

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Re-disseny impressora de Fused Deposition Modeling de grans dimensions

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Arnau Colls Martí

Tutor: Dra. Maria Luisa Garcia-Romeu De Luna

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels Processos de Fabricació

Convocatòria: Setembre/2019

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ	4
1.1	Antecedents	4
1.2	Objecte	5
1.3	Especificacions i abast	6
2.	CARACTERÍSTIQUES DE LES IMPRESSORES 3D	9
2.1	Resum tecnologies additives	9
2.2	Resum funcionament i components mecànics de les impressores FDM.....	12
3.	SOLUCIONS ALTERNATIVES	18
3.1	Enfoc inicial	18
3.2	Proposta de solucions	24
3.3	Dissenys alternatius	28
4.	DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ	37
4.1	Introducció.....	37
4.2	Subconjunt estructura.....	37
4.3	Subconjunt guiatge i transmissió eix X i Y	40
4.4	Subconjunt guiatge i transmissió eix Z.....	43
4.5	Subconjunt <i>heatbed</i>	45
4.6	Extrusors i suports bobines.....	46
4.7	Hardware i Software	47
4.8	Muntatge elèctric	49
6.	RESUM DEL PRESSUPOST.....	51
7.	CONCLUSIONS	51
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	52
9.	BIBLIOGRAFIA.....	53
10.	GLOSSARI	54
	ANNEX A: Estudi de les diferents tecnologies 3D	55
A.1	Descripció de les diferents tecnologies d'impressió 3D del mercat.....	56
A.2	Descripció funcionament FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>).....	60

A.3 Descripció mecànica FDM.....	61
A.3.1 Estructura.....	62
A.3.2 Llit calent.....	63
A.3.3 Sistema de guiatge.....	65
A.3.4 Sistema transmissió capçal i taula.....	65
A.3.5 Capçal.....	65
A3.6 Hotend	66
A.3.7 Extrusor.....	68
A.4 Estudi mercat impressores FDM grans dimensions	70
A.5 Materials comuns de la impressió 3D	72
ANNEX B: Anàlisi del prototip-màquina per reformar	75
B.1 Introducció.....	76
B.1 Anàlisi	77
B.1.1 Estructura.....	77
B.1.2 Llit calent.....	79
B.1.3 Sistema guiatge i transmissió eix Z	80
B.1.4 Sistema guiatge i transmissió als eixos X i Y.....	82
B.1.5 Altres elements de la impressora	85
ANNEX C: Anàlisi de solucions.....	87
C.1 Introducció	88
C.2 Estructura impressora 3D.....	88
C.3 Sistema guiatge i transmissió eix X i Y.....	93
C.4 Sistema guiatge i transmissió eix Z	98
C.5 Capçal i <i>hotend</i>	99
C.6 Extrusors i bobines filament	101
C.7 Localització elements elèctrics	102
ANNEX D: Càlculs	105
D.1 Introducció	106
D.2 Dades de la impressora	106

D.3 Precisió de l'eix Z.....	108
D.4 Flexió tirant amb guia HIWIN.....	110
D.5 Potència dels motors de l'eix Z.....	112
D.6 Potència dels motors de l'eix X	114
D.7 Potència dels motors de l'eix Y	116
D.8 Precisió de l'eix X i l'eix Y.....	117
ANNEX E: Documentació tècnica	119
E.1 Motor NEMA 17.....	120
E.2 Guia HIWIN i carro	121
E.3 Cargol potència BND 20x5 R.....	122
E.4 Femella R20-05K4	123
E.5 Suport rodaments de contacte angular FK 15	124
E.6 Acoblament rígid FACE20	125
E.7 RAMPS 1.4	126
E.8 Placa calefactada MK2B PCB	127

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Supervisat pel Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Politècnica de la Universitat de Girona, un grup d'estudiants va desenvolupar i fabricar un prototip d'impressora 3D, utilitzant la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*), coneguda també com FFF (*Fused Filament Fabrication*).

Amb una capacitat d'impressió de 500x500x500 [mm], a l'ordre de ample x llargada x alçada, els resultats del producte final que s'obtenien tenien una baixa precisió de tolerància, degut doncs a que es tractava d'un disseny a nivell de proves.

Com a característiques de la actual impressora 3D:

- El moviment amb eixos cartesianes està combinat en dos subconjunt:
 1. El subconjunt del capçal té moviment guiat a l'eix "X" i "Y", que corresponent a l'ample i la llargada de la peça.
 2. El subconjunt de la taula té moviment guiat a l'eix "Z", que correspon a l'alçada de la peça.
- Pels accionaments s'utilitzen motors NEMA (pas a pas), que tenen unes prestacions suficients per complir velocitats, moments, i precisió.
- La transmissió del moviment a l'eix "Z" de la taula es fa a partir i en l'ordre d'un conjunt d'engranatges helicoïdals accionats pel motor NEMA, politges (en el mateix eix que l'engranatge conduït) i corretges tancades T5, que finalment porten la transmissió a 4 vis-sens-fi, situats a les cantonades de la taula. Els vis-sens-fi actuen també com a eixos de guiatge de la taula.
- La transmissió del capçal es fa a partir de politges i corretges T5, i aquest està guiat amb barra INA i rodaments de boles lineals.
- El xassís de la impressora està fabricat amb perfil d'alumini extruït de secció 45x45 i regata de 10.
- En gran part, per la fabricació de suports i peces varies de la màquina s'ha utilitzat tecnologia 3D. Com per exemple:

- Carro del capçal extrusor.
 - Cartelles del xassís.
 - Suports dels motors pas a pas.
- La màquina disposa d'un carenat, amb una porta frontal i les seves frontisses i tapes els lateral i posteriors fixes. A la part superior del conjunt hi consta un caixó de tal manera que evitat totalment el possible contacte de l'operari amb els elements mòbils de la màquina..
- El control de la màquina es basa en hardware lliure (open hardware). S'ha utilitzat un Arduino mega 2560 que controla totes les senyals de la màquina excepte els motors, que estan controlats a partir d'una placa també de hardware lliure anomenada RAMPS 1.4.

El software utilitzat en aquesta màquina ha estat el Slic3r, que s'ocupa de transformar el model 3D en capes per ser impreses generant el G-Code. El software és lliure. Per enviar el G-Code al control de la màquina s'han utilitzats el Proterface i el Repetier, també software lliure.

1.2 Objecte

En aquest projecte es vol, en primer lloc, fer un estudi de mercat de les diferents tecnologies d'impressió 3D, i en concret FDM (*Fused Deposition Modeling*) que és la utilitzada per la màquina que es desenvoluparà. D'aquest estudi es pretén definir les característiques mecàniques de les màquines, les condicions de treball, fent referència per exemple tant a velocitats d'impressió com a condicions ambientals òptimes. Aquest recull d'informació es treballarà per tal que la direcció del projecte sigui correcte per l'obtenció de resultats equiparables a les tecnologies del mercat.

Seguidament, es treballarà en el re-disseny de l'actual màquina propietat de la UdG. Aquest re-disseny mecànic vol complementar l'anterior, millorant aspectes crítics o millorables observats gràcies a la construcció del prototip.

S'analitzarà el prototip, es reaprofitarà i/o es complementarà un Software acord amb el nou disseny, per expressar totes les possibilitats mecàniques que ofereix.

Es construirà la màquina d'impressió 3D, com a objectiu principal del projecte, a partir dels mitjans de l'autor, i possibles subcontractacions per fabricacions complexes autoritzades pel Departament al càrrec. Tanmateix, si fos necessari s'adquirirà material comercial a més del que es disposa actualment.

Finalment, es pretén fer una impressió 3D amb la màquina construïda d'un model, a ser possible d'una peça impresa amb la mateixa tecnologia a una màquina comercialitzada per professionals.

1.3 Especificacions i abast

1.3.1 Especificacions

En la següent taula es descriuen les directrius (especificacions) que ha de seguir i respectar el desenvolupament del projecte:

Taula 1 - Especificacions

Concepte	Descripció	Grau restrictiu	Responsable
GENERAL	La màquina d'impressió 3D ha de respectar com a mínim la capacitat en volum actual.	Imprescindible	Autor projecte
DISSENY	El disseny del capçal ha de ser modular, de tal manera que el seu muntatge i desmuntatge no impliqui molt de temps	Objectiu	Autor projecte
DISSENY	L'estructura ha de ser suficientment solida i rígida per suportar i esmorteir inèrcies i vibracions dels moviments generats per la impressió. Tanmateix el xassís ha d'estar dimensionat per suportar els esforços estàtics.	Imprescindible	Autor projecte
DISSENY	La taula d'impressió ha de ser prevista per obtenir una bona adherència dels diferents materials d'impressió.	Imprescindible	Autor projecte
MATERIALS	El disseny mecànic de la màquina ha de suportar diferents materials d'impressió, i	Imprescindible	Autor projecte

Concepte	Descripció	Grau restrictiu	Responsable
	per tant diferents velocitats de treball, temperatures de fusió, etc.		
MATERIALS	El capçal ha de poder intercanviar diferents <i>nozzle</i> , per variar la secció d'extrusió o el tipus de broquet. Serà un objectiu dissenyar un capçal amb capacitat de instal·lar-hi 2 <i>nozzle</i> .	Imprescindible	Autor projecte
RENDIMENT	A partir de resistències, sondes de temperatura i ventilació es vol aconseguir un control de temperatura tant al conjunt del capçal i al conjunt de la taula.	Objectiu	Autor projecte
RENDIMENT	La taula ha de poder graduar la seva perpendicularitat amb l'eix d'impressió mitjançant un mecanisme.	Imprescindible	Autor projecte
RENDIMENT	La tolerància de la peça resultant ha de poder-se comparar amb els resultats de les impressores que es comercialitzen de dimensions grans. Hauria de tenir una resolució fins a 100 micras.	Objectiu	Autor projecte
RENDIMENT	La velocitat de impressió haurà de ser de 150mm/, semblant a les que ofereixen les màquines de grans dimensions comercials.	Objectiu	Auto projecte
SENYAL I CONTROL	Es vol reaprofitar el Hardware utilitzat en la màquina existent, i en el cas de ser insuficient buscar alternatives, sempre compatible amb el software lliure.	Objectiu	Ajudes externes de tècnics electrònics amb el suport de l'autor del projecte.
SEGURETAT	Lligat en el concepte de SEGURETAT, els punts perillosos de la màquina seran degudament senyalitzats, per fer el marcatge CE a la màquina.	Imprescindible	Autor projecte
SEGURETAT	La màquina ha d'estar carenada, amb dos objectius: protegir operaris de punts d'enclavament, i per establir unes condicions ambientals.	Imprescindible	Autor projecte

1.3.2 Abast

A la finalització del projecte, tal i com es va pactar amb el peticionari, s'haurà d'elaborar un disseny que compleixi les especificacions esmentades a l'apartat *1.3.1 Especificacions*, amb l'elaboració de l'annex de plànols constructius, l'annexes necessaris per l'ús de la màquina, i la resta de documents necessaris que formaran el projecte escrit.

A més, es reconstruirà la impressora 3D, mecànicament i electrònicament, i es realitzarà una prova per valorar els resultats.

2. CARACTERÍSTIQUES DE LES IMPRESSORES 3D

En aquest apartat es resumeix l'estudi realitzat a l'annex A, on es descriuran breument les diferents tecnologies 3D que es poden trobar al mercat entrant més al detall a la tecnologia FDM.

2.1 Resum tecnologies additives

Actualment es troben diferents tecnologies de fabricació additiva, algunes d'elles inventades des de fa anys (l'estereolitografia va ser inventada al 1983) i d'altres descobertes recentment.

Actualment, un usuari no informat del ventall de possibilitats que ofereix la tecnologia additiva, tendeix a pensar que aquesta consisteix en extrudir un filament plàstic a sobre una base, i mitjançant l'acumulació d'aquest material, i el moviment d'una màquina, es forma una model. Aquesta tecnologia additiva correspon a la FDM (*Fused Deposition Modeling*), on les màquines es poden considerar impressores 3D, i és la més popular ja que és assequible per gairebé tothom, per això les màquines de gamma baixa s'anomenen també impressores 3D d'escriptori.

Ara bé, en el sector industrial, des del d'automoció, l'alimentari, l'aeroespacial, etc., com també el sector d'odontologia i joieria, es treballa, a més a més de la tecnologia FDM, amb altres tecnologies additives, on cada una d'elles ofereix unes característiques pròpies en el producte resultant.

Es fa un resum de les característiques generals d'aquestes tecnologies, descrites a l'ANNEX A, on en la tecnologia FDM es faran dos valoracions, una per impressores econòmiques, i una per impressores industrials, de tal manera que es podrà distingir les diferents possibilitats d'aquesta tecnologia estudiada en el projecte.

A totes les taules, a les files de *Velocitat d'impressió*, *Resolució element resultant* i *Resistència element resultant*, es fa una valoració sobre cinc, on les cel·les pintades en verd especifiquen el valor, sent negatiu les cinc cel·les en blanc, i molt bo les cinc pintades.

Taula 2: Resum característiques tecnologia FDM econòmica

Nom Tecnologia Additiva:	Tecnologia FDM econòmica				
Materials base:	PLA, ABS, Nylon, PETG, TPE, TPU, policarbonat.				
Estat material base:	Filament				
Element fusor o element adhesiu:	Element es fon travessant un broquet calefactada amb resistències i un llit calent.				
Velocitat d'impressió					
Resolució element imprès					
Resistència element imprès	PA	ABS	Nylon		
Productes elàstics o de més d'un color al mateix model:	Sí, tot i que es requereix màquines preparades i ben ajustades per imprimir el TPE, TPU ; Si (Da Vinci Color +3.000€)				
Sectors on s'utilitza	Prototipatge en general				

Taula 3: Resum característiques tecnologia FDM industrial

Nom tecnologia additiva:	Tecnologia FDM industrial				
Materials base:	Els mateixos que FDM econòmica. A més polímers d'alt rendiment, distingit per les famílies de poliariletercetones (PAEK) i les politerimides (PEI). Materials base que inclouen fibres de carboni, esferes de vidre. N'existeixen d'altres.				
Estat material base:	Filament, filament amb càrregues d'altres components.				
Element fusor o element adhesiu:	Element es fon travessant un broquet calefactat amb resistències, amb una càmera calefactada a vegades i un llit calent.				
Velocitat d'impressió					
Resolució element imprès					
Resistència element imprès					
Productes elàstics o de més d'un color al mateix model:	Si ; Si				
Sectors on s'utilitza	Aeroespacial, automotriu i mèdic, entre molts d'altres que requereixen de prototipatge.				

Taula 4: Resum característiques tecnologia SLA i DLP

Nom tecnologia additiva:	Estereolitografia (SLA) i DLP				
Materials base:	Es poden trobar varis tipus de resina: transparents, elàstics, resistents a impactes, d'alta resolució.				
Estat material base:	Resina líquida				
Element fusor o element adhesiu:	Rajos UV				
Velocitat d'impressió			SLA	DLP	
Resolució element imprès					
Resistència element imprès					
Productes elàstics o de més d'un color al mateix model:	Si ; Si				
Sectors on s'utilitza	Sector joieria, sector odontologia, prototipatge en general i producte final.				

Taula 5: Resum característiques tecnologia SLS i SLM

Nom tecnologia additiva:	Sintetitzat Selectiu per Làser (SLS) i fusió selectiva per làser (SLM)				
Materials base:	Poliamida, poliamida amb fibra de vidre, Nylon, pols bi-components amb metall, ceràmica, etc.				
Estat material base:	Pols				
Element fusor o element adhesiu:	Raig làser				
Velocitat d'impressió					
Resolució element imprès					
Resistència element imprès					
Productes elàstics o de més d'un color al mateix model:	Si (PP o polipropilè); No				
Sectors on s'utilitza	Prototipatge en general i productes finals				

Taula 6: Resum característiques tecnologia BJ

Nom tecnologia additiva:	Injecció d'aglutinant (Binder Jetting, BJ)				
Materials base:	Termoplàstics, metalls, cera, ceràmica, resines bi-components.				
Estat material base:	Pols				
Element fusor o element adhesiu:	Adhesiu				
Velocitat d'impressió					
Resolució element imprès					
Resistència element imprès					
Productes elàstics o de més d'un color al mateix model:	Si ; Si				
Sectors on s'utilitza	Prototipatge en general, utilitatges, models per aplicacions científiques i alguns productes finals.				

2.2 Resum funcionament i components mecànics de les impressores FDM

2.2.1 Funcionament general

El funcionament de les impressores FDM consisteix a entrar un programa G-Code d'un model a la màquina mitjançant un Software, el model prové inicialment de l'arxiu que està en format .STL.

Un cop s'inicia la impressió, el Software comença a controlar la màquina. L'extrusor alimenta el *hotend* amb el filament enrotllat de la bobina. El *hotend*, escalfat amb resistències i controlat amb ventiladors, extrudeix el filament en estat viscos a través d'un broquet que té roscat al seu extrem.

Aquest filament extrudit es va acumulant a sobre el llit calent, anomenat *heatbed*. Quan una capa del model acaba, la taula es separa la distància programada respecte el broquet, i s'inicia la impressió del següent nivell. Aquest cicle es repeteix les vegades que són necessàries per acabar la peça, i un cop finalitzada es deixa refredar i s'extreu de l'interior de la màquina.

Encara que el mercat ofereixi dissenys molts diferents de màquines FDM, quan s'analitza la mecànica interior d'aquesta es confirma que gaire bé totes utilitzen el mateixos mecanismes. Deixant de banda les màquines 3D Delta, les Polars o les que utilitzen braços robòtics, queden les impressores que funcionen en els eixos cartesianes (X , Y , Z), que són les més comunes.

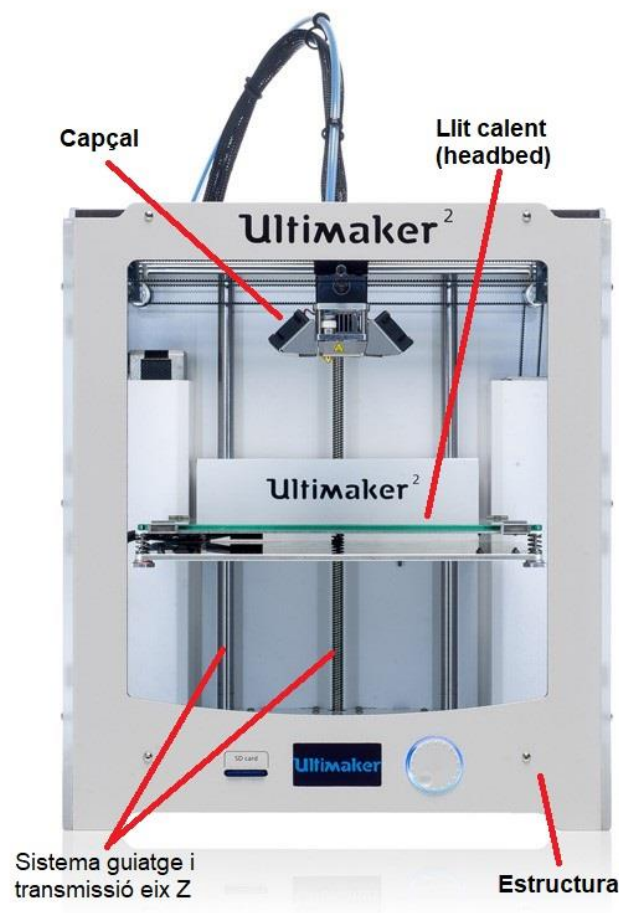
Per no desviar-se del contingut estudiat al treball, s'analitzarà exclusivament les màquines on el capçal extrusor es desplaça a l'eix X i Y, i el llit calent a l'eix Z. Si es dividís els subconjunts mecànics d'aquestes impressores FDM, es trobarien les següents parts:

2.2.2 Subconjunt estructura:

En altres paraules el xassís de la màquina, encarregat de suportar tots els altres subconjunts. Durant el disseny d'aquest, s'ha de tenir en compte les forces degudes als moviments i les possibles vibracions que es generen.

Per altre banda, ha de preveure un carenat si es vol certificar la màquina.

En casos més excepcionals l'estructura pot tenir un aïllament tèrmic i una estanqueïtat per si es vol calefactar l'interior de la impressora.



Imatge 1: Frontal impressora Ultimaker

2.2.3 Subconjunt llit calent (*heatbed*):

Fa referència a la base on es vol fabricar el model. Gairebé tots els filaments FDM requereixen que aquesta superfície es trobi a temperatures elevades i per satisfer aquesta necessitat, s'hi acoblen plaques calefactades comercials o bé resistències a una placa d'alumini mecanitzada.

Aquestes plaques calefactades es fixen a la part superior d'una altre placa més rígida, per evitar flexions de la base que resultin errors dimensionals del model.

També s'ha de tenir en compte que el filament viscos requereix ser imprès en una superfície llisa i adherent, on a les màquines més convencionals utilitzen vidre de borosilicat pel baix coeficient de deformació a temperatures elevades.

Finalment, aquest paquet de plaques (placa suport resistència + placa resistència + vidre) ha d'estar perfectament alineat a la superfície que descriu els moviments en els dos eixos del capçal. Una forma senzilla per aconseguir certa graduació és unir aquest paquet format per 3 nivells a una quarta placa separada per cargols roscats, de tal manera que el gir de cada un d'ells permeti l'alineament amb el capçal (hi ha màquines que porten sensors de proximitat per facilitar l'alineament a l'operari, i d'altres més industrials, el mateix Software mitjançant senyals adquirides, sincronitzen els moviments en els 3 eixos aconseguint imprimir sempre a la mateixa distància entre el broquet i la superfície).

2.2.4 Subconjunt guiatge i transmissió X i Y

Aquest subconjunt ofereix un ventall d'alternatives molt variat per incorporar a la màquina, on cada un dels fabricants d'impressores FDM desenvolupa el seu disseny (que moltes vegades el manté als diferents models de la marca, si en té) i en defineix les prestacions mecàniques. Es poden trobar un munt de solucions òptimes per cobrir el moviment dels dos eixos encarregats de moure el capçal amb el *hotend*, que vindran dimensionades segons la velocitat i acceleració que es vulgui assolir, la capacitat d'impressió de la màquina, i la resolució que es vulgui aconseguir.

Fent referència al guiatge, les solucions més habituals que es troben al mercat són:

- Guies calibrades o rectificades, amb coixinets lineals amb boles recirculants.
- Perfil guia comercials, amb el seu carro amb boles recirculants.

Fent referència a la transmissió, les solucions més habituals que es troben al mercat són:

- Corretges dentades i les respectives politges.
- Cargols de potència amb passos relativament grans.

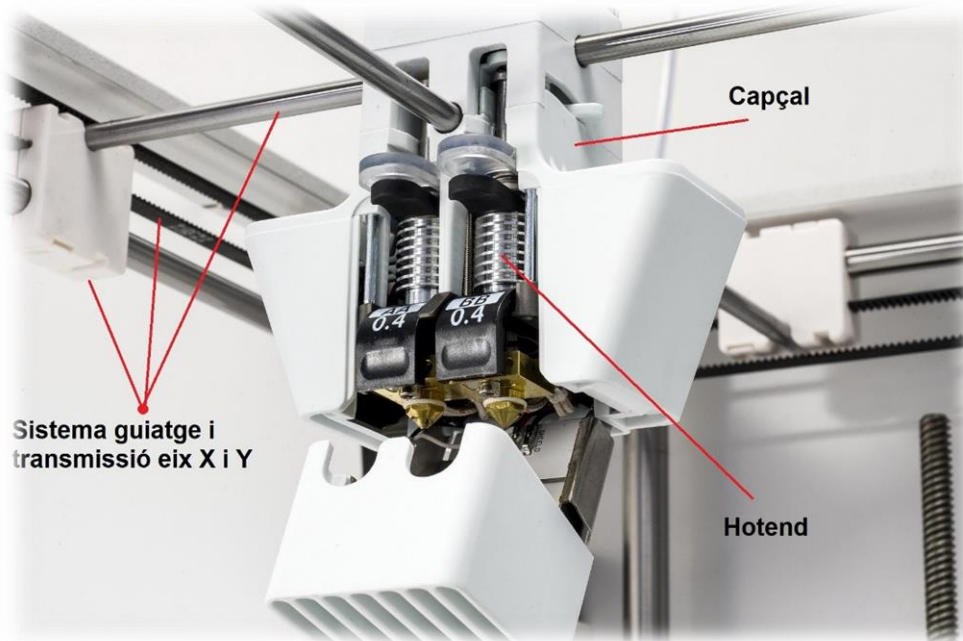
Llavors es poden trobar altres solucions, que son la combinació d'un element de transmissió i un de guiatge formant tal i com es mostra a la *imatge 2*, i es poden trobar al mercat.



Imatge 2: Conjunt comercial carro guiat amb corretja dentada (Fabricant: IGUS)

Tot i que els elements utilitzats normalment per aquest subconjunt no és molt ampli, la disposició d'aquests a la màquina permet multitud de combinacions. Els dissenys més aconseguits són:

- Els que eliminen pes dels elements mòbils .
- Els que redueixen longituds de corretges i per tant errors de posicionaments.
- Els que faciliten el muntatge de la màquina.
- El que el seu ajustatge és senzill, i no es desajusta amb el pas del temps.



Imatge 3: Detall capçal impressora Ultimaker

2.2.5 Subconjunt guiatge i transmissió Z:

Aquest subconjunt és l'encarregat gairebé sempre, d'eleva el *heatbed* on s'imprimirà la peça. Aquest, igual que els altres dos moviments lineals, requereix certa precisió, i l'element més utilitzat com element transmissor és el cargol de potència. A diferència dels altres dos moviments, aquest té una velocitat inferior, ja que només s'activa quan hi ha un canvi d'alçada de capa, que solen ser d'entre 0.12-0.5 mil·límetres.

Així doncs mentre que l'element de transmissió és el cargol de potència, l'element més utilitzat pel guiatge del *heatbed* és la guia de secció circular calibrada o rectificada. Aquestes guies van acompanyades de coixinets lineals amb boles recirculants, o altres productes que gairebé no generen fricció en el moviment axial sobre l'eix.

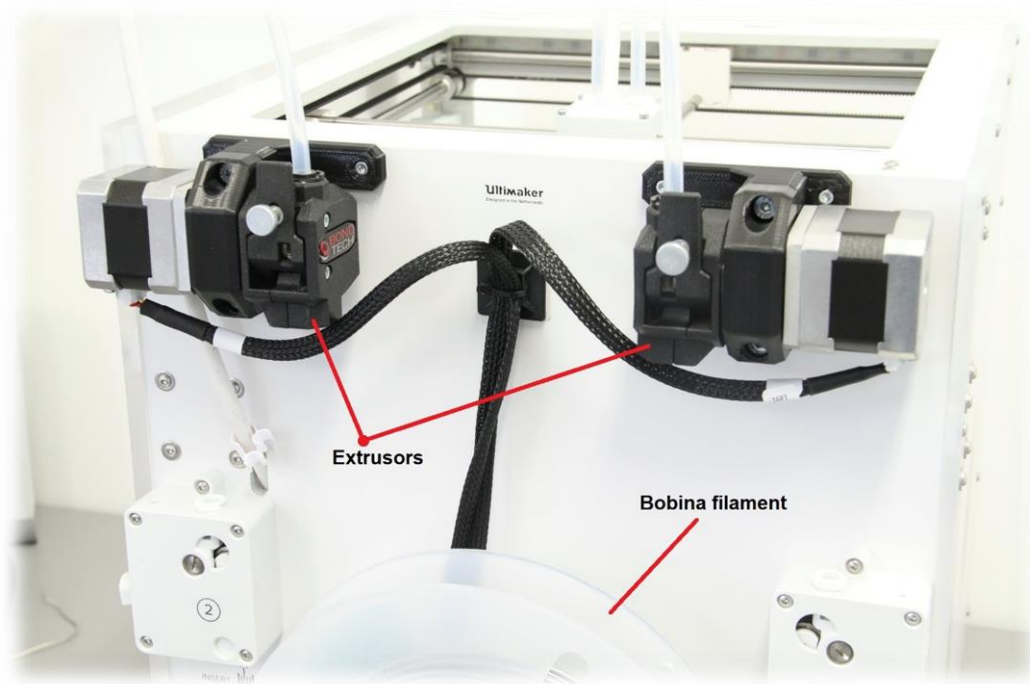
2.2.6 Subconjunt capçal + *hotend*

És un dels elements mòbils de la màquina, encarregat de transportar al *hotend* a tota la superfície 2D on la màquina podrà imprimir que defineix la capacitat. Cada fabricant de impressores 3D fan el seus propis dissenys, a partir de blocs d'alumini mecanitzats, peces injectades, xapes plegades o inclús peces impreses en 3D.

Unes de les premisses que s'ha de tenir en compte a l'hora de dissenyar un capçal, és reduir tant com sigui possible el seu pes, sense deixar de banda la seva rigidesa i resistència. D'aquesta manera, s'aconseguirà una fixació òptima amb el sistema de guiatge per evitar errors de posicionament, i alhora es reduirà la seva inèrcia.

A més d'aquestes premisses, el capçal ha de transportar els ventiladors, tant per refrigerar el difusor de calor del *hotend*, com per refrigerar el material extrudit pel broquet; i alguna vegada es transporta l'extrusor en cas d'utilitzar el sistema d'extrusió directa.

El *hotend*, encarregat d'escalfar el filament serà uns dels elements que determinarà els materials que es podran utilitzar. Al mercat es troben dos models de *hotends*, que es diferencien segons com està disposada la resistència del conducte extrusor. Aquest són el *hotend V6* i el *hotend Volcano*.



Imatge 4: Posterior impressora Ultimaker

2.2.7 Altres mecanismes

A part del subconjunt principals esmentats anteriorment, les impressores 3D necessiten altres mecanismes pel seu funcionament.

Per exemple, l'encarregat d'alimentar el *hotend* és l'extrusor, que consisteix en un motor pas a pas on té integrat un mecanisme d'engrenatges, aquest últim encarregat de traccionar el filament. L'extrusor es pot instal·lar directament al *hotend*, on el sistema s'anomena extrusió directa; o es pot col·locar a l'estructura de la màquina quedant una distància entre ell i el *hotend*, on el sistema s'anomena extrusió *Bowden* o indirecta.

Per altre banda, la bobina de filament requereix un suport, que a més a més faciliti la seva rotació. Algunes vegades es construeixen caixons pel filament, per mantenir unes condicions ambientals òptimes i per millorar-ne el rendiment.

3. SOLUCIONS ALTERNATIVES

En aquest apartat es resumeix l'ANNEX B on s'analitza el prototip de l'anterior projecte, i es proposen actuacions. Seguidament es descriu breument les dos alternatives desenvolupades prèviament a la solució final i es fa una valoració individual dels motius perquè han estat descartades.

El recull de solucions de cada subconjunt de la màquina que s'han valorat per adoptar al disseny, tant a les alternatives com a la solució final, es poden trobar descrites a l'ANNEX C.

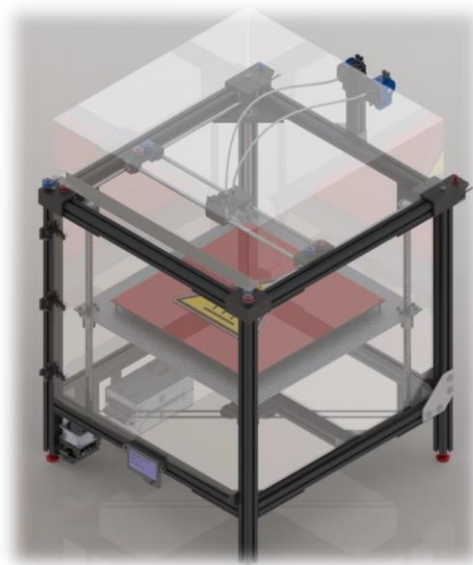
3.1 Enfoc inicial

Pel plantejament de les alternatives d'aquest projecte, s'ha pres com a model el prototip que es va construir a un projecte anterior, tenint en compte tant els aspectes positius com els negatius. Gràcies a la construcció d'aquest prototip, s'ha pogut analitzar tant la part teòrica del projecte com el funcionament de la màquina, donant una informació molt completa per poder treballar sobre els punts crítics que es donen a les impressores 3D amb tecnologia FDM d'aquestes característiques.

Per l'execució d'aquest projecte es parteix de dos requisits principals:

1. Construir una impressora 3D amb una capacitat similar a la que es va treballar a l'anterior projecte [400x400x400mm]
2. Utilitzar les coordenades cartesianes, on l'encarregat del moviment a l'eix Z és la taula calefactada, i el del moviment dels eixos X i Y és el capçal.

A partir dels dos requisits esmentats anteriorment, s'ha fet una anàlisi seccionat del prototip, que es pot trobar de forma detalla a l'ANNEX B, del que es pretén mantenir les decisions encertades del disseny que siguin compatibles amb la màquina nova, i reconduir les decisions que afectaven al bon funcionament. A sobre les taules de característiques de l'anàlisi del prototip de l'ANNEX B, es descriu les actuacions que es volen prendre per corregir-ne els punts crítics. Abans però, es descriu breument el disseny del prototip:

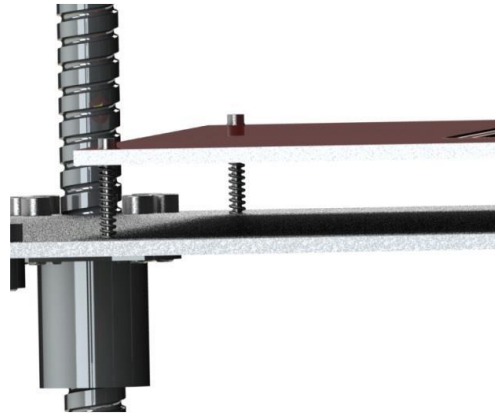


Imatge 5: Vista isomètrica del prototip en 3D del projecte reformat

L'estructura es va dissenyar amb perfilaria extruïda d'alumini, de secció 45x45 amb quatre regates. Constava de quatre peus units amb dos marcs rectangulars, un a la part superior de la màquina i l'altre a la part inferior, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 5*. Els perfils estaven units entre si amb angles i esquadres comercials.

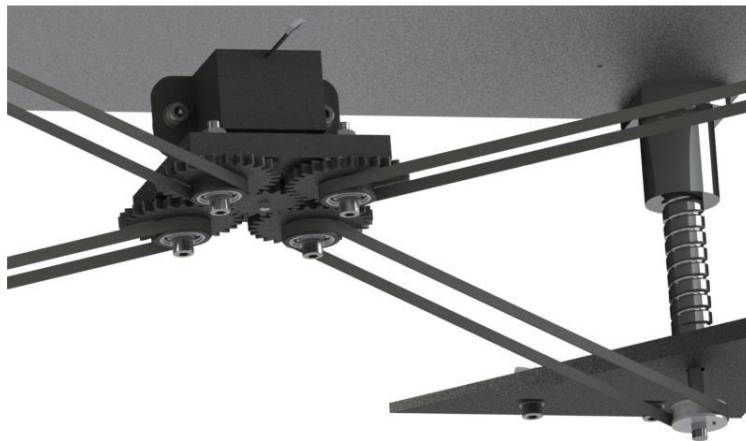
El *heatbed* estava format per quatre nivells:

- El nivell superior contava amb quatre vidres rectangulars de gruix 4mm, formant un quadrat de 400x400mm.
- A la part inferior dels vidres es van instal·lar quatre plaques d'alumini calefactades amb resistències. Aquest material era comercial i també formava un quadrat aproximadament de 400x400mm.
- Per reforçar els dos primers nivells, aquests es van fixar a la part superior d'una placa de escuma de polietilè d'uns 30mm de gruix.
- Finalment, per anivellar el paquet que formaven els primers tres nivells, es va acoblar una placa llisa d'alumini a la part inferior del muntatge del *heatbed*, amb un sistema de regulació que contava amb quatre cargols roscats i quatre molles, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 6*.



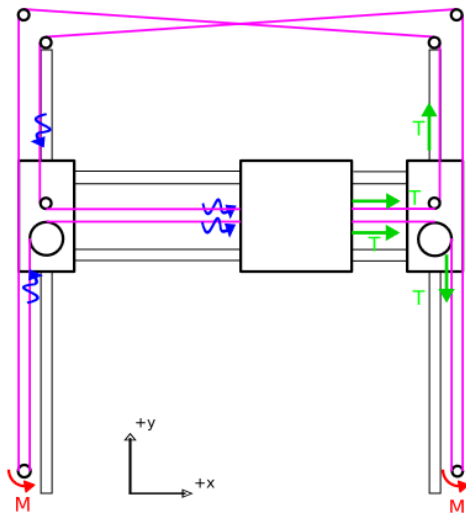
Imatge 6: Detall ajustatge heatbed del prototip reformat

Per el moviment del *heatbed* es van instal·lar quatre cargols de potència a les cantonades de l'interior de la màquina; i les seves femelles es van fixar a la placa llisa d'alumini. Els quatre cargols de potència estaven activats per un sol motor, fixat al centre del marc inferior de l'estructura. Mitjançant un sistema de pinyons i politges dentades, es traslladava la potència des de l'eix del motor fins els quatre cargols, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 7*.

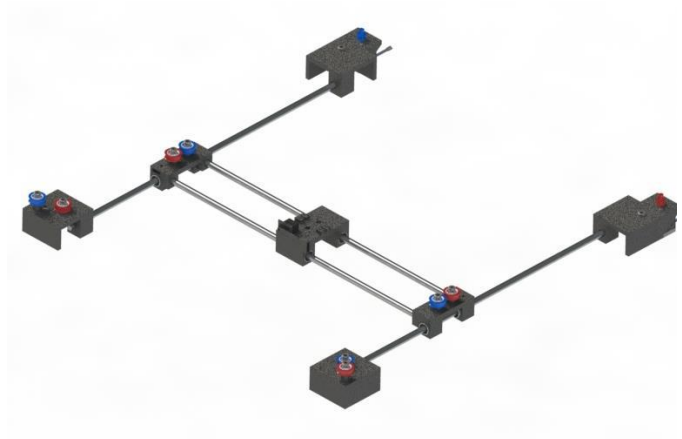


Imatge 7: Detall transmissió eix Z del prototip reformat

Pel moviment del capçal amb els *hotends*, es va adoptar un sistema de politges amb una corretja, anomenat CoreXY, amb una distribució com l'*Esquema 1: CoreXY*. Per les peces construïdes en aquest conjunt, i per gairebé tots els altres, es va utilitzar la tecnologia d'impressió FDM.



Esquema 1: CoreXY



Imatge 8: Detall guiatge eix X i Y del prototip reformat

Pel guiatge del moviment del capçal, i els dos carrossos que el traslladaven, es van utilitzar barres calibrades circulars, amb coixinets lineals de boles recirculants.

A la taula 7 es descriu les actuacions que es volen aplicar per solucionar els punts crítics analitzats.

Taula 7: Valoració i actuació del prototip a reformar

	Punts dèbils o crítics	Actuació
ESTRUCTURA	<ol style="list-style-type: none"> 1. El muntatge de l'estructura amb perfilaria d'alumini requereix certa experiència per acoblar una estructura escairada. 2. Les estructures amb perfilaria d'alumini es solen convertir amb un esquelet de la màquina, i això provocà problemàtiques alhora d'acoblar elements a la part més interior dels marcs que formen l'estructura. 3. Els suports que fixaven les barres cilíndriques de guiatge es trobaven a diferents perfils de l'estructura, i per tant la dificultat d'alinear totes les guies era major. 4. El sistema d'ancoratge dels perfils d'alumini sovint provoquen desajustos deguts a desplaçaments de les fixacions provocats per forces laterals. 	<p>Molt utilitzat a la construcció de màquines industrials, i també impressores FDM, les <u>plaques llises</u> per formar l'estructura presenten variats avantatges.</p> <p>Aquestes poden ser tallades amb tecnologies làser, aigua, etc., i posteriorment mecanitzades, assegurant un alineament en els diferents elements que s'hi fixen.</p> <p>L'acoblament de les plaques també és senzill, però respecte la perfilaria és més fàcil d'escairar, i el manteniment és inferior.</p>
LLIT CALENT	<ol style="list-style-type: none"> 5. Durant les proves que va realitzar el prototip, el suport d'espuma de polietilè va deformar-se degut a que no va suportar la temperatura generada per les resistències. 	<p>Per reforçar el <i>heatbed</i> s'haurà d'utilitzar un material resistent a les temperatures que assoleixin les plaques calefactades, com per exemple l'alumini, que també es caracteritza per tenir una densitat baixa.</p>

EIX "Z"	<p>6. Es va unificar al guiatge i la transmissió col·locant quatre cargols de potència que realitzaven aquestes funcions. Els cargols de potència amb les seves femelles no són la solució més idònia per realitzar el guiatge, ja que es troben altres elements amb menys fricció.</p> <p>7. El fet de realitzar el guiatge amb els cargols de potència va obligar a col·locar-ne quatre, un a cada extrem de taula. Tant l'acoblament com el manteniment és complicat per un usuari inexpert.</p> <p>8. Els possibles desalineaments, errors de posició, poden generar friccions innecessàries, a més de defectes als models.</p>	<p>El cargol de potència segurament és la millor solució per transmetre el moviment de la taula a l'eix Z, per la seva robustesa i precisió. Tanmateix, per descarregar els esforços de la femella del cargol, es poden acoblar guies de secció circular amb coixinets lineals amb boles recirculants, o bé coixinets amb un coeficient de fricció baix.</p> <p>En alguns casos on la impressora és de dimensions relativament petites, la taula només té un cargol de potència a un lateral amb dos guies circulars, per tant està en voladís. En el cas d'aquest projecte, s'haurà de guiar la taula a dos laterals per reduir els moments als elements de guiatge i transmissió.</p>
EIX "X i Y"	<p>9. El fet de utilitzar una sola corretja, comporta que ha de resseguir totes les longituds que ha de recórrer el capçal. Per aquest motiu, en resulta una corretja relativament llarga, i a més tenint en compte que es tracta d'una impressora de grans dimensions, hi haurà deformacions provocades per les tensions que faran perdre resolució a la peça.</p>	<p>Per disminuir les longituds de les corretges, es pots instal·lar una corretja per cada un dels moviment als dos eixos. A més, amb aquesta solució es simplificaria el control, ja que s'evitaria el sincronisme dels dos motors per moure el capçal als dos eixos amb una sola corretja.</p>
SUPORTS FDM	<p>10. Es va optar per utilitzar una impressora FDM a l'hora de fabricar la gran majoria de suports. Aquests suports on s'hi acoblaven elements que requerien toleràncies dimensionals concretes, no van donar el rendiment esperat generant errors de posicionament, friccions innecessàries, etc.</p>	<p>Per garantir el rendiment de la màquina, es pot utilitzar l'alumini per fabricar els suports que requereixin unes toleràncies dimensionals concretes. Es pot partir de blocs massissos posteriorment mecanitzats, o bé plaques tallades amb tecnologies com el làser, aigua, etc. posteriorment mecanitzades també. Amb l'alumini s'obtenen peces prou resistents i lleugeres per el requeriments de la impressora FDM, i el mecanitzat garanteix un acabat superficial correcta, a més d'un es toleràncies molt exactes.</p>

3.2 Proposta de solucions

Previ a una anàlisi de les alternatives desenvolupades en el projecte, on s'han estudiat únicament els elements mecànics, es fa una valoració de les diferents solucions estudiades i valorades per cada subconjunt. En algunes parts de la màquina només s'ha valorat una solució per la falta d'alternatives equiparables en el rendiment.

Les decisions de la part elèctrica i la seva execució s'analitzarà posteriorment a la descripció de la solució, on l'autor del projecte haurà subcontractat una assessorament i disseny d'aquesta part de la màquina.

Per analitzar les solucions s'avaluaran diferents aspectes dels mecanismes en un rang de 0 a 6, on una puntuació de 0 significarà que es una solució poc favorable (cap casella pintada de gris), i on una puntuació de 6 significarà que és molt favorable (les sis caselles pintades de gris).

- Disseny: analitzarà el disseny que es podrà obtenir amb la solució, sense tenir en compte les prestacions mecàniques de l'element.
- Fabricació: analitzarà el procés de fabricació de les peces que formen el subconjunt, on la puntuació de 0 significarà que es complexa, i un 6 que és ràpida i senzilla.
- Muntatge: avaluarà la dificultat d'acoblar els diferents elements del subconjunt. A més també es tindrà en compte la dificultat d'alinejar el sistema de guiatge.
- Manteniment: avaluarà si la màquina requerirà un manteniment constant, és a dir, si els elements tendiran a desquadrar-se amb regularitat. A més també es tindrà en compte la dificultat,
- Pes/resistència: avaluarà el ratio pes/resistència dels elements, sempre tenint en compte que per aquesta màquina es requereixen elements poc pesats però alhora resistents als esforços creats per les acceleracions.
- Cost: valorarà el cost dels elements del subconjunt, sumant el material de partida, els processos de fabricació i tractaments si és el cas. També valorarà si l'elecció d'una solució en resultarà altres costos per adquisició de material comercial, etc.
- Resolució model: avaluarà la influencia de la solució respecte la qualitat de impressió que s'obtindrà.

Taula 8: Valoració solucions sub-conjunt estructura

Subconjunt	Descripció solució	Disseny			Fabricació			Muntatge			Manteniment			Pes/resistència			Cost			Resolució model			Valoració (0-6)
ESTRUCTURA	Estructura amb perfils extruïts d'alumini.																						2.9
	Plaques laterals unides amb tirants o suports																						3.1
	Plaques base d'alumini per guiatge i transmissió eix X i Y																						4

Taula 9: Valoració solucions sub-conjunt guiatge i transmissió eix X i Y

Subconjunt	Descripció solució	Disseny			Fabricació			Muntatge			Manteniment			Pes/resistència			Cost			Resolució model			Valoració (0-6)
GUIATGE I TRANSMISSIÓ EIX X I Y	Solució similar Markerbot																						2.9
	Solució similar Ultimaker																						2.9
	Solució similar Markforged																						4

Taula 10: Valoració solucions sub-conjunt capçal

Subconjunt	Descripció solució	Disseny			Fabricació			Muntatge			Manteniment			Pes/resistència			Cost			Resolució model			Valoració (0-6)
EXTRUSORS	Sistema extrusió Bowden	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	3.9
		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Sistema extrusió directe	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	3.3
		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Taula 11: Valoració solucions extrusors

Subconjunt	Descripció solució	Disseny			Fabricació			Muntatge			Manteniment			Pes/resistència			Cost			Resolució model			Valoració (0-6)
CAPÇAL	Fabricació suports a partir de blocs d'alumini	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	4
		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Fabricació suports a partir de fabricació additiva	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	3.3
		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Taula 12: Valoració solucions distribució elements elèctrics

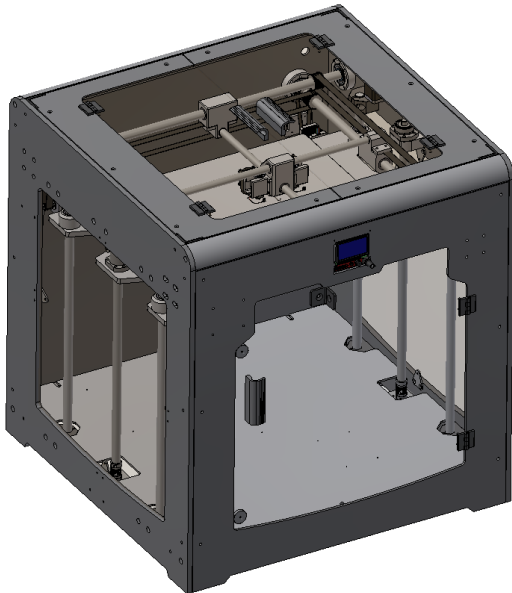
Subcon junt	Descripció solució	Disseny			Fabricació			Muntatge			Manteniment			Pes/resistèn cia			Cost			Resolució model			Valoració (0-6)
ELEMENTS ELÈCTRICS	Placa integrada a la màquina													-	-	-				-	-	-	3.8
														-	-	-				-	-	-	
	Quadre elèctric annex.													-	-	-				-	-	-	3.6
														-	-	-				-	-	-	

Val a dir, que la valoració realitzada en forma de taula de l'apartat 3.2 està realitzada respecte a la capacitat d'aquest projecte, en una màquina de grans dimensions que treballa sobra els eixos cartesianes.

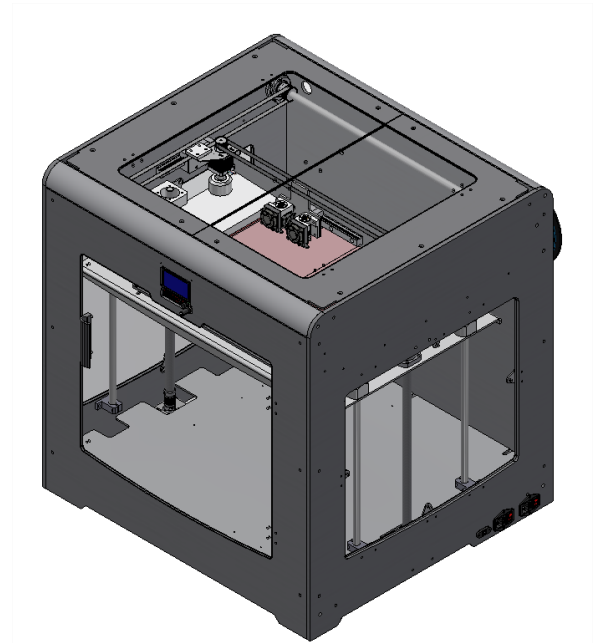
Tot i que hi ha més subconjunts a les impressores amb les característiques que s'avaluen al projecte, no es tindran en compte solucions alternatives. Aquests subconjunts són els que ja disposava el prototip i es consideraven una solució correcta, dels quals es pot aprofitar material per la fabricació de la màquina nova. Dos dels principals subconjunts que no es contempla una alternativa és el *heatbed*, tot i que s'hi aplicaran millores; i el sistema de guiatge i transmissió de l'eix Z, que no es contempla cap altre solució respecte la descrita a l'apartat C.4 de l'ANNEX C.

3.3 Dissenys alternatius

Durant l'execució del projecte, es van desenvolupar dues alternatives abans d'obtenir el disseny final. En aquestes alternatives s'adoptaven diferents combinacions de les solucions analitzades a l'ANNEX C. Finalment, aquests dos dissenys van ser descartats ja que les seves prestacions eren inferiors a la solució final.



Imatge 9: Vista isomètrica de la alternativa 1

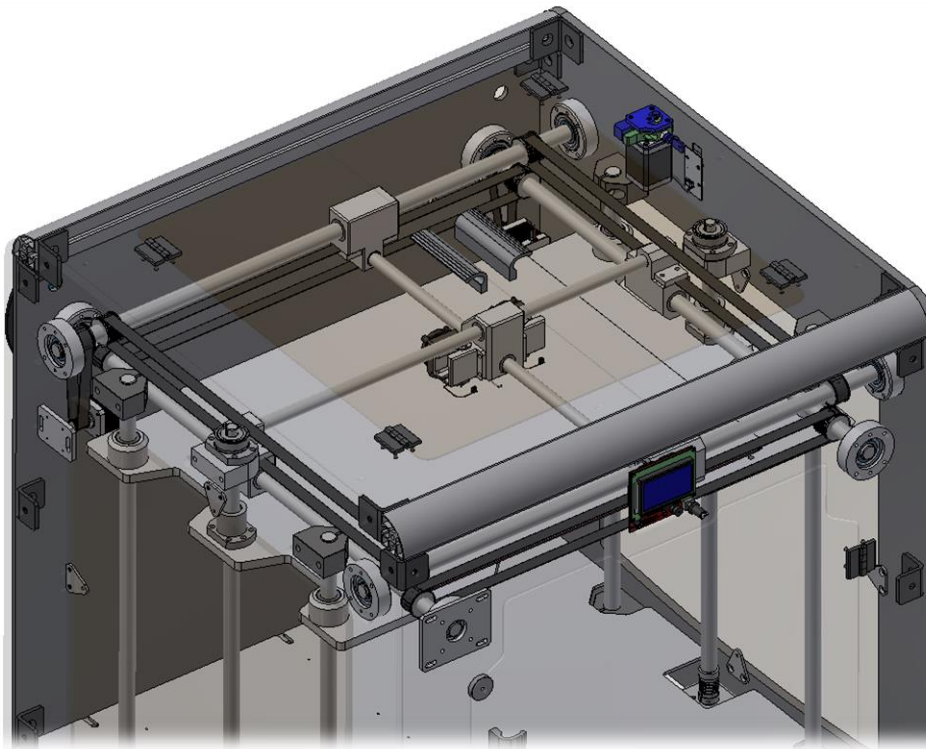


Imatge 10: Vista isomètrica de la alternativa 2

3.3.1 Disseny alternatiu 1

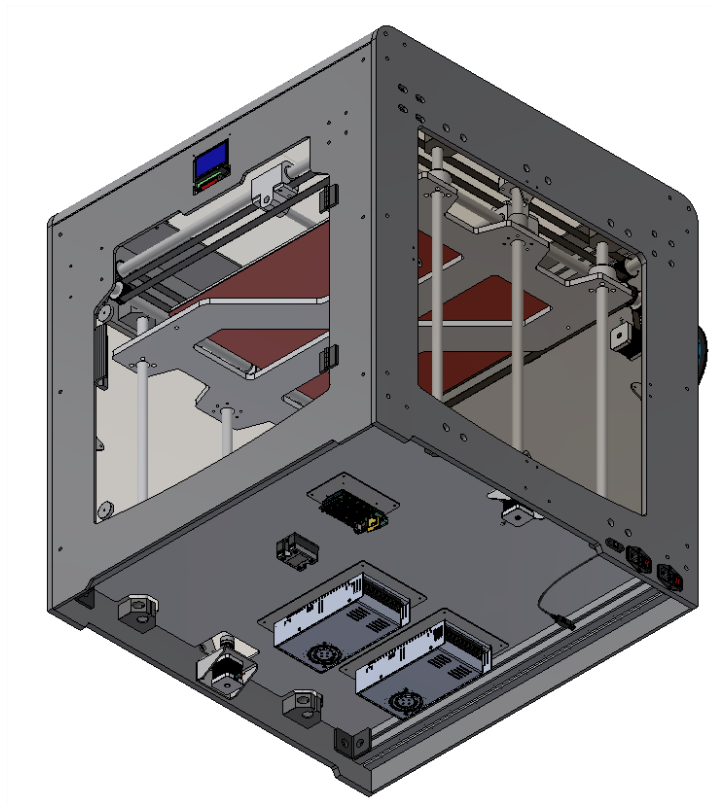
- L'estructura de la impressora estava formada per quatre plaques d'alumini tallades amb doll d'aigua, tal i com s'aprecia a la *Imatge 9*. Aquestes plaques estaven unides entre elles amb suports comercials i amb tirants de perfil extruït d'alumini. Per tant aquest disseny utilitzava la Solució 2 del subconjunt estructura.

- Pel guiatge i transmissió de l'eix X i Y s'adoptava un disseny similar al que utilitza Ultimaker. Aquest tracta de quatre eixos calibrats aparellats de dos en dos, un a cada lateral superior de la màquina. Un dels dos eixos de cada parella és activat mitjançant una corretja dentada connectada a un motor pas a pas amb les politges corresponents. A cada extrem dels quatre eixos té acoblat un rodament de boles oscil·lant, per possibles desalineaments durant el muntatge (un rodament de boles rígid amb l'eix desalineat hagués tingut una vida curta).
Cada eix també té fixat dues politges a cada extrem, i estan unides unes amb les altres amb corretges dentades per transmetre la potència. Aquest muntatge es pot apreciar a la *Imatge 111*. Aquestes corretges són les encarregades de desplaçar quatre carros, guiats un a cada eix i units de dos en dos per una guia del capçal de secció circular. Les dues guies que en resulten formen una creu i travessen el capçal, amb rodaments lineals de boles recirculants entremig per facilitar el lliscament d'aquest últim subconjunt. El moviment de les guies, independents entre elles, desplacen el capçal en els dos eixos.
Aquesta és la solució 2 de guiatge i transmissió de l'eix X i Y de l'ANNEX C.



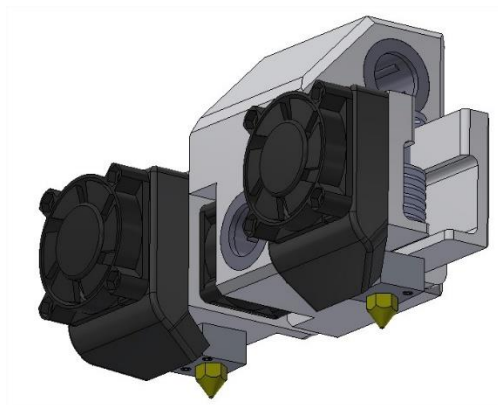
Imatge 11: Detall sistema guiatge i transmissió a l'eix X i Y de la alternativa 1

- Pel guiatge i la transmissió de l'eix Z, s'utilitza l'únic sistema descrit a l'ANNEX C, apartat C.4. Aquest consisteix a desplaçar el *heatbed* en aquest eix a partir de dos motors pas a pas units mitjançant un acoblament rígid als cargols de potència, i dos femelles fixades a laterals oposats de la placa guiada del subconjunt en moviment. A més, la mateixa placa on hi ha fixades les femelles, es troben també acoblats 4 suports de rodaments lineals de boles recirculants per lliscar a les quatre guies verticals de secció circular. Amb aquestes guies es descarregava la femella de forces axials i moments que haguessin afectat al rendiment.
- El *heatbed* estava formada per la placa guiada esmentada anteriorment. A més, la part superior s'instal·lava un vidre just damunt de quatre plaques calefactades comercials, reaprofitades del prototip. Finalment, per donar rigidesa el paquet que formava el vidre i les resistències, es fixava a la part inferior una placa d'alumini. Per l'anivellament de la superfície d'impressió, es col·locaven quatre cargols roscats amb una molla a cada un d'ells, entre la placa guiada i la placa que donava rigidesa, i amb el gir de cada un d'ells s'obtenia la inclinació correcta.



Imatge 12: Vista isomètrica inferior de la alternativa 1

- El capçal estava format per varis blocs d'alumini mecanitzat. Constava d'un bloc central on es mecanitzaven els allotjaments dels rodaments lineals de boles, i dos suports simètrics per suportar els dos *hotends* de la marca BCN3D, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 122*. Finalment es fixaven dos conductes d'aire, fabricats amb la tecnologia additiva d'injecció d'aglutinant, on s'hi instal·laven els ventiladors encarregats de refredar el material imprès. A més d'aquests dos ventiladors, se'n instal·laven dos més per refredar el difusor dels *hotends*.



Imatge 13: Vista isomètrica conjunt capçal amb hotends

- L'electrònica es pretenia instal·lar a la part inferior de la màquina, separada entre la cavitat d'impressió amb una placa prima d'alumini.

Les plaques laterals tenien obertures per ser tapades amb policarbonat i així facilitar la visibilitat a l'operari. La placa frontal també tenia prevista una obertura on s'hi hagués instal·lat una porta, també de policarbonat, amb dos frontisses. La part superior, també s'hi volia instal·lar dos portes de policarbonat, aquestes reforçades amb un marc de placa prima d'alumini.

- Finalment, en aquesta alternativa no es va arribar a definir la localització dels extrusors, tot i que es volia utilitzar el sistema indirecta, també anomenat *Bowden*, que fa referència a la Solució 1 de l'*apartat C.6* de l'ANNEX C. Tampoc la localització del suport de bobines, ni el cablejat elèctric de la màquina.

3.3.2 Punts millorables de l'alternativa 1

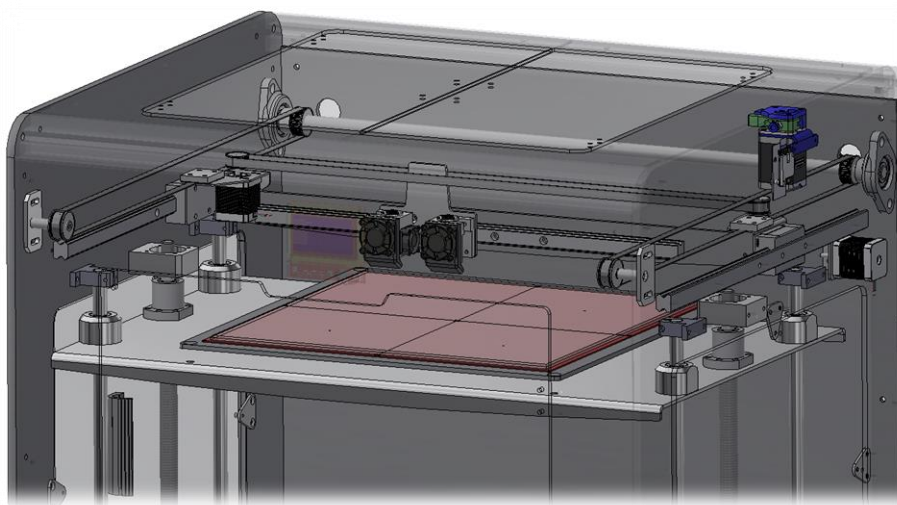
A la taula següent es descriu breument els punts que van descartar continuar amb el disseny de l'alternativa 1:

Taula 13: Valoració alternativa 1

CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Flexió guies	Es va realitzar una anàlisi estàtic de varies guies encarregades del moviment X i Y, on la flexió d'aquestes era superior a la permessa per complir amb les limitacions de resolució del projecte. Es va concloure que amb les dimensions de la impressora desenvolupada, es requerien una guies perforades comercials que augmentaven molt el cost.
Cost plaques estructura	Es van enviar a pressupostar les plaques d'alumini que formaven els quatre laterals de la màquina, més alguna tapa. Aquestes plaques, pressupostades amb tall de doll d'aigua, augmentaven el cost per sobre la previsió d'inversió que es volia dedicar al projecte, tenint en compte totes les altres despeses que s'havien de comptabilitzar de la màquina.
Muntatge i manteniment	El sistema de guiatge i transmissió de l'eix X i Y constava de suports de rodaments oscil·lants fixats a les diferents plaques laterals de l'estructura. L'alineament de les guies, que requerien una tolerància de paral·lelisme i perpendicularitat per evitar friccions innecessàries, complicaria tant el muntatge que possibles manteniments futurs. La mateixa problemàtica es trobava amb l'alineament del guiatge de l'eix Z.

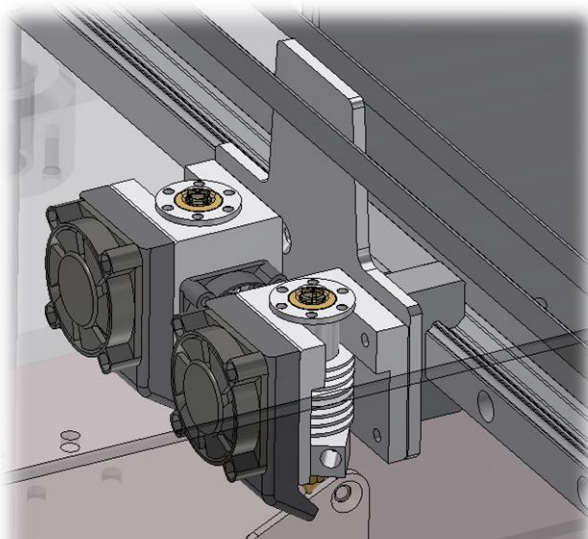
3.3.3 Disseny alternatiu 2

- L'estructura de la impressora estava formada per quatre plaques d'alumini tallades amb doll d'aigua, tal i com s'aprecia a la *Imatge 10*. Aquestes plaques, igual que l'alternativa 1, estaven unides entre elles amb suports comercials i amb tirants de perfil extruït d'alumini. Per tant aquest disseny també utilitzava la Solució 2 del subconjunt estructura.
- Pel guiatge i transmissió de l'eix X i Y s'adoptava un disseny similar al que utilitza Markerbot. Aquest sistema, com a característica principal, tenia acoblat un motor (en aquest disseny l'encarregat del moviment de l'eix X) a sobre un conjunt mòbil que normalment seria el tirant del capçal.
Per realitzar el moviment a l'eix Y, es fixaven dos guies comercials amb els seus carros corresponents, en aquest cas de la marca HIWIN, a l'extrem superior de les plaques laterals. Amb dos corretges dentades conduïdes pel mateix eix, també als laterals de la màquina, es pinçaven els dos carros i es donava el moviment al tirant, que aquest estava unit al conjunt a partir de dos suports diferents de xapa plegada. El tirant estava construït a partir d'una xapa tallada d'alumini, per reduir-ne el pes.
A sobre un suport de xapa plegada s'hi fixava el motor encarregat del moviment a l'eix X, on la guia del capçal es trobava muntat al llarg del tirant.
D'aquesta manera les corretges encarregades d'aquests moviments tindrien la mínima llargada necessària.
Aquest sistema es pot apreciar a la *Imatge 14*.
Aquesta és la solució 1 de guiatge i transmissió de l'eix X i Y de l'ANNEX C.



Imatge 14: Detall guiatge i transmissió a l'eix X i Y de la alternativa 2

- Pel guiatge i la transmissió de l'eix Z, s'utilitza l'únic sistema descrit a l'ANNEX C, apartat C.4, que s'ha d'escrit a l'alternativa 1
- Pel conjunt *heatbed* es va utilitzar el mateix sistema que l'alternativa 1.
- El conjunt capçal, semblant al de l'alternativa 1, es simplificava substituint el bloc central mecanitzat, per una placa d'espessor 6, on s'hi fixarien els suports dels *hotends* i el carro de la guia. El conducte d'aire també estava previst ser impresa amb la tecnologia additiva d'injecció d'aglutinant.



Imatge 15: Detall conjunt capçal amb hotends de la alternativa 2

- L'electrònica també es pretenia instal·lar a la part inferior de la màquina, separada entre la cavitat d'impressió amb una placa prima d'alumini.
Pel carenat també utilitzava plaques de policarbonat, amb portes a la part frontal i finestres fixes al lateral..
- Aquesta disseny es va descartar abans d'acabar-lo, quedant punts de la impressora per definir.

3.3.4 Punts millorables de l'alternativa 2

A la taula següent es descriu breument els punts que van descartar continuar amb el disseny de l'alternativa 2:

Taula 14: Valoració de la alternativa 2

CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Concepte distribució motors	Aquest sistema de guiatge i transmissió de l'eix X i Y constava d'un motor acoblat a un conjunt en moviment, per tant el segon motor encarregat de moure aquest últim tenia un torçor superior a una solució més o optimitzada.
Cost plaques estructura	Es van enviar a pressupostar les plaques d'alumini que formaven els quatre laterals de la màquina, més alguna tapa. Aquestes plaques, pressupostades amb tall de doll d'aigua, augmentaven el cost per sobre la previsió d'inversió que es volia dedicar al projecte, tenint en compte totes les altres despeses que s'havien de comptabilitzar de la màquina.
Muntatge i manteniment	El sistema de guiatge i transmissió de l'eix X i Y constava de guies lineals amb els seus carros fixades a les dos plaques laterals de l'estructura. L'alineament d'aquestes era complexa, augmentat la probabilitat de crear friccions innecessàries. La mateixa problemàtica es trobava amb l'alineament del guiatge de l'eix Z.

4. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ

4.1 Introducció

Com a directrius pel desenvolupament del projecte, s'han intentat respectar les especificacions inicials del sol·licitant. A més, tot i no estar especificat en aquest llistat, s'ha ajustat el cost de fabricació de la màquina amb els preus de impressores FDM comercials de característiques similars que es poden trobar al mercat. Finalment, no com a restricció sinó com a prioritat, s'ha intentat aprofitar el material del prototip del qual també s'ha basat part del projecte.

Tant els dissenys alternatius, com el disseny final del projecte, s'ha partit de les dues directrius bàsiques que han condicionat les decisions posteriors:

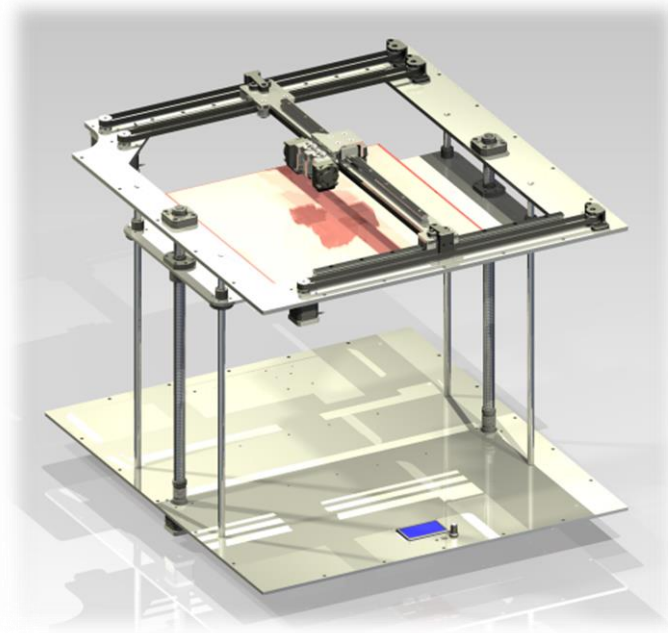
- La impressora FDM ha de tenir una capacitat d'impressió de 400x400mm per 400mm d'alçada.
- Els moviments de la impressora han de treballar amb les coordenades cartesianes (X,Y,Z).

4.2 Subconjunt estructura

Pel disseny de l'estructura s'ha utilitzat la Solució 3 de l'*apartat C.2* de l'ANNEX C. Com a característica principal tracta de instal·lar, sobre una placa d'alumini rectangular, el sistema de guiatge i de transmissió amb el seus motors dels eixos X i Y.

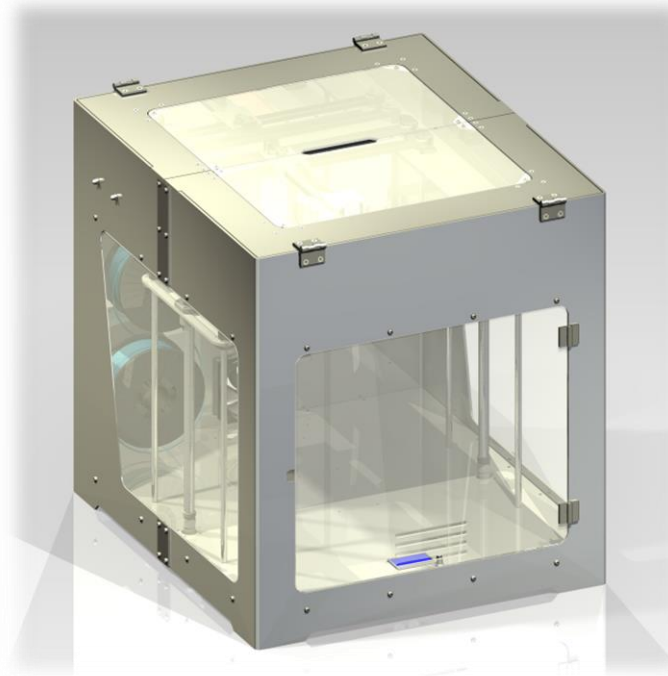
Amb aquest muntatge es pretén poder realitzar el muntatge de tot aquest subconjunt amb la placa desmuntada de la màquina. A més, els elements de guiatge estan fixats tots sobre la mateixa placa, facilitant l'alineament d'aquests i per tant el seu muntatge i manteniment.

Aquesta placa, fixada a la part superior de la màquina, té una obertura interior on els *hotends* tindran capacitat de imprimir, tal i com s'aprecia a la *imatge 16*. A la part inferior de la màquina, s'acobla una placa llisa. Entre les dos plaques hi haurà el sistema de guiatge i transmissió de l'eix Z, explicat a un altre apartat.



Imatge 16: Vista isomètrica disseny final sense xapes laterals

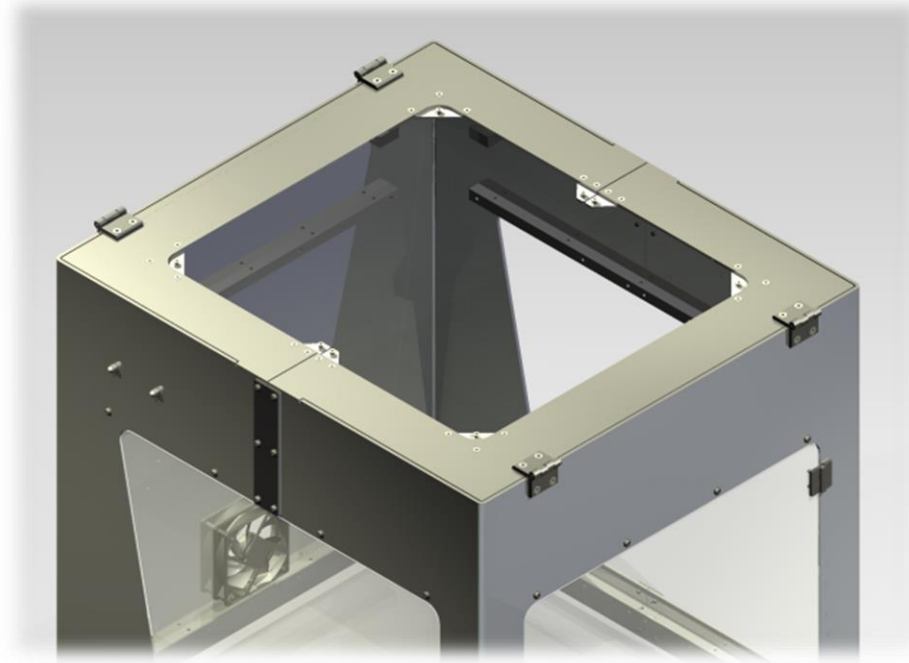
Per tancar la impressora i unir les plaques paral·leles a la planta de la màquina, es munten dues xapes d'alumini més primes, plegades en forma de "U" a l'exterior de les primeres, cobrint els quatre laterals. Aquest muntatge es pot apreciar a la *Imatge 17*.



Imatge 17: Vista isomètrica disseny final amb carenat

Per unir les dues xapes exterior plegades, es fixen una platines inoxidables de 3 mil·límetres en els junts; i per unir-se a les dues plaques base, es fixen uns tirants quadrats d'alumini 18x18

mil·límetres de secció, amb forats roscats a les dos cares necessàries, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 18*.



Imatge 18: Detall estructura sense plaques base

En els dos laterals de la impressora hi ha una finestra fixa amb una placa de policarbonat. A la part frontal hi ha una porta, també de policarbonat, amb dos frontisses per la seva obertura. A més, a la part superior de la màquina consta de dues portes abatibles simètriques, amb un marc obert d'alumini en forma de "U" amb el forat interior tapat amb una placa de policarbonat. S'ha utilitzat el policarbonat per totes les zones translúcides de la màquina ja que és un dels materials més resistents a la temperatura i d'un cost raonable.

Finalment, a la part posterior de la màquina, concretament just per sobre el nivell de la placa base inferior, s'hi instal·la un ventilador d'aire per refrigerar aquesta zona, propera als elements elèctrics, descrita a un apartat següent. Aquest ventilador regularà la temperatura que hi haurà a la cavitat d'impressió de la màquina, que pot augmentar degut als diferents elements calefactats.

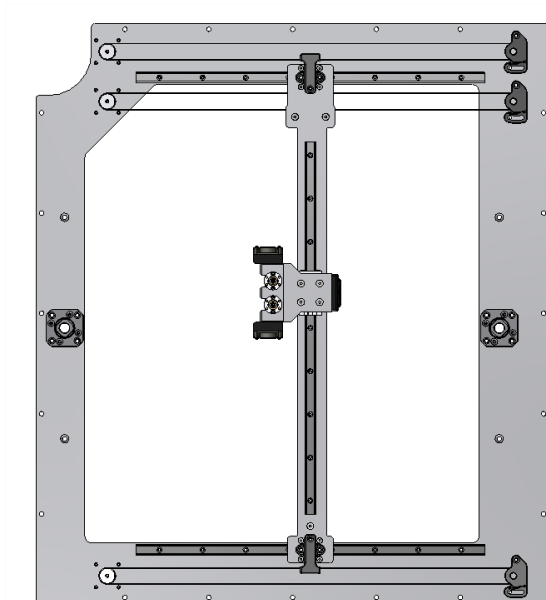
S'ha decidit carenar tota la màquina per evitar corrents d'aire, canvis de temperatura bruscos; ja que és el principal causant de l'error d'impressió anomenat *warping*, que consisteix a que la primera capa del model es desprèn de la superfície d'impressió.

4.3 Subconjunt guiatge i transmissió eix X i Y

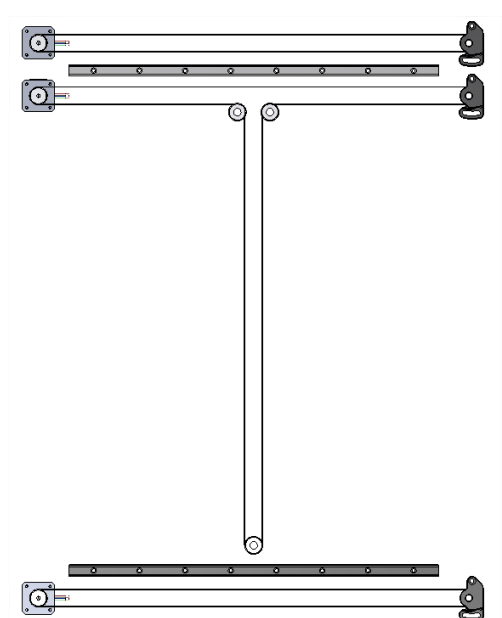
En relació el subconjunt estructura, s'ha adoptat la Solució 3 de l'*apartat C.3* de l'ANNEX C. Com a característica principal, aquesta solució acoblava tots els elements de guiatge i transmissió a sobre la mateixa placa.

Pel guiatge, tant amb l'eix X com amb l'eix Y, s'utilitzen guies de la marca HIWIN, en concret la referència HGR15R, i els carros HGH15CA. Les seves especificacions es troben a l'*apartat E.2* de l'ANNEX E.

Per la transmissió s'utilitzen motors pas a pas NEMA17 d'alçada 48mm, on també es poden trobar les especificacions a l'annex corresponent; i politges T5 d'alçada 10mm, i les corretges corresponents. Aquest perfil de dent és més precís que altres productes del mercat.



Imatge 19: Planta guiatge i transmissió eix X i Y



Imatge 20: Detall sistema politges-corretges

➤ **Acoblament a la placa:**

Es fixen dues guies HIWIN paral·leles a l'eix X, una a cada lateral de la placa. Encara més a l'extrem de la placa en aquests dos laterals, si acobla un NEMA17 amb una politja al seu eix, gairebé a la cantonada de la placa. Al cantó oposat del motor, un suport de politja, que també actua com a tensor, l'eix i la politja. Finalment aquesta i la del motor es connecten mitjançant una correa dentada.

Al cantó de la guia HIWIN de la part posterior de la màquina, s'acobra el motor encarregat de la transmissió de l'eix Y. A l'eix el motor, col·locat al mateix lateral de la placa base amb els motors de l'eix X, s'hi fixa una politja; a l'altre lateral, amb el mateix sistema tensor anterior, es col·loca un suport amb la politja. Finalment al tirant del capçal, amb dos politges llises fixades a un seu extrem, i una politja central fixada a l'altre extrem, s'aconsegueix un sistema de corretja en forma de "T" que es pot apreciar a la *Imatge 19 i Imatge 20*. Aquest sistema permet el tirant del capçal desplaçar-se al llarg de l'eix X, sense variar la longitud encarregada de la transmissió a l'eix Y.

➤ Acoblat al tirant del capçal:

El capçal està format per una placa d'alumini, per reduir-ne el pes, tallada amb doll d'aigua i mecanitzada posteriorment.

Als dos extrems del tirant, a la part inferior, hi ha fixat els dos carros HIWIN de les guies de l'eix X. Just a la part superior de la placa, hi ha fixades les pinces de la corretja, iguals als dos cantons.

Com ja s'ha descrit anteriorment, a la part inferior del tirant hi ha fixades tres politges amb els seus eixos per conduir la corretja de l'eix Y.

Finalment a la part superior hi ha fixada la guia HIWIN de l'eix Y, on es desplaçarà el capçal amb els *hotends*.

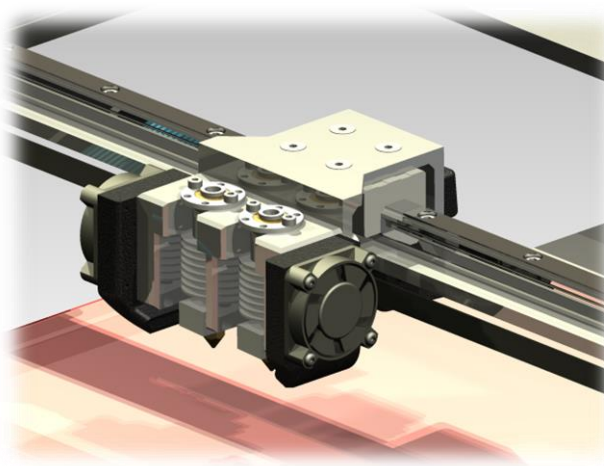
➤ Acoblat al capçal:

El capçal està format per varies peces:

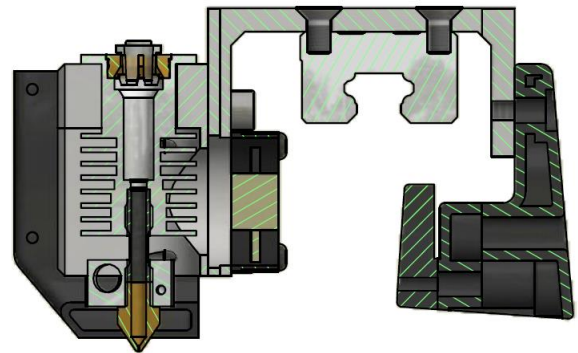
consta d'un suport mecanitzat d'alumini, on a la seva part inferior es fixe el carro HIWIN de la guia de l'eix Y. A la part frontal d'aquest suport s'hi acobra un altre peça mecanitzada d'alumini, aquesta encarregada de suportar els *hotends*. Finalment, a la part posterior del suport del carro HIWIN, hi ha acoblada la pinça de la corretja dentada de l'eix Y.

A cada lateral dels *hotends*, es fixa un canal d'aire amb el seu ventilador, aquests encarregats del refredament post-extrusió del filament. Sense aquest refredament, sorgeixen deformacions a la geometria del model, ja que el material no té temps de soldar-se amb les capes inferiors i es precipita per gravetat.

El *hotends*, de la marca BCN3D, estan fixats per la seva brida superior amb dos cargols M3. Finalment, per refredar el difusor del *hotend*, s'hi instal·len dos ventiladors més a la part interior del suport de la guia HIWIN. Aquest muntatge es pot apreciar a la *Imatge 22*.



Imatge 21: Detall capçal amb hotends



Imatge 22: Secció muntatge capçal

Així doncs, amb els elements de la placa, el tirant del capçal i el capçal, s'aconsegueix donar moviment als *hotends*, encarregats d'imprimir, a l'eix X i Y. El dimensionament de tots els elements que s'han utilitzat, s'ha basat segons les restriccions següents:

- 150mm/segon velocitat màxima del capçal.
- Una resolució de 0.05 a tots els eixos de la màquina.

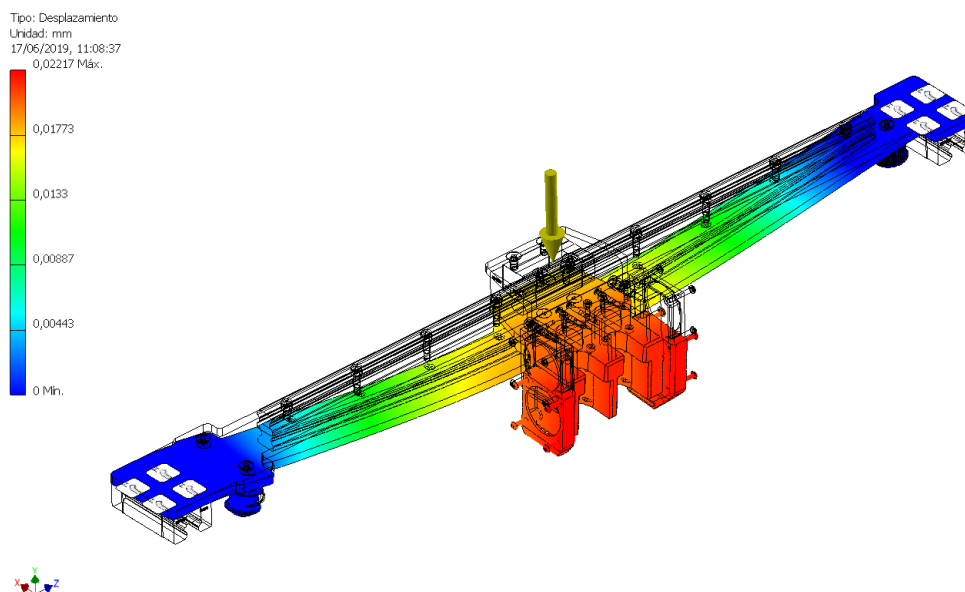
El motor de l'eix Y té menys esforç, tal i com s'ha comprovat a l'ANNEX D, ja que només se'n ocupa de desplaçar el capçal; en canvi a l'eix X s'ha de desplaçar el capçal i el seu tirant, i degut aquest fet es va decidir acoblar dos motors.

S'ha pogut comprovar que els motors tenen un torçor molt més elevat que el demandat pel conjunt.:

$$T[\text{N}\cdot\text{m}]_{\text{tirant+capçal}} = \frac{8.0215 \text{ N}\cdot\text{cm}}{2} = 4.0107 < 55\text{Ncm}$$

on els 4.0107Ncm és el torçor que ha de superar el motor a l'eix X, encarregat del desplaçament del subconjunt del tirant del capçal i el mateix capçal; i els 55Ncm la capacitat que tindria el NEMA 17 a un règim de 128rpm aproximadament. Els càlculs estan justificats a l'ANNEX D: Càlculs.

De la mateixa manera, s'ha comprovat el desplaçament de la punta de la broqueta en el sistema estàtic, per comprovar si és inferior a la resolució demandada:



Imatge 23: Simulació desplaçament broqueta sistema estàtic

Com es pot apreciar a la *Imatge 23*, el desplaçament màxim és de 0,00217mm (zona vermellosa).

Per assolir velocitats elevades, però sense perdre rigidesa es comprovarà que a gairebé totes les impressores no hi ha peces robustes, sinó més aviat optimitzades, i els materials d'aquestes soldrà ser alumini o un plàstic tècnic, per la seva densitat. Com s'ha justificat anteriorment, l'alumini ha permès que els motors assolissin velocitats altes sense carregar-los excessivament, i alhora la deformació estàtica ha estat mínima.

En aquest subconjunt, igual que en alguns altres, s'ha volgut utilitzar elements impresos amb una tecnologia additiva. En aquest cas, s'ha decidit fabricar els suports de les politges tensores, totes les pinces de la corretja (2 models diferents), i els conductes d'aire del ventilador, amb la tecnologia d'injecció d'aglutinant.

En canvi, no s'ha pogut reaprofitar material del prototip, amb un sistema totalment diferent al disseny en el projecte.

4.4 Subconjunt guiatge i transmissió eix Z

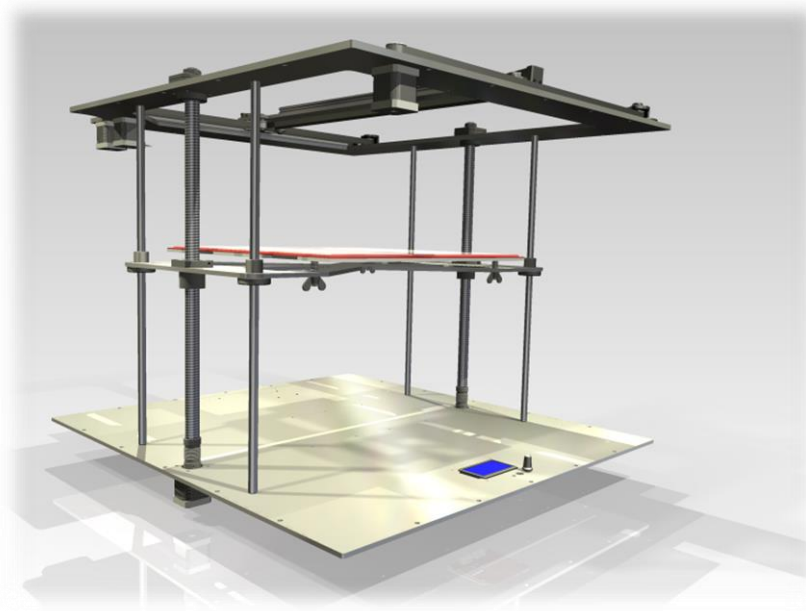
Pel sistema de guiatge i transmissió de l'eix Z, només s'ha valorat una solució. Aquesta tracta d'utilitzar eixos calibrats circulars pel guiatge a cada lateral de la màquina, fixats a la bancada

amb coixinets lineals acoblats al *heatbed*. Per la transmissió, s'utilitzaran dos cargols de potència amb les seves femelles de boles recirculants.

En total es col·locarien dos eixos calibrats a cada lateral de la màquina, just a les cantonades del *heatbed*. Al mig de cada parella d'eixos, s'acoblaria el cargol de potència, que seria d'un perfil similar a l'especificat a l'ANNEX E, *apartat E.3*. D'aquesta manera i a diferència del prototip, les femelles del cargol de potència se'n encarregarien exclusivament del moviment vertical del llit calent, mentre que els coixinets facilitarien el lliscament. També, amb els quatre coixinets lineals distribuïts s'aconsegueix reduir el moment a cada un d'ells generat pel pes del *heatbed*.

Els eixos calibrats es fixarien entre les dues plaques base d'alumini, mitjançant cargols roscats. A la part superior del cargol de potència, es col·locaria un suport de rodaments angulars, aquest fixat a la placa base d'alumini superior. Aquests dos suports, especificats a L'ANNEX E, s'encarregarien de suportar el pes dels cargols de potència i el conjunt *heatbed*. A més, eliminaria el joc axial amb l'ajustatge que té integrat.

A la part inferior del cargol de potència, a través d'un acoblament rígid FACE20, es connectaria a l'eix del motor pas a pas, aquest fixat a la placa base inferior. El muntatge es pot apreciar a la *Imatge 24*.



Imatge 24: Detall guiatge i transmissió eix Z

Aquest sistema de transmissió ha de ser capaç de realitzar el moviment del *heatbed*. A diferència del capçal, aquest subconjunt no ha d'assolir una velocitat de 150mm/s, sinó que amb una velocitat de 50mm/s és suficient.

En aquest cas els dos motors treballen a 600rpm per assolir la velocitat de la taula d'impressió requerida. En aquesta velocitat, els motors donen 40Ncm, molt superiors als 3Ncm que necessita el sistema.

$$T[\text{N}\cdot\text{m}]_{\text{motor}} = \frac{5.963 \text{ N}\cdot\text{cm}}{2} = 3\text{Ncm} < 40\text{Ncm}$$

La justificació dels càlculs es troba a l'ANNEX D, *apartat D.5*.

4.5 Subconjunt *heatbed*

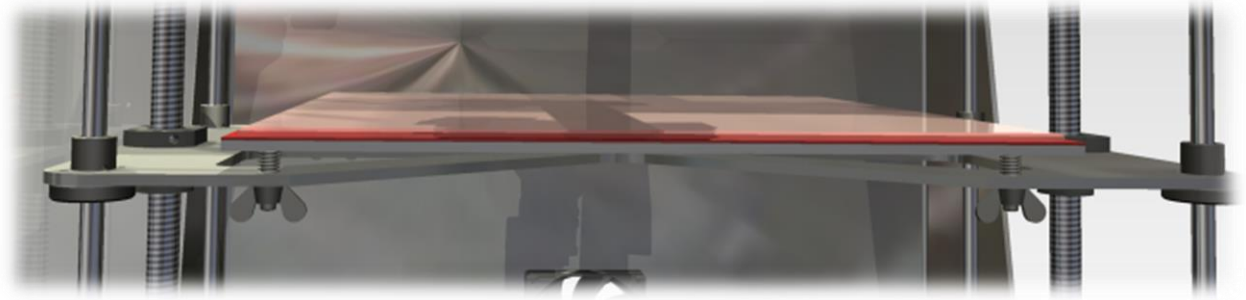
Pel disseny d'aquest subconjunt s'ha adoptat el mateix que utilitzen les impressores comercials de gamma baixa i mitja. Com que es volen imprimir filaments de materials estàndards (PLA, ABS, Nylon, etc.), es pot reaprofitar les plaques calefactades comercials del prototip.

A la part superior de les plaques calefactades, s'ha de instal·lar un vidre de borosilicat per la seva superfície llisa, i el seu coeficient de deformació tèrmica baix. Aquest vidre, de forma rectangular, tindrà la mida de la capacitat d'impressió requerida: 400x400mm.

A l'inferior de les plaques calefactades es fixarà una placa d'alumini per donar resistència al conjunt.

Finalment, s'acobla a l'inferior dels tres primers elements una placa on hi aniran fixades les femelles dels cargols de potència i els coixinets lineals de les guies. Entre aquestes i la placa per donar resistència, es col·loquen quatre cargols roscats a les cantonades, amb una molla als seus eixos, per facilitar l'alineació de la superfície d'impressió respecte el moviment de l'eix X i Y. Aquesta regulació serà manual, i s'haurà de realitzar a la posta a punt o quan s'observin errors d'impressió.

El muntatge del conjunt es pot apreciar a la *imatge 25*.



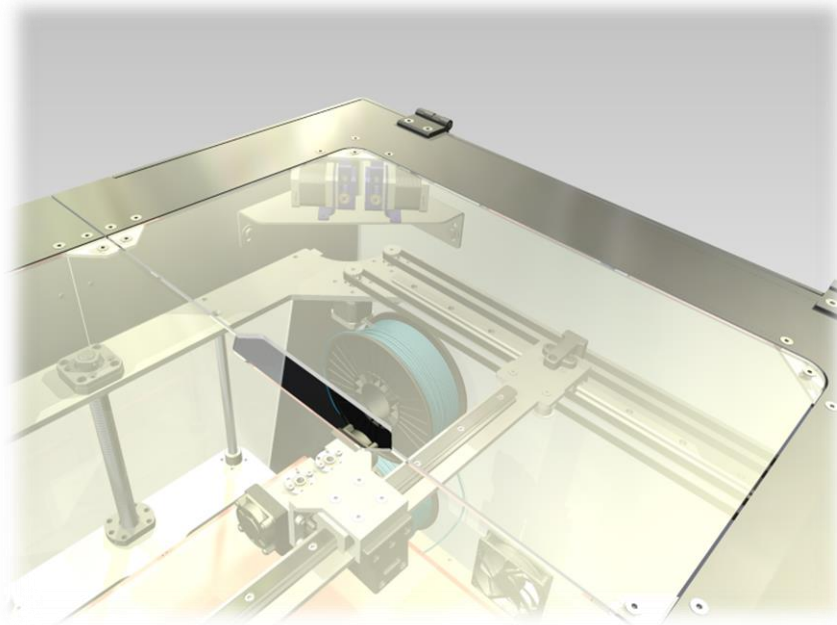
Imatge 25: Detall heatbed

4.6 Extrusors i suports bobines

Els extrusors de filament, encarregats d'alimentar els *hotends*, aniran acoblats a l'estructura fixa, per tant s'utilitzarà el sistema *Bowden* que fa referència a la Solució 1 de l'apartat C.6 de l'ANNEX C. Cada un dels extrusors estarà format per una motor pas a pas NEMA 17 amb un mecanisme comercial fixat. El mecanisme conté dos engranatges, un solidari a l'eix del motor, i l'altre acoblat a una palanca amb molla per infringir pressió al primer. El filament travessaria pel mig dels dos engranatges i amb la pressió d'aquests el traccionaria.

Aquests extrusors es col·locaran a una cantonada superior de la màquina a sobre un suport de xapa inoxidable de 3 mil·límetres. Aquesta localització preveu un bucle del tub de tefló optimitzat, que connectarà la sortida de l'extrusor amb l'entrada del *hotend*.

Els suports de les bobines es preveuran a l'interior de la màquina, a la paret posterior just a l'inferior dels extrusors. D'aquesta manera el filament també s'aïllarà de corrents d'aire i humitat.



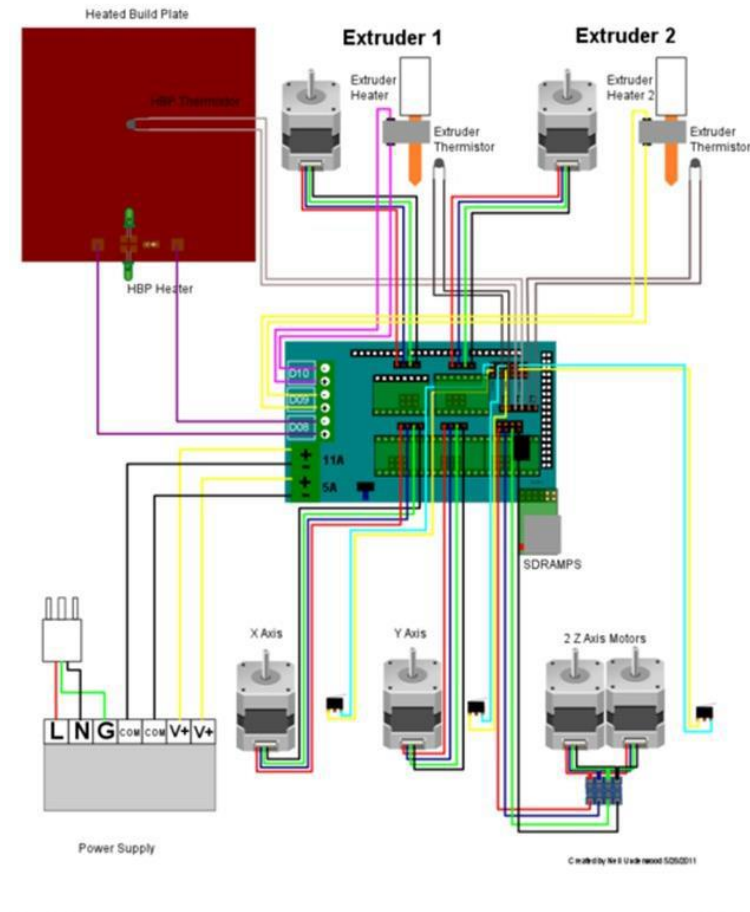
Imatge 26: Detall interior impressora

4.7 Hardware i Software

El comandament de la impressora es realitzarà amb una placa RAMPS 1.4 unida a un Arduino Mega 2586, la solució més utilitzada a les impressores 3D *open source*. S'escull aquesta solució pel seu cost raonable, amb unes prestacions suficients i la facilitat de trobar informació per ser programades.

La placa Arduino Mega 2586 governarà els motors encarregats dels moviments de la impressora, els motors extrusors i les resistències dels *hotends*. En canvi, no alimentarà les resistències del *heatbed*, ja que el consum de les 4 plaques calefactades és massa elevat. La placa RAMPS 1.4 i l'Arduino s'alimentaran d'una font de energia de 12V i 30A, i les plaques calefactades amb una segona font de energia amb les mateixes prestacions. Les plaques calefactades s'hauran de governar amb la placa Arduino, però es farà a través de un relé d'estat sòlid per no sobrecarregar cap element electrònic.

En el següent esquema s'aprecia el muntatge de la placa RAMPS amb els elements, però com ja s'ha comentat anteriorment, les plaques calefactades tindran un muntatge independent excepte el relé d'estat sòlid que serà governat per la placa.



Esquema 2: Connexió elements elèctric a RAMPS 1.4

A l'Esquema 2 tampoc s'aprecia la pantalla LCD, que s'instal·larà a la màquina i també serà controlada per l'Arduino.

Per controlar la impressora s'haurà d'instal·lar una base (firmware) a la placa Arduino Mega. El programa que s'utilitzarà al projecte serà el Marlin, i serà l'encarregat de llegir el G-Code i convertir-lo en un conjunt de comandaments per governar la impressora.

Per realitzar la configuració dels diferents paràmetres de la màquina s'utilitzarà l'Arduino IDE, un software lliure. Aquest software generarà un arxiu optimitzat per la placa, ja que es podrà programar paràmetres com:

- Definir quin tipus de placa s'utilitza
- Definir número d'extrusors

- Definir el termistor
- Calibratge dels motors
- Etc.

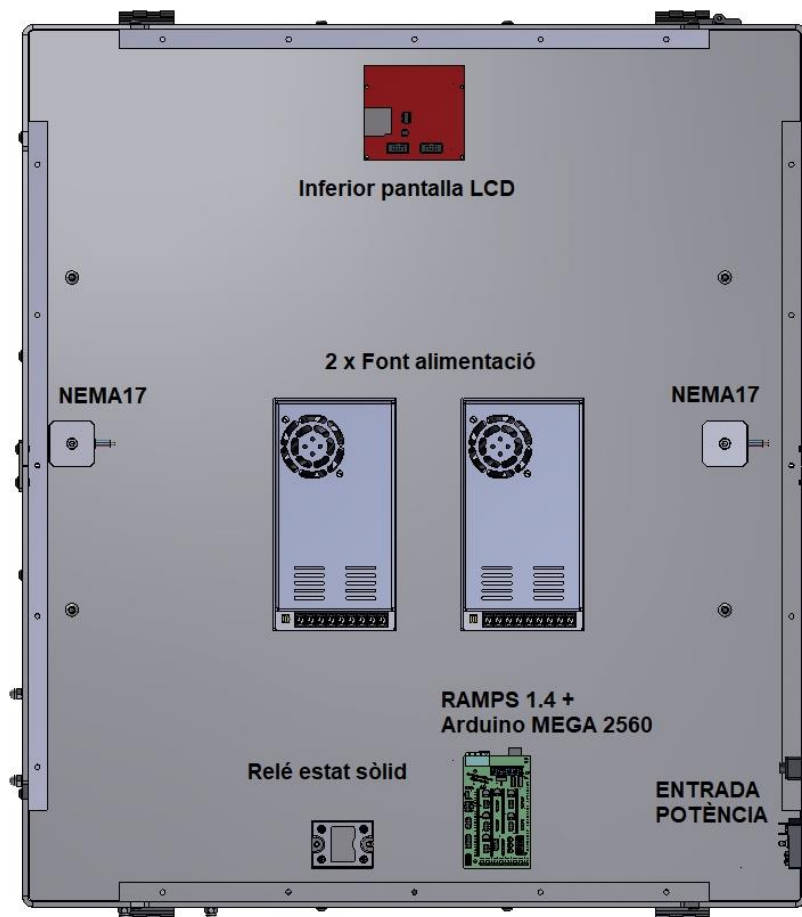
Per altre banda, per generar el G-Code a partir d'un arxiu .STL s'utilitzarà el programa SLIC3R. Aquest tindrà la capacitat de llegir el 3D en el format esmentat, i descompondre'l en capes. El conjunt de capes el convertirà en el G-Code i ja es podrà enviar a la impressora.

El programa SLIC3R permet modificar els paràmetres d'impressió, paràmetres dels materials i paràmetres de la impressora.

Finalment, per enviar el G-Code amb un cable USB a la impressora s'utilitzarà el Pronterface. El Ponterface vindria a ser una quadre de control com el de una màquina CNC, que permet modificar la velocitat d'impressió en percentatge, la velocitat dels extrusors, etc.

4.8 Muntatge elèctric

El muntatge elèctric s'ha decidit integrar-lo a la impressora, tal hi com descreia a la Solució 1 de l'apartat C.7 de l'ANNEX C. Els elements es fixaran a la placa base inferior, on estaran aïllats de la calor residual radiada per les resistències a la cavitat de la impressora. La distribució dels elements quedarà tal i com mostra la *Imatge 27: Inferior impressora. Distribució elements electrònics*, tenint en compte que la pantalla LCD està ubicada a la part frontal de la màquina.



Imatge 27: Inferior impressora. Distribució elements electrònics

6. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost total de la fabricació i muntatge de la impressora FDM reformada amb IVA inclòs a dia 31 de agost de 2019 és de:

CINC MIL NOU-CENTS CINQUANTA-UN EUROS AMB SEIXANTA-DOS CÈNTIMS
5.951,62€

7. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el projecte de la impressora FDM de grans dimensions, es pot afirmar que s'ha assolit l'objectiu principal, que era reformar un prototip d'un projecte anterior per fer possible la producció de models impresos amb la màquina.

Tanmateix, més detalladament s'han respectat cada un dels punts de les especificacions imprescindibles; inclòs s'han assolit aspectes de caràcter no obligatori.

Entrant a valorar el pressupost de fabricació i muntatge de la impressora FDM, es pot concloure que el cost total, tot i no destacar dins dels preus de les impressores equivalents del mercat, és elevat. Aquest cost és degut en primera instància pel fet de la construcció d'una sola unitat, que afecta tant amb cost de la matèria primera com el temps de fabricació.

D'altre banda, la impressora s'ha construït en gran part amb alumini, i les fixacions dels diferents elements s'han previst robustes, obtenint una estructura sòlida i resistent. A més, s'han adquirit elements comercials amb un cost elevat, com podrien ser les guies dels eixos X i Y, però amb una prestacions mecàniques més elevades que altres materials comercials econòmics.

Per tant, el cost elevat de la impressora, a part de la fabricació d'una sola unitat, es pot justificar amb les prestacions mecàniques elevades de la màquina.

Finalment, s'ha optat per re aprofitar material comercial de la impressora anterior reformada. Dos d'aquests elements podrien ser les broquetes de la marca BCN3D, o bé les 4 plaques calefactades. Aquests dos últims elements defineixen en gran part la qualitat i la capacitat d'impressió, a més dels tipus de material de bobina per imprimir.

L'estructura modular de la impressora permet en un futur, aplicar-hi canvis com ja podrien ser les broquetes o la placa, en el cas que es volgués millorar les prestacions.

A la finalització del projecte, queda pendent la realització de proves d'impressió de diferents models, per reajustar la màquina mecànicament i/o electrònicament; en un cas més crític realitzar les reformes necessàries.

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

- Document 1: memòria i annexes
 - Memòria
 - ANNEX A: Informació tècnica
 - ANNEX B: Anàlisi del prototip-màquina per reformar
 - ANNEX C: Anàlisi de solucions
 - ANNEX D: Càlculs
 - ANNEX E: Documentació tècnica
- Document 2: Plànols
- Document 3: Plec de condicions
- Document 4: Estat d'amidaments
- Document 5: Pressupost

9. BIBLIOGRAFIA

Llistat direccions web utilitzades com a fonts d'informació:

Lloc web del portal web TRSD, (enllaç URL: <https://impresiontresde.com/tecnologias-de-impresion-3d-industrias/>), consultada 20 de maig del 2019.

Lloc web del proveïdor de material d'impressores 3D Filament2print, (enllaç URL: https://filament2print.com/es/blog/9_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html/), consultada 20 de maig del 2019.

Lloc web del portal web 3Dnatives, (enllaç URL: <https://www.3dnatives.com/es/top-10-impresoras-fdm-volumen-de-impresion-21092016/>), consultada al 25 de maig del 2019.

Lloc web de la revista All3DP, (enllaç URL: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>), consultada al 5 de juny del 2019.

Lloc web del proveïdor de servei d'impressió 3D Bitfab, (enllaç URL: <https://bitfab.io/es/materiales-de-impresion-3d-fdm/>), consultada al 5 de juny del 2019.

Lloc web del fabricant d'impressores BCN3D, (enllaç URL: <https://www.bcn3dtechnologies.com/>), consultada al 5 de juny del 2019

Lloc web del proveïdor d'elements electrònics per impressores 3D STATICBOARDS, (enllaç URL: <https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/>), consultada al 17 de juliol del 2019.

Lloc web del portal web 3Dnatives, (enllaç URL: <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/>), consultada al 17 de juliol del 2019.

Lloc web del fabricant d'impressores PRUSA PRINTERS, (enllaç URL: <https://blog.prusaprinters.org/calculator/>), consultada el 18 de juny de 2019.

Lloc web del portal web 3Dnatives, (enllaç URL: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>), consultada al 18 de juliol del 2019.

10. GLOSSARI

- *Warping*: un dels problemes més habituals de la impressió FDM. Aquest problema tracta de que la primera capa impresa es desprèn de la superfície de impressió, desenvolupant en deformacions considerables a la peça, normalment a les cantonades d'aquest.
- *Cracking*: un altre problema habitual durant la impressió FDM. Aquest, a diferència del *warping*, tracta de deformacions a les capes intermitges de la peça, degut a la falta de soldadura entre elles o a les contraccions per un refredament massa ràpid.
- Màquina 3D Delta: Aquest tipus de màquines consta de 6 barres, emparellades de dos en dos. En un extrem de cada parella de barres esta subjectada a una carro amb desplaçament vertical. A l'altre extrem es troba el capçal amb el *hotend*. Amb el sincronisme de moviments dels 3 carros de les guies, s'aconsegueix un moviment sobre una superfície del capçal. Aquesta tecnologia s'està desenvolupant i s'hi està invertint perquè permet moviments més ràpids que les màquines que funcionen en els eixos cartesianes, tot i que els resultats de les peces que s'obtenen són menys bons que el sistema convencional.
- Màquina 3D Polar: a diferència de treballar en coordenades cartesianes (X , Y, Z) aquestes impressores ho fan amb angles i longituds. Per tant, la taula de la màquina es pot desplaçar en una direcció, però a més permet la rotació al seu centre.

ANNEX A: Estudi de les diferents tecnologies 3D

A.1 Descripció de les diferents tecnologies d'impressió 3D del mercat.

A l'actualitat es poden trobar diferents tecnologies per imprimir models en 3D. Cada tecnologia utilitza diferents processos, del qual s'obtenen uns resultats característics i limitats.

Cada vegada més utilitzades les tecnologies d'impressió 3D, tant el sector industrial, com també en la odontologia, en àmbits amb la necessitat del prototipatge com l'automobilístic, etc.; s'haurà d'escollir quina d'aquestes que ja es troben en el mercat utilitzar segons les necessitats del client.

Aquestes tecnologies i les seves característiques són:

- **FDM (Fused Deposition Modeling):**

descripció a l'apartat A.2.

- **Estereolitografia (SLA):**

Se'n podria dir que és la tecnologia d'impressió 3D més antiga, del 1983, inventada per 3Dsystems, fabricant de les màquines Cube i Cubex.

Aquesta tecnologia funciona mitjançant l'exposició de una cap de resina líquida (foto-polímers) fotosensible a rajos làser UV perquè s'endureixi i es solidifiqui.

Una màquina d'impressió SLA consta de una plataforma perforada on s'imprimeix la peça a la base inferior. A la part inferior de la plataforma es trobaria una pantalla on es projectaria el rajos làser UV. Finalment entremig d'aquests dos, es trobaria un tanc on s'hi bolcaria la resina fotosensible.

Durant la impressió, la plataforma s'introdueix al tanc a la posició inicial per solidificar la primera capa de resina. El raig làser UV segueix un patró a cada capa, i fins que no l'ha solidificat tot no passa a fer la següent capa. A mesura que es van imprimint les capes la plataforma es va distanciant de la pantalla dels rajos UV.



Imatge 28: Màquina SLA Formlabs Form 2

Un cop el producte es retira de la màquina se li fa un bany en dissolvent per eliminar restes de resina no solidificada, i alguna vegada es posa en un forn UV per millorar les propietats mecàniques. Tot el material que no ha estat solidificat es reaprofitat.

A més a més de oferir una ampla gama de materials foto-polímers per imprimir, s'obtenen bones propietats mecàniques del producte resultant, tot i que alguns d'ells es poden arribar a deformar per sobre dels 60°C.

Els resultats d'aquesta tecnologia són peces llises i sobretot detallades, molt més que els resultats de FDM, però menys resistents que les peces obtingues per SLS. Entre d'altres, s'utilitza en sectors de la joiera i la odontologia.

- **Processament digital de llum (DLP):**

Aquesta tecnologia també utilitza foto-polímers líquids, és a dir la resina, com l'esterolitografia. A diferència d'aquesta última, no utilitza els rajos làser UV, si no que endureix la resina aplicant llum mitjançant un projector especial. Aquest projector utilitza uns micro miralls disposats a un motlle sobre un xip semiconductor controlats per un software (els projectors de pel·lícules, telèfons mòbils també utilitzen aquests micro miralls, que formen els píxels.)

D'aquesta manera, aquesta tecnologia permet solidificar patrons en un instant, i la velocitat d'acumulació de capes és més ràpid.

D'aquesta tecnologia s'obtenen models robusts amb una excel·lent resolució. També es fa servir en el sector de la odontologia i la joieria.

- **Sintetitzat selectiu per làser (SLS):**

Aquesta tecnologia seria similar a la SLA, amb la diferència que en la SLS el material utilitzat es pols. Aquesta pols, que es col·locada capa a capa amb una alçada inferior a un mil·límetre a una cubeta on la temperatura és lleugerament inferior al seu punt de fusió, és sintetitzat per una làser selectivament, i el producte és el resultat de tot el material unit per la fusió.

Aquesta pols pot ser de nylon, poliamida i poliamida amb carrega de fibres de vidre, metàl·lica, ceràmica. Normalment totes les pols són bi-components.

Aquesta tecnologia s'utilitza per la creació de prototips orientats a indústries comercials. Tanmateix, és útil per la fabricació de productes finals de us limitat.

L'ús de làsers d'alta potència, fa que aquesta tecnologia tingui un cost més elevat que la resta.

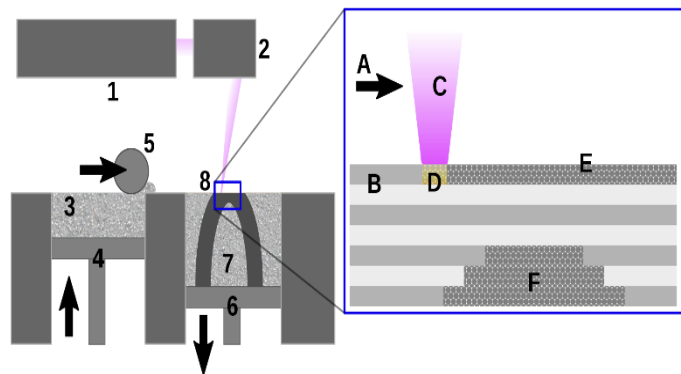
- **Fusió selectiva per làser (SLM):**

Per la seva similitud es podria considerar una subcategoria de la tecnologia SLS. Com a característica pròpia, el producte en pols utilitzat és metàl·lic. S'utilitza des de acer inoxidable, alumini, titani, crom-cobalt i altres aliatges.

Igual que la tecnologia SLS, un capçal va dipositant capes de pols sobre una plataforma. Un làser de alta potència fusiona la pols segons el patró. Seguidament es torna a repetir el procés fins a acabar la peça. La pols no fusionada es reaprofita.



Imatge 29: Màquina SLM sPro 230



Esquema 3: Procés de fusió selectiva per làser

Aquesta tecnologia permet la fabricació de peces unitàries, amb cavitats i geometries internes complexes, moltes vegades impossibles de fabricar amb motlles o sent mecanitzades.

La tecnologia SLM dona servei a la indústria aeroespacial o la ortopèdia per crear peces complexes i estructures de parts primes, amb canals ocults o espais buits.

- **Injecció d'aglutinant (BJ):**

Aquests tipus d'impressora utilitza dos materials: la base de pols i un agent adhesiu. Aquest últim actua unint les capes de pols segons el patró. Normalment l'aglutinant s'injecta en estat líquid des de un capçal similar a la d'una impressora 2D.

Aquestes impressores fan servir pols de guix, sorra, ceràmica i recentment plàstica, tot i que s'està desenvolupant altres materials base com els metàl·lics. Les principals empreses d'aquesta tecnologia són, 3DSystems, HP, Voxeljet i Exone. 3DSystems són els únics que compten amb la tècnica d'afegir color als models.

Els resultats no tenen alta resolució ni són resistents en comparació a les altres tecnologies, però aquesta tecnologia és molt utilitzada ja que a més a més de ser econòmica (fent referència a subcontractar la impressió), té una velocitat d'impressió més alta que les altres, fet que decanta a molts clients a fabricar les peces amb aquesta tecnologia.

D'aquesta manera s'utilitza per fabricar prototips de forma ràpida per la indústria automotriu, mèdica i aeroespacial.



Imatge 30: Kit de maquinari HP per injecció d'aglutinant

- **Altres tecnologies additives:**

Es poden trobar altres tecnologies a part de les descrites anteriorment, com per exemple el la injecció de material (MJ) utilitzats pels joiers des de fa anys, la fabricació mitjançant laminat de objectes (LOM) similar a SLA o SLS però més econòmic utilitzant paper, plàstics i metalls laminats.

També es troba la tecnologia 3D EBM, capaç d'imprimir titani a alta pressió i a temperatures de 1000 °C per fabricar peces aeroespacials o implants mèdics. De moment, es una tecnologia lenta i costosa.



Imatge 31: Impressora Mcor Arke

A.2 Descripció funcionament FDM (*Fused Deposition Modeling*)

Per poder imprimir models 3D amb la tecnologia FDM es requereixen 3 elements: una impressora FDM, una bobina del filament que s'esculli, i un model en format 3D amb l'extensió .STL.

Lligat amb l'arxiu .STL, es requerirà un altre software que s'encarregarà de generar un G-Code podent modificar alguns paràmetres de la impressió. Aquest pas serà necessari ja que el Software de la impressora llegirà el G-Code per anar controlant els mecanismes de la màquina.

Un cop es té el G-Code carregat a la impressora, aquesta comença un procés que no s'aturarà fins que hagi acabat el model:

1. El filament és estirat per l'extrusor, un motor amb un mecanisme d'engranatges, i enviat fins l'entrada del *hotend* a través d'un tub.
Algunes màquines, entre mig de la bobina i l'extrusor hi instal·len un encoder, on es fa la lectura del desplaçament del filament, corregint errors de posicionament del motor extrusor i com a resultat corregint errors superficials del model.
2. El *hotend*, l'element travessat pel filament, es prèviament escalfat amb una resistència que sempre està en funcionament, i consta d'uns difusors on s'hi aplica aire mitjançant un o varis ventiladors. El ventilador controla la temperatura del *hotend*, gràcies el Software que rep informació d'una sonda.
El filament surt en un estat viscos pel final del *hotend*, on aquest últim té un broquet d'una secció concreta. Cada material té un punt on arriba en aquest estat diferent, per tant la màquina haurà d'estar pre-ajustada segons el tipus de filament.
3. El capçal de la màquina, on hi ha el *hotend* acoblat, es desplaça per sobre una superfície segons el G-Code que s'està llegint, repartint el filament extruït. Aquesta superfície es la taula d'impressió, anomenada *heatbed*.
4. Quan s'ha acabat d'imprimir un nivell, la taula es separa del *heatbed* la distància d'alçada de capa pre-definida.
5. Finalment, quan la impressió ha acabat, s'espera fins que la peça s'acaba de refredar i s'extreu de la màquina.

A.3 Descripció mecànica FDM

Quan es parla de impressores FDM, es poden classificar en quatre grups diferents segons la seva mecànica:

- Eixos cartesianes (X , Y , Z): la màquina realitza moviments lineals en aquests 3 eixos que són controlats pel Software instal·lat. És el sistema més senzill i el que utilitza la gran majoria de fabricants
- Delta: aquest tipus de màquines consta de 6 barres, emparellades de dos en dos. En un extrem de cada parella de barres esta subjectada a una carro amb desplaçament vertical. A l'altre extrem es troba el capçal amb el *hotend*. Amb el sincronisme de moviments dels 3 carros de les guies, s'aconsegueix un moviment del capçal sobre una superfície.

Aquesta tecnologia s'està desenvolupant i s'hi està invertint perquè permet moviments més ràpids que les màquines que funcionen amb els eixos cartesianes, tot i que els models que s'obtenen són menys bons que el sistema convencional.

- Coordenades polars: a diferència de treballar en coordenades cartesianes (X , Y, Z) aquestes impressores ho fan a través de controlar angles i longituds. Per tant, la taula de la màquina es desplaça en una direcció, però a més permet la rotació al seu centre. L'últim eix, encarregat de donar alçada a la peça, normalment el realitza el capçal.
- Braç robot: aquest element serà encarregat de transportar el *hotend*, i a diferència dels tres sistemes anteriors, disposarà de més graus de llibertat.

Tenint en compte el sistema dels eixos cartesianes, i deixant de banda els altres, es pot afirmar que les màquines sempre consten d'uns mecanismes imprescindibles.

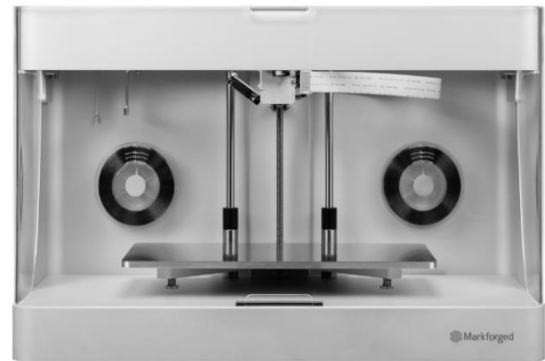
En el cas d'aquest projecte, el moviment de l'eix Z el realitza la taula, mentre que el moviment de l'eix X i Y el realitza el capçal. La descripció dels subconjunts d'una impressora es realitzen segons la màquina del nostre projecte:

A.3.1 Estructura

Es troben un gran ventall de dissenys, tots amb la mateixa finalitat de suportar els mecanismes de la impressora. S'utilitzen perfils extruïts d'alumini, xapes plegades de varis metalls o plàstics, peces impreses amb 3D, policarbonats o similars, etc. Aquesta estructura s'hi acoblarà el sistema de guiatge i transmissió del capçal, el de la taula, els motors, les bobines de material, etc.; i per tant haurà de suportar les càrregues estàtiques, però alhora s'haurà de dimensionar tenint em compte les càrregues dinàmiques generades pel moviment de la impressió.



Imatge 32: Impressora FDM Ultimaker 3



Imatge 33: Impressora FDM Markforged

Si s'analitzen les impressores dels fabricants professionals, s'observa que gairebé la totalitat de màquines estan carenades, i les industrials amb capacitat d'imprimir materials més tècnics disposen d'aïllament tèrmic. A més totes les impressores disposen de finestres de policarbonat o semblants, per visualitzar el procés d'impressió. Com es veu l'interior de la màquina, els fabricants miren d'ocultar els mecanismes entre les plaques i el carenat, buscant dissenys agradables i simples, tal i com es pot apreciar a les *Imatge 32* i *Imatge 33*.

El carenat serveix també per obtenir un control ambiental, millorant les condicions d'impressió, i com s'ha esmentat anteriorment, algunes tenen aïllament tèrmic per poder imprimir materials amb una alta temperatura de fusió.

A.3.2 Llit calent

El llit calent (*heatbed*), si es fa referència a tots els elements que el componen es troben les següents peces:

La part superior del llit calent, on la impressió de filament requereix una superfície llisa, uniforme i adherent, normalment disposa d'un vidre de borosilicat. Aquest cristall és recomanat per imprimir materials "estàndards", moltes vegades ajudat amb esprais adhesius, i es caracteritza per tenir un coeficient d'expansió tèrmica molt baix. No sempre s'utilitza vidre, es troben altres tipus de materials pel llit calent que suporten temperatures més altes.

La gran majoria de filaments FDM requereixen que la superfície on s'imprimeix estigui calefactada. Es troben diferents solucions comercials, que simplement consisteix en plaques d'alumini amb resistències instal·lades i sondes per prendre la temperatura. Si comercialment no es troba una solució, es tractaria de trobar un material bon conductor tèrmic i de fàcil mecanitzar (normalment el material idoni és l'alumini), i calefactar-lo mitjançant resistències. Cada material d'impressió necessita una condicions específiques, per tant aquestes plaques calefactades són controlades pel Software aconseguint diferents temperatures.



Imatge 34: Exemple placa calefactada amb resistències comercial

La taula, formada pel vidre i la placa calefactada roman a la part superior d'una estructura fixe (en forma de placa, de marc, etc.) per augmentar la rígides del sistema. S'ha de tenir en compte quan es vol guanyar rigidesa no elevar innecessàriament el pes del conjunt, ja que desenvoluparia amb un dimensionament més gran dels sistemes de guiatge i transmissió.

El vidre, la placa calefactada i la placa, que considerem el *heatbed*, s'ha d'alinejar amb el moviment en els dos eixos del capçal. Una de les solucions que utilitzen moltes impressores és incorporar una placa, aquesta guiada a l'eix Z, on mitjançant cargols roscats s'uneix amb el *heatbed* i amb la rotació de cada un d'ells s'alinea el sistema.

Altres impressores, amb un Software més potent, es resol l'alineament a través del programa electrònic que rep dades de varis sensors, controlant simultàniament els 3 eixos de la màquina per mantenir la distància d'impressió.

A.3.3 Sistema de guiatge

En aquest subconjunt, observant les solucions de les marques professionals, es troba:

- Guies INA o cromades de secció circular amb rodaments lineals de boles recirculants.
- Guies de perfils mecanitzats amb carros, de fricció o amb boles recirculants.
- Guies calibrades amb coixinets de fricció, del tipus SELFOIL o bé coixinets plàstics.
- Perfils de guies de seccions varies amb els seus propis carros amb coixinets o rodaments de boles.

Segons la solució de guiatge que s'escull pel disseny, limitarà la velocitat i la precisió de l'acabat del model 3D, marcarà la durabilitat i com a conseqüència el manteniment preventiu de la màquina.

A.3.4 Sistema transmissió capçal i taula

En aquest subconjunt, observant les solucions de les marques professionals, es troba:

- Eixos vis-sens-fi, de diferents passos i diàmetres amb les seves femelles respectives. Normalment es solen utilitzar pels moviments a l'eix Z.
- Corretges dentades i politges. Les més utilitzades per la poca inèrcia generada i per la velocitat que permeten.
- Pinyons i cremalleres. Inusual, tot i que la precisió de posicionament es superior a altres sistemes. No permet velocitat altes per la seva relació.
- Tot i que és una solució amb un cost molt elevat, i les impressores 3D FDM d'escriptori no les utilitza, es podrien fer servir servomotors lineals.

Per escollir aquesta part de la màquina, s'ha de valorar quina velocitat d'impressió es vol aconseguir, quina precisió, i altres aspectes del procés.

A.3.5 Capçal

És la part mòbil de la màquina que suportarà el *hotend* i a vegades l'extrusor. Aquest es desplaçarà en l'eix X i Y a diferents velocitats (exemple: Ultimaker pot arribar a uns 300mm/s), amb el *hotend* calefaccionat gràcies a resistències i amb ventiladors per regular la temperatura després de l'extrusió.

Les màquines de marques professionals permeten l'extrusió de diferents materials, i degut a que els materials s'han de tractar a diferents condicions, alguns capçals consten de més d'un extrusor o permeten un intercanvi d'aquest de forma molt ràpida.



Imatge 35: Hotends de la marca Ultimaker

A3.6 Hotend

És la part de la màquina encarregada d'extrudir el fil termoplàstic, al mateix temps que l'escalfa per l'adhesió amb les altres capes fent-lo arribar fins al seu *melting point*, punt on presenta un estat de viscositat. Es troben dos seccions diferents de filaments, 1.75mm i 2.85mm. Per el funcionament correcte del *hotend*, haurà d'estar dimensionat per unes de les dos seccions.

Les parts del *hotend* són:

- Conducte d'entrada fins al *nozzle*. Aquest conducte, normalment d'acer, pot està revestit a la part interior de PTFE per no cremar el material amb les temperatures que assoleix aquest conjunt. L'inici del conducte pot està preparat per muntar un ràcord pneumàtic o directament té perfil cònic. Dependrà doncs del tipus d'extrusió de la màquina.

La part exterior del conducte està dissenyat per dissipar la calor, amb uns nervis circulars. En aquest coll dissipador si aplica aire a partir d'un ventilador, aconseguit més control de temperatura.

- Suport *nozzle* i resistències. Normalment d'alumini o de llautó (bons conductors tèrmics), és un dau rectangular preparat per introduir una resistència i aguantar el *nozzle* amb un forat roscat.
- *Nozzle*. Normalment de llautó, té un canvi de secció circular a l'interior. A l'entrada tindrà el diàmetre del filament termoplàstic i el final el diàmetre que es vol extrudir. La

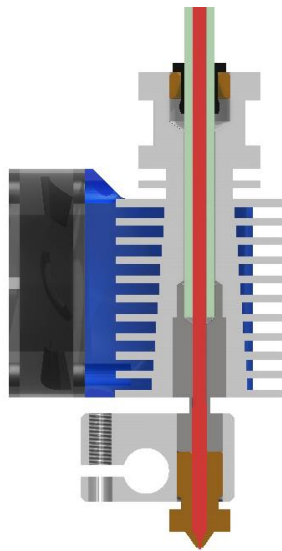
part exterior del *nozzle* és sisavada, amb un coll roscat per el seu acoblament. La punta acaba amb conicitat.

Es troba dos models per fer l'extrusió, que es diferències a la direcció de la seva resistència:

➤ *Hotend V6:*

Amb l'experiència del *hotend V5* s'ha desenvolupat el disseny d'aquest k, eliminant errors anteriors durant el procés d'impressió i reduint les dimensions. És el més polivalent del mercat. Permet un control de temperatura amb una precisió de 0.5°C, podent arribar a una temperatura de 300°C, i amb electrònica addicional fins a 400°C. A més, el temps per escalfar-se de 20 a 200°C oscil·la amb uns 65 segons.

Amb aquests rangs de temperatura, es poden utilitzar broquets des de 0.4mm obtenint alta resolució a les peces, fins a broquetes de 1mm per impressions amb alta velocitat. A l'*Esquema 4* es veu la secció del muntatge.



Esquema 4: Secció hotend V6

➤ *Hotend Volcano:*

A diferència del *hotend V6*, en el *hotend Volcano* el calefactor del *nozzle* està en paral·lel, com es pot apreciar a la *Imatge 36*, aconseguint un control de temperatura major que el primer. Degut aquest major control, el Ø del *nozzle* pot arribar a ser fins a 1,2mm, reduït el temps de fabricació i augmentant la resistència de la peça. Per contra, com que les capes impreses són més altes les superfícies de les peces tenen menys detall.



Imatge 36: Hotend Volcano

A.3.7 Extrusor

Per alimentar el filament al *hotend*, s'utilitza un mecanisme acoblat normalment a un motor pas a pas, que es basa en un primer rodet dentat solidaria a l'eix motriu, i un segon rodet llis que mitjançant una molla pressiona el primer. El filament es col·loca entre mig dels dos rodets i d'aquesta manera s'alimenta el *hotend* de forma controlada.

Quan es dissenya la màquina, es poden utilitzar dos sistemes extrusors:

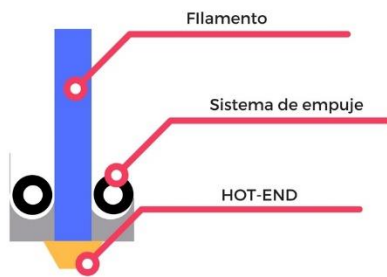
- Sistema extrusió directa:

Aquest sistema, tal i com diu el seu propi nom, consisteix a acoblar el mecanisme d'extrusió del filament directament al *hotend*. A l'esquema 4 es pot apreciar un esquema del muntatge.

L'avantatge que presenta aquest sistema és que s'elimini uns dels errors més comuns en la impressió FDM: la retracció del filament durant l'alimentació al *hotend*, eliminant defectes a la peça.

En canvi, aquest sistema requereix situar el motor de l'extrusor a la part mòbil del capçal, generant inèrcies degut al seu pes.

Extrusión Directa



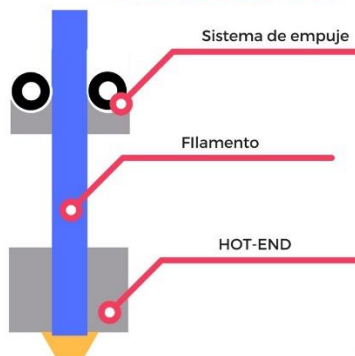
Esquema 5: Funcionament extrusió directe

➤ Sistema extrusió indirecte (*extrusió Bowden*):

Aquest sistema, consisteix a acoblar el mecanisme d'extrusió del filament en una part de la màquina immòbil. D'aquesta forma es crearà una distància variable entre l'extrusor i el *hotend*, on el fil es transportarà a l'interior d'un tub elàstic. A l'esquema 6 es pot apreciar un esquema del muntatge.

L'avantatge d'aquest sistema és que a diferència de l'extrusió directe, la part mòbil del capçal no trasllada el pes del motor de l'extrusor, disminuint el pes i per tant les forces generades. En canvi, el desavantatge que presenta aquest sistema és que es generen unes retraccions en el tram de filament que va des de l'extrusor fins al *hotend* que resulten errors superficials a la peça.

Extrusión Bowden



Esquema 6: Funcionament extrusió Bowden

A.4 Estudi mercat impressores FDM grans dimensions

En aquest apartat es recollirà informació comercial del ventall de productes que es poden trobar al mercat relacionades amb la impressora desenvolupada al treball. D'aquesta manera es tindrà una comparativa que servirà com a directriu pel desenvolupament del projecte.

Valoració de les impressores comercials de dimensions grans actuals:

Taula 15: Resum impressores comercials de grans dimensions

Marca	Model	Volum impressió [LxAxh]	Velocitat [mm/s]	Resolució	Materials	Cost [€]
Ultimaker	Ultimaker S5	330x240x300 mm	24mm ³ /s *	20micras amb broquet de 0.4mm.	PLA, ABS, PP, NYLON, CPE, PVA, PC, TPU 95A, etc.	6.782,05€
BCN3D	BCN3D Sigmax R19	420x297x210			PLA, ABS, Nailon, PET-G, TPU, PVA, etc.	3.695,00€
Kloner3D	Kloner3D 320	320x240x140 mm		50micras amb broquet de 0.4mm.	PLA, ABS, PCABS, NYLON, PET-G, PVA, PET, TPE, etc.	999,00€
TUMAKER	BIGFoot 500	500x500x500 mm		100micras.	PLA, ABS HI, NYLON, Bronze, Tech Petg, HIPS.	
Makerbot	Replicator+ Desktop	252x199x150 mm		100micras.		3.042,00€

Marca	Model	Volum impressió [LxAxh]	Velocitat [mm/s]	Resolució	Materials	Cost [€]
Zotrax	Zotrax M300	300x300x300 mm	150	90micras.		1.999,00€
XYZprinting	XYZprinting da Vinci Super	300x300x300 mm		20micras.	PLA, ABS, NYLON, TPE, PETG, HIPS, metall, fusta.	2.599,00€
COLIDO	COLIDA X3045	300x300x450 mm		100micras.	PLA, ABS.	2.264,03€
Impresora 3D CEL RoboxPRO	RoboxPRO	210x300x400mm		50 micras.	PLA, ABS, PETG, TPU, PC i nylon	4.418,70€
WitBox 2	WitBox	297x210x200mm	200	20 micras	PLA, fusta, bronze, coure, Filfafex	1.418,00€
Raise 3D Pro 2 Plus	Raise 3D	305x305x605mm	150		PLA, ABS, HIPS, PC, TPU, NYLON, TPE, FLEX, PETGX etc.	6.048,79€

A.5 Materials comuns de la impressió 3D

Per seleccionar els diferents elements mecànics i electrònics de la impressora, cal saber les propietats dels materials que es voldran extrudir i formar els models resultants.

La impressora desenvolupada en aquest projecte haurà de tenir la capacitat de treballar amb els materials que es poden considerar comuns en la tecnologia FDM. Aquest són el PLA, l'ABS, el Nylon, el PETG, el TPE, TPU i TPC i finalment el policarbonat.

PLA

Aquest material seria el més popular degut a la seva facilitat per ser imprès. La temperatura de l'extrusor serà més baixa que l'ABS, el seu competidor, i el llit calent no farà falta que assoleixi cap temperatura, tot i que es recomana per un major control.

Una altra característica positiva és que no emet mal olor durant la impressió.

En canvi, el PLA no servirà per fabricar peces que s'hi apliqui flexió ni impactes ja que és un material fràgil amb baixes prestacions mecàniques. Als 60°C tendeix a deformar-se.

ABS

Respecte el PLA, les seves propietats mecàniques són lleugerament superiors. Per contra, aquest és més difícil de ser imprès. S'utilitza per peces que necessitin una vida útil llarga i puguin suportar altes temperatures i impactes a més de ser lleugerament flexible.

L'ABS s'ha d'imprimir a altes temperatures, i durant el procés de refredament tendeix a deformar-se i a emetre fums forts.

PET

Les seves propietats mecàniques es trobarien entremig del PLA i ABS, més flexible i resistent que el primer i més fàcil de ser imprès que el segon.

Per contra, aquest material absorbeix amb facilitat la humitat, que té un efecte negatiu a la impressió. Per tant s'han de guardar les bobines de filament en llocs secs i frescos. A més, es el material ideal per peces destinades al contacte alimentari.

A més aquest material és adhesiu, impossibilitant l'ús de materials de suports. Aquesta característica per això, facilita la unió de les capes durant la impressió.

NILON

És el que millors característiques mecàniques té dels materials d'impressió comuns FDM, fent referència a la duresa, flexibilitat i durabilitat. A més aquest material pot tenyir-se durant o després de ser imprès.

Per contra, igual que el PETG absorbeix amb facilitat la humitat.

Amb aquest material es poden fabricar prototips funcionals, eines, peces mecàniques, etc.

TPE, TPU, TPC

Els elastòmers termoplàstics (TPE) són essencialment plàstic amb propietats elàstiques, per tant extremadament flexibles i resistents. El TPE es difícil d'extrudir per la seva flexibilitat, en canvi el TPU que és una mica més rígid, és més fàcil de utilitzar. El TPC, que es similar el TPE, es diferencia per la seva alta resistència a tractaments químics i a rajos UV. Generalment els tres tenen alta resistència tèrmica, fins a poder suportar temperatures de 150°C.

Policarbonat

És el material que té més duresa dels descrits, a més amb una alta resistència als cops i a la calor (pot suportar fins a 110°C). A més és transparent, i permet fabricar mascarees per bussejar, pantalles de dispositius electrònics, etc.

El policarbonat també absorbeix la humitat, per tant s'ha de guardar en llocs secs i frescos.

Resum de les propietats dels materials comuns a la impressió FDM:

Taula 16: Resum materials estàndards FDM

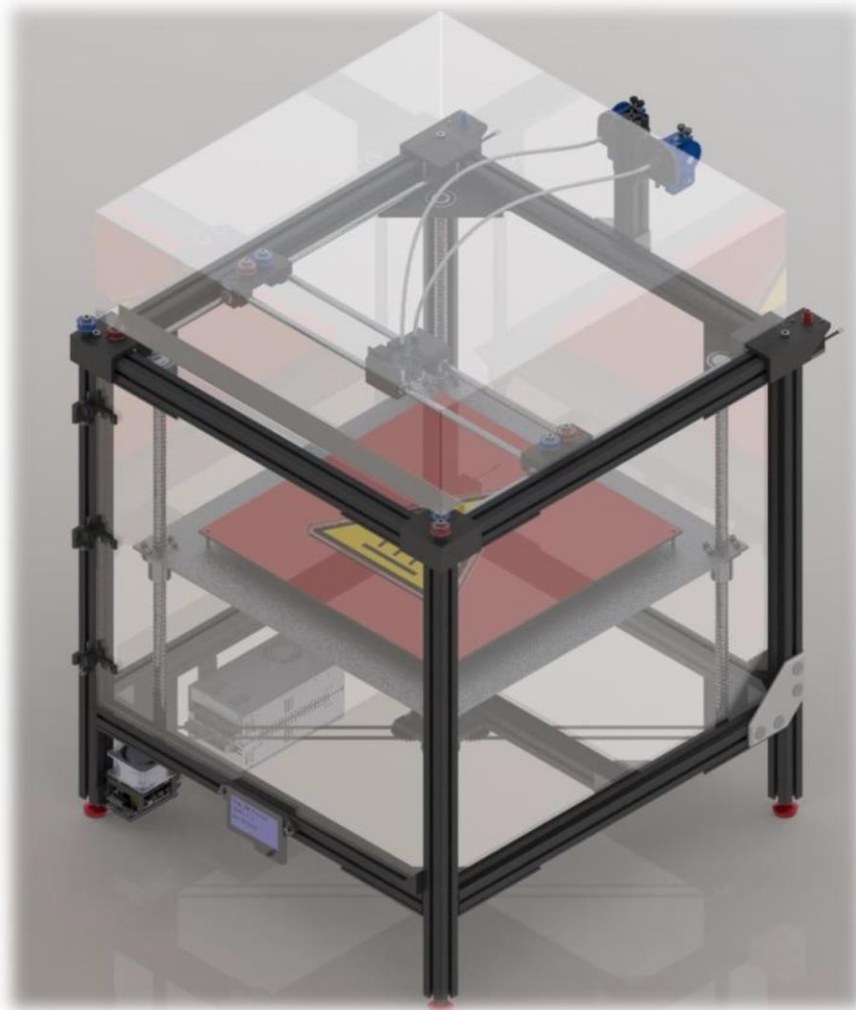
	PLA	ABS	PETG	NILON	TPE,TPU,TPC	Policarbonat
<i>Duresa</i>	Alta	Alta	Alta	Alta	Mitja	Molt alta
<i>Flexibilitat</i>	Baixa	Mitja	Mitja	Alta	Molt alta	Mitja
<i>Durabilitat</i>	Mitja	Alta	Alta	Alta	Molt alta	Molt alta
<i>Dificultat d'ús</i>	Baixa	Mitja	Baixa	Mitja	Mitja (TPE,TPU) Baixa (TPC)	Mitja
<i>Temp. impressió</i>	180-230°C	210-250°C	220-250°C	240-260°C	210-230°C	270-310°C
<i>Temp. Llit calent</i>	20-60°C	80-110°C	50-75°C	70-100°C	30-60°C	90-110°C
<i>Contracció /deformació</i>	Mínima	Considerable	Mínima	Considerable	Mínima	Considerable
<i>Soluble</i>	No	En cetones i acetona	No	No	No	No
<i>Seguretat alimentaria</i>	Segons fabricant	No	Segons fabricant	Segons fabricant	No	No

ANNEX B: Anàlisi del prototip-màquina per reformar

B.1 Introducció

L'objecte d'aquest projecte tracta de estudiar i analitzar el projecte de la màquina d'impressió FDM realitzat anteriorment per un altre alumne; i a partir d'aquesta base dissenyar una nova impressora FDM atacant sobre els punts crítics trobats, també gràcies el prototip construït, per millorar-ne el rendiment.

Quan s'executa un projecte d'aquestes característiques, on es parteix d'una part teòrica formada pels càlculs mecànics i els plànols constructius, i s'acaba en la construcció d'un prototip màquina, sovint sorgeixen errors imprevistos, tals com vibracions o friccions. Per fer un anàlisi que aporti una informació fiable es creu convenient fer-lo en base el prototip, i a partir d'aquest punt fer una comparativa amb la part teòrica del projecte.



Imatge 37: Vista isomètrica del 3D del prototip reformat

B.1 Anàlisi

Tal i com es mostra a la *imatge 37* es pot apreciar que la màquina per reformar utilitza els eixos cartesianes, on el capçal amb el *hotend* és l'encarregat de realitzar els moviments en X i Y, i la taula calefactada el moviment en l'eix Z. Així doncs, té el mateix sistema de funcionament del que es basa el projecte; per seguir el seccionament de subconjunts d'aquest tipus de màquina realitzat a l'ANNEX A: Informació tècnica, aquest anàlisi seguirà el mateix esquema:

B.1.1 Estructura

El xassís del prototip analitzat va estar construït a partir de perfil·l·l·ria extruïda d'alumini, en concret un perfil de 45x45 amb 4 regates. Les barres estaven unides entre si mitjançant angles i esquadres comercials, amb cargols DIN 7991 M8x12 i femelles "T" per regata de 10, també comercials.

L'acoblament, de quatre peus, constava de dos bases rectangulars, una a la part inferior i l'altre a la part superior, i la unió d'ells formaven l'estructura de la impressora. A més, a la part inferior estava reforçada per un tirant, on s'hi va acoblar un conjunt de transmissió dels cargols de potència que s'analitzarà en un apartat següent.

Taula 17: Resum característiques estructura

	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Avantatge	Rigidesa	L'estructura muntada era rígida, tot i que amb aquest tipus d'acoblements s'ha de tenir en compte que les fixacions es poden afluixar, desquadrant la màquina.
Avantatge	Pes	La perfilaria d'alumini, amb una secció perforada amb gruixos de paret estrets, té com a característiques un moment d'inèrcia acceptable per l'aplicació a més de tenir un pes reduït.
Avantatge	Muntatge i fabricació	El muntatge d'aquesta estructura pot arribar a ser senzill, igual que la fabricació del perfils. A més, els perfils content amb quatre regates on faciliten la fixació dels diferents elements de la màquina.
Desavantatge	Desalineament	S'ha esmentat que el muntatge del conjunt pot arribar a ser senzill, però per contra aconseguir escairar les dimensions de l'estructura pot tenir cert dificultat per un operari no experimentat. Un desalineament pot provocar que el sistema de guiatge pateixi friccions innecessàries.
Desavantatge	Muntatge	Les estructures amb perfilaria d'alumini es solen convertir amb un esquelet de la màquina, i això provocà problemàtiques alhora d'acoblar elements a la part més interior dels marcs que formen l'estructura. Això pot provar que s'hagin d'afegir més tirants, o s'hagin de sobredimensionar alguns suports.
Desavantatge	Muntatge	Els diferents suports que fixaven les barres cilíndriques de guiatge es trobaven a diferents perfils de l'estructura, i per tant la dificultat d'alineat totes les guies era major.
Desavantatge	Manteniment	A les impressores 3D es generen moviments a unes velocitats relativament altes, i com a conseqüència acceleracions també elevades. Aquestes acceleracions poden provocar esforços a les fixacions en els perfils. Aquestes fixacions treballen estampint la femella "T" a l'interior de la regata del perfil gràcies al cargol, i davant de forces laterals (alineades al llarg de la regata), aquests elements poden arribar a lliscar distàncies petites. La suma d'aquests desplaçaments pot provocar desalineaments als diferents conjunts de la màquina

B.1.2 Llit calent

El llit calent del prototip, un dels punts més crítics del prototip constava de quatre plaques (MK2B PCB) quadrades de 214x214 mil·límetres, d'alumini amb resistències comercials, formant un quadrat de 428x428 mil·límetres. Es va preveure d'aquesta forma ja que no es troben aquests tipus de plaques per les dimensions que es requereixen.

A la part superior de les 4 resistències es van col·locar 4 vidres, que no s'ha pogut comprovar si era vidre de borosilicat.

Per fixar les resistències i els vidres, es va col·locar un format de espuma de polietilè a la part inferior de les primeres.

A la part inferior d'aquest muntatge esmentat, hi constava una placa d'alumini llisa, on els extrems hi tenia fixat les quatre femelles R20-05K4 pel cargol de potència. Entre aquesta placa guiada pels cargols de potència i el format d'espuma, hi havia un sistema d'anivellació de la superfície d'impressió mitjançant quatre cargols i quatre molles, el més utilitzat per les impressores comercials de gamma baixa i mitja.

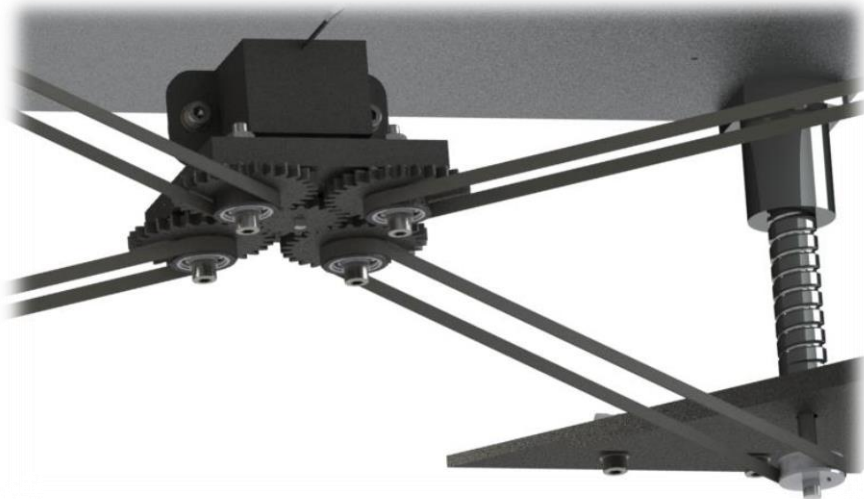
Taula 18: Resum característiques llit calent

	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Avantatge	Concepte	El sistema que es va adoptar a la impressora és el més habitual a les impressores FDM: una placa guiada a l'eix Z, que també permet alinear el vidre i les resistències amb una placa que reforça el paquet.
Avantatge	Cost	A falta de productes comercials per satisfer els requeriments del prototip, es va optar per acoblar varies resistències més petites, també comercials amb un cost relativament baix. Si s'hagués optat per mecanitzar una placa d'alumini per acoblar-hi resistències, el cost hauria estat major.
Desavantatge	Material placa reforç resistències i vidre.	Durant les proves que va realitzar el prototip, el suport d'espuma de polietilè va deformar-se degut a que no va suportar la temperatura generada per les resistències.
Desavantatge	Desajust	El disseny de transmissió dels cargols de potència, analitzat en un altre apartat, té joc entre alguns elements que el formen. A més, els motors pas a pas també poden generar errors quan no llegeixen correctament el control. La suma d'aquests pot generar errors de sincronisme entre els cargols de potència, generant desalineaments i friccions.
Desavantatge	Muntatge	Pel bon funcionament del sistema, s'han de deixar els quatre punts de la taula amb la femella R20-05K4 pre-muntats al mateix nivell per evitar friccions innecessàries. El fet de tenir quatre cargols de potència dificulta aquest ajustatge.

B.1.3 Sistema guiatge i transmissió eix Z

Pel sistema de guiatge, tal hi com s'ha fet referència a l'apartat anterior, es va optar per utilitzar els cargols de potència, també encarregats de la transmissió. D'aquesta manera se'n van col·locar quatre, una a cada cantonada de la taula.

Per activar la transmissió s'hi va incorporar un motor NEMA17, acoblat a un suports imprès amb la tecnologia FDM tal i com es pot apreciar a la *Imatge 38*.



Imatge 38: Detall transmissió eix Z del prototip

A l'eix del motor hi havia el primer pinyó dels cinc que formaven el conjunt. En els quatre eixos dels pinyons restants s'hi va fixar una politja T3.

Així doncs, a partir del pinyó activat pel motor, es transmetia potència als quatre pinyons restants. I des de la politja de cada un dels pinyons, s'activaven els cargols de potència a través de una corretja dentada i una segona politja fixada en aquests últims.

Posteriorment, en una reforma que es va aplicar al prototip, es va instal·lar un segon motor i es van fabricar dos conjunts de transmissió iguals, cada un encarregat de dos cargols de potència. Tanmateix, també hi entrava en joc un pinyó motriu, en aquests cas dos en comptes de quatre pinyons conduïts per cada conjunt, 8 politges dentades T3 i quatre corretges per activar els cargols de potència.

Cada un dels cargols de potència estaven guiats per un rodament de boles rígid a la part inferior de la màquina, muntat a sobre un suport, i a la part superior estava acoblat a un suport de rodaments de contactes angular comercial. El suport de rodaments de contactes angular, equivalent al producte comercial de HIWIN FK 15, a més de guiar, fixava axialment el cargol de potència.

Taula 19: Resum característiques transmissió i guiatge eix Z

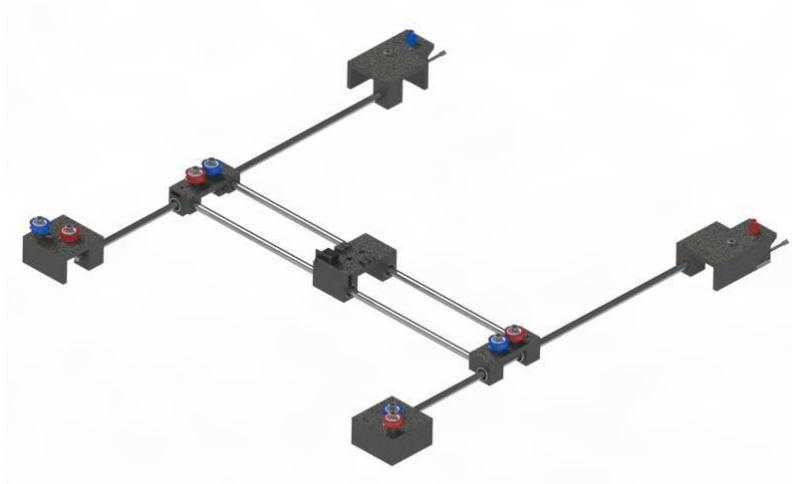
	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Avantatge	Joc	Un dels errors més habituals de la impressió FDM són els desalineaments de la taula amb el capçal, generant desprendiments de parts del model imprès. És important reduir el joc en el moviment de l'eix Z, ja que els canvis de capa han de ser precisos. Gràcies al suport de rodaments angulars que fixa el cargol de potència axialment, i la femella d'aquest últim que consta d'un sistema per ajustar-se, el joc d'aquest eix serà petit.
Desavantatge	Joc	El motor transmet la potència al cargol de potència, passant per varis elements amb les seves relacions de transmissió. Deixant de banda quins elements de transmissió s'utilitzin, s'ha de tenir en compte que entre ells sempre existeix un joc que fa perdre resolució al sistema.
Desavantatge	Joc	Entre moltes altres peces del prototip, es va optar utilitzar una impressora FDM per fabricar els pinyons de la transmissió de l'eix Z. Aquests elements de transmissió requereixen unes toleràncies dimensionals bastant exhaustives, ja que treballen gairebé amb joc 0.
Desavantatge	Joc	Els suports d'aquest subconjunt van ser fabricats amb una impressora FDM. Molts d'aquests suports requerien toleràncies dimensionals, ja que alguns tenien allotjaments per rodaments, altres suportaven dos pinyons que engranaven, etc; i tot i que es va fer un procés de mecanitzat posterior en algun cas, l'acoblament d'aquests elements al conjunt no donaven la precisió necessària.

B.1.4 Sistema guiatge i transmissió als eixos X i Y

Mantenint la filosofia de procés de fabricació, en aquest subconjunt es trobaven la gran majoria de peces fabricades amb una impressora FDM. Si s'observa a la *Imatge 39*, els quatre suports dels extrems estaven fixats als extrems superiors del xassís. Aquestes suports eren encarregats de suportar les politges que servien per la transmissió, i dos barres calibrades col·locades paral·lelament, un a cada lateral de màquina.

A sobre aquestes hi lliscaven dos carros, un per cada barra, mitjançant coixinets lineals de boles recirculants. Aquests carros estaven units entre si amb dos barres calibrades més. Finalment, en aquestes últimes barres hi lliscava el capçal on hi havia els *hotends* fixats.

D'aquesta manera, els dos carros units realitzaven un dels moviments juntament amb el capçal, i aquest realitzava el segon moviment perpendicular al primer.



Imatge 39: Sistema guiatge eix X i Y del prototip

Per la transmissió dels dos conjunts mòbils del sistema, s'utilitzaven dos motors NEMA, cada un acoblat a un suport diferent dels extrems superiors de la màquina. El sistema de corretges i politges T3 adoptat al prototip, s'anomenava Core XY, i es pot apreciar a l'esquema 7.

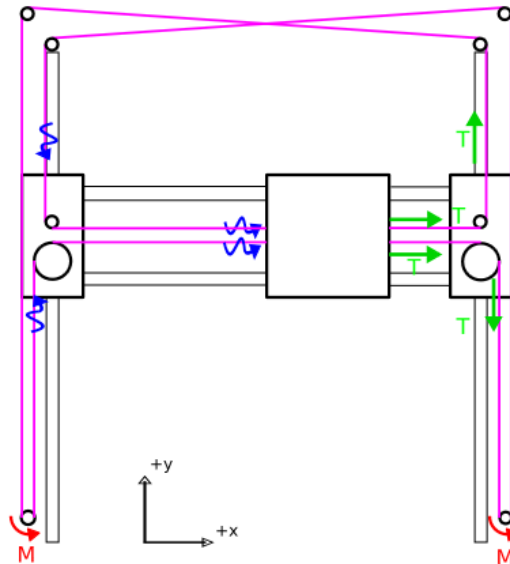
Com a propietats d'aquest muntatge, és que amb una sola corretja seguint el circuit que marcaven les politges, i el sincronisme dels dos motors, aconseguien moure aquests elements als dos eixos independentment.

	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Avantatge	Pes	El sistema CoreXY que es va utilitzar per la transmissió, permetia acoblar els dos motors en punts fixos de la bancada. D'aquesta manera es reduïa la inèrcia dels elements mòbils
Avantatge	Guiatge	Aquest sistema, emprat també per altres impressores comercials, és senzill i efectiu. El muntatge d'aquest no requereix un ajustatge molt complex, sempre hi quan es compti amb uns suports de les guies dins d'unes toleràncies dimensionals.
Avantatge	Cost	El cost del material comercial utilitzat, tant pel guiatge com per la transmissió, no té un cost elevat envers sistemes que incorporen altres màquines.
Desavantatge	Resolució	El fet de utilitzar una sola corretja, comporta que a de resseguir totes les longituds que ha de recórrer el capçal. Per aquest motiu, en resulta una corretja relativament llarga, i a més tenint en compte que es tracta d'una impressora de grans dimensions, hi haurà deformacions provocades per les tensions que faran perdre resolució a la peça.
Desavantatge	Joc	Com ja s'ha esmentat a l'apartat anterior, es va optar per utilitzar una impressora FDM a l'hora de fabricar la gran majoria de suports. Aquests suports on s'hi acoblaven elements que requerien toleràncies dimensionals concretes, no van donar el rendiment esperat generant errors de posicionament, friccions innecessàries, etc.

Taula 20: Resum característiques guiatge i transmissió eix X i Y

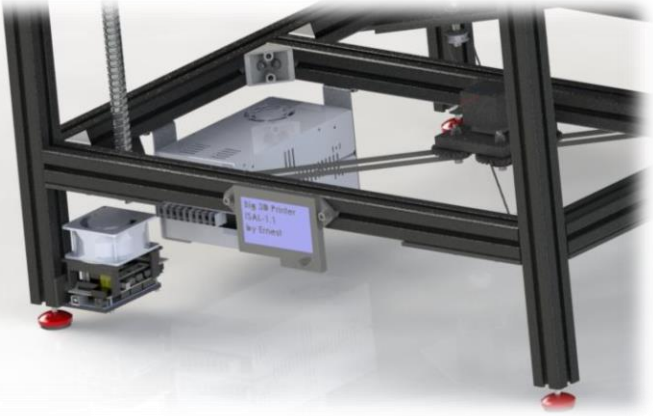
B.1.5 Altres elements de la impressora

En aquest apartat no es farà una valoració dels avantatges i desavantatges com s'ha fet anteriorment; en aquest punt es vol recalcar algunes parts del disseny que restaven rendiment a la impressora per diferents motius: muntatge, suports de l'element, element no òptim per la funció que se li demana, etc.



Esquema 7: Sistema transmissió CoreXY

Taula 21: Resum característiques altres elements del prototip

ELEMENT	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ
Finals de carrera	Muntatge	<p>Igual que una màquina CNC, la impressora requereix de un zero màquina, on a partir d'aquest treballa en unes coordenades concretes, evitant col·lisions i tenint un control de l'espai correcte. El prototip comptava amb els 3 sensors per galgar el zero, tot i que les seves fixacions als suports no eren prou rígides. A l'eix Z, el més crític, es podrien haver donat errors de distància entre la broquet i el headbed impossibilitant la bona execució del model.</p>
Elements electrònics	Muntatge	<p>Els elements electrònics de la màquina estaven penjats amb diferents suports a la base inferior.</p>  <p>Aquesta distribució, tot i que estava ventilada, no estava prevista per cablejar-la de forma ordenada i simplificada.</p>
Suport bobina filament	Suport	<p>Durant l'anàlisi del prototip no es va localitzar cap suport per la bobina de filament. Tenint en compte que la màquina constava de dos <i>hotends</i>, per tant treballava amb dos filaments simultàniament, hagués estat recomanable utilitzar dos suports per acoblar les bobines, facilitant la tracció dels extrusors i evitant errors d'impressió.</p>

ANNEX C: Anàlisi de solucions

C.1 Introducció

En aquest annex es pretén exposar les diferents solucions que s'han valorat alhora de dissenyar mecànicament la impressora 3D, a un nivell conceptual. Els diferents acoblaments o mòduls que pot formar una impressora FDM s'analitzaran de forma seccionada. A la Memòria es definiran les solucions que s'incorporaran a la màquina i es justificarà.

C.2 Estructura impressora 3D

Com estructura de la impressora s'entendrà els elements on s'hi fixaran tots els sub-acoblaments que formaran la impressora. A més l'estructura haurà de facilitar el carenat complet de la màquina per la seguretat de l'usuari i per tenir unes condicions ambientals òptimes.

➤ Solució 1:

Tractaria de formar un xassís únicament amb perfil·laria extruïda d'alumini com el prototip de la màquina del projecte anterior que s'ha analitzat. En el mercat professional d'impressores es troben molts dissenys que han emprat aquesta solució. Es tracta de dissenyar un esquelet amb perfils d'aquest tipus, i preveure les unions que els unirà, que poden ser comercials.



Imatge 40: Exemple 1 estructura perfils alumini



Imatge 41: Exemple 2 estructura perfils alumini

- Avantatges:

- La versatilitat que ofereix aquesta solució alhora de construir figures geomètriques rectes és difícil d'aconseguir amb altres solucions.
- Els perfils extruïts es caracteritzen per ser elements pocs pesats amb una alta resistència gràcies a les seves seccions.
- Hi ha un mercat molt extens de perfilaria extruïda d'alumini, que a més de subministrar les barres, ofereixen una gamma variada d'elements per la seva unió, articulació, remats, etc. D'aquesta forma s'aconsegueixen estructures amb un acabat robust i professional.
- Els perfils tenen fins a 4 regates segons el model que s'esculli, on mitjançant unes femelles en forma de "T" es poden unir qualsevol tipus d'element. El fet de poder escollir les regates dels perfils permet deixar cares llises en punts de la màquina on no s'hi ha de subjectar res.
- Carenar estructures amb perfilaria d'alumini resulta senzill gràcies a que ofereix punts de fixació a tot el seu llarg.

- Desavantatges:

- El cost actual d'un metre en el mercat ronda els 80€, per tant és un element car tenint en compte el relació pes/€.
- De la mateixa manera que és senzill formar estructures amb aquest perfils, és difícil quadrar les dimensions d'aquestes tot i els elements que ofereixen els proveïdors (cartelles, platines, etc.).
- Les estructures formades amb aquesta perfilaria, tendeixen a desquadrar-se amb el pas del temps, degut a que les unions de les regates treballen fent "Sandwich". Per tant forces en direccions alineades a la regata poden desplaçar els elements units.
- Tots els elements que formin la màquina necessitaran suports fixats a la perfilaria, i sovint pot limitar la ubicació d'elements en zones interiors dels marcs que es formen amb els perfils.

➤ Solució 2:

Es tractaria de formar un xassís amb plaques metàl·liques com l'alumini, o bé de plàstic, o fins i tot fusta; tallades amb làser, oxicall, amb doll d'aigua, etc. Les plaques formarien les quatre parets de la màquina, i s'unirien amb esquadres o be tirants entre elles.

En el mercat professional d'impressores es troben molts dissenys que han emprat aquesta solució. Amb les tecnologies de tall actuals es pot reduir molt el temps de mecanització o fins i tot eliminar, ja que permeten tallar forats, colissos, etc. Sempre hi quan es necessitin toleràncies dimensionals però, s'haurà de recórrer a la mecanització.



Imatge 42: Exemple estructura amb plaques

- Avantatges:
 - Les plaques poden subjectar els elements de la màquina en qualsevol punt de la seva superfície.
 - Aquestes plaques poden ser fabricades amb tecnologies com el tall làser, amb doll d'aigua, amb plasma; obtenint els forats per les fixacions amb una gran precisió, eliminant temps de mecanització i reduint el cost de fabricació.

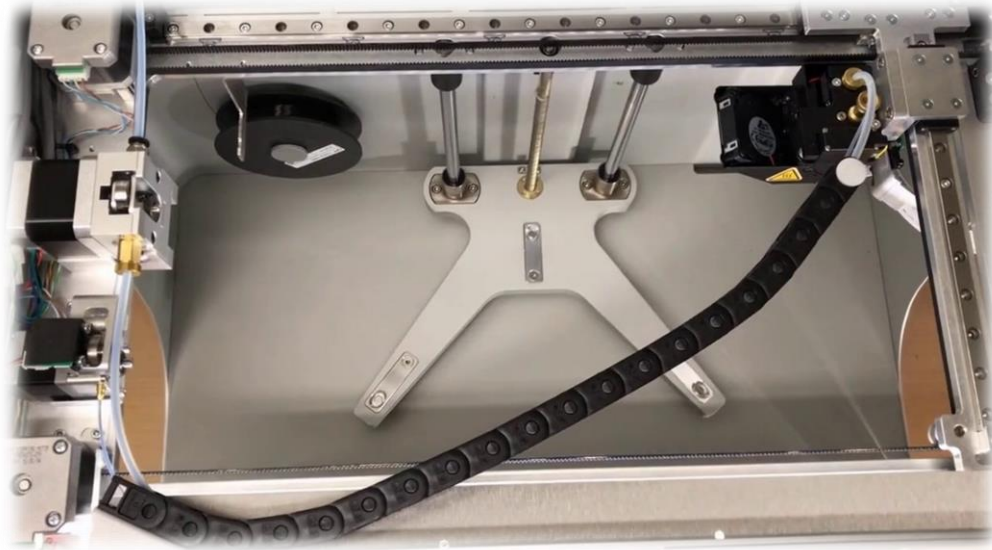
- Relacionat amb el punt anterior, es poden fabricar les plaques amb qualsevol geometria de 2 dimensions amb un gruix específic. D'aquesta forma es surt de dissenys quadriculats, fent-los més comercials i agradables.
- Es poden aconseguir estructures més quadrades i alineades entre sí, i a conseqüència eliminar forces i friccions innecessàries dels elements de guiatge.
 - Desavantatges:
 - El cost actual del tall de plaques pot variar segons el material i la tecnologia emprada (les tecnologies donen diferents acabats, per exemple el doll d'aigua aconsegueix un perímetre molt més agradable i gairebé no genera feina per polir la placa, però alhora és més car que el làser).
 - Algunes de les plaques hauran de passar per un tractament (anoditzat, pintat) per mantenir un acabat superficial resistent al pas del temps
 - Si hi ha elements de guiatge dels quals els seus suports estiguin fixats a plaques diferents, apareixeran les mateixes dificultats d'alineament que amb la solució 1.
 - L'estructura de la impressora 3D resultarà més pesada que si fos construïda amb la solució 1.

➤ Solució 3:

Igual que l'anterior, l'estructura es fabricaria amb plaques tallades amb alguna tecnologia disponible del mercat. En aquest cas, les plaques serien la base del muntatge tant de la transmissió com del guiatge dels eixos X i Y, i substituirien els tirants o unions de les plaques laterals.

Aquesta solució l'adopta el fabricant de impressores Markforged, i els models que es fabriquen amb les seves màquines tenen una resolució correcta, a més d'aconseguir una acoblament molt integrat. Tal i com es pot apreciar a la *Imatge 43*, es veu com hi ha un sistema de guiatge fixat a la placa al llarg de l'eix X. A sobre aquest sistema hi llisca un carro, on porta el segon sistema de guiatge a l'eix Y, perpendicular al primer, on el capçal amb el *hotend* s'hi desplaça. De la mateixa manera també es pot apreciar

com el sistema de transmissió esta fixat a la mateixa placa, amb els motors corresponents.



Imatge 43: Detall sistema guiatge i transmissió eix X i Y de la impressora Markforged

- Avantatges:
 - Amb la mecanització de la placa que subjecta el sistema de guiatge de l'eix X i Y s'assegura una alineació exacte.
 - A més de suportar el sistema de guiatge, també s'hi pot acoblar el sistema de transmissió i els seus motors, facilitant el muntatge i desmuntatge de tot el bloc .
 - El cablejat dels motors, finals de carrera, i extrusors es podrà preveure a la mateixa placa, facilitant la feina d'instal·lació elèctrica.
 - Les plaques acoblades paral·lelament al pla de la planta actuen com a tirants de les plaques laterals, millorant inclús els muntatges que utilitzen perfils per fer de tirants.
- Desavantatges:
 - El cost actual del tall de plaques pot variar segons el material i la tecnologia emprada (les tecnologies donen diferents acabats, per exemple el doll d'aigua aconsegueix un

perímetre molt més agradable i gairebé no genera feina per polir la placa, però alhora és més car que el làser).

- Algunes de les plaques hauran de passar per un tractament (anoditzat, pintat) per mantenir un acabat superficial resistent al pas del temps.

C.3 Sistema guiatge i transmissió eix X i Y

El moviment de la impressora FDM es farà en els eixos cartesianes XYZ. En aquest punt s'analitzarà la ubicació del motor de cada eix (estàtic o en moviment), els elements de guiatge i el carro/s que desplaçaran el capçal amb el *hotend*. A més s'estudiarà els diferents sistemes de transmissió que es podran integrar al conjunt.

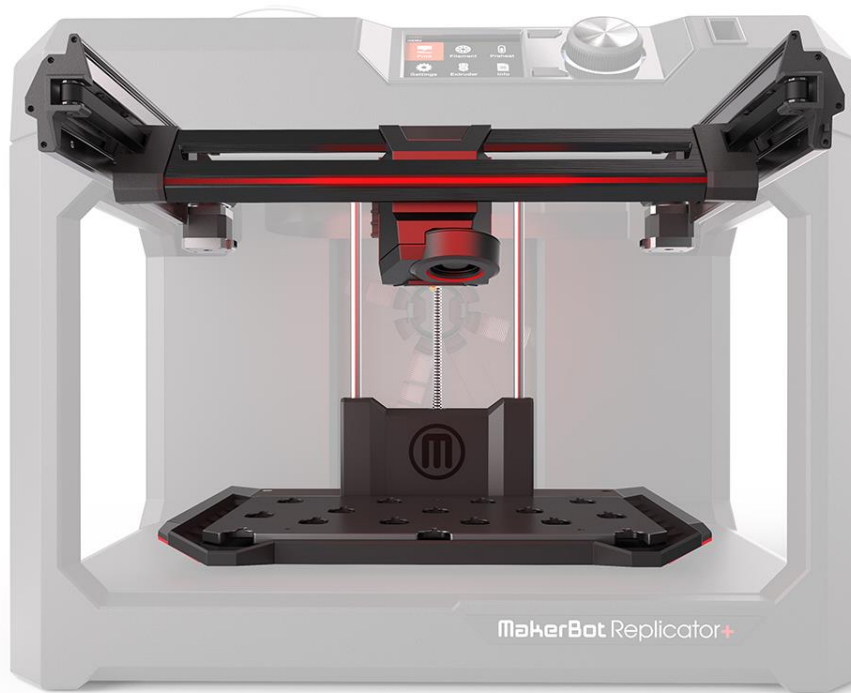
* Es troben altres solucions on un dels dos moviments XY el realitza la taula. Aquest disseny demana el doble de la longitud de l'estructura respecta la capacitat d'impressió que realitza la taula en aquest eix. Com que en aquest projecte es dissenya una impressora de grans dimensions, no es contempla aquest disseny.

Després de l'anàlisi de l'ANNEX A, s'arriba a la conclusió que el millor sistema de transmissió per aquesta projecte són les politges i corretges dentades, per la seva versatilitat, rendiment i cost reduït. A partir d'aquest punt, la distribució d'aquests elements és el que oferirà diferents solucions:

➤ Solució 1:

La solució descrita a continuació és utilitzada per diferents impressores FDM, com per exemple la màquina Makerbot. Com a característica principal d'aquest sistema és que un dels motors encarregat de la transmissió d'un eix (X o Y) està acoblat a un element mòbil, normalment el tirant que desplaça el capçal. Gràcies a la fixació del motor a sobre aquest element mòbil, la longituds de les corretges dentades queden reduïdes. A la *Imatge 44* es pot apreciar un exemple d'una màquina comercial.

Com element de guiatge es pot utilitzar guies comercials, amb el seu carro corresponent. Per exemple el fabricant HIWIN té diferents models de guies per aquesta aplicació.



Imatge 44: Detall guiatge i transmissió eix X i Y de la màquina MakerBot

- Avantatges:
 - Aquest sistema simplifica els elements de guiatge dels dos eixos i resulta un manteniment senzill i econòmic.
 - Aquest sistema no requereix un espai en la superfície XY gaire més gran que la superfície d'impressió.
 - El sistema de corretges no serà més llarg que el desplaçament total que ha de fer el capçal, disminuint la deformació elàstica i afavorint la resolució. A més el muntatge quedarà simplificat.
- Desavantatges:
 - La transmissió del primer eix transportarà el pes del motor i els altres elements del segon eix, amb una inèrcies superiors a altres muntatges. Aquest muntatge no és el més adient quan es volen assolir velocitats d'impressió altes, ja que els elements de

guiatge i transmissió s'hauran de sobredimensionar per suportar les forces generades per les acceleracions.

- Un dels motors té moviment lineal, per tant el cablejat de control i potència d'aquest haurà de preveure un bucle per permetre el desplaçament.

➤ Solució 2:

En aquest disseny no hi ha cap element mòbil a part del capçal amb els *hotend*. Els dos motors que activen el moviment dels dos eixos estan fixats a la bancada, i mitjançant un sistema de transmissió connectat al capçal s'aconsegueix el moviment:

Pel moviment a l'eix X i Y, consten quatre barres calibrades de secció circular, paral·leles de dos en dos situades als laterals superiors de l'estructura de la impressora. Cada parell de barres està unida amb dos corretges dentades i les politges corresponents, a cada un dels dos extrems per transportar la potència. A més, a cada extrem de cada una de les guies hi haurà un suport de rodament de boles.

Una barra de cada parell és activada per un motor, i aquesta activa la seva parella amb la corretja esmentada anteriorment.

En aquestes barres hi llisquen 4 carros, un a cada eix, i aquests estant units de dos en dos per una guia del capçal. Les dos guies que uneixen els carros, formen una creu.

Els carros, pinçats a les corretges de les barres calibrades, transporten les dos guies i com a conseqüència el capçal, que és travessat per aquestes últimes. Aquest sistema és el que utilitza la coneguda marca Ultimaker a tots els seus models, tal i com és pot apreciar a la *Imatge 45*.



Imatge 45: Detall capçal Ultimaker

- Avantatges:

- Les inèrcies es redueixen ja que els elements mòbils només són les barres calibrades i el capçal.
- Aquest sistema no requereix un espai a la superfície XY gaire més gran que la superfície d'impressió.
- El sistema de corretges no serà més llarg del desplaçament total que ha de fer el capçal, disminuint la deformació elàstica d'aquesta.
 - Desavantatges:
 - Tenint en compte la quantitat de corretges utilitzades pel moviment, tant el muntatge com el manteniment mecànic serà més complexa.
 - Es troben elements que poden tenir ser joc entre ells, disminuint la resolució de les peces. Aquests elements poden ser: els rodaments de boles de les barres calibrades, els rodaments lineals dels carros i el capçal, el joc de corretja.
 - La capacitat de superfície d'impressió va lligada amb la longitud de les guies del capçal, fent que s'hagi d'elevat el seu diàmetre en impressores més grans (per evitar la flexió i mantenir les prestacions de la impressora). Degut aquest fet, aquest sistema sol ser més favorable a impressores petites.

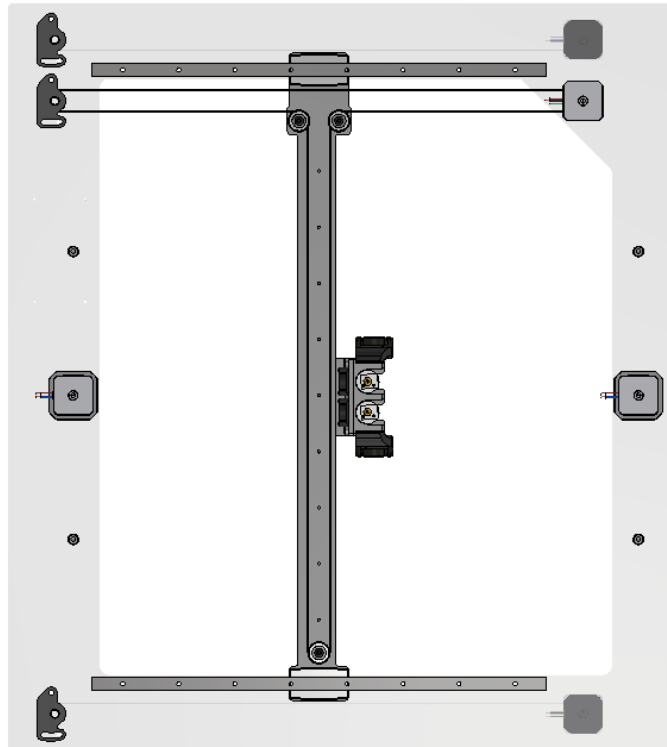
➤ Solució 3:

En aquest disseny, igual que la solució 2, cap dels motors estarà acoblat a elements en moviment. Els motors que activen el moviment dels dos eixos són fixats a la bancada, en concret a una placa (aquest muntatge va lligat a la Solució 3 de l'apartat C.2 Estructura impressora 3D) , i mitjançant un sistema de transmissió connectat al capçal s'aconsegueix el moviment:

A sobre una placa fixada a l'estructura, es munten tots els motors necessaris pel moviment tant de l'eix X com el del Y. També, a sobre aquesta placa es fixen dos guies amb el seu carro respectiu. Aquestes guies paral·leles només guiaran el moviment a

un eix. Els carros d'aquestes estaran pinçats a una corretja que anirà d'un extrem a l'altre de l'eix.

A sobre els dos carros de les guies anteriors, es muntarà un tirant que els unirà. En aquest tirant si acoblarà la tercera guia amb el seu carro, que aquest transportarà el capçal. Pel moviment en aquest segon eix, serà necessari acoblar un sistema de corretja en forma de "T", segons l'esquema 7.



Esquema 8: Muntatge sistema guiatge i transmissió eix X i Y

- Avantatges:
 - Les inèrcies es redueixen ja que els elements mòbils només són el tirant amb la seva guia i el capçal.
 - Aquest sistema no requereix un espai en la superfície XY gaire més gran que la superfície d'impressió.
 - L'acoblament, l'ajust i el manteniment d'aquest disseny és senzill, ja que els elements de guiatge i transmissió dels dos eixos es troben fixats sobre un sol nivell, que correspon a la placa.
- Desavantatges:

- El tirant amb la seva guia pot tenir un pes més elevat que altres dissenys, tot i que es pot compensar afegint un segon motor per superar les forces generades.
- El sistema de transmissió del capçal adopta una forma de "T", augmentant la longitud respecta la Solució 1 i 2. El muntatge serà més complex, igual que el manteniment.

C.4 Sistema guiatge i transmissió eix Z

Moltes de les impressores que funcionen amb els eixos cartesianes, on la taula és l'encarregada de desplaçar-se a l'eix Z, adopten la mateixa solució: eixos calibrats de secció circular i cargols de potència amb la seva femella. Si s'analitzen impressores de diferents dimensions, es veu que les petites treballen amb la taula en voladís, és a dir, només estan guiades a un lateral dels 4 de la taula, tal i com es pot apreciar a la *Imatge 42*. En canvi, quan es tracta d'impressores de dimensions mitges o grans, es pot veure que la taula està guiada a dos laterals oposats.

En el cas d'aquest projecte, i igual que l'anterior, l'element de transmissió de l'eix Z serà el cargol de potència, i s'utilitzarà el material reaprofitat del prototip.

➤ Solució 1:

Tractaria de guiar la taula a dos dels seus laterals, oposats entre ells. S'utilitzarien 4 guies i es localitzarien gairebé als extrems de les taules. Entre mig de les dos guies de cada lateral, s'instal·laria el cargol de potència.

Les guies es fixarien o bé amb dos suports amb serratge per cada una d'elles, fixats a les parets interiors de l'estructura; o bé amb forats roscats a les testes, sempre hi quan l'estructura permetés aquesta fixació.

Cada un dels cargols de potència, que estaria al mateix eix del motor (per activar la potència de l'eix Z, s'utilitzarien dos motors), estaria suportat per un suport de rodaments angulars a la part superior; aquest últim estaria fixat a l'estructura de la màquina. A la part inferior del cargol de potència estaria unit amb l'eix del motor a partir d'un acoblament rígid. D'aquesta manera els rodaments del motor servien també per el cargol.

La taula, tindria un suport amb coixinet lineal per cada una de les guies. Pel cargol de potència, s'instal·laria la femella corresponent a la taula. Aquest material, com s'ha esmentat anteriorment es reaprofitaria del prototip.

En aquest subconjunt no es contempla cap altre solució, ja que amb l'estudi de mercat realitzat, s'ha observat que és la solució més emprada pels fabricants, i les prestacions del sistema són superiors a les necessitats de la màquina.

C.5 Capçal i *hotend*

El *hotend* que s'utilitzarà a la màquina serà del fabricant BCN3D, que és del tipus *hotend V6* descrit a l'*apartat A3.6* de l'ANNEX A. El fabricant d'aquest *hotend* que també s'havia utilitzat al prototip, limita l'ús als materials següents: PLA, PVA, ABS, nylon, policarbonat, TPU i copolièsters. Si s'observa la taula ... de l'ANNEX A, apartat A.5 on es veuen les característiques dels filaments d'impressió FDM, es podrà deduir que aquest *hotend* es capaç d'assolir una temperatura de 250°C.

Amb el *hotend* definit, es veuran les alternatives per la fabricació del capçal, que anirà relacionat també amb el sistema de guiatge.

Per buscar els millors sistemes de fabricació, s'hauran de tenir en compte les característiques que requereix aquest conjunt:

- Haurà de ser rígid per transportar el *hotend*, els ventiladors, etc.
- El pes haurà de ser mínim, ja que és un element amb moviment que genera forces.
- A més dels elements que haurà de transportar, s'hi haurà d'instal·lar els *drivers* dels *hotends* i ventiladors.

➤ Solució 1:

Tractaria de partir d'un bloc d'alumini per les peces que formarien el cos del capçal, i es mecanitzarien a un centre de mecanitzat.

- Avantatges:

- Gràcies el mecanitzat, s'assolirien totes les toleràncies dimensionals necessàries amb el procés de fabricació.
- L'alumini és un material amb una densitat baixa, per tant no generaria forces elevades.

- Les peces resultants tindrien més resistència que si es fabriquessin amb altres materials.
- És de les millors solucions per fer peces unitàries, ja que per exemple la injecció de plàstic no es pot contemplar en aquest projecte (fer el motlle de la peça podria ascendir fins a 3.000€).
- El *hotend* assoleix temperatures elevades, i per tant els elements del seu voltant queden afectats. L'alumini no tindrà problemes per aguantar aquesta calor.
 - Desavantatges:
 - El mecanitzat pot arribar a ser complexa, ja que tindrà moltes fixacions a mecanitzar per acoblar-hi tots els elements, i per tant varies estacades.
 - El mecanitzat tindrà un temps de fabricació major que amb altres tecnologies.

➤ Solució 2:

Tractaria de dissenyar el capçal en 3D i enviar-les a imprimir amb una tecnologia additiva. Per seleccionar la tecnologia s'hauria de tenir en compte la resistència que ha de tenir la peça, el pes, la temperatura que haurà de suportar, un procés de mecanitzat posterior, etc.

- Avantatges:
 - La tecnologia additiva permet la fabricació de models gairebé amb qualsevol geometria.
 - Encara que s'hagi de fer un mecanitzat posterior a les peces, pot reduir molt aquest temps de fabricació.
 - Hi ha Software per crear una geometria interior del model optimitzada, reduint el màxim el pes, però mantenint una estructura resistent a les carregues.

- Les tecnologies additives són un bon recurs per fabricar peces unitàries, ja que els seus preus són competitius respecte altres processos de fabricació.
 - Desavantatges:
- Les tecnologies additives que es podrien utilitzar per fabricar aquestes peces, treballen amb uns materials específics amb les característiques corresponents. De moment aquestes prestacions són inferiors que una peça d'alumini mecanitzada. La temperatura que es deformen aquests materials pot ser una limitació
- Si s'ha de fer un procés de mecanitzat, s'haurà de tenir en compte una geometria per poder estacar al centre de mecanitzat. Això limita la llibertat alhora de dissenyar la peça. A més s'ha de tenir en compte que els resultats de les mecanitzacions no seran els mateixos que si es parteix d'un bloc de metall.

C.6 Extrusors i bobines filament

Per dissenyar la màquina s'haurà d'escollir quin sistema d'extrusió s'utilitza, quins elements són encarregats de realitzar l'alimentació de filament, i relacionat als dos primers on es col·locaran els suports de bobines.

➤ Solució 1:

Tractaria de preveure el sistema *d'extrusió Bowden*, que consisteix a col·locar l'element d'alimentació de material fixat a la bancada, i a través d'un tub de tefló connectat en aquest primer i al *hotend*, transportar el filament. Per tant, es entre l'extrusor i el *hotend* hi hauria una distància determinada segons les dimensions de la màquina. La bobina de filament, es podria col·locar a un pròxim als extrusors.

- Avantatges:
- L'extrusor està fixat a la bancada, per tant cap conjunt mòbil ha de traslladar el seu pes, reduït les forces generades per la inèrcia.

- El muntatge elèctric queda simplificat, ja que al ser fixes a la bancada, sempre hi haurà la mateixa distància amb el hardware de la màquina.

- Desavantatges:

- Aquest muntatge crea problemes amb la retracció del filament durant la impressió, que pot desenvolupar en errors al model.

➤ Solució 2:

Tractaria de preveure el sistema d'extrusió directe, que consisteix a col·locar l'element d'alimentació de material directament al *hotend*. Per tant, es entre l'extrusor i el *hotend* no hi hauria distància. La bobina de filament, es podria col·locar a qualsevol punt de la màquina.

- Avantatges:

- Aquest muntatge evita els errors que es poden generar amb la retracció del filament durant la impressió.

- Desavantatges:

- Aquest sistema requereix muntar el motor encarregat de l'extrusió a sobre el capçal, augmentat el pes d'aquest conjunt mòbil, i per tant augmentant la inèrcia. Així doncs, el motor encarregat d'aquest moviment s'haurà de preveure per aquest pes de més.
- El cablejat del motor extrusor haurà de preveure el moviment d'aquest, per tant el disseny i muntatge serà més complex.

C.7 Localització elements elèctrics

La disposició de les fonts d'energia, relés d'estat sòlid, el Hardware del control, etc., haurà de ser previst per preveure el cablejat de la màquina, per dimensionar un espai reservat per aquests elements, etc.

➤ Solució 1:

Tractaria de fer tallar una placa per ser acoblada a la part inferior de la impressora, on es fixarien els diferents elements elèctrics. D'aquesta manera es podria realitzar el pre-muntatge, o el manteniment dels elements de la placa sense la necessitat d'estar acoblada a la impressora. S'hauria de tenir en compte la temperatura durant la impressió de la zona dels elements elèctrics, ja que alguns són sensibles a temperatures altes.

- Avantatges:

- Els forats per les fixacions dels elements vindrien tallats amb làser, o qualsevol altre tecnologia de tall emprada.
- Els elements elèctrics quedarien acoblats a la impressora, sense necessitar una quadre annex a la màquina.
- Facilitaria el pre-muntatge dels elements elèctrics, i es podria preveure el cablejat.

- Desavantatges:

- Aquest muntatge crea problemes amb la retracció del filament durant la impressió, que pot desenvolupar en errors al model.

➤ Solució 2:

Tractaria de preveure un quadre elèctric annex a la màquina, on amb una manega multicable es portaria el control als diferents elements de la màquina.

- Avantatges:

- Amb el quadre elèctric s'aïllarien l'electrònica de la calor radiada dels elements calefactats de la impressora.
- El quadre elèctric es podria col·locar a qualsevol punt independent a la impressora en el seu lloc de treball.

- Facilitaria el pre-muntatge dels elements elèctrics.
 - Desavantatges:
- La instal·lació elèctrica no estaria integrada a la màquina.

ANNEX D: Càlculs

D.1 Introducció

Previ a la fabricació de la impressora, es calcularan diferents punts crítics del conjunt que precisen un dimensionament adequat pel funcionament òptim de la màquina. Per això es llista les prestacions que hauria d'oferir la impressora:

- Resolució del model en els eixos X;Y;Z: 0.05;0.05;0.05 [mm]
A l'ANNEX F, a l'apartat F.3 concretament a la taula 1 hi ha llistat diferents models d'impressores FDM comercials, totes de grans dimensions, amb les seves característiques. Es troba doncs, que la resolució d'aquestes impressores està entre 0.1-0.05mm.
- Velocitat d'impressió XY: 150mm/s-100mm/s
El sistema de transmissió i les guies del capçal han de permetre aquesta velocitat d'impressió, que si es comprova les característiques de les impressores FDM comercials llistades a la taula 1 es podrà comprovar que també estan imprimint en aquestes velocitats.
- Velocitat d'impressió Z: 50mm/s
Per fer el canvi de capa de la peça impresa, no es necessitarà la velocitat d'impressió en els eixos XY. La impressora requerirà un moviment vertical de la taula en aquesta velocitat.

D.2 Dades de la impressora

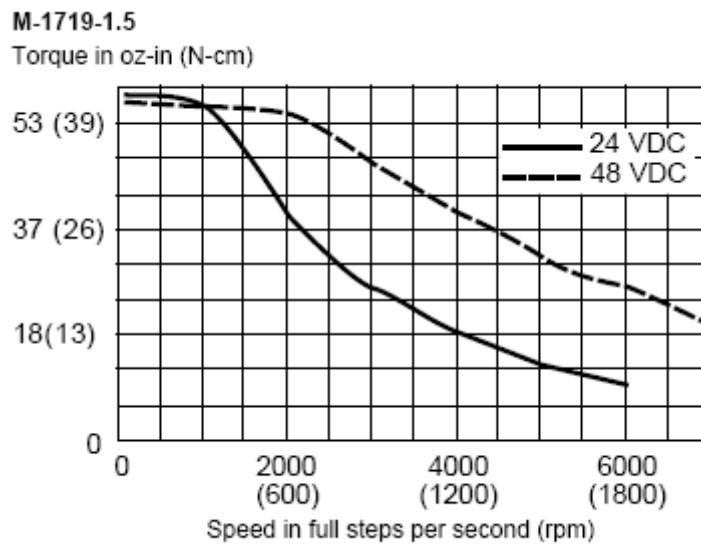
- Pes conjunt capçal: 1,000kg
- Pes conjunt tirant guia capçal: 1,400kg
- Pes conjunt taula *headbed*: 7,000kg

- Característiques cargol potència: Ø20 x pas 5mm Ø_p: 20.6mm

- Característiques NEMA 17:

La taula adjunta amb les prestacions del NEMA 17, on especifica el torçor que genera respecta la velocitat angular, no equivaldrà amb els motors utilitzats en el muntatge de la impressora, ja que segons el fabricant d'aquest producte tindrà unes característiques diferents. Tot i així,

s'utilitzarà la següent taula, amb un coeficient de seguretat alt, per la dificultat de trobar la taula específica del model utilitzat en aquest projecte.



Gràfic 1: Torçor segons rpm motor NEMA17

Altres característiques:

$$\text{Resolució motor} = \frac{200 \text{ passos}}{\text{volta}}$$

- Politja eix X i eix Y: T5 ; ample: 10mm; z:14; \varnothing_p : 22.282mm
- Velocitat eix X i eix Y: 150mm/s
- Acceleració eix X i eix Y:

Es vol assolir la velocitat lineal $v = 150\text{mm/s}$ amb un temps de $t = 0.05\text{s}$.

Es troba l'acceleració en l'eix X i Y:

$$v = v_0 + t \cdot a \quad (\text{Eq. 2})$$

Per tant, tenint amb compte que la v_0 serà 0mm/s ja que arrenca parat, es troba que l'acceleració $a = 3000\text{mm/s}^2$

- Velocitat eix Z: 50mm/s

- Acceleració eix Z:

Es vol assolir la velocitat lineal $v = 50\text{mm/s}$ amb un temps de $t = 0.1\text{s}$.

Es troba l'acceleració en l'eix Z:

$$v = v_0 + t \cdot a \quad (\text{Eq. 1})$$

Per tant, tenint amb compte que la v_0 serà 0mm/s ja que arrenca parat, es troba que l'acceleració $a = 500\text{mm/s}^2$.

D.3 Precisió de l'eix Z

Es comprova que els diferents elements que poden afectar amb la resolució de la impressió en l'eix Z no sobrepassi un error de 0.05mm.

Els elements que es troben són:

- Motor NEMA 17
- Cargol de potència
- Acoblament rígid MKM4
- Femella del cargol de potència
- Suport de rodaments angulars FK15 de Hiwin.

També afectarà a la resolució la flexió estàtica del tirant del capçal.

Es considerarà que el muntatge del suport FK15 eliminarà el joc axial del cargol de potència. Tanmateix, l'ajust de la femella amb el cargol de potència també eliminarà el joc ambdós.

Per tant, quedarà l'error generat pels engranatges del motor NEMA 17 i es considerarà un error "x" aplicant un 10% a la seva capacitat de resolució:

- Relació transmissió cargol potència: $i_1 5 \frac{mm}{volta}$
- Motor: $200 \frac{passos}{volta} = 1,8 \frac{a}{volta}$ que resultarà un error (10%) de: $\pm 0.18 \frac{a}{volta}$

Es calcula la distància mínima que es pot desplaçar la taula *heatbed* amb el sistema muntat:

$$Resolució\ motor\ Z = \frac{Pas\ minim \cdot i1}{360} = 0,025mm \quad (Eq. 2)$$

Si es calcula l'error que pot generar el joc d'engranatges del motor a partir de la fórmula anterior s'obté:

$$Error\ del\ motor = \frac{Error\ (10\%) \cdot i1}{360} = \pm 0,0025mm \quad (Eq. 3)$$

En aquest cas, com que durant la impressió no es fa un canvi de sentit de la taula, l'error del motor serà el trobat anteriorment. En el cas de l'eix X i Y, com que es fan canvi de direccions, per fer una aproximació de la resolució es podria considerar que l'error serà el doble.

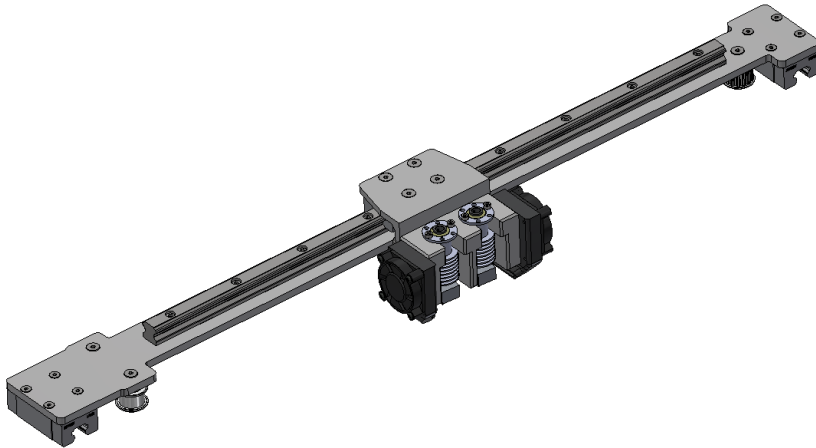
Per tant la precisió de l'eix Z serà:

$$Resolució\ Z = 0,025\ mm \pm 0,0025$$

Es pot concloure que el sistema compleix amb les especificacions del client, a més tenint en compte que s'ha utilitzat un coeficient d'error (10%) alt, es podran assumir altres possibles errors generats per mals ajustos de la femella del cargol de potència o el suport de rodaments axials també del cargol.

D.4 Flexió tirant amb guia HIWIN

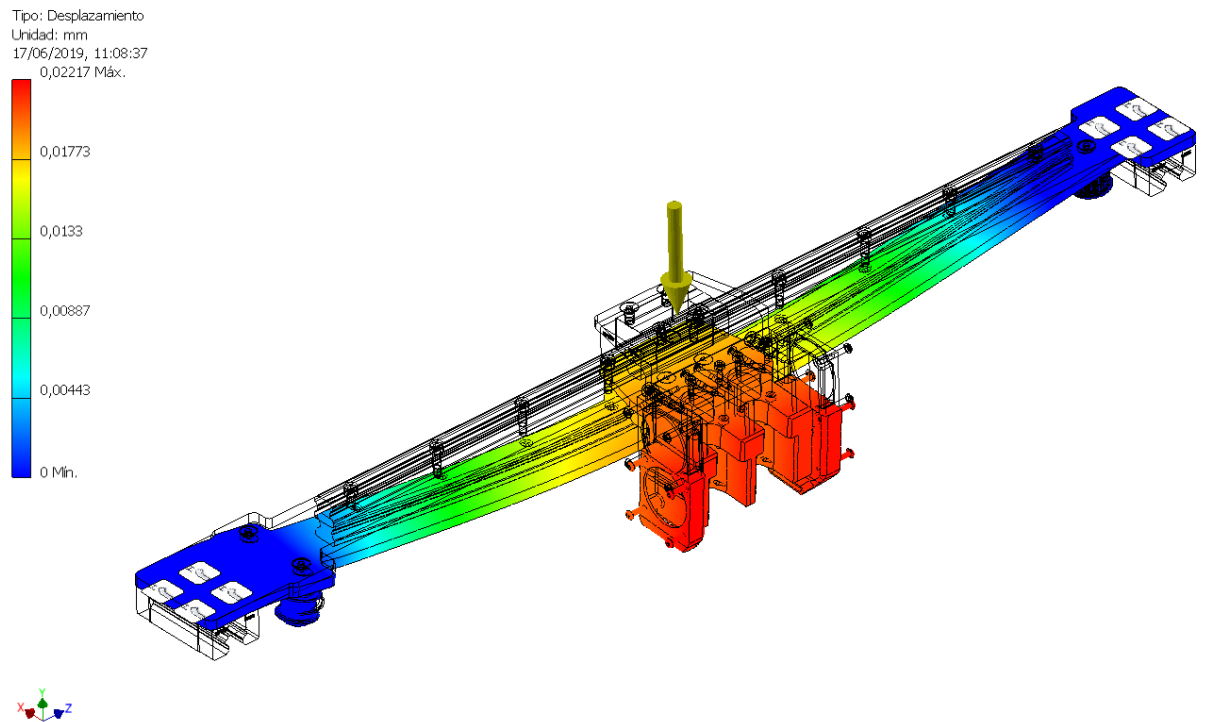
Per complementar la resolució de l'eix Z, s'ha de tenir en compte la flexió del tirant del capçal degut el seu propi pes i el del conjunt muntat del capçal amb els *hotends*. Aquesta flexió s'haurà de sumar a la *Resolució Z* calculada a l'apartat B.3 *Precisió a l'eix Z*.



Imatge 46: Conjunt tirant capçal i capçal

Pel càlcul de la flexió s'utilitza el mòdul que ofereix el programa de dibuix 3D (Inventor 2018). Cada un dels elements que es troben al conjunt tenen una característiques específiques que s'assignen al mateix programa 3D a partir del material. El material d'aquests elements es pot trobar especificat a l'ANNEX de plànols.

Pel càlcul es restringeixen com a punts fixes els 4 forats on s'hi fixen els coixinets lineals HIWIN de cada un dels extrems del tirant. S'aplica la força de gravetat a tots els elements del sistema.



Imatge 47: Simulació anàlisi flexió tirant capçal càlcul estàtic

Com es pot veure amb l'escala de colors, la punta dels *hotends* s on hi haurà el desplaçament més alt: 0.02217mm

Amb els resultats obtinguts a l'apart B.3 i amb els d'aquest, es tindrà la resolució total teòrica de l'eix Z. Serà doncs la suma dels dos:

$$\text{Resolució total Z} = (0,025 \text{ mm} \pm 0,0025) + 0.02217\text{mm} = 0.04967\text{mm}$$

Si es compara amb l'error màxim especificat pel client:

$$\text{Resolució total Z} = 0.04967\text{mm} \approx \text{Resolució mx. Z} = 0.05\text{mm}$$

Es compleix amb les especificacions.

D.5 Potència dels motors de l'eix Z

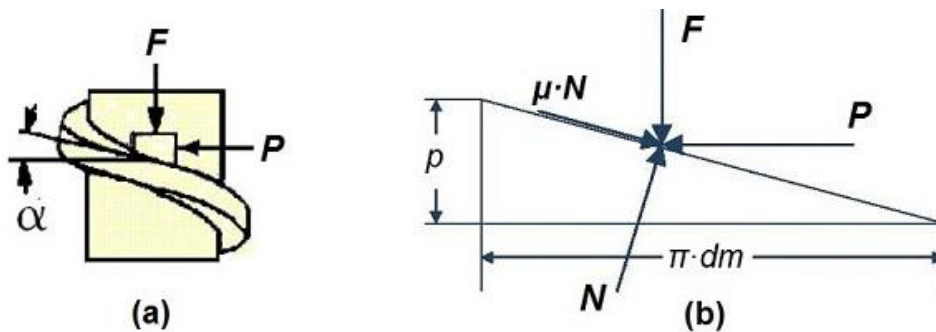
Durant la impressió la taula amb el *heatbed* es va desplaçant a l'eix Z negativament. Llavors es pot deduir que l'acceleració crítica del sistema serà quan la taula així de desaccelerar, sumant-se la força deguda a la inèrcia i la força gravitatòria. D'aquesta manera s'obté:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{gravetat}} + F_{\text{acceleració}} \quad (\text{Eq. 4})$$

- $F_{\text{gravetat}} = \text{Pes conjunt taula} \cdot 10 \text{ [m/s}^2\text{]}$ on pes conjunt taula = 7,000 kg
- $F_{\text{acceleració}} = \text{Pes conjunt taula} \cdot a \text{ [mm/s}^2\text{]}$ on $a = 500 \text{ mm/s}^2$

$$F_{\text{total}} = 7,000 \text{ kg} \cdot 10.5 \text{ m/s}^2 = 73.5 \text{ N}$$

Es passa a calcular el torçor en el cargol de potència, on es necessita el desenvolupament d'un pas del cargol de potència al seu diàmetre primitiu. Tal com es veu a l'Esquema 10.



Esquema 9: Forces al cargol de potència

Es troba l'angle α del triangle:

$$\alpha = \arctg \frac{5 \text{ mm}}{\pi \cdot 20.6 \text{ mm}} = 4.418^\circ \quad (\text{Eq. 5})$$

Es troben les equacions d'equilibri:

$$\Sigma F_x = \cos(\alpha) \cdot \mu \cdot N + \sin(\alpha) \cdot N - P = 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\Sigma F_y = -\sin(\alpha) \cdot \mu \cdot N + \cos(\alpha) \cdot N - F = 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

S'aïlla:

$$(1) N = \frac{F}{\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha)} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$(2) P = \frac{F(\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha))}{\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha)} \quad (\text{Eq. 9})$$

**Es suposa que el coeficient de fregament de les boles de la femella del cargol de potència equival al coef. dels rodaments rígids de boles: $\mu = 0.0015$*

Només necessitant P per trobar el torçor:

$$P = 735 \text{ N} \cdot 0.078767 = 5.7894 \text{ N}$$

On el torçor serà:

$$T[\text{N}\cdot\text{m}] = P[\text{N}] \cdot \frac{\varnothing p[\text{m}]}{2} = 0.05963 \text{ N}\cdot\text{m} = 5.963 \text{ N}\cdot\text{cm} \quad (\text{Eq. 10})$$

Per saber les prestacions del motor s'ha de calcular la velocitat angular amb rpm del seu eix.

Amb una velocitat lineal de la taula de 50mm/s, es troba:

$$\text{Voltes/s del cargol de potència} = v[\text{mm/s}] / \text{pas cargol potència} [\text{mm}] = 10 \text{ voltes/s}$$

Com que el cargol de potència es troba al mateix eix del motor unit amb un acoblament rígid, la velocitat angular que tindrà el motor serà es mateix = 10 voltes/ segon = 600rpm

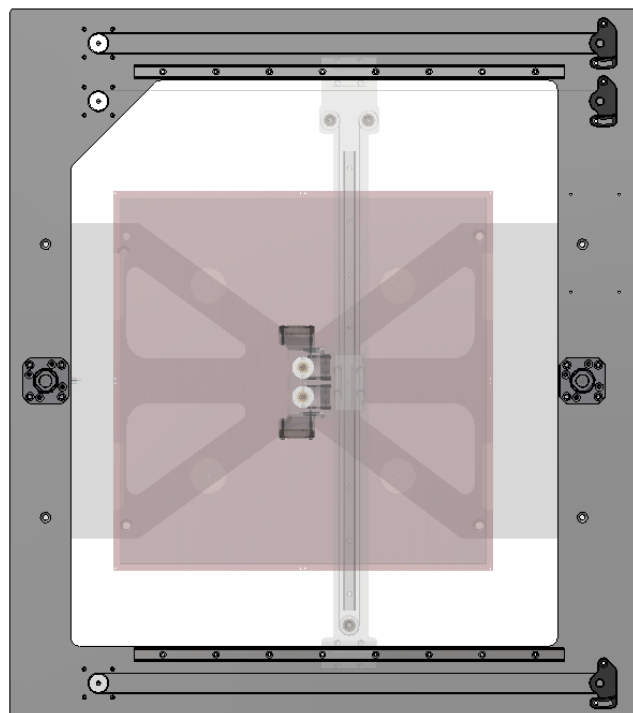
Si s'observa la gràfica 1 on es pot trobar la prestacions del motor NEMA 17 respecta la velocitat de treball, s'obté que a 600rpm el torçor capaç de transmetre a l'eix és de 40N-cm.

Tenint en compte que s'utilitzen dos motors NEMA 17 pel moviment a l'eix Z amb un torçor de 40 Newtons centímetre en aquesta velocitat, es pot concloure que suportaran el torçor de 5,963 Newtons centímetre generats pel pes de la taula:

$$T[\text{N}\cdot\text{m}]_{\text{motor}} = \frac{5.963 \text{ N}\cdot\text{cm}}{2} = 3\text{Ncm} < 40\text{Ncm}$$

D.6 Potència dels motors de l'eix X

La transmissió a l'eix X es farà mitjançant dos motors NEMA 17 (un a cada costat del tirant del capçal), situats a un dels extrems del desplaçament total, amb una politja T5 z:14 al seu eix. A l'altre extrem, es col·locà una politja amb coixinets amb un sistema tensor. La corretja és pinçada pel tirant del capçal.



Imatge 48: Detall transmissió eix X

Per tant el pes que hauran d'arrestar aquests motors és tant el del tirant del capçal + el del capçal:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{tirant}} + P_{\text{capçal}} = 2.400\text{kg} \quad (\text{Eq. 11})$$

Com s'ha especificat anteriorment, el conjunt tindrà una acceleració de $a = 3.0 \text{ m/s}^2$

$$F_{\text{total}} = 2,400\text{kg} \cdot 3.0\text{m/s}^2 = 7.2\text{N} \quad (\text{Eq. 12})$$

Amb el $\varnothing p$: 22.282mm de la politja del motor es troba el torçor aplicat a l'eix:

$$T[\text{N}\cdot\text{m}] = F_{\text{total}}[\text{N}] \cdot \frac{\varnothing p[\text{m}]}{2} = 0.0802152\text{N}\cdot\text{m} = 8.0215 \text{ N}\cdot\text{cm} \quad (\text{Eq. 13})$$

Per trobar les prestacions del motor, es necessita saber la velocitat angular d'aquest. La velocitat lineal del tirant requerit és de 150mm/s. Es busca la velocitat angular de la politja fixada a l'eix del motor:

$$w [\text{rad/s}] = v[\text{m/s}] / \frac{\varnothing p[\text{m}]}{2} = 13.46 \text{ rad/s} \quad (\text{Eq. 14})$$

Es passen els rad/s a rpm:

$$w [\text{rpm}] = 13.46[\text{rad/s}] \cdot \frac{\text{volta}}{2 \cdot \pi \text{ rad}} \cdot \frac{60\text{s}}{1 \text{ min}} = 128.56 \text{ rpm} \quad (\text{Eq. 15})$$

En aquesta velocitat el motor dona un torçor de : 55Ncm. Tenint en compte que hi ha instal·lats dos motors per el moviment:

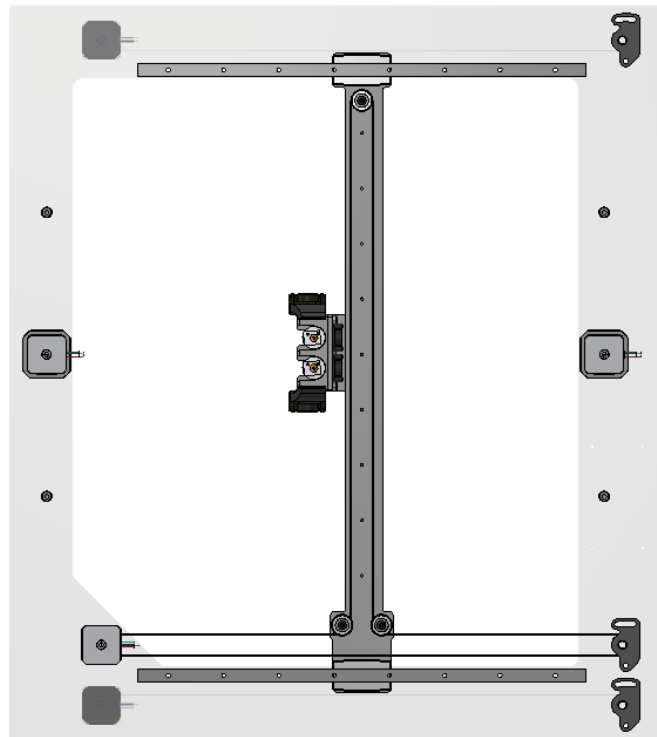
$$T[\text{N}\cdot\text{m}]_{\text{tirant+capçal}} = \frac{8.0215 \text{ N}\cdot\text{cm}}{2} = 4.0107 < 55\text{Ncm} \quad (\text{Eq. 16})$$

Per tant els dos motors superaran el torçor generat pel tirant i el capçal de 4.01 Newton centímetre.

D.7 Potència dels motors de l'eix Y

La transmissió a l'eix Y es farà mitjançant un motor NEMA 17, amb un sistema de transmissió amb politges T5 z:14 com el representat a la *Imatge 49*.

Imatge 49: Detall transmissió eix Y



Per tant el pes que haurà d'arrestar aquest motors és el del capçal:

$$P_{\text{capçal}} = 1.00\text{kg}$$

Com s'ha especificat anteriorment, el conjunt tindrà una acceleració de $a = 3.0 \text{ m/s}^2$

$$F_{\text{capçal}} = 1,000\text{kg} \cdot 3.0\text{mm/s}^2 = 3.0\text{N}$$

Amb el \varnothing_p : 22.282mm de la politja del motor es troba el torçor aplicat a l'eix:

$$T[\text{N}\cdot\text{m}] = F_{\text{capçal}}[\text{N}] \cdot \frac{\varnothing_p[\text{m}]}{2} = 0.033423\text{N}\cdot\text{m} = 3.33423 \text{ N}\cdot\text{cm} \quad (\text{Eq. 17})$$

La velocitat del motor serà la mateixa que la de l'apartat B.6, ja que la velocitat i la dimensió de la politja de l'eix són les mateixes.

Per tant, en aquesta velocitat el motor dona un torçor de : 55N-cm.

$$T[\text{N}\cdot\text{m}]_{\text{capçal}} = 3.33423\text{N}\cdot\text{cm} < 55\text{Ncm}$$

Per tant el motor superarà el torçor generat pel capçal de 3.33 Newton centímetre.

D.8 Precisió de l'eix X i l'eix Y

Per obtenir la precisió dels dos eixos, s'utilitzarà part dels càlculs de l'apartat B.3, aplicant un error del 10% pel joc entre dents.

Anteriorment, s'ha trobat que un 10% d'error al motor representava: $\pm 0.18 \frac{\text{a}}{\text{volta}}$

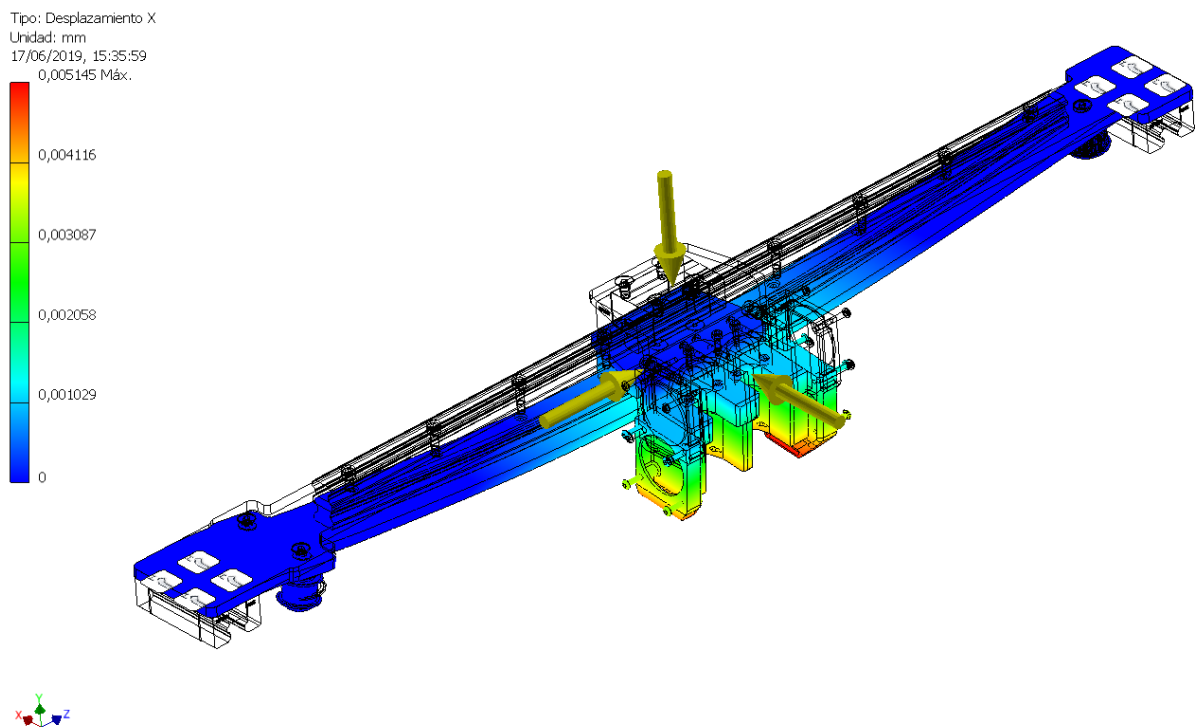
Es calcula el perímetre de la politja, que servirà per trobar l'error de motor en mil·límetres:

$$\text{Perímetre} = \varnothing_p [\text{mm}] \cdot \pi = 70\text{mm}$$

Per tant l'error representat en mil·límetres del motor serà:

$$\text{Error del motor} = \frac{\text{Error (10\%)} \cdot \text{perímetre}}{360} = \pm 0,035\text{mm} \quad (\text{Eq. 18})$$

Per complementar l'estudi de precisió a l'eix X i Y, s'afegeixen les forces generades per les acceleracions, simultàniament, calculades a l'apartat B.6 i B.7 a la simulació de l'Inventor:



Imatge 50: Simulació anàlisi flexió capçal càlcul dinàmic

La deformació a l'eix X és de 0.005mm, i la de l'eix Y és gairebé nul·la a les puntes del *nozzle*.

Per tant es pot concloure que la resolució, tant a l'eix X com a l'eix Y, complirà amb l'especificació del client de 0.05mm.

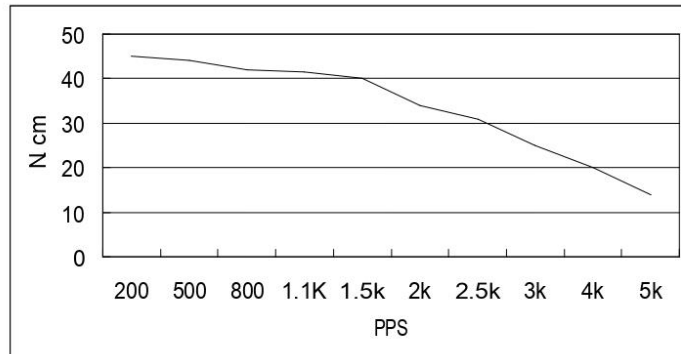
ANNEX E: Documentació tècnica

E.1 Motor NEMA 17

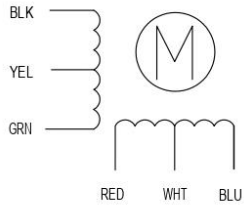
HIGH TORQUE HYBRID STEPPING MOTOR SPECIFICATIONS

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	4
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1.2
Ambient temperature (°C)	-20~+50	Resistance Per Phase ($\pm 10\% \Omega$)	3.3 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase ($\pm 20\% \text{mH}$)	2.8
Insulation Resistance	100M Ω , Min (500VDC)	Holding Torque (Kg.cm)	3.17
Insulation Class	Class B	Detent Torque (g.cm)	200
Max.radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Inertia (g.cm ²)	68
Max.axial force (N)	10	Weight (Kg)	0.365

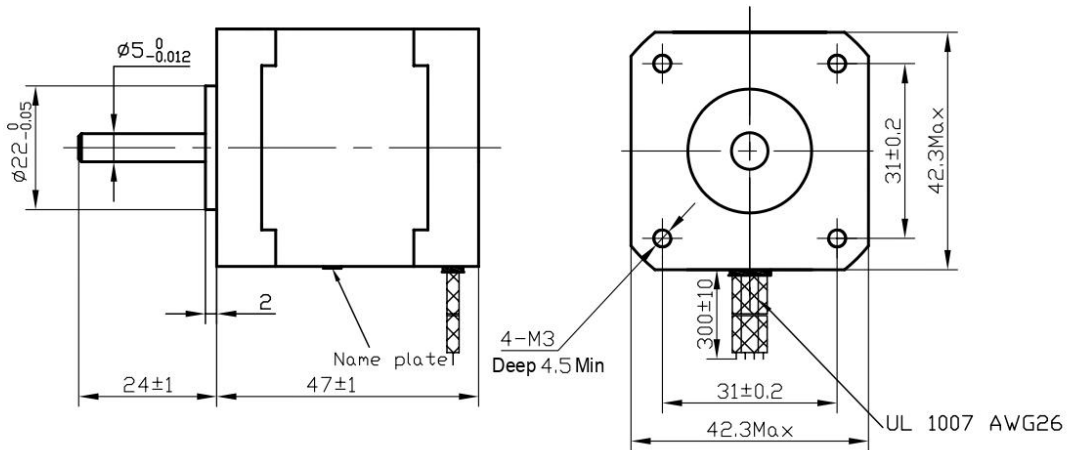
● Pull out torque curve:
VOLTAGE: 24VDC, CONSTANT CURRENT: 1.2A, HALF STEP



● Wiring Diagram:



● Dimensions:
(unit=mm)



					SY42STH47-1206A	TECHNICAL CONDITIONS
REV	REVISIONS	DESCRIPTION	BY	DATE		
DRAW					CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE	
CHECK						
APPROVE						

E.2 Guia HIWIN i carro

GUÍAS LINEALES. SERIES HG Y QH



DIMENSIONES DE LOS PATINES HG / QH

DIMENSIONES DE HGH / QHH

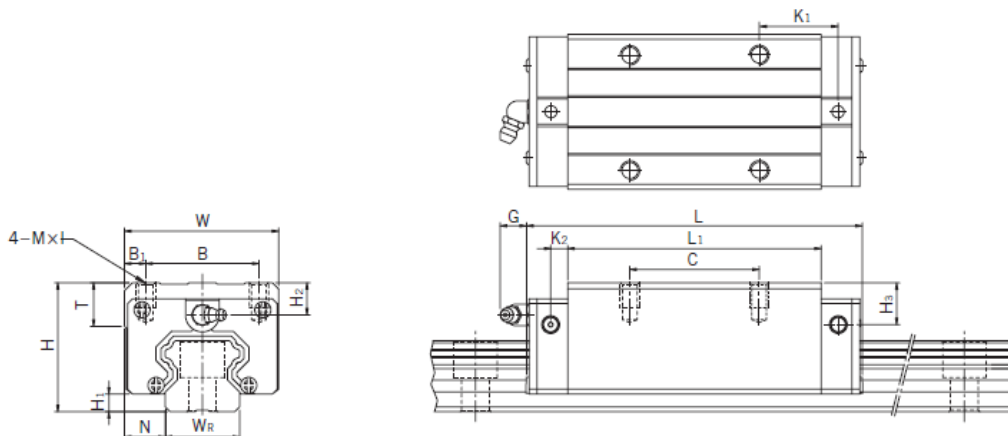


Tabla 3.6 DIMENSIONES DEL PATÍN

Series / tamaño	Dimensiones instalación (mm)			Dimensiones del patín (mm)													Capacidades de carga (N)		Peso (kg)
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	G	M × I	T	H ₂	H ₃	C _{dyn}	C ₀	
HGH15CA	28	4,3	9,5	34	26	4,0	26	39,4	61,4	10,00	4,85	5,3	M4 × 5	6,0	7,95	7,7	11.380	16.970	0,18
QHH15CA	28	4,0	9,5	34	26	4,0	26	39,4	61,4	10,00	5,00	5,3	M4 × 5	6,0	7,95	8,2	13.880	14.360	0,18
HGH20CA	30	4,6	12,0	44	32	6,0	36	50,5	77,5	12,25	6,00	12,0	M5 × 6	8,0	6,00	6,0	17.750	27.760	0,30

GUÍAS LINEALES. SERIES HG Y QH



DIMENSIONES DEL RAÍL HG

Los raíles HG se usan tanto para los patines HG como para los QH.

DIMENSIONES DE HGR_R

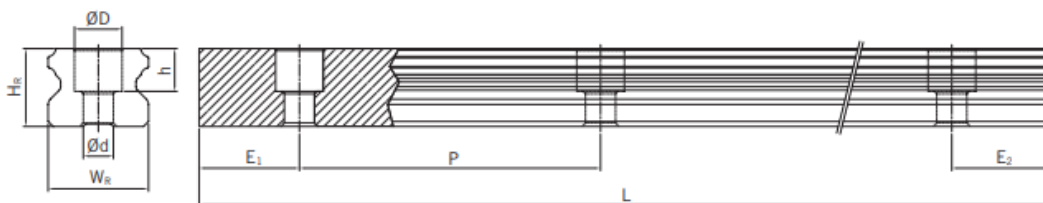


Tabla 3.9 DIMENSIONES DEL RAÍL HGR_R

Series / tamaño	Tornillo montaje para rail (mm)	Dimensiones del rail (mm)						Longitud máx. (mm)	Longitud máx. E ₁ = E ₂ (mm)	E _{1/2} mín. (mm)	E _{1/2} máx. (mm)	Peso (kg/m)
		W _R	H ₁₆	D	h	d	P					
HGR15R	M4 × 16	15	15,0	7,5	5,3	4,5	60	4.000	3.900	6	54	1,45
HGR20R	M5 × 16	20	17,5	9,5	8,5	6,0	60	4.000	3.900	7	53	2,21
HGR25R	M6 × 20	23	22,0	11,0	9,0	7,0	60	4.000	3.900	8	52	3,21
HGR30R	M8 × 25	28	26,0	14,0	12,0	9,0	80	4.000	3.920	9	71	4,47
HGR35R	M8 × 25	34	29,0	14,0	12,0	9,0	80	4.000	3.920	9	71	6,30
HGR45R	M12 × 35	45	38,0	20,0	17,0	14,0	105	4.000	3.885	12	93	10,41
HGR55R	M14 × 45	53	44,0	23,0	20,0	16,0	120	4.000	3.840	14	106	15,08
HGR65R	M16 × 50	63	53,0	26,0	22,0	18,0	150	4.000	3.750	15	135	21,18

E.3 Cargol potència BND 20x5 R

Husillos de precisión SND/BND, norma DIN 69051

Husillo de bolas de rosca laminado con recirculación a través de insertos, tuerca DIN

Características

- Diámetro nominal de 16 a 63 mm
- Paso de 5 a 10 mm
- Insertos de recirculación estándar de material compuesto
- Insertos de recirculación de acero opcionales
- Precisión de paso estándar G5, G7 y G9
- Cuello y frente posterior de la tuerca rectificadas.
- Rosca de tuerca rectificada con precisión¹⁾
- Orificio de lubricación para boquilla de grasa o para kit de lubricación automática SYSTEM 24 de SKF

- Recubrimiento superficial opcional en eje y tuerca
- Tuercas de seguridad opcionales. Póngase en contacto con SKF para obtener información sobre la selección y el uso de esta opción
- Rascadores opcionales.

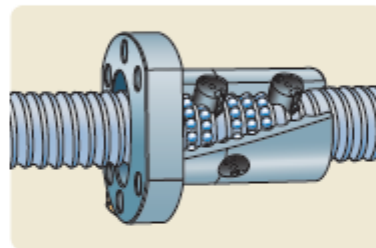
Ventajas

- Tuerca compacta/brida integral para fácil montaje
- Diseño adecuado para colocación de husillos. Precisión de paso G5 de husillos de bolas rectificadas

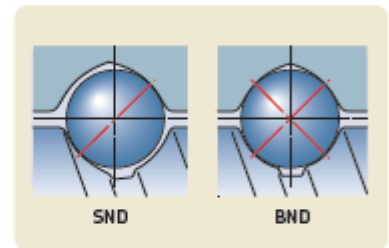
- Los insertos de recirculación de acero opcionales pueden actuar como dispositivo de seguridad en aplicaciones verticales o bajo condiciones severas. Póngase en contacto con SKF para obtener información sobre este tipo de aplicaciones
- Eliminación de la holgura mediante bolas de gran tamaño a petición (designación BD), a lo largo de una longitud máxima de 1 000 mm.



Standard



Recirculación



SND

BND

Diámetro nominal	Paso	Tuerca Capacidad de carga básica		Número de circuitos de bolas	Juego estándar	Reducción de juego a petición	Par de precarga con juego cero T_{pr}	Inercia	Grasa	Peso	Eje del husillo		Designación	
d_0	P_h	C_a	C_{0a}								Masa	Inercia	Grasa	
mm	mm	kN		-	mm		Nm	kgmm^2	cm^3	kg	kg/m	kgmm^2/m	cm^3/m	-
16	5 10	7,8 10,7	10,7 17,2	3 2x1,8	0,08 0,07	0,05 0,03	0,05 0,06	40 41	0,9 1,6	0,17 0,18	1,3 1,21	33 30,7	2,1 2,1	SND/BND 16x5 R SND/BND 16x10 R
20	5	11,3	17,9	3	0,1	0,05	0,08	86	1,1	0,24	2	85	2,7	SND/BND 20x5 R
25	5 10	12,7 24,1	22,7 39	3 4	0,1 0,12	0,05 0,08	0,11 0,23	117 144	1,6 4,5	0,29 0,38	3,3 3,2	224 255	3,4 3,2	SND/BND 25x5 R SND/BND 25x10 R
32	5 10	19 21,9	41,3 39	4 3	0,1 0,12	0,05 0,08	0,21 0,25	364 384	2,1 4,6	0,54 0,58	5,6 5,6	641 639	4,5 4,2	SND/BND 32x5 R SND/BND 32x10 R
40	5 10	25,6 63,3	65,6 124,1	5 5	0,1 0,12	0,05 0,08	0,36 0,64	855 1 010	3,1 10,7	0,92 1,3	9 8,4	1 639 1 437	5,6 5,1	SND/BND 40x5 R/L ²⁾ SND/BND 40x10 R
50	10	71,3	157,3	5	0,12	0,08	0,88	2 130	13,1	1,8	13,6	3 736	6,5	SND/BND 50x10 R
63	10	81,5	206,9	5	0,12	0,08	1,23	4 075	16,1	2,4	22	9 913	8,4	SND/BND 63x10 R

E.4 Femella R20-05K4

TUERCAS PARA HUSILLOS DE BOLAS LAMINADOS

TUERCA SIMPLE CON BRIDA FSCDIN / FSIDIN

CÓDIGO DE PEDIDO: R 25 10 K4 FSCDIN 650 730 0,052

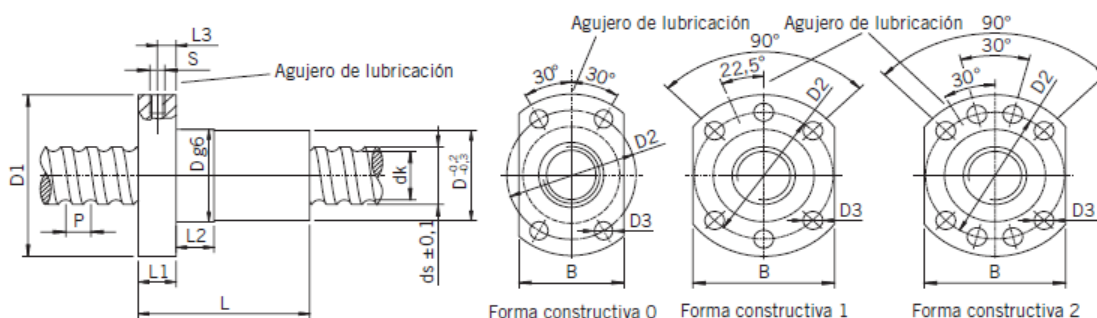
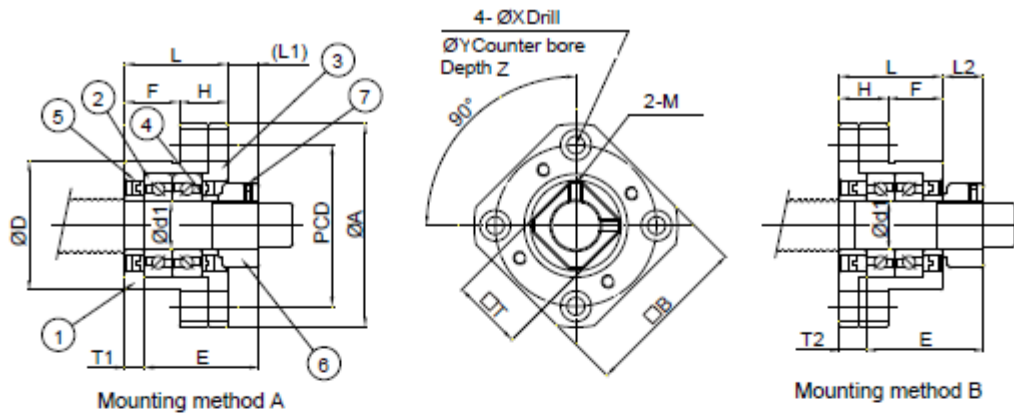


Tabla 4.4 DIMENSIONES DE TUERCAS. Todas las dimensiones en mm

Artículos en stock

Artículo número	ds	P	D	D1	D2	D3	Forma constructiva	L	L1	L2	L3	S	B	dk	C ₀₇₈ (N)	C ₀ (N)	Juego axial máx. (mm)	Masa (kg/St.)
R12-05K4-FSCDIN	11,7	5	24	40	32	4,5	0	33	8	8	4	M3	26	9,9	5.500	12.000	0,02	0,11
R12-10K3-FSCDIN	118	10	24	40	32	4,5	0	43	8	8	4	M3	26	9,6	5.100	10.100	0,02	0,13
R15-05K4-FSCDIN	13,9	5	28	48	38	5,5	1	38	10	10	5	M6	40	11,8	12.600	21.000	0,04	0,18
R16-05T3-FSIDIN	15,5	5	28	48	38	5,5	1	40	10	10	5	M6	40	12,9	6.500	11.700	0,04	0,18
R16-10K3-FSCDIN	14,7	10	28	48	38	5,5	1	45	10	10	5	M6	40	12,5	9.100	19.300	0,04	0,20
R16-16K3-FSCDIN	15,0	16	28	48	38	5,5	1	61	12	20	6	M6	40	13,0	7.900	17.000	0,04	0,26
R16-20K2-FSCDIN	14,0	20	28	48	38	5,5	1	56	10	10	5	M6	40	11,8	5.200	10.400	0,04	0,25
R20-05K4-FSCDIN	19,6	5	36	58	47	6,6	1	40	10	10	5	M6	44	16,9	13.400	32.740	0,04	0,28
R20-10K3-FSCDIN	19,3	10	36	58	47	6,6	1	48	10	10	5	M6	44	16,6	10.000	23.500	0,04	0,32
R20-20K2-FSCDIN	19,7	20	36	58	47	6,6	1	57	10	10	5	M6	44	17,1	6.800	15.300	0,04	0,37
R20-20K4-DFSCDIN	19,7	20	36	58	47	6,6	1	57	10	10	5	M6	44	17,1	12.300	30.500	0,04	0,36
R25-05K4-FSCDIN	24,9	5	40	62	51	6,6	1	43	10	12	5	M6	48	22,3	14.900	41.500	0,04	0,22
R25-10K4-FSCDIN	24,5	10	40	62	51	6,6	1	61	10	16	5	M6	48	21,8	16.100	44.900	0,04	0,43
R25-25K2-FSCDIN	24,7	25	40	62	51	6,6	1	70	10	16	5	M6	48	22,1	7.400	19.100	0,04	0,48
R25-25K4-DFSCDIN	24,7	25	40	62	51	6,6	1	70	10	16	5	M6	48	22,1	13.500	38.200	0,04	0,46
R32-05K6-FSCDIN	31,7	5	50	80	65	9	1	48	12	10	6	M6	62	29,1	23.900	81.900	0,04	0,59
R32-10K5-FSCDIN	31,8	10	50	80	65	9	1	77	12	16	6	M6	62	28,6	31.500	80.100	0,04	0,82
R32-20K3-FSCDIN	31,8	20	50	80	65	9	1	88	12	16	6	M6	62	28,6	17.000	48.500	0,04	0,91
R32-32K2-FSCDIN	31,9	32	50	80	65	9	1	88	12	20	6	M6	62	28,7	11.600	31.800	0,04	0,90
R32-32K4-DFSCDIN	31,9	32	50	80	65	9	1	88	12	20	6	M6	62	28,7	20.600	62.200	0,04	0,87

E.5 Suport rodaments de contacte angular FK 15



Part No.	Part name	Qty
1	Housing	1
2	Bearing	1 set
3	Holding lid	1
4	Collar	2
5	Seal	2
6	Set screw	1
7	Hexagonal socket-head setscrew with set piece	2



Specification	Main dimensions (mm)																		
	d1	L	H	F	E	D (Note 1)	A	PCD	B	Mounting method A		Mounting method B		X	Y	Z	M	T	Weight (kg)
										L1	T1	L2	T2						
FK05	5	16.5	6	10.5	18.5	20	34	26	26	5.5	3.5	5	3	3.4	6.5	4	M3	11	0.1
FK06	6	20	7	13	22	22	36	28	28	5.5	3.5	6.5	4.5	3.4	6.5	4	M3	11	0.1
FK08	8	23	9	14	26	28	43	35	35	7	4	8	5	3.4	6.5	4	M3	14	0.16
FK10	10	27	10	17	29.5	34	52	42	42	7.5	5	8.5	6	4.5	8	5	M3	16	0.25
FK12	12	27	10	17	29.5	36	54	44	44	7.5	5	8.5	6	4.5	8	5	M4	19	0.26
FK15	15	32	15	17	36	40	63	50	52	10	6	12	8	5.5	9.5	6	M4	22	0.4
FK17	17	45	22	23	47	50	77	62	61	11	9	14	12	6.6	11	10	M4	24	0.85
FK20	20	52	22	30	50	57	85	70	68	8	10	12	14	6.6	11	10	M4	30	1.2
FK25	25	57	27	30	60	63	98	80	79	13	10	20	17	9	15	13	M6	35	1.6
FK30	30	62	30	32	61	75	117	95	93	11	12	17	18	11	17.5	15	M6	40	2.38

E.6 Acoblament rígid FACE20

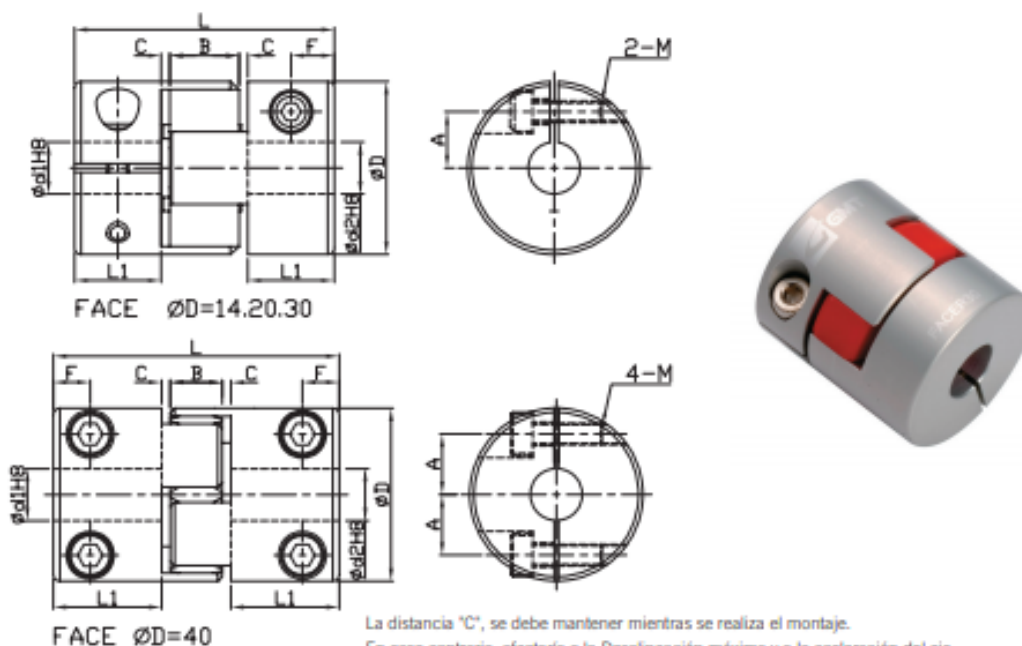
FACE



ACOPLAMIENTO DE ESTRELLA

- Rango de temperatura de trabajo: -20°C - 60°C.
- Los valores de desalineación son individuales, en caso de más de una desalineación en el mismo instante estos valores serán inferiores.

- Material:** AL 7075
- Inserción:** Poliuretano
- Acabado superficial:** Anodizado
- Accesorios:** Tornillos de fijación



La distancia "C", se debe mantener mientras se realiza el montaje.
En caso contrario, afectaría a la Desalineación máxima y a la aceleración del eje, pudiendo causar daños en el acoplamiento.

DIMENSIONES

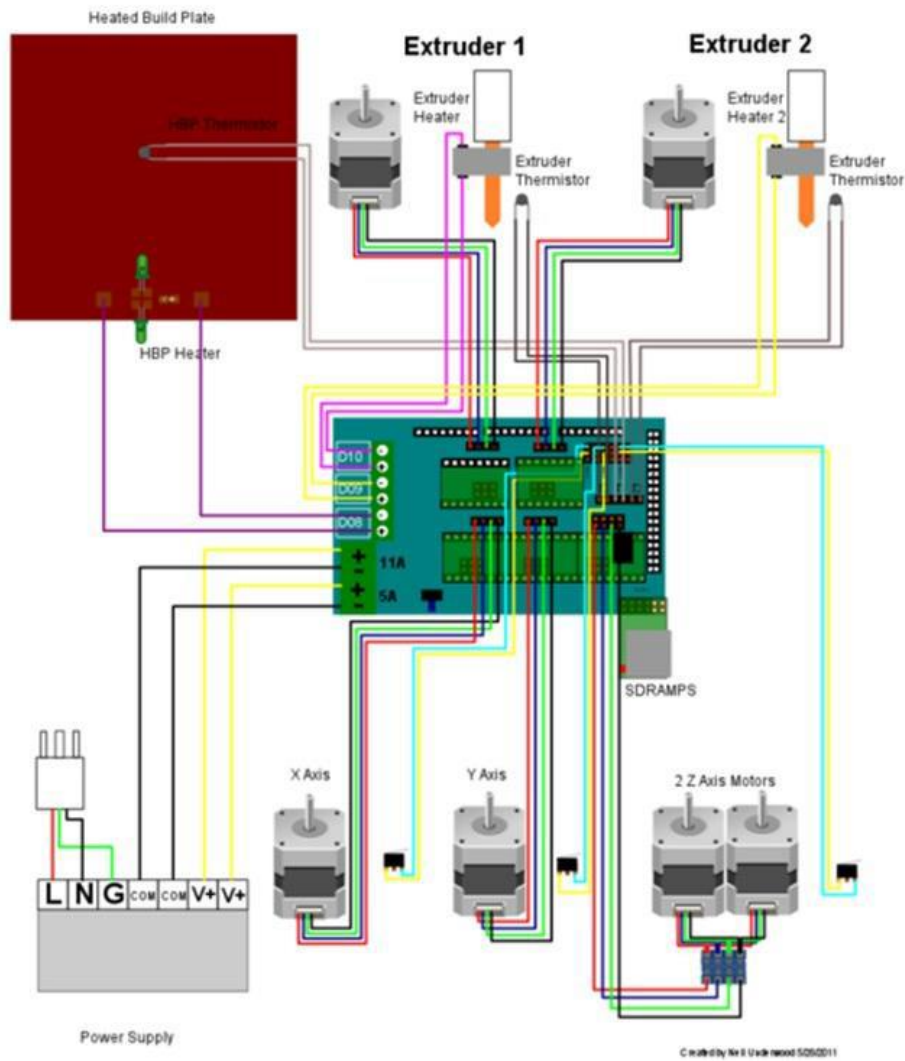
Tipo	ØD	Selección Ød1 y Ød2 *Ød1 ≤ Ød2														L	L1	B	C	F	A	Tornillos de fijación	
		3	4	5	6	6,35	7	8	9,525	10	11	12	14	15	16							M	Par de apriete (Nm)
FACE	14	*	*	*												22	7	6	1	3,5	4	2	0,5
	20			*	*	*	*	*								30	10	8	1	5	6,5	2,5	1
	30						*	*	*	*	*					35	11	10	1,5	5,5	10	4	2,5
	40								*	*	*	*	*	*		66	25	12	2	8,5	14	5	4

CARACTERÍSTICAS

Tipo	ØD	Par nominal (Nm)			* Momento de inercia (kg/m ²)	Rigidez torsional (Nm/rad)			Desalineación máxima				Máx. RPM (rpm)	* Peso (g)	
		B	W	R		B	W	R	Angular (°)	Paralelo (mm)		Axial (mm)			
										B	W				R
FACE	14	0,7	1,2	2	1,6·10 ⁻⁷	8	14	22	1,0	0,10	0,15	0,10	+0,5 0	11000	6
	20	1,8	3	5	1,1·10 ⁻⁶	16	29	55			0,20	0,15	+0,8 0	7600	19
	30	4	7,5	12,5	6,2·10 ⁻⁶	46	73	130			0,20	0,15	+1,0 0	5100	50
	40	4,9	10	17	3,9·10 ⁻⁵	380	570	1200			0,15	0,10	+1,2 0	3800	160

* El momento de inercia y el peso se ha obtenido con el diámetro máximo.

E.7 RAMPS 1.4



E.8 Placa calefactada MK2B PCB



- Voltatge: 12V o 24V
- Resistència: 1.0-1.2 ohm (12V), 3.0-3.4 ohm (24V)
- Dimensions: 214mm x 214mm
- Laminat: FR4 de 1.6mm, 2 capes, 35um de coure
- Soldermask: Vermells als dos costats
- Silkscreen: Blanc als dos costats