

PROTOTIPATGE D'UNA MICROINJECTORA DE TERMOPLÀSTICS

Marcel Martínez Melià

Treball final de carrera del grau en Enginyeria Mecànica

Departament de disseny gràfic de Vilanova i la Geltrú – UPC EPSEVG

Resum

En aquest projecte s'ha realitzat un estudi de disseny per a crear un prototip de màquina d'injecció de termoplàstics en format reduït de manera que pugui ser reproduïble en un entorn no professional, sense la necessitat d'utilitzar eines o mètodes de fabricació complexos.

dia, seguint tots els càlculs fets per a assegurar el seu correcte funcionament, de manera que resti d'exemple per a que altres persones puguin reproduir-lo com a projecte DIY de manera senzilla i assequible.

1. Introducció

Veurem en aquest article el procés seguit per a dissenyar i fabricar un prototip de microinjectora per a termoplàstics, des de l'elecció de les premisses bàsiques en les que es basa el projecte, passant pel disseny i assemblatge en CAD, els càlculs justificatius i simulacions realitzades, fins a la fabricació i muntatge final.

Finalment és parlarà de les millores, tant de funcionament com de redisseny de components, a aplicar de cara a una possible comercialització del producte, que s'han trobat gràcies a l'experimentació realitzada mitjançant el prototip construït.

2. Objectius

L'objectiu final d'aquest projecte construir un prototip automatitzat d'una microinjectora per a reutilitzar el PLA residual de les impressions 3D, així com altres termoplàstics que fem servir dia a

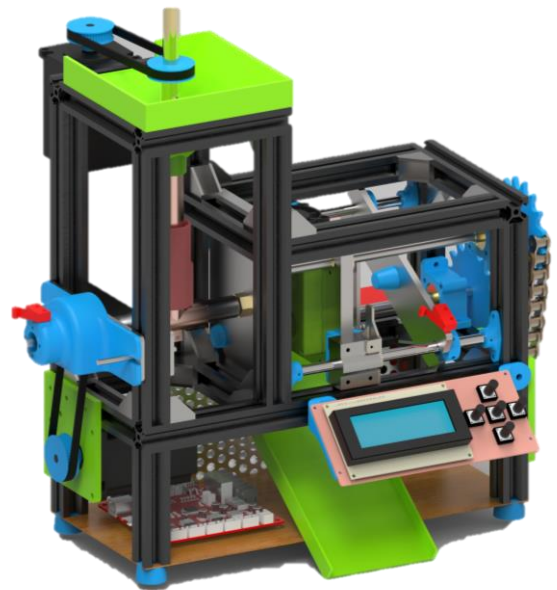


Figura 1. Renderitzat del disseny final del prototip.

3. Disseny del prototip

Després d'una llarga recerca i estudi sobre el funcionament de les IMM i de les diferents solucions disponibles al mercat que podrien ser aplicables al propi prototip, es decideix apostar per un disseny amb les següents característiques:

- Dos canals independents per a la injecció, un per fondre el material (plastificació) i un altre per extrudir-lo a alta pressió (injecció). D'aquesta manera s'evita la utilització de complexes vàlvules i flancs d'un cargol únic per ambdues tasques.
- Una estructura de perfils d'alumini T-slot per a poder delimitar la forma bàsica de la màquina i poder fixar la resta de components a ella simplement passant femelles en T a dintre dels seus canals.
- Moviment automatitzat amb motos pas a pas. Aquests són capaços de transmetre un moviment molt precís i controlat alhora que permeten escollir entre diferents models segons el par necessari per a les diferents tasques.
- Transformació del moviment rotatori dels motors a lineal mitjançant cargols sense fi. Són una opció econòmica i resistent per a aconseguir desplaçar linealment tots els components.
- Motlle imprès en 3D amb resina mitjançant tecnologia SLA. Les impressores SLA proporcionen peces massisses amb uns acabats superficials i toleràncies molt superiors a les convencionals FDM. Suposen una alternativa molt més ràpida i accessible al mecanitzat de blocs d'alumini.

Un cop establertes aquestes premisses bàsiques es procedeix a donar forma al conjunt global del prototip així com al disseny inicial dels diferents components i sistemes que integrarà.

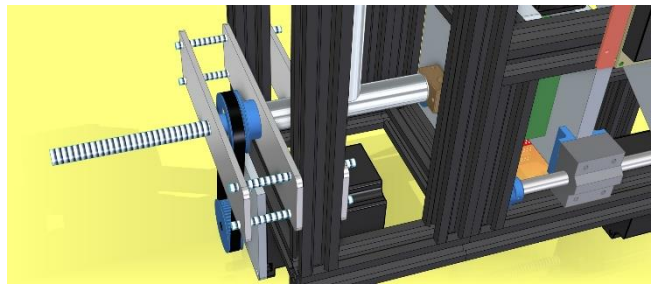
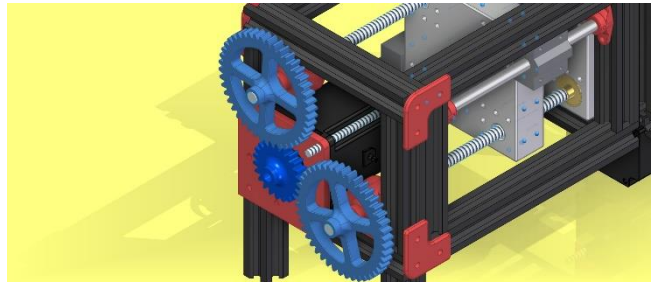


Figura 2. Algunes de les propostes de disseny descartades.

4. Proposta final

Tot el mecanisme reposa dintre d'una estructura de perfils d'alumini anoditzat que li dóna rigidesa i delimita el volum ocupat per la màquina. El seu funcionament, que podem observar a la figura 3, comença per la tolva que trobem a la part superior de la torre dreta on es diposita tot el material a injectar. Els pellets es precipiten pel forat central a dintre del tub de plastificació on una broca el desplaça cap a sota entre els seus flancs, a mesura que avança el polímer s'apropa a un primer anell calefactable que augmenta la seva temperatura fins a un estat plastós. Aquest tub connecta amb un altre d'horitzontal en el que es diposita la quantitat necessària de material per a un cicle, seguidament un pistó desplaçat per un cargol sense fi empeny el polímer fins a la boquilla, la qual està a la temperatura necessària gràcies a un segon anell calefactable a l'extrem del tub d'injecció. El material passa a través de la boquilla fins a l'embocadura que connecta amb el motlle, el qual està tancat a alta pressió mitjançant els dos cargols sense fi de les cantonades que reben la potència d'un motor a través d'una distribució per plats i cadena. Quan el polímer ha refredat i adoptat la forma desitjada els cargols giren en el sentit contrari obrint el motlle, que fa xocar una placa amb els pins ejectors amb un topall, fent que aquests s'endinsin al motlle i empenyin la peça ja solidificada fora de la cavitat la qual és recollida per una rampa i dipositada a un contenidor.

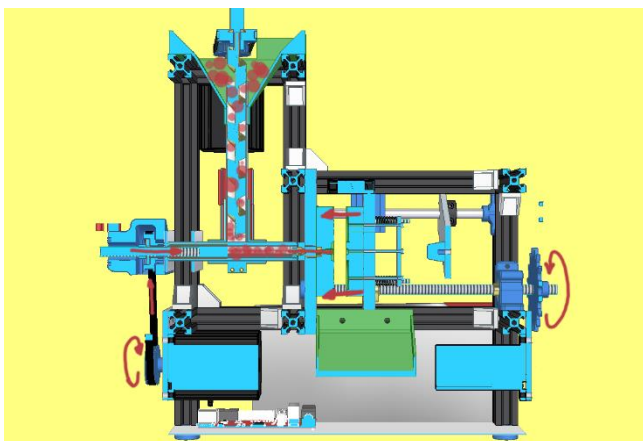
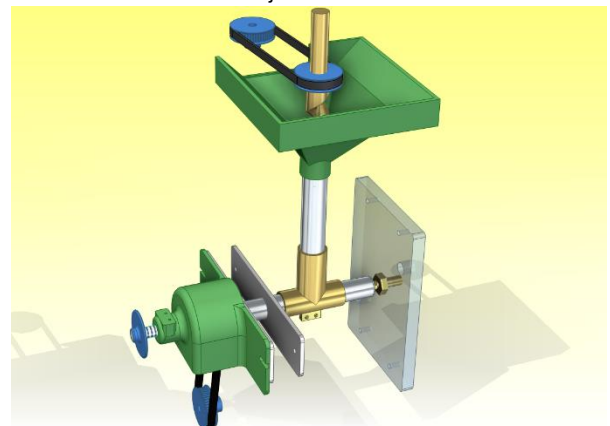


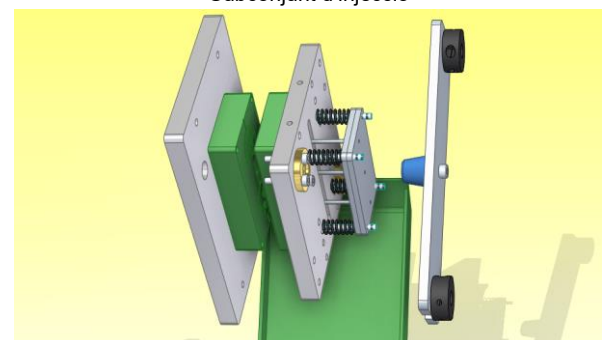
Figura 3. Esquema de funcionament del prototip.



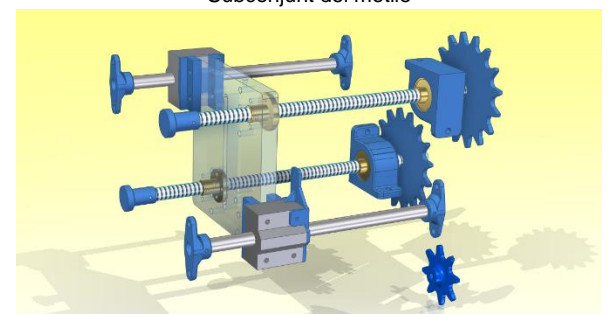
Subconjunt d'estructura



Subconjunt d'injecció



Subconjunt del motlle



Subconjunt de tancament

Figura 4. Separació dels subconjunts que formen el prototip.

5. Simulació d'omplerta del motlle

Es dissenya una peça en forma de moneda per a ser injectada en dues cavitats. Se li calcula un diàmetre de canal i de les portes d'entrada del material el més òptim possible perquè les dues cavitats puguin ser omplertes alhora i amb el menor esforç possible. També s'aplica un angle de desemmotllament de 2° a totes les parets de la peça per a facilitar l'ejecció d'aquesta, que es farà mitjançant tres pins, un al centre del canal i els altres dos al centre de les peces aprofitant els cercles del dibuix per a dissimular la marca.

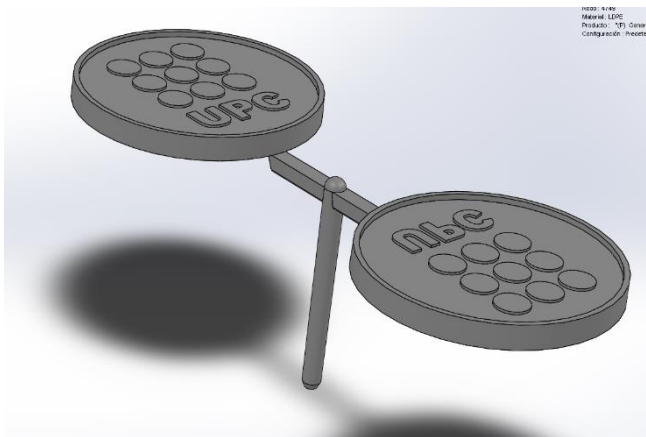


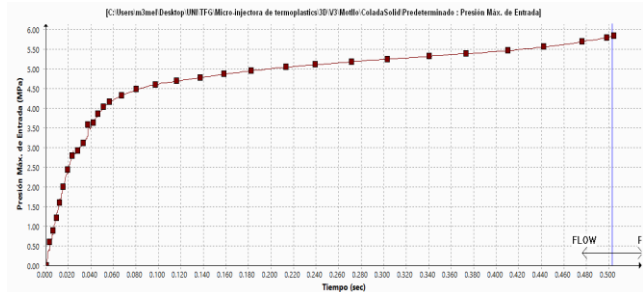
Figura 5. Disseny de la peça a injectar amb els canals.

El punt d'injecció es localitza a l'extrem inferior de la tija central amb un diàmetre de 1.2 mm.

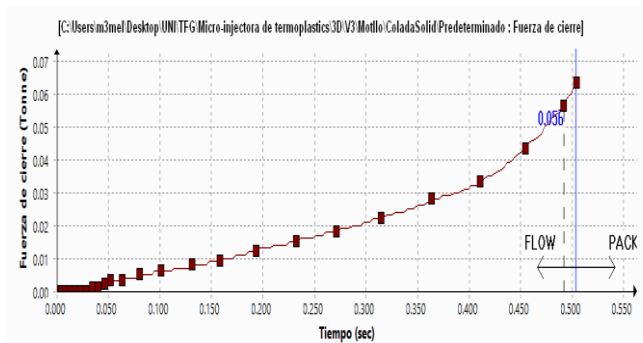
Els materials seleccionats són Polièstirè de baixa densitat genèric com a polímer a injectar, degut a la seva semblança quant a viscositat i punt de fusió amb el PLA^[1], i nylon 6-10 per al motlle doncs té una gran resistència a la calor i pot ser imprès en 3D per a fabricar el motlle del prototip^[2]. Les temperatures de treball per a ambdós materials es fixen a 220°C i 40°C respectivament.

La pressió màxima d'injecció és delimitada a 20MPa i a la força màxima de tanca disponible se li dona el valor de 6.5 tones. Aquests valors es prenen només com a aproximacions des d'on poder començar a realitzar els càlculs.

Els resultats obtinguts són satisfactoris. La peça es pot omplir correctament amb una pressió d'injecció de 5.8 MPa (Gràfica 1), inferior al 66% del límit de pressió d'injecció màxima especificat per aquesta anàlisi, i la força de tanca necessària per a mantenir el motlle tancat té el seu pic màxim a 0.066 Tones o 650 N (Gràfica 2).



Gràfica 1. Pressió d'injecció.



Gràfica 2. Força de tancament.

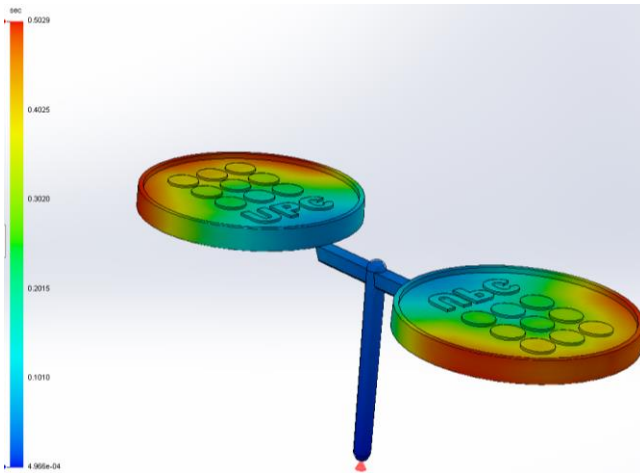


Figura 6. Temps d'omplerta de la peça (0.503s).

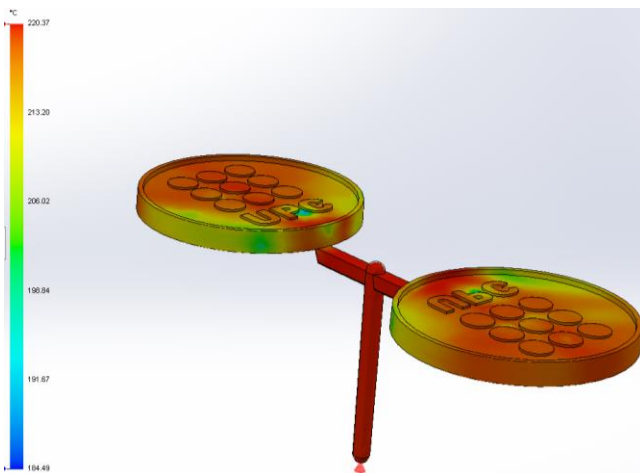


Figura 7. Temperatura del polímer al finalitzar la injecció.

En conclusió, la simulació ha sigut molt satisfactòria i tot i mostrar-se un parell de punts conflictius respecte a xuclets i solidificacions prematures, no són excessivament grans o problemàtics i podríem ser fàcilment remeiabls amb un lleuger redisseny de la peça. D'altra banda, s'han obtingut uns valors de pressió d'injecció i força de tanca bastant per sota del que hipotèticament s'havia establert amb anterioritat. Això s'ha aconseguit en part per l'absència de parets molt primes i de geometries complexes o de recorreguts excessivament llargs, per la qual cosa per als càlculs del funcionament general de la màquina s'utilitzaran uns valors lleugerament per sobre dels obtinguts en aquesta simulació a mode de factor de seguretat.

6. Càlculs justificatius

Per a escollir el motor adequat per a moure el pistó injecció és necessari saber quin moment ha de crear aquest per a obtenir la pressió requerida a dintre del tub injecció. En aquest cas es suposa que no és requeriran més de 15 MPa per a omplir la configuració de motlle més gran, aproximadament tres cops més que l'obtingut a la simulació de l'apartat anterior, a part es menyspreen les forces degudes al pes dels components.

Per tant, mitjançant la pressió i la secció del tub podem trobar la força d'injecció requerida:

$$P = F/S \rightarrow F_{max} = 15MPa * (5^2mm * \pi) = \mathbf{1200N}$$

Un cop obtinguda la força d'avanç podem traduir-la al moment de gir necessari per al nostre cargol i femella:

$$Mt = Mr + Mf = F * \frac{dp}{2} * tg(\lambda + \theta) + \frac{F * \mu v * df}{2}$$

On:

- $dp = d_{rosca} - \frac{p}{2} = 8mm - \frac{2}{2} = 7mm$
- $\lambda = arctg\left(\frac{p}{\pi * dp}\right) = arctg\left(\frac{2}{7\pi}\right) = 5.29^\circ$
- $\theta = arctg(\mu r) = arctg(0.15) = 5.14^\circ$ ($\mu r =$ coeficient de fricció de la rosca)^[3]
- $df = 14.5mm =$ diàmetre de fricció femella casquillo
- $\mu v = 0.04 =$ coeficient de fricció femella casquillo^[4]

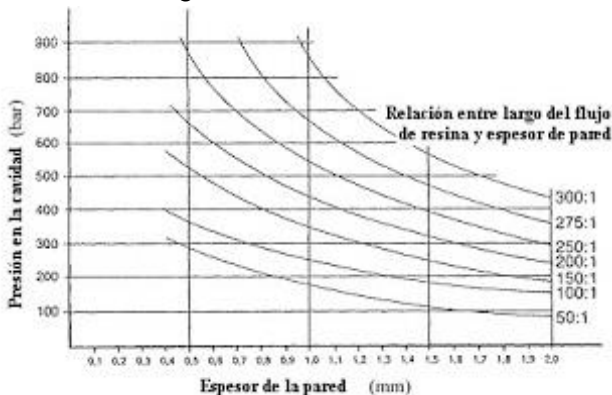
Per tant el moment necessari al cargol serà:

$$\begin{aligned} & 1200N * \frac{7mm}{2mm} * tg(5.29^\circ + 5.14^\circ) \\ & \quad + \frac{1200N * 0.04 * 14.5}{2} \\ & = 1121Nmm = \mathbf{1.15Nm} \end{aligned}$$

Es calcula també la força necessària del mecanisme de tanca per a ser capaç de mantenir les dues meitats del motlle unides a alta pressió durant l'omplerta d'aquest, degut a que el menor desajust o obertura entre elles pot causar una peça defectuosa o fins i tot la fuga de material calent a alta pressió.

La pressió al interior del motlle derivada de la injecció depèn de la geometria de la peça injectada i del material utilitzat. En aquest cas es suposarà que s'injecta una peça de la major mida possible en Poliestirè de baixa densitat, doncs té unes propietats semblants al PLA.

- Dimensions de la peça: 60x30mm → Àrea projectada= $A_p = 1800\text{mm}^2$
- Recorregut màxim del material: 20mm abeurador +60mm peça= 80mm.
- Pressió màxima disponible: 15MPa.
- Relació de flux: 50:1 → 80 mm de recorregut i 1.6 mm d'espessor de les parets.
 - Pressió de la cavitat= $P_i = 100\text{ bar} = 100\text{ kg/cm}^2$ → Obtingut de la gràfica 4^[5].



Gràfica 3. Relació de flux. (Font: [Tecnología de los plásticos](#))

- Correcció de viscositat: $100\text{ kg/cm}^2 * 1.2$ (PEBD)= 120 kg/cm^2
- Força de tanca= $P_i * A_p = 120\text{ kg/cm}^2 * 18\text{ cm}^2 = 2.130\text{ kgf} = 21.000\text{ N}$

Un cop obtinguda la força exercida al motlle degut a la pressió a la cavitat es calcula el moment necessari que ha de traslladar el motor per a mantenir les dues meitats d'aquest tancades.

Al utilitzar la mateixa configuració de cargols i femelles els valors a l'equació seran els mateixos que en el cas anterior i només canviarà el valor de la força, que serà de 21.000N dividida entre els dos cargols, per tant 10.500N cadascun. La diferència és que en aquest cas no trobem cap fricció de volanderes o casquillos i per tant el segon terme de l'equació és eliminat.

$$M_t = M_r = F * \frac{dp}{2} * tg(\lambda + \theta)$$

$$10.500\text{ N} * \frac{7\text{ mm}}{2\text{ mm}} * tg(5,29^\circ + 5,14^\circ) = 6.765\text{ Nmm}$$

$$= 6.75\text{ Nm}$$

D'aquest 6.75 Nm, el motor n'haurà de proporcionar el doble perquè disposem de dos cargols, però degut a la relació de 2:1 entre els plats i el pinyó del motor només es necessitarà d'un motor amb un parell de **7 Nm**.

7. Pressupost

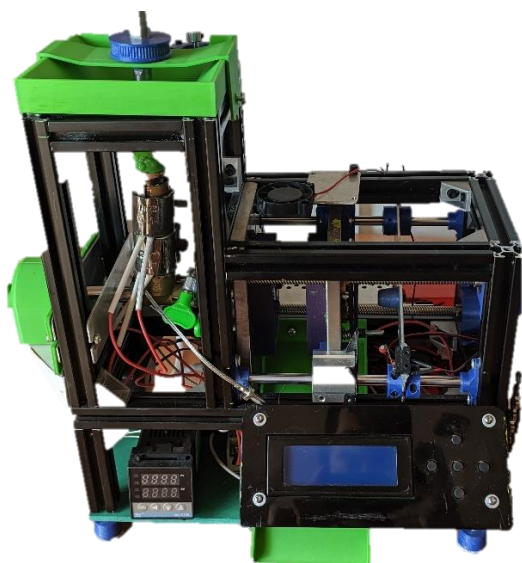
Es troben tres parts diferents a analitzar, per una banda el cost del treball com a enginyer per a obtenir el disseny final del prototip, per altra el cost de la compra de les peces necessàries i finalment el cost generat per les hores dedicades a la fabricació i muntatge d'aquest. Totes aquestes hores han sigut comptabilitzades a 30€/h segons el sou mitjà d'un enginyer recent titulat a Espanya.

No s'han considerat en cap apartat les despeses generades per l'obtenció de llicències, equips informàtics o eines utilitzades durant la fabricació, doncs es consideren com a bens propis ja amortitzats o de caràcter gratuït com en el cas de les llicències educatives.

Pressupost d'execució material		26.049,74
Despeses generals	13%	3.308,47
Partida de benefici industrial	6%	1.526,98
Pressupost base de licitació		4.835,45
I.V.A.	21%	5.344,45
PRESSUPOST TOTAL		35.629,64

Taula 1. Pressupost total del projecte^[6].

Tal i com consta a la Taula 1, el pressupost total del projecte, així com la fabricació del prototip, és de **35.629.64 €**.



8. Conclusions

Per a finalitzar es detallen les reflexions sorgides al llarg del desenvolupament del projecte i com la fabricació del prototip ha servit per a poder comparar les expectatives obtingudes, fruit dels càlculs i simulacions realitzats, amb l'experimentació real.

Degut a les mancances en quant a eines i maquinària de fabricació disponible les toleràncies i geometries obtingudes distaven de ser les més adients per al correcte funcionament del procés d'emmotllament per injecció i per tant no s'ha aconseguit produir cap peça ni comprovar el comportament del motlle i el mecanisme ejector en presència de material fos. Encara així, si que s'ha aconseguit crear un prototip compacte, senzill i econòmic, com dictaven els objectius inicials, en el que es poden fer tots els moviments necessaris per a poder injectar peces de forma automàtica i que, amb uns pocs ajustos en els components esmentats a l'apartat anterior, possiblement s'aconseguiria fer-lo funcionar, i per tant podria ser replicat i modificat sense majors complicacions, per altres persones amb coneixements tècnics que comparteixin l'esperit *maker* o *DIY*.

La fabricació del prototip, després de comprovar una correcte interacció entre els components al CAD, ha servit per a tenir una major consciència sobre el funcionament dels elements mecànics i els requeriments que ha de complir un disseny, en termes de rigidesa, toleràncies, moviments, etc. De manera que s'ha pogut anar realimentant el disseny amb cada iteració, per a millorar-lo i facilitar tant la fabricació, com el muntatge de la màquina.

No crec que el disseny obtingut sigui el definitiu, doncs hi ha gran espai per a la millora o conceptes que es podrien haver enfocat des d'una altra perspectiva de cara a comercialitzar el producte en un futur. Tot i així, si crec que si ha sigut un gran repte i projecte en el que s'han reflectit gran part de les competències pròpies del grau i que m'ha servit sobretot a mi personalment per a millorar la meua capacitat per a desenvolupar dissenys i productes més reals i propers a la industrialització d'aquí endavant.

AGRAÏMENTS

Als meus pares, sense l'esforç dels quals no hauria tingut l'oportunitat d'arribar fins aquí.

A la família Fargas Gonzalez, per la seva hospitalitat i ajuda en la creació d'aquest projecte.

BIBLIOGRAFIA

[1] Rogers, Tony (2015). Polylactic Acid (PLA). A Creative mechanisms.

www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes

[2] Fernandez, Mariano (2011). Nylon (PA66). A Tecnología de los plásticos.

tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/nylon.html

[3] Engineering ToolBox, (2004). *Friction and Friction Coefficients*. A

https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html

[4] D. Fuller, Dudley (Consultat 12/2020). Coeficients of friction. A Massachusetts Institute of Technology. <https://web.mit.edu/references-fall/aip>

[5] Fernandez, Mariano (2012). Fuerza de cierre. A Tecnología de los plásticos.

tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/08/fuerza-de-cierre-clamping-force.html

[6] Artículo 131 del REIAL DECRET 1098/2001. BOE, número 257, del 26 d'octubre de 2001.