està pensat per tenir aplicacions didàctiques i recreatives.

En l'àmbit didàctic es podria utilitzar per aprendre a programar, per fer servir eines de disseny en 3D o per presentar als alumnes l'innovador i fascinant món de la impressió 3D.

En l'àmbit recreatiu, per la seva banda, es podria treballar en la mateixa línia que el didàctic, però afegint la possibilitat de fer-lo servir com una joguina. També es podrien incloure altres dispositius, canviar la disposició de les potes o tot el que el bon aficionat al món del disseny 3D, de la robòtica i de la programació pugui imaginar.

El disseny podria, igualment, utilitzar-se en l'àmbit industrial si es realitzés amb la mida adequada i amb els materials adients.

Seria fàcilment aplicable, per exemple, en l'agricultura industrialitzada, on interessa malmetre poc el terreny, aprofitar al màxim la superfície de conreu i poder sobrepassar certs obstacles o moure's pels camps de cultiu salvant les seves irregularitat. Els recursos econòmics sovint no són suficients per poder adquirir màquines complexes que realitzin aquestes tasques. L'aplicació del mecanisme de Theo Jansen al sector agrari seria una bona solució a aquests problemes, ja que ofereix, alhora, simplicitat i baix cost.

També es podria aplicar en tasques de rastreig marítim, planetari o de clavegueram, tot i que la velocitat de translació és petita i són molt més àgils i òptims per aquestes tasques els robots que disposen de rodes o de potes amb més d'un grau de llibertat per a moure's.

CONCLUSIONS

És possible realitzar un robot caminador que es mogui mitjançant el mecanisme de Theo Jansen?

Des del descobriment de l'artista fins a l'estudi del seu mecanisme i la realització del robot, en aquest treball ens hem endinsat en diferents camps de l'enginyeria i del disseny per tal d'assolir el propòsit plantejat al començament. No només s'ha aconseguit l'objectiu sinó que, a més a més, hem aprofundit en la matèria i hem conegut, i sobretot descobert, moltes eines del disseny assistit per ordinador.

A partir de les experiències pràctiques i els models digitals realitzats al GeoGebra hem pogut arribar a la conclusió que les mides deduïdes per Nabil Khamashta Llorens en el seu treball titulat: *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* són les més adients per aconseguir la major efectivitat en el moviment del mecanisme. Amb aquestes mides s'obté la major alçada de pas, amb un diàmetre també considerable i amb la relació transmissió de potència-no interacció amb obstacles més gran entre els conjunts estudiats.

També hem vist que cal tenir presents les limitacions de precisió de la impressora i dissenyar les peces que realitzen funcions mecàniques amb un marge més gran per poder evitar fregaments, mals encaixos o altres problemes entre elles. Si es fa d'aquesta manera no serà necessari haver-les de modificar a posteriori.

I finalment, es pot afirmar que s'han complert tots els objectius plantejats abans d'iniciar el projecte i que el robot compleix amb tota la llista de requisits desitjats al començament:

- Camina sobre terrenys irregulars.
- Porta acoblat tot el material del kit Imagina3dBot de Picaxe.
- S'ha imprès en 3D malgrat la falta d'impressora pròpia o de l'Institut.
- És controlat per un comandament a distància d'emissió d'infraroig.
- Disposa d'un grau de llibertat per cada tres parells de potes.

ÍNDIX DE FIGURES, TAULES I GRÀFIQUES

A continuació s'enumeren les diverses figures, taules i gràfiques mostrades al treball i les fonts de les quals han estat extretes. Les que no apareixen a la relació han estat realitzades per l'autor del treball.

Imatge fons de portada: Zayer, S. (2014). *Fondos de pantalla poligonales*. 3 octubre 2015. Recuperat de <http://fandroides.com/wp-content/uploads/2014/05/wall3.jpg>

Imatge portada ANNEX I: Utilidad.com. (2011). *Equipo y material para dibujo técnico: guía para principiantes*. 3 octubre 2015. Recuperat de http://www.utilidad.com/sites/default/files/imagecache/article_image/images/technical_draw_tools_plan_architecture.jpg

Fig. 1.1: [*Roue de bicyclette* (1913) de Marcel Duchamp]. 21 juny 2015. Recuperat de https://www.centrepompidou.fr/media/imgcoll/Collection/4R/01/4R01144_normal.jpg

Fig. 1.2: [*La esfera Japón* (1988) de Jesús Soto]. 21 juny 2015. Recuperat de http://www.venezuelatuya.com/guayana/soto/japon_rojo.jpg

Fig. 1.3: [*The Matter of Time* (1997) de Richard Serra al Guggenheim Bilbao]. 21 juny 2015. Recuperat de <http://minimalissimo.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/02/Snake-04.jpg>

Fig. 1.4: [George Rickey confeccionant una de les seves obres]. 26 juliol 2015. Propietat de VAGA, Nova York. Recuperat de http://sniteartmuseum.nd.edu/assets/132727/ricky9_sm.jpeg

Fig. 1.5: Nisly, E. i Orcutt, B. (2015). *George Rickey: Esculturas* [*Nebula III* (1989) de George Rickey. Acer inoxidable. Peça única. 61x96,5x91,5 cm]. 1 juliol 2015. Recuperada de <http://www.galeriamarlborough.com/img/upload/Rickey--Nebula-III--1989--acero-inox--61x96-5x91-5-cm.jpg>

Fig. 1.6: Nisly, E. i Orcutt, B. (2015). *George Rickey: Esculturas* [*Four Rectangles One Square* (1979) de George Rickey. Acer inoxidable. 3 peces. 94x94x20,3 cm]. 1 juliol 2015. Recuperada de <http://www.galeriamarlborough.com/img/upload/Rickey-Four-rectangles-one-square-1979-acero-inox-94-94-20-3cm.jpg>

Fig. 1.7: Nisly, E. i Orcutt, B. (2015). *George Rickey: Esculturas* [*Column of Six Cubes with Gimbal* (1996) de George Rickey. Acer inoxidable i policromia. Peça única. 210,8x81,3x81,3 cm]. 1 juliol 2015. Recuperada de <http://www.galeriamarlborough.com/img/upload/Rickey--Column-of-Six-Cubes-with-Gimbal--view-2---1995-96--acero-inox.-policromia--210-8x81-3x81-3-cm.jpg>

Fig. 1.8: Nisly, E. i Orcutt, B. (2015). *George Rickey: Esculturas* [*Conversation-Mondrian Meets Malevich* (1990) de George Rickey. Acer inoxidable. 3 peces. 76,2x24,1x30,3 cm]. 1 juliol 2015. Recuperada de <http://www.galeriamarlborough.com/img/upload/Rickey--Conversation---Mondrian-meets-malevich--view-5--1990--acero-inox.--ed.de-3--76-2x24-1x30-3-cm.jpg>

Fig. 1.9: Nisly, E. i Orcutt, B. (2015). *George Rickey: Esculturas* [*One Line Up with Gimbal* (1990) de George Rickey. Acer inoxidable. Peça única. 223,5x25,41x25,4 cm]. 1 juliol 2015. Recuperada de <http://www.galeriamarlborough.com/img/upload/Rickey--One-Line-up-with-Gimbal--1986-7--acero-inox.--223-5x25-4x25-4-cm.jpg>

Fig. 2.1: Van der Klis, L. (2010). *Strandbeest* [Theo Jansen]. 25 juliol 2015. Recuperada de <https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10595446254/>

Fig. 2.2: Scheeren, J. (2014). *Theo Jansen for the New York Times* [Theo Jansen construint una de les seves “criatures”]. 25 juliol 2015. Recuperada de <http://static01.nyt.com/images/2014/11/30/magazine/30strandbeest1/30strandbeest1-master675-v2.jpg>

Fig. 2.3: [Plataforma voladora]. (1979). 30 juliol 2015. Recuperat de <http://www.strandbeest.com/images/ufo.jpg>

Fig. 2.4: [Màquina de pintar]. (1986). 30 juliol 2015. Recuperat de <http://www.strandbeest.com/images/schildermachine.jpg>

Fig. 2.5: Lambert, L. (2011). *# EXHIBITIONS: The Beach Animal that Eats Wind. Theo Jansen with Earthscape* [Exposició de Theo Jansen al Museu d'Art d'Ōita, al Japó]. 1 setembre 2015. Recuperada de <http://thefunambulistdotnet.files.wordpress.com/2011/09/theo-jansen-earthscape-exhibition.jpg>

Fig. 2.6: Hofstee, S. (2010). *Strandbeest* [*Animaris Siamesis* i les seves aletes]. 5 setembre 2015.

Recuperada de <https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10595202243/in/photolist-h9gbuK-8892uX-h9daHF-h95Ffq-h9hzwL-h9hpeH-h97Q2t-h98LL6-h97JFh-h9bmkE-h96ecv-8892xt-88j2Ya>

Fig. 2.7: Voges, L. (2010). *Strandbeest* [Theo Jansen amb el control binari a les mans]. 5 setembre

2015. Recuperada de <https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594946896/>

Fig. 2.8: Kok, A. (2005). *Strandbeest* [*Animaris Currens Ventosa* (1993) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594490483/in/photolist-h9cwV2-h97Dic-h97WLZ-h9et6h>

Fig. 2.9: Jansen, T. (2008). *Strandbeest* [*Animaris Sabulosa* (1994) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única.]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594417233/in/photolist-h9ca96-h97wdw-88ccto-88ccdQ>

Fig. 2.10: Jansen, T. (2013). *Strandbeest* [*Animaris Ancore* (1997) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594196375/in/photolist-h9b2uc-h973Zc>

Fig. 2.11: Van der Klis, L. (2011). *Strandbeest* [*Animaris Rhinoceros* (2004) de Theo Jansen. Plàstic i fusta. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594313385/in/photolist-h9bCgB-88cd8Y-h9brQN-h9bycf-h96Mqt-h98nug-h9731u>

Fig. 2.12: Van der Klis, L. (2013). *Strandbeest* [*Animaris Percipiere Recutus* (2005) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594435643/in/photolist-h9aZKF-h9hpdm-h97rRN-h97YHz-h9cfBv-h9769U>

Fig. 2.13: Jansen, T. (2009). *Strandbeest* [*Animaris Umerus* (2009) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594935775/in/photolist-h9hCyY-8xyPH8-h9ePht-h9b1RC-h97pGB-h97Ha2-8xyTD8-h98exz>

Fig. 2.14: Van der Klis, L. (2011). *Strandbeest* [*Animaris Gubernare* (2011) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/6231437024/in/photolist-auB5v6-auB6Q4-auDKDd-auB6cT-auDK8o-h9hf1n-h97vCp-h9eUYh-h96dq1-h9hx6p-h98TW8>

Fig. 2.15: Jansen, T. (2013). *Strandbeest* [*Animaris Apodiacula* (2013) de Theo Jansen. Plàstic. Peça única]. 5 setembre 2015. Recuperada de

<https://www.flickr.com/photos/50964344@N08/10594183416/>

Fig. 3.1: [Mecanisme de James Watt]. Recuperada de la pàgina M11 del treball *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* elaborat per Khamashta, N.

Fig. 3.2: [RIMHO 2]. 15 agost 2015. Recuperat de <http://www.car.upm-csic.es/fsr/gds/rimho2.jpg>

Fig. 3.3: [Model biològic del mecanisme de Theo Jansen]. 15 agost 2015. Recuperada de <http://s88921297.onlinehome.us/Photography/blog/wp-content/uploads/2006/11/research-7.jpg>

Fig. 4.1: [Primera maqueta de Theo Jansen]. Recuperada de la pàgina M28 del treball *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* elaborat per Khamashta, N.

Fig. 5.1: [Màquina Plustech, de Plustech Oy (2006). Realitza tasques forestals]. Recuperada de la pàgina M9 del treball *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* elaborat per Khamashta, N.

Fig. 8.1: Zureks. (2008). *3D Printing* [Esquema de la tecnologia FDM]. 15 setembre 2015. Recuperada de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/FDM_by_Zureks.png

Fig. 8.2: [Pantalla d'utilització del NetFabb]. 15 setembre 2015. Recuperada de <http://airwolf3d.com/2013/06/21/no-drips-making-parts-watertight-netfabb/>

Fig. 8.3: [Arxiu Gcode d'un disseny STL]. 15 setembre 2015. Recuperada del *Manual de impresión* elaborat per RepRap BCN i adaptat per RepRap Venezuela. Disponible a https://docs.google.com/a/iesdecelra.cat/file/d/0B_BoZiOp_RLHMms4S1FNMTE2RkE/edit

Fig. 8.4: [Impressora BCN3d+]. 15 setembre 2015. Recuperada de http://www.bcn3dtechnologies.com/sites/default/files/BCN3Dplus_1_0.jpg

Taula 4.1: [Resum de les unions del mecanisme simplificat]. Dades recuperades de la taula 1 de la pàgina M32 del treball *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* elaborat per Khamashta, N.

Taula 6.1: [Recull de les diverses mides que conformen el mecanisme i les respectives alçades i diàmetres de pas obtingudes durant l'estudi]. Dades recuperades de la taula 2 de la pàgina M40 del treball *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* elaborat per Khamashta, N. i de la web de Theo Jansen: http://www.strandbeest.com/beests_leg.php

Taula 9.1: [Mides i normativa de les peces de ferreteria utilitzades en el muntatge del robot]. Dades recuperades de la guia confeccionada per DISLAS Universal en Tornillería i disponible a <http://www.tornilleriadislas.com/files/tornilleriadin.pdf>

REFERÈNCIES

Llibres

Cebolla, Castell. *AutoCAD 2014: Curso practico*. 1a ed. Madrid: RA-MA editorial, 2013.

Gómez del Campo, Juan Carlos. *Mecánica*. 3a ed. Madrid: S.A. Ediciones Paraninfo, 1999.

Treballs

Khamashta, N. (2009). *Estudio de una plataforma móvil para desplazarse sobre superficies irregulares* (Projecte de final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya). 10 juny 2015. Recuperat de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/7744>

Blanch, G. (2014). *Història, construcció i funcionament de la nostra impressora 3D*. (Treball de recerca). Institut Cendrassos, Figueres.

Guies i reculls d'informació

Manual de impresión. RepRap BCN. Adaptació de RepRap Venezuela. 5 setembre 2015. Recuperat de https://docs.google.com/a/iesdecelra.cat/file/d/0B_BoZiOp_RLHMms4S1FNMTF2RkE/edit

Catálogo tornillería en DIN. DISLAS Universal en Tornillería. 5 agost 2015. Recuperat de <http://www.tornilleriadislas.com/files/tornilleriadin.pdf>

Activitats amb Imagina3dBot i Scratch2. (pàg.27). INNOVA DIDÀCTIC. 16 juliol 2015. Recuperat de <https://dl.dropboxusercontent.com/u/13016054/MANUAL%20IMAGINA3DBOT-SCRATCH2%20REV2.0.pdf>

Pàgines web

Arte cinético. Última edició: 15 juny 2015. Wikipedia. 20 juny 2015. https://es.wikipedia.org/wiki/Arte_cin%C3%A9tico

Arte cinético. Juan Luis Roldan Calzado. Sense especificar. Ilusionario. 21 juny 2015. http://www.ilusionario.es/ARTE/arte_cinet.htm

La galeria Marlborough presenta la primera mostra de George Rickey a Barcelona. Barcelona cultura. 1 juny 2015. Ajuntament de Barcelona. 21 juny 2015.

<http://lameva.barcelona.cat/barcelonacultura/descobreix/exposicio-george-rickey-escultura-art-cinetic-galeria-marlborough#.VYc26UZqO1o>

Bringing George Rickey home. Michael O. Garvey. 2009. University of Notre Dame. 11 agost 2015.

<http://news.nd.edu/news/12273-bringing-george-rickey-home/>

Arte cinético. Sense especificar. 2015. masdearte.com. 11 agost 2015.

masdearte.com/movimientos/arte-cinetico/

Theo Jansen, el sutil encanto del arte cinético. Sense especificar. 2015. Ounae. 11 juliol 2015.

<http://ounae.com/theo-jansen-arte-cinetico/>

Exposición Theo Jansen: Animales que se alimentan de viento. José Tomás Franco. 2013. Plataforma arquitectura. 12 juliol 2015. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-292608/exposicion-theo-jansen-animales-que-se-alimentan-de-viento-theo-jansen-earthscape/52327a47e8e44e8766000034>

Theo Jansen. Última edició: 10 juliol 2015. Wikipedia. 12 juliol 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Theo_Jansen

Painting Machine. Theo Jansen. 2011. Strandbeest. 13 juliol 2015.

www.strandbeest.com/theo_painting_machine.php

Leg System. Theo Jansen. 2011. Strandbeest. 12 juliol 2015. www.strandbeest.com/beests_leg.php

Creación de gráficos para los foros. 2010. La web de física. 8 juliol 2015.

<http://forum.lawebdefisica.com/entries/374-Creacion-de-graficos-para-los-foros>

Lego: Dimensions and Measurements. Robert Cailliau. Sense especificar. 25 juliol 2015.

<http://www.robertcailliau.eu/Lego/Dimensions/zMeasurements-en.xhtml>

HEXBUG Strandbeast. Sense especificar. 2015. HEXABUG ®. 2 agost 2015.

<https://www.hexbug.com/mechanical/tarantula/>

3D printing. Última edició: 4 agost 2015. Wikipedia. 6 setembre 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

Fused deposition modeling. Última edició: 7 setembre 2015. Wikipedia. 7 setembre 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling

STL. Última edició: 2 juliol 2015. Wikipedia. 8 setembre 2015.

<https://es.wikipedia.org/wiki/STL>

Filaments. Sense especificar. 2015. BCN3D Technologies. 8 setembre 2015.

<http://www.bcn3dtechnologies.com/es/catalog/filaments>

Àcid polilàctic. Última edició: 6 juliol 2015. Wikipedia. 20 setembre 2015.

https://ca.wikipedia.org/wiki/%C3%80cid_polil%C3%A0ctic

Acrilonitril butadiè estirè. Última edició: 22 agost 2015. Wikipedia. 20 setembre 2015.

https://ca.wikipedia.org/wiki/Acrilonitril_butadi%C3%A8_estir%C3%A8

Clorur de polivinil. Última edició: 16 juliol 2014. Wikipedia. 20 setembre 2015.

https://ca.wikipedia.org/wiki/Clorur_de_polivinil

Vídeos

TED Conferences, LLC. (2007). *Theo Jansen: My creations, a new form of life* [Vídeo]. 11 juliol 2015.

Recuperat de http://www.ted.com/talks/theo_jansen_creates_new_creatures

Barón, S. (2015). *Mecanismo de Theo Jansen en GeoGebra* [Vídeo]. 8 juliol 2015. Recuperat de

https://www.youtube.com/watch?v=1K3D3T_jjG0

Hernández, A. (2012). *Tutorial Solidworks nivel básico 1* [Vídeo]. 15 juliol 2015. Recuperat de

<https://www.youtube.com/watch?v=0BaOrpMrymg>

ANNEX I: PLÀNOLS

En aquest primer annex s'hi adjunten els plànols de les diverses parts en el següent ordre:

1. Plànol acotat de la pota fet en dues dimensions amb AutoCAD.
2. Plànols de les diverses peces realitzades en 3D amb el SolidWorks, seguint el mateix ordre establert al treball.

Trobareu l'annex en format PDF en el fitxer .zip on s'envia el treball i també en el següent enllaç:

[https://drive.google.com/file/d/0B_2A-DceoNA1VnldzhZR05jRzQ/view?usp=sharing]

ANNEX II: BLOG

L'adreça web que s'adjunta a continuació conté tot el material digital, des de fotos o vídeos fins a les rèpliques realitzades amb GeoGebra i els models .STL d'aquest treball. També conté material complementari, com ara vídeos de les escultures de George Rickey o de Theo Jansen.

[<http://elrobotcaminador.blogspot.com.es/>]

