

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Desenvolvimento de um equipamento de impressão 3D por extrusão de filamento

José Carlos Ferreira Castro



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Jorge Lino

27 de Julho de 2020

Desenvolvimento de um equipamento de impressão 3D por extrusão de filamento

José Carlos Ferreira Castro

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

A presente dissertação surge da proposta de desenvolver uma impressora 3D por extrusão de filamento no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialização de Produção, Conceção e Fabrico.

Realizou-se um estudo aprofundado de um dos processos de FA, processo de modelação por extrusão de plástico. Analisou-se outros projetos realizados em impressoras 3D tipo Delta. Efetuou-se a revisão bibliográfica para que fosse possível iniciar a componente prática do projeto que consiste na utilização e otimização da máquina disponibilizada para torná-la numa *Open-Source*.

A impressora foi alvo de um processo de melhorias contínuas. Estudou-se o hardware da impressora bem como todos os componentes elétricos que envolve. Como comparação, foi realizado um estudo de mercado de impressoras do tipo CoreXY para identificação de possíveis componentes que pudessem ser atualizados e otimizados na impressora em estudo.

De seguida, foram implementadas as melhorias consideradas relevantes e foram efetuadas as calibrações necessárias para a realização de impressões. O objetivo final deste projeto passa por tornar a máquina numa *open-source* para que seja possível a impressão de diversos tipos de termoplásticos. Para esta finalização foi necessário modificar alguns componentes da impressora tanto a nível de *hardware* como de componentes elétricos.

Por fim, para testar a funcionalidade da impressora, realizou-se algumas impressões. Foram ainda indicados trabalhos futuros para que seja possível continuar a otimização e obter o máximo partido da impressora *CubePro*.

Abstract

The present dissertation arises from the proposal to develop a 3D printer by filament extrusion within the scope of the Integrated Master in Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering of the University of Porto, in the specialization of Production, Design, and Manufacturing.

An in-depth study of one of the FA processes was carried out, a plastic extrusion modeling process. Other projects carried out on 3D type Delta printers were analyzed. A bibliographic review was carried out so that it was possible to start the practical component of the project, which consists of using and optimizing the available machine to make it Open-Source.

The printer has undergone a process of continuous improvement. Was studied the printer's hardware as well as all the electrical components it involves. As a comparison, a market study of CoreXY printers was carried out to identify possible components that could be updated and optimized in the printer under study.

Then, the improvements considered relevant were implemented and the necessary calibrations were made for making impressions. The final objective of this project is to turn the machine into an open-source so that it is possible to print various types of thermoplastics. For this purpose, it was necessary to modify some components of the printer both in terms of hardware and electrical components.

Finally, to test the printer's functionalities, some prints were made. Future work was also indicated so that it is possible to continue the optimization and get the most out of the CubePro printer.

Agradecimentos

A realização deste trabalho contou com importantes apoios e incentivos aos quais sinto o dever de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro Lugar, ao professor Jorge Lino, pela disponibilidade, apoio, motivação e partilha de conhecimentos que em muito contribuíram para a melhoria deste trabalho. Um especial agradecimento pela oportunidade de realizar a dissertação na área da impressão 3D, um trabalho que me cativou e incentivou.

Aos restantes membros do LDPS (Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços) pela colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho. Agradeço toda a disponibilidade, paciência e dedicação que demonstraram para que fosse possível concluir os objetivos a que me propus.

Aos meus pais, tendo consciência que sem o apoio deles nada disto seria possível, um especial agradecimento por serem modelos de coragem, pelo incentivo e apoio incondicional nos altos e baixos desta etapa. A Eles, que sempre acreditaram em mim, dedico este trabalho!

Carlos Castro

*“A essência do conhecimento consiste em aplicá-lo,
uma vez possuído.”*

Confúcio

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto	1
1.2	Objetivos do projeto	1
1.3	Metodologia	1
1.4	Estrutura da dissertação	2
2	ESTADO DA ARTE	3
2.1	Contextualização da impressora 3D	3
2.2	Processo FDM	5
2.3	Impressoras	8
2.4	CubePro impressora 3D	13
2.5	Materiais	14
2.6	Placas de controlo	17
2.7	Softwares CAM e de controlo de impressão.	19
2.8	Parâmetros de impressão	20
2.9	Hotend	23
3	Metodologia - Seleção dos componentes a utilizar	29
3.1	Mosquito Hotend	29
3.2	Extrusor Bondtech BMG-M	31
3.3	Placa de controlo (Duet 2 Wifi)	33
4	Conversão da impressora/Parte estrutural	37
4.1	Localização das partes a modificar	37
4.2	Design do novo suporte do módulo de extrusão	37
4.3	Design suporte Duet 2 Wifi	44
4.4	Reposição da bobine de filamento	48
4.5	Atualização da Duet	50
4.5.1	Configuração do novo Firmware	50
4.6	Configuração dos parâmetros de impressão	52
4.6.1	Endstops	52
4.6.2	Nivelação da base de construção	53
4.6.3	Calibração dos motores passo-a-passo de movimentação	54
4.6.4	Calibração do motor do módulo de extrusão	55
4.6.5	Teste dos heaters	55
4.6.6	Calibração da alimentação de filamento	56

5 Resultados obtidos	59
5.1 Sistema de refrigeração	65
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	67
6.1 Conclusões	67
6.2 Trabalhos Futuros	68
A Anexo A	69
A.1 <i>Duet 2 Wifi</i>	69
A.2 <i>G-Code</i>	70
B Desenhos técnicos	79
C Componentes originais da impressora	87
Referências	91

Lista de Figuras

2.1	Mercado da impressão 3D por materiais e tecnologias (5).	4
2.2	Processo FDM, adaptado de (10).	6
2.3	Processo de construção de um modelo por impressão 3D (5).	8
2.4	Impressoras 3D câmara fechada (esquerda) e câmara aberta (direita) (15).	9
2.5	Impressora típica com sistema de movimentação tipo cartesiana (18).	10
2.6	Impressora tipo Delta, adaptado de (19).	10
2.7	Movimentação dos eixos dos tipos de impressora Cartesiana e Delta, adaptado de (20).	11
2.8	Sistema de movimentação CoreXY.	12
2.9	Representação dos eixos XY (24).	12
2.10	Impressora CubePro do LDPS.	13
2.11	Retração térmica numa peça impressa em ABS.	16
2.12	Interface do software cura.	20
2.13	Diferenças dos diversos infill (31).	21
2.14	Primeiro sistema de extrusão (40).	23
2.15	J-Head Mark V-B (41).	24
2.16	representação do sistema heater cartridge (42).	25
2.17	Bloco de aquecimento em alumínio.	26
2.18	Simulação de um sistema de extrusão (40).	26
2.19	Novo aquecedor Typhoon com duas resistências espirais à volta da zona cilíndrica de fusão vs a dissipação de calor no seu interior adaptado de (40).	27
3.1	Comparação entre o novo e o antigo hotend, já acoplado ao Bondthec.	29
3.2	Mosquito Hotend (43).	30
3.3	Extrusor Bondtech (44).	31
3.4	Engrenagens do sistema Dual-Drive (44).	32
3.5	Placa de controlo Duet 2 Wifi (45)	33
3.6	Placa com os principais componentes (46)	35
4.1	Suporte original do sistema de extrusão.	38
4.2	CubePro sem o suporte do motor, apenas a carruagem foi mantida.	38
4.3	Suporte/carruagem dos novos componentes versão PLA.	39
4.4	Protótipo montado para teste do sistema de extrusão.	40
4.5	Assembly do suporte do motor versão PLA.	41
4.6	Suporte do motor versão sheet metal.	42
4.7	Dimensões da chapa.	42
4.8	Desmontagem da parte inferior da impressora para ter acesso aos componentes elétricos.	43

4.9	Seleccção dos fios, teste de continuidade.	44
4.10	Suporte da <i>Duet 2 Wifi</i> através do programa <i>solidworks</i>	45
4.11	Parte inferior da impressora com todas as ligações eletrónicas realizadas.	46
4.12	Relé estado solido SSR-25.	48
4.13	Novo sistema de alimentação de filamento.	49
4.16	Dados relativos ao <i>Firmware</i> instalado e a sua versão.	51
4.17	Interface criado pela <i>Duet 2 Wifi</i>	52
4.18	Parafuso de ajuste da nivelção da base de construção.	53
4.19	Base elevada através dos retângulos de 13mm de altura.	54
4.20	Protótipo final da elevação da base de construção.	54
4.21	Tensão aplicada nos motores.	55
4.22	Teste dos <i>heaters</i>	56
4.23	Teste da alimentação do filamento com um bico de 0.4mm.	57
4.24	Definição dos passos/mm no <i>firmware</i>	58
5.1	Primeiras impressões realizadas na <i>CubePro</i>	59
5.2	Impressão 3D de um suporte para <i>smartphones</i>	61
5.3	Comparação de impressões.	62
5.4	Impressão de um vaso para testes de detalhe.	63
5.5	Estado final na impressora.	65
A.1	<i>Duet 2 wifi wiring</i>	69
A.2	Interface <i>web control</i> durante impressão.	72
A.3	Módulo de extrusão montado num protótipo com filamento ASA.	73
A.4	tentativa de impressão.	74
A.5	Alguns exemplares dos protótipos impressos.	74
A.6	Suporte de elevação da mesa, <i>solidworks</i>	75
A.7	Protótipo de fixação da base de construção em ASA.	76
A.8	Vista <i>solidworks</i> do encaixe do filamento.	77
A.9	Primeiro protótipo do suporte da <i>Duet</i>	77
A.10	Impressões realizadas na <i>CubePro</i> para testes.	78
B.1	Desenho técnico parte inferior versão PLA.	80
B.2	Desenho técnico parte superior versão PLA.	81
B.3	Suporte inferior versão <i>sheet metal</i>	82
B.4	Suporte superior versão <i>sheet metal</i>	83
B.5	Desenho definição suporte <i>Duet</i>	84
B.6	Desenho técnico apoios da base de construção.	85
B.7	Desenho técnico do encaixe.	86
C.1	Placa original da <i>CubePro</i>	87
C.2	Sistema original de alimentação de filamento.	88
C.3	Comparação das bobines.	89

Lista de Tabelas

2.1	Categorias dos processos de FA de acordo com as normas iso/astm standard 52900.	4
2.2	Propriedades de alguns materiais para impressoras 3D \citep{3DPrinti52:online}.	15
2.3	Propriedades do PLA (29).	16
2.4	Comparação de algumas propriedades entre vários modelos de placas de controlo	18
2.5	Softwares CAM e de controlo disponíveis no mercado (28)-(16).	20
2.6	Temperatura da base de construção recomendada para alguns filamentos (19).	22
4.1	Limites máximos de deslocação dos motores.	53
5.1	Medições das caixas nos diferentes eixos em milímetros.	60
5.2	Medições do eixo Z.	60
5.3	Software e hardware do estado atual da impressora CubePro.	64
5.4	Classe dos motores	66

Abreviaturas e Símbolos

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
ASA	Acrilato de Acrilonitrilo Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HIPS	<i>High Impact Polystyrene</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LDPS	Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços
LED	<i>Light-emitting diode</i>
PC	Policarbonato
PEEK	<i>Polyether ether ketone</i>
PET	Polietileno Teraftalato
PETG	Polietileno Teraftalato modificado com Glicol
PLA	Ácido Polilático
PMW	<i>Pulse Width Modulation</i>
PVA	Acetato de Polivinila
PSU	Polysulfone
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
SLi	<i>Slice file</i>
TPU	Poliuretano Termoplástico
USB	<i>Universal serial bus</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

Atendendo às necessidades atuais dos equipamentos do mercado de impressão 3D, foi desenvolvida uma impressora 3D de extrusão de filamento para atingir padrões internacionais de qualidade no produto acabado.

Com o intuito de melhorar o funcionamento desta máquina e, após a examinação do diagnóstico inicial de uma impressora 3D de extrusão de filamento, em conjunto com os membros do laboratório LDPS (Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços), foram detetados os problemas de maior relevo que impedem o alcance dos resultados desejados.

Desta forma, pretende-se corrigir estas imperfeições, atualizando todos os comandos/unidades necessários para permitir imprimir com qualidade e repetibilidade peças termoplásticas, com a possibilidade de existir um ambiente com temperatura controlada, melhorando o seu funcionamento.

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo desta dissertação é, utilizando as ferramentas adequadas, fazer as alterações necessárias no corpo de uma impressora 3D de extrusão de filamento, já existente no LDPS, CubePro, e transformá-la numa impressora 3D de código aberto para que, desta forma, seja possível imprimir diversos tipos de termoplásticos.

1.3 Metodologia

Neste trabalho começou-se por fazer um estudo do processo de FDM, seguidamente a contextualização da impressora 3D, mais precisamente impressoras de geometria CoreXY. Estudo aprofundado do seu funcionamento e dos diversos componentes, *softwares* e parâmetros.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos.

1. Introdução

Introdução ao tema, objetivos, metodologia e estrutura da dissertação.

2. Estado de arte

- Contextualização da impressão 3D processo FDM, com foco nas impressoras tipo CoreXY, estudo dos vários componentes, *softwares* e parâmetro;
- Materiais utilizados na impressão 3D.
- Estudo do conceito e das características das variadas placas de controlo utilizadas na impressão 3D;

3. Metodologia - Seleção dos materiais utilizados

Estudo aprofundado dos componentes:

- *Mosquito Hotend*;
- Extrusor *Bondtech* BMG-M;
- Placa de controlo *Duet 2 wifi*.

4. Conversão da impressora

- Localização das partes a modificar;
- Design dos novos suportes;
- Atualização da placa de controlo;
- Configuração dos parâmetros de impressão.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Contextualização da impressora 3D

A produção industrial é, nos dias correntes, conduzida pela competição global e pela necessidade da rápida adaptação da produção, essas necessidades podem ser atingidas através de avanços radicais na tecnologia de fabricação tradicional (1).

O fabrico aditivo (FA) tem como objetivo reduzir os custos e está a proporcionar maior eficiência e flexibilidade aos sistemas produtivos, num período onde a busca pela maximização da produtividade é constante (2). Devido à popularização da Internet e ao surgimento de outras inovações tecnológicas, a produção industrial no mundo cresceu exponencialmente, visando responder a tal demanda com um nível de exigência cada vez maior num ambiente cada vez mais competitivo. O objetivo é que a indústria 4.0 sedimentada em inovação e melhoria contínua, possibilitará a criação de melhores produtos e serviços atendendo a essa busca cada vez maior e mais exigente (3).

A impressão 3D é o tipo de industrialização/conceção de um produto mais flexível do momento atual pelo que assenta na perfeição no conceito de Indústria 4.0.

A produção de protótipos através da tecnologia de impressão 3D pode aumentar a velocidade não apenas do processo de design, mas também da produção final, permitindo a redução (das dependências) na cadeia de valor.

O governo Português tem investido cada vez mais na investigação, para desta forma aumentar a implementação de tecnologias de Fabrico Aditivo. Podendo averiguar esse facto com o acréscimo de várias empresas a investirem na própria tecnologia de FA (4).

Espera-se que o mercado global de impressão 3D continue a crescer nos próximos anos. Os fatores que impulsionam esta tecnologia no mercado são a redução de erros, uma utilização das matérias-primas mais eficiente, a capacidade de construir produtos personalizados o uso simultâneo de múltiplos materiais, entre outros.

A figura 2.1 representa a tendência das tecnologias e da matéria prima mais usadas na indústria da atualidade.

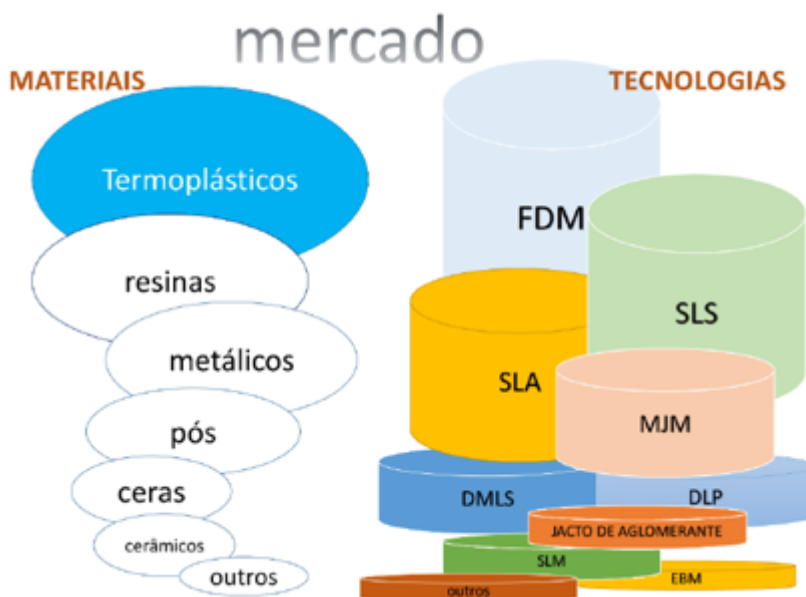


Figura 2.1: Mercado da impressão 3D por materiais e tecnologias (5).

Cada vez têm surgido mais processos de fabrico aditivo, embora os diversos processos e tecnologias existentes disponíveis no mercado, consentem todos o mesmo princípio de adição de camadas, para produzir peças físicas através de modelos CAD. O fabrico aditivo tem se destacado como sendo o processo mais rápido na criação de modelos únicos e complexos, com vantagem de os modelos produzidos apresentarem boa qualidade de produção, que até então eram impossíveis de criar por métodos convencionais (5).

De acordo com a norma iso/astm standard 52900, os processos de FA estão divididos em sete categorias (6).

Tabela 2.1: Categorias dos processos de FA de acordo com as normas iso/astm standard 52900.

Classe	Descrição do processo de FA
<i>Binder jetting</i>	A base de funcionamento é um líquido de ligação, que é seletivamente depositado para união de material em pó.
<i>Directed energy deposition</i>	A energia térmica é utilizada para fundir matérias à medida que vão sendo depositadas.
<i>Material extrusion</i>	O material é seletivamente depositado por um bico ou orifício.
<i>Powder bed fusion</i>	Processo em que a energia térmica é seletivamente funde regiões de uma base em pó.
<i>Material jetting</i>	Gotículas de material de construção são depositadas seletivamente.
<i>Sheet lamination</i>	Processo onde camadas de material são coladas para formarem um objeto.
<i>Vat photopolymerization</i>	Fotopolímero em estado líquido numa cuba dentro de um reservatório que é seletivamente curado por polimerização ativada por luz.

2.2 Processo FDM

Em 1989, Scott Crump, cofundador da *Stratasys Inc*, apresentou um pedido de patente para a tecnologia FDM do inglês (*Fused Deposition Modeling*). A patente foi concedida à empresa em 1992, na qual ainda é proprietária desta tecnologia na atualidade. Este processo é dos mais usados por muitos dos equipamentos de impressão 3D, baseados no modelo de código aberto, *RepRap*, os quais proliferam com o desenvolvimento da impressão 3D atual (5). As técnicas de FA estão classificadas de acordo com as normas ISO/ASTM standard 52900:2015.

Este é o processo mais económico e usado de todas as outras técnicas do fabrico aditivo (7). O processo FDM está a ganhar vantagens e a distanciar-se dos outros processos na indústria devido à sua habilidade para produzir peças com formas complexas, sem necessitar de qualquer ferramenta de maquinaria ou interferência humana (8).

A modelação por deposição de material fundido, também conhecida como FDM, é um processo de fabrico aditivo baseado na extrusão de um termoplástico, como por exemplo o PLA ou o ABS, podendo ainda ser extrudidos compósitos ou metais. Neste processo, um filamento desse material é aquecido e extrudido através de um bocal fino, que se desloca horizontalmente (segundo os eixos X e Y). Existe também uma plataforma que se desloca verticalmente, eixo Z. Neste processo é necessário ter em conta a geometria do caudal de extrusão, o método de aquecimento utilizado, bem como, o comportamento de fusão do fluido Não-Newtoniano.

O processo em si inicia-se através de das duas engrenagens que rodam em sentidos opostos permitindo que o filamento, que se encontra em forma de fio com dimensões normalizadas, chegue da bobina (onde está armazenado) até ao extrusor (*Hotend*) onde é aquecido acima da sua temperatura vítrea, permitindo, assim, ao bocal extrudi-lo. A trajetória percorrida pelo bico extrusor e/ou pela base de impressão irá ditar a forma da peça à medida que o material é depositado na plataforma por camadas. Ao fim de cada camada, a plataforma ou o sistema de extrusão desloca-se no eixo Z, permitindo dessa forma ser depositada a camada seguinte, e assim sucessivamente, até as especificações dadas pelo ficheiro em CAD serem cumpridas (9).

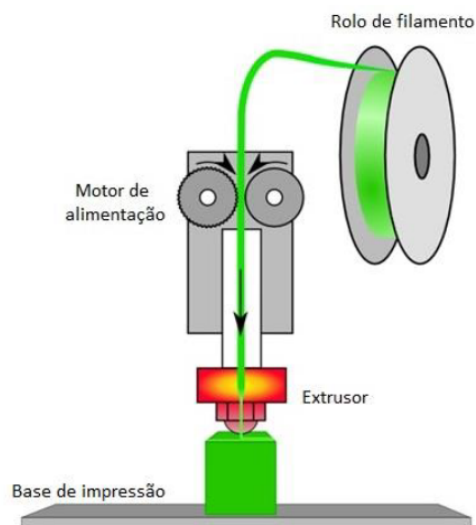


Figura 2.2: Processo FDM, adaptado de (10).

O mecanismo de fusão do processo FDM depende do tempo necessário para a solidificação. As fibras originalmente interagem umas com as outras enquanto uma delas esta no ponto de fusão. Isso cria um vínculo entre elas. O rápido arrefecimento da fibra que se encontra no ponto de fusão, pode resultar numa má ligação às camadas de fibras anteriores podendo provocar vazios entre elas. Isto, cria ligações que não possuem propriedades mecânicas semelhantes às dos processos convencionais. Embora a prática do uso do processo FDM como método de produção esteja a aumentar dia após dia, uma das maiores dificuldades no fabrico de peças através do processo FDM para aplicações finais é prever as propriedades mecânicas das mesma devido a descontinuidade natural do processo (11).

Como qualquer outro tipo de processo de fabrico, a impressão 3D tem as suas vantagens e desvantagens. Este processo, FDM, destaca-se de outros devido à sua simplicidade e ao facto de apresentar baixo custo na produção de pequenas séries. Para além disso, é facilmente utilizado em laboratórios ou em meios domésticos, apresentando versatilidade para fabricar todos os tipos de formas com uma ampla gama de materiais, principalmente plásticos, em pouco tempo. Permite ainda obter geometrias de extrema complexidade num único processo, e no que diz respeito ao interior de cavidades proporciona uma enorme liberdade durante a fase de projeto. Somando ainda o baixo custo do equipamento e do material de extrusão. (12).

No entanto, este tipo de equipamento também existe a nível industrial, onde tanto o seu tamanho como custo são maiores, permitindo, assim, a utilização de polímeros com temperaturas de fusão mais elevadas, bem como a produção de peças funcionais. Outras das vantagens são as peças produzidas apresentarem boa resistência térmica e a produtos químicos e húmidos;

No entanto as limitações deste processo passam por: pouca variedade de materiais de construção comparando com processos convencionais, necessidade de suporte de construção e da sua remoção, peças com baixa resistência mecânica segundo o eixo Z, velocidade de impressão relativamente lenta comparada com outros e processo com pouca precisão. Apesar do produto final cada

vez apresentar melhor qualidade superficial, por vezes, ainda é necessário a peça passar por um processo de acabamento (pós processamento), quando as linhas de camada (efeito *Neck*) visíveis não são desejáveis, como por exemplo o polimento à mão (5).

A tecnologia FDM é das mais procuradas devido a sua diversidade de aplicações em diversos campos, desde aplicações industriais a reconstrução craniofacial e inserções ortopédicas.

Após a expiração da patente criada por Scott Crump iniciou-se o movimento *open source* sobre impressoras 3D de baixo custo, que consiste na partilha de códigos que permite a qualquer utilizador os adapte à sua impressora e faça as modificações necessárias com vista à melhoria contínua destes mesmos códigos, para um melhor funcionamento do seu equipamento.

Para controlo dos parâmetros de impressoras 3D utiliza-se o código G, anexo A figura A.2, que por sua vez também é utilizado de igual modo no controlo de máquinas CNC. Este código é criado através de programas que realizam o fatiamento da peça a imprimir, alguns desses códigos disponíveis são como por exemplo o *Slic3r*, *Reptier Host*, *Cura*, *Simplify3D* entre outros. Estes programas criam o código que define os diversos parâmetros a ter em conta na realização da impressora, tal como, as diversas velocidades, a trajetória do bico extrusor e/ou da base de impressão, a temperatura do extrusor e a da cama de construção, entre outros (5).

Para realização de um projeto de impressão um modelo tridimensional terá que ser desenvolvido previamente num *software* CAD com a forma final da peça a imprimir, ou então, através da técnica de engenharia inversa. Esta técnica consiste na digitalização de uma peça já existente para que possa ser realizada a impressão. Esse modelo é posteriormente convertido em ficheiro STL, ficheiro em formato poligonal, que descreve a forma exterior da peça. Posteriormente, é criado um modelo em SLi que consiste na divisão da peça em partes por adição de material em camadas finas, sendo que a espessura destas camadas irá ditar a resolução do produto final. Através do último modelo a impressora é capaz de ler o código e fazer a reprodução do modelo final (9). A figura 2.3 representa um esquema do processo envolvido desde a criação do modelo até à obter o produto final.

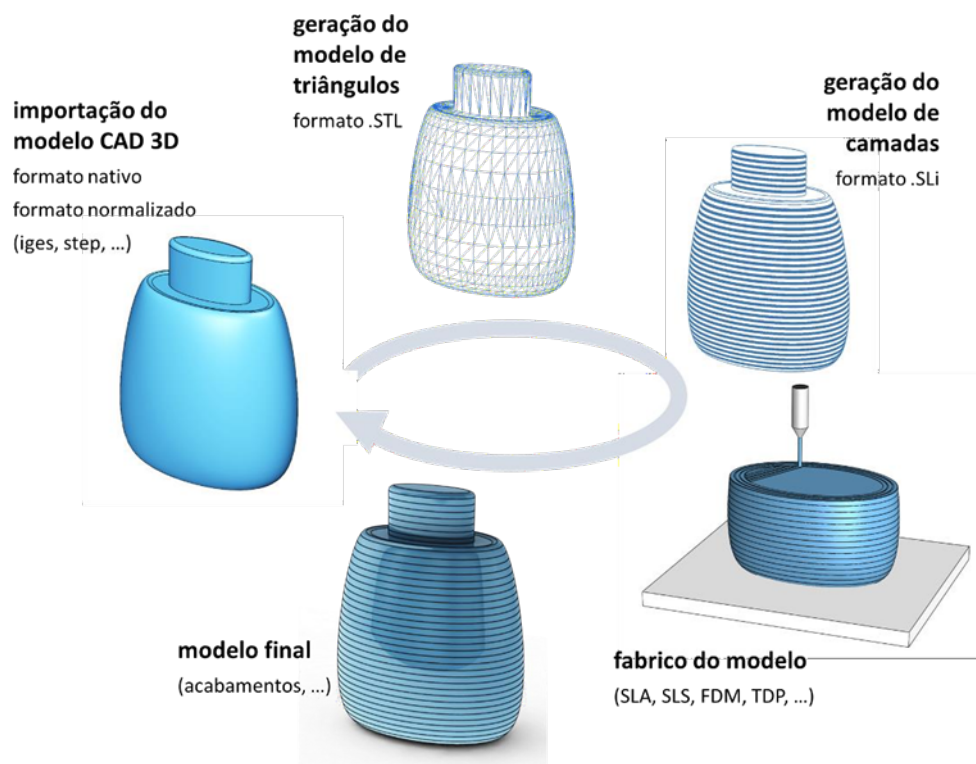


Figura 2.3: Processo de construção de um modelo por impressão 3D (5).

2.3 Impressoras

O termo "impressora 3D" foi patenteado em 1999, tornou-se um termo de domínio público através da empresa *Stratasys Inc.* para definir a máquina que tornaria possível criar objetos a partir da adição de material. Designers do produto, engenheiros ou artistas apenas têm de fazer o *upload* do ficheiro digital (CAD) para a impressora onde pretende imprimir o objeto(13). Contudo o cérebro de todo o processo de impressão reside no *software CAD*, que em 1970, emergiu para melhorar todo o processo (14). Com o avanço da tecnologia de impressão tridimensional ao longo dos anos, vários modelos (estruturas) de impressoras foram desenvolvidos. A seguir, serão citados apenas alguns aspetos que ajudam a classificar as diversas gamas.

Estrutura

As impressoras 3D podem ser classificadas devido a vários fatores. Se são abertas ou fechadas, onde a diferença consiste em que nas abertas o modelo produzido pode ser retirado diretamente enquanto que nas fechadas o modelo impresso fica em uma câmara fechada como mostra na figura 2.4.



Figura 2.4: Impressoras 3D câmara fechada (esquerda) e câmara aberta (direita) (15).

A principal característica da impressora de câmara fechada é concentrar o calor no seu interior pois funciona como uma câmara quente impedido a mudança brusca de temperaturas. Este fator é essencial e deve ser tomado em conta quando se pretende imprimir materiais tipo ABS que sofrem regularmente contrações ou empenamentos das peças com a mudança de temperatura, fazendo com que este tipo de estruturas seja recomendado para a impressão deste tipo de materiais (16).

Movimentação dos eixos

De igual modo também podem ser distinguidas e classificadas pelo tipo de sistema de deslocamento que os eixos realizam. Os principais sistemas são Cartesianas, Delta, XY *Dualwire Gantry* ou CoreXY. Em baixo estão citados alguns tipos de movimentação. Neste projeto a impressora utilizada trabalha com um sistema CoreXY, portanto dar-se-á mais relevo a esse sistema.

Cartesiana

Sistema onde os eixos X, Y e Z correspondem ao plano cartesiano representado na figura 2.5 onde formam o espaço reticulado, o eixo X corresponde à largura, o eixo Y à profundidade e o eixo Z à altura. Atuadores lineares estão paralelos a cada um dos três planos ortogonais. Através do controlo dos carris é possível comandar o bico extrusor para qualquer ponto do volume de impressão (17).

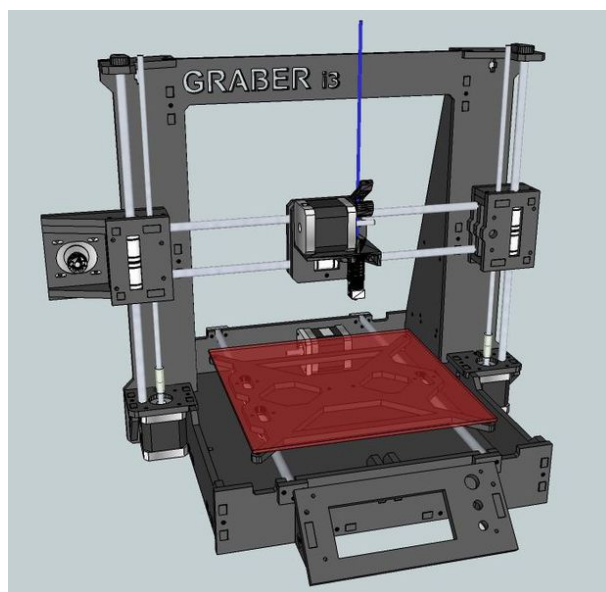


Figura 2.5: Impressora típica com sistema de movimentação tipo cartesiana (18).

Delta

Como acontece com as impressoras tipo cartesianas, estas impressoras usam coordenadas cartesianas para efetuarem a movimentação. Impressoras 3D do tipo Delta apresentam três atuadores lineares dispostos verticalmente à volta de um círculo (19). A movimentação é realizada verticalmente por três carris como é possível ver na figura 2.6.

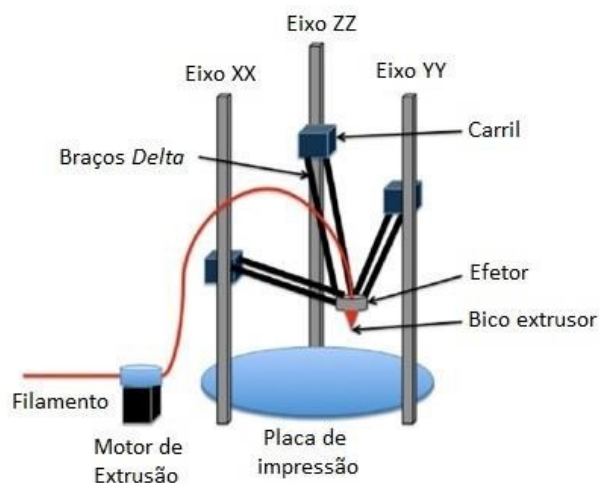


Figura 2.6: Impressora tipo Delta, adaptado de (19).

De forma geral, a grande diferença entre a máquina Cartesiana e Delta reside no modo como os eixos se movimentam, estando isso ligado diretamente ao modo como afeta a estrutura total da impressora e o modo como a impressão é controlada (19). As diferenças são possíveis de constatar na figura 2.7.

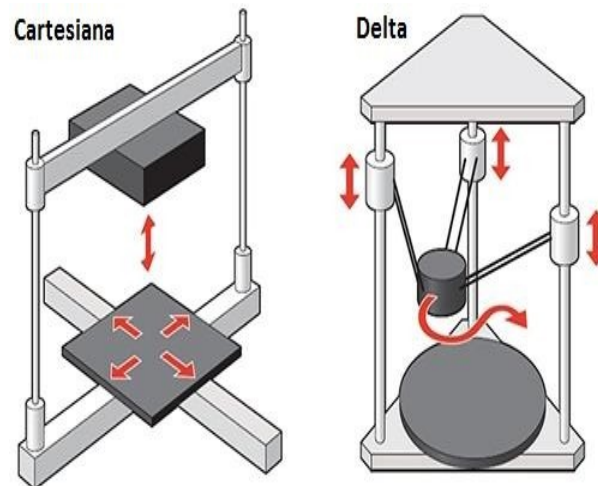


Figura 2.7: Movimentação dos eixos dos tipos de impressora Cartesiana e Delta, adaptado de (20).

CoreXY

O sistema CoreXY, basicamente, é uma técnica, não uma implementação. É um sistema de eixos que permite o controlo preciso nos eixos X e Y, simples, este tipo de estruturas economiza peças evitando o cruzamento de eixos como acontece no *Dualwire Gantry*. É considerado um sistema robusto, com cinemática paralela e motores fixos na estrutura. A cinemática paralela da CoreXY significa que os motores, normalmente a maior fonte de inércia em um estágio, estão estacionários, o que permite acelerações rápidas. É de fácil controlo e permite elevadas velocidades de movimentação, sendo este o fator que fez com que tenha sido adotado em várias impressoras 3D comerciais de estrutura fechada(21). O sistema de movimentação é representado na figura 2.8.

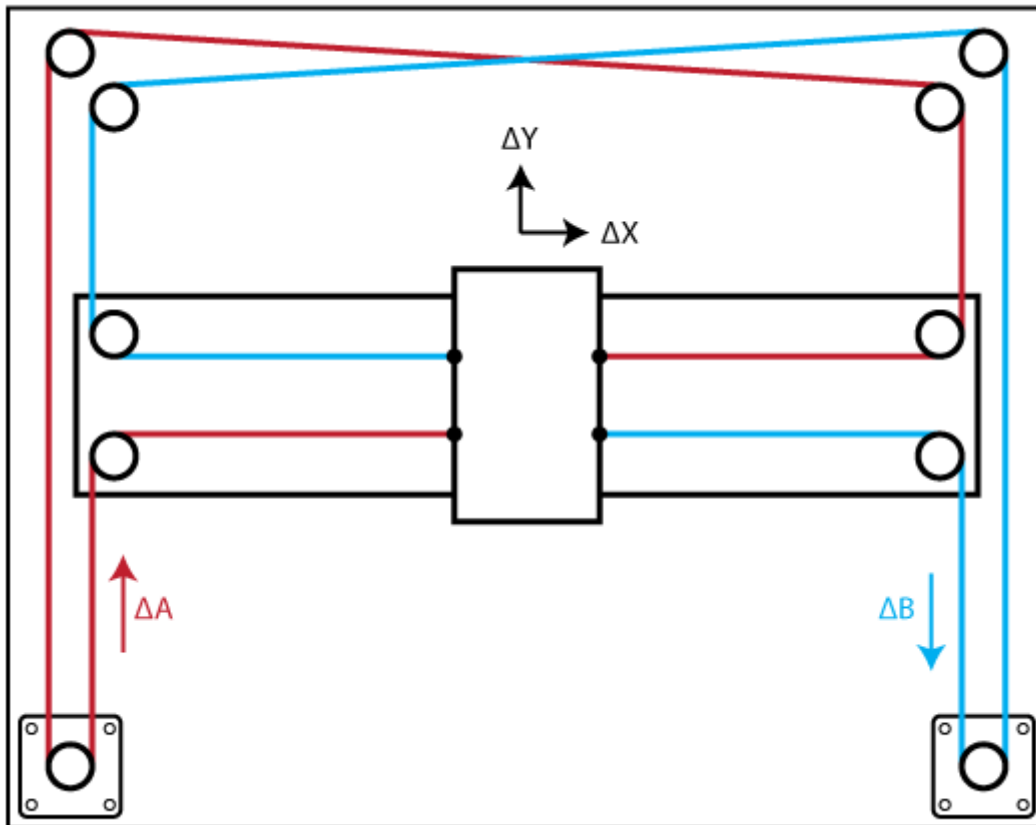


Figura 2.8: Sistema de movimentação CoreXY Fonte:(22).

Nesta configuração, a impressora possui três eixos formando o espaço reticulado definido pelo sistema de coordenadas cartesiano. Como é possível constatar na figura 2.9 o eixo X, corresponde à largura, o eixo Y à profundidade enquanto que o eixo Z representa a altura. Em suma, para formar o volume de impressão, o cabeçote (sistema de carruagem), onde se encontra todos os sistema de extrusão da máquina (*hotend*, *bondthec* e motor), desloca-se sobre os guias lineares nas direções dos eixos X e Y, enquanto que a mesa de construção desloca-se apenas no eixo Z (23).

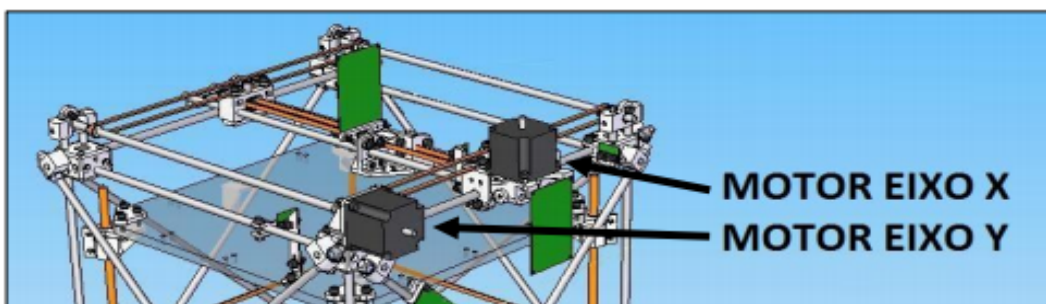


Figura 2.9: Representação dos eixos XY (24).

Esteticamente impressoras que possuem este sistema cartesiano apresentam grandes dimensões estruturais para acomodar todo o *hardware* no seu interior. Mecanicamente estas máquinas

são conhecidas por possuírem boa rigidez estrutural o que proporciona maior velocidade de impressão (25).

2.4 CubePro impressora 3D

A impressora CubePro esta inserida na categoria de impressoras *desktop* processo FDM, o funcionamento da CubePro baseia-se no puxar de um filamento que se encontra nos cartuchos através da cabeça de extrusão por via dos tubos de alimentação. O filamento é depois injetado através da cabeça de extrusão em uma fina camada de material fundido. O movimento da cabeça de extrusão é coordenado através do prato de impressão, onde camada após camada vai-se formando a peça. O aspeto geral da impressora pode ser vista na figura 2.10.



Figura 2.10: Impressora CubePro do LDPS.

O nivelamento do bico extrusão (*nozzles*), é muito importante para garantir impressões de elevada qualidade, especialmente após a substituição de um bico, do inglês *nozzle* ou qualquer outro componente do sistema de extrusão. Sendo assim, um passo de grande importância a ter em conta no inicio de cada impressão após a substituição de algum componente do sistema. Cada tipo de material possui uma calibração diferente, com uma folga diferente entre o bico extrusor e a mesa de construção, o que se torna indicado, se for imprimir em diferentes cores, usar o mesmo tipo de material. Os níveis de calibração indicados para cada tipo de material a usar podem ser encontrados tabelados no próprio site da *3D Systems* ou disponibilizados também no *Firmware and Files*. Nesses ficheiros estão disponíveis as indicações para os materiais PLA, ABS e Nylon. Cada um com os seus diferentes códigos de calibração.

CubePro Propriedades

- Tecnologia de impressão de plástico (PJP- *Plastic Jet Printig*);
- Capacidade para até três cabeças de impressão de material multicolor;
- Trabalha com Nylon, PLA e ABS, pode-se encontrar ambos materiais recicláveis;
- Imprime objetos até 275 x 265 x 230 mm;
- Fácil instalação dos cartuchos de filamento;
- Suportes totalmente automatizados para ABS e PLA.

Tipos de Materiais capaz de imprimir

Por defeito este tipo de impressora pode imprimir materiais de Nylon, PLA e ABS o que na altura em que foi lançada poderia ser o suficiente mas que nos dias correntes é insuficiente, com a melhoria da impressora pretende-se que seja possível imprimir uma vasta gama de materiais (26). Cada material têm benefícios únicos dos quais pode-se guiar para a escolha correta através das propriedades requeridas para o objeto final.

2.5 Materiais

Há uma grande variedade de materiais disponíveis para utilizar como filamento na tecnologia FDM, embora os polímeros básicos que mais se destacam por serem frequentemente usados são os termoplásticos, Ácido Polilático (PLA) e o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) (27). No entanto existem outros termoplásticos que demonstram diferentes propriedades, como é o caso dos flexíveis, TPE, TPU, TPC, Nylon e policarbonato (PC) algumas das suas propriedades podem ser encontradas em 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades de alguns materiais para impressoras 3D \citep{3DPrinti52:online}.

Material	Abreviatura	Tm(°C)	Descrição
Polycarbonato	PC	155	Resistente ao impacto. Transparente.
Poliamida	Nylon	220	Baixo custo.
Poliestireno de alto impacto	HIPS	180	Semelhante ao ABS. Geralmente usado como suporte, pode ser dissolvido.
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	ABS	215	Flexível, fácil de controlar.
Polietileno Teraftalato	PET	210	Reciclável.
Polietileno Teraftalato modificado com Glicol	PETG	230	Resistente ao impacto, durável.
Acetato de Polivinili	PVA	200	Dissolve-se em água quente.
Laywood - Acetato de polivinido com partículas de madeira	PVA	180	Mistura de madeira, semelhante ao PLA.
Ácido Polilático	PLA	160	Derivado de plantas e biodegradável.
Acrylonitrile Styrene Acrylate	ASA	250	Boa estabilidade térmica.

Tm representa a temperatura de fusão do material.

Estes materiais estão disponíveis em diversas cores e normalmente com os diâmetros de 1,75 e 3,00 mm, sendo os filamentos de de 1,75 mm mais amplamente utilizados devido à sua facilidade de arrasto comparado com os de 3 mm. Um menor diâmetro possibilita uma maior resolução na impressão do modelo pretendido (28).

Nas impressoras de baixo custo, o PLA é o filamento plástico mais utilizado nas impressões. Possui um custo acessível (o custo médio ronda os 20 euros/Kg) e é um termoplástico biodegradável derivado de recursos renováveis, como o amido de milho e cana-de-açúcar. Implica que o PLA é ambientalmente amigável e muito seguro para se trabalhar. A temperatura de transição vítrea é baixa (60°C a 65°C) e muito nítida, pelo que torna-se fácil de arrefecer, sendo um sistema de ventoinhas eficaz para torna-lo rapidamente em sólido. Todas estas condições fazem com que o PLA consiga atingir uma vasta gama de geometrias, o que não se verifica com outros plásticos. A sua baixa temperatura vítrea proporciona uma redução da retração térmica no modelo impresso, (não necessitando de um ambiente aquecido, sendo assim possível ser impresso à temperatura ambiente) que reduz alguns dos típicos problemas, como por exemplo o empenamento ou distorção, nos modelos impressos de maiores dimensões. Como complemento o PLA não necessita de qualquer pós-tratamento ou de cura. No entanto se for desejado pode ser lixado e revestido com *spray automotivo* ou pintado com tinta acrílica (26).

Na tabela 2.3, estão apresentados algumas propriedades do PLA.

Tabela 2.3: Propriedades do PLA (29).

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade (MPa)	3000 – 4000
Tensão máxima (MPa)	50 – 70
Extensão na rotura (%)	2 – 10
Modulo de elasticidade à flexão (MPa)	4000 – 5000
Tensão máxima à flexão (MPa)	100
Tg (°C)	60-70
Massa específica (g/cm ³)	1,24 – 1,26

Já o ABS é considerado, seguidamente do PLA, como o segundo material mais fácil de manipular e trabalhar quando se inicia as impressões no mundo da impressão 3D. Este material é bastante versátil e utilizados desde os Legos, projetados para as crianças, até ser usado como um polímero de engenharia, com elevada resistência mecânica, frequentemente usado para produzir pára-choques de carros (21). Embora as suas características, considerações devem ser tidas ao imprimir objetos em ABS, pois ao contrário do PLA, a temperatura de transição vítrea, de aproximadamente 105°C, é mais elevada e pode causar retração térmica e deformações nas peças à medida que vai solidificando, como se pode observar no canto esquerdo da figura 2.11, a peça impressa sofreu uma deformação.



Figura 2.11: Retração térmica numa peça impressa em ABS.

O material ABS é recomendado para produtos leves, rígidos, com capacidade de absorver choques e resistência ao desgaste. Aparentemente o ABS tem uma cor fosca e está disponível pela 3D systems em 16 cores (26), embora no mercado atualmente seja possível encontrar em mais cores distintas.

Ao longo desta dissertação também foi usado filamento tipo ASA, (acrilato de acrilonitrilo estireno) do inglês *acrylonitrile styrene acrylate*. O ASA é conhecido como um ABS melhorado, é um terpolímero obtido pela enxertia de um éster acrílico elastomérico no copolímero estireno-acrilonitrila, SAN (30). É um plástico altamente funcional com excelente resistência as intempéris, com grande estabilidade térmica e mantém a maioria das vantagens do ABS (31). Este tipo de

filamento é largamente utilizado no mercado automotivo. Este material conta com as principais características:

- Excelente resistência às intempéries;
- Excelente processabilidade;
- Resistência química;
- Boa resistência ao impacto;
- Boa resistência à temperatura.

O filamento ASA soluciona os principais problemas do ABS, como por exemplo, o efeito *warping* que ocorre na impressão de peças com grandes dimensões. Ao apresentar uma alta estabilidade dimensional, uma alta temperatura de transição vítrea e boa resistência química, a ASA é um material bastante empregado na indústria (32).

2.6 Placas de controlo

As placas de controlo conhecidas como *motherboards* (placa principal ou placa mãe), são o cérebro de todas as máquinas. Sem o controlador, a impressora 3D seria apenas capaz de ativar ou desativar determinados componentes que funcionassem com um interruptor manual. Este componente é responsável pela leitura do código G e a tradução em sinais elétricos capazes de controlar os motores de passo, a última ação é substancialmente computacional, uma vez que estamos a falar de motores de passo. É situado na placa de controlo, normalmente possuem um cartão SD, onde é carregado o *firmware*, que contem todos os parâmetros necessários para o controlo de todo o sistema funcionar corretamente. As *motherboards* têm na sua base de funcionamento o microcontrolador (33).

Um microcontrolador ou microprocessador é um chip capaz de executar operações que são pré-estabelecidas através de métodos de programação. Estes componentes possuem memória e interfaces de entrada e saída, para além de todas as lógicas necessárias para se projetar qualquer tipo de função e implementação em sistemas de controle e automação, por exemplo, realiza a leitura dos sensores e controla os *steppers drivers* dos motores de passo, controla a velocidade das ventoinhas e o aquecimento dos sistema de extrusão, entre outros. Estes microcontroladores também possuem a função de fornecer dados à interface do sistema, quer através de um ecrã LCD cupulado à impressora, de um cabo USB ou via wifi, através de um computador ou qualquer aparelho que tenha acesso ao *browser* (34).

Cada motor de passo necessita de uma placa chamada *stepper driver* (circuito integrado responsável pelo controlo da movimentação do motor), que podem estar integrados na placa principal, ou então, numa placa de extensão. Estes motores utilizam um método de controlo chamado *microstepping*. O *microstepping* vai ditar a resolução dos movimentos do motor e ainda vai “suavizar” a movimentação do mesmo, ou seja, a dita sensibilidade da operacionalidade do motor.

Placas de controlo de impressão 3D trabalham com transístores ou do inglês *mosfets*. Estes componentes são essências para o controlo de elementos de aquecimento como por exemplo os bicos extrusores, ajudam no controle das ventoinhas, bases de impressão, sensores de controlo de temperatura ambiente entre outros (35).

Atualmente existem diversas marcas e modelos de controladores disponíveis no mercado. É possível encontrar uma grande variedade de controladores adaptados para a impressão 3D e ainda mais especializados para cada tipo de *layout* das impressoras. Estes variam de acordo com as suas características, os mais usados são as placas da marca *Smoothieboard*, *Panucatt Azteeg X5 GT*, *Duet wifi*, *Revolve* e o *Arduino Mega*, controlado através do *software Arduino IDE* disponibilizado pela companhia, que ainda continua a ser o mais comum no mundo da impressão 3D. A figura 2.4 apresenta as principais diferenças de alguns exemplos de placas de controlo (36).

Tabela 2.4: Comparação de algumas propriedades entre vários modelos de placas de controlo

Placa	Preço aprox.\$	Tipo de processador	Stepper drivers	Nº Drivers	Tipo firmware	Bits	Micro-stepping
<i>DUET Wifi</i>	170	ARM-Cortex M4 SAM4E8E	Na placa TMC2660	5	<i>Open-Source</i>	32	1/256
<i>Replicape with BeagleBone</i>	149	ARM Cortex-A8 AM335x	Na placa TMC2100	5	<i>Open-Source</i>	32	1/256
<i>Arduino DUE with RADDs 1.5</i>	72	ARM-Cortex M3 SAM3X8E	Externo	6	<i>Open-Source</i>	32	-
<i>Smoothieboard</i>	135	ARM-Cortex M3LPC1769	Na placa A5984	4	<i>Open-Source</i>	32	1/32
<i>Archim 1.0</i>	170	ARM-Cortex M3 SAM3X8E	Na placa DRV8825	5	<i>Open-Source</i>	32	1/32
MKS SBASE 1.3	61	ARM-Cortex M3 LPC1768	Na placa DRV8825	5	<i>Open-Source</i>	32	1/32
<i>Arduino Mega 2560+RAMPS</i>	80	Atmel Atmega 2560	Externo	5	<i>Open-Source</i>	8	-
<i>Pannucatt Azteeg X3 PRO</i>	113	Atmel Atmega 2560	Externo	8	<i>Open-Source</i>	32	-
<i>RAMBo 1.4</i>	170	Atmel Atmega 2560	Na placa A4882	5	<i>Open-Source</i>	32	1/16
<i>Lerdge-X</i>	263	ARM Cortex M4 STM32F4	Externo	6	Privado	32	-

O que começou como um projeto simples de apenas obter o trabalho feito, transformou-se num mercado cheio de tecnologia. As placas apenas não se tornaram mais poderosas, mas também mais diversas oferecendo novos recursos que fizeram avançar a indústria de impressão 3D como um todo (33).

2.7 Softwares CAM e de controlo de impressão.

Como referido anteriormente os parâmetros de impressão, no processo de FA, são controláveis através de *softwares* CAM ou de controlo de impressão. Existe uma grande diversidade de *softwares* CAM e como o processo de FDM tem por base o *open source*, a maioria desses *softwares* CAM são disponibilizados gratuitamente. Neste projeto serão apenas abordados *softwares* desenvolvidos especificamente para uso na impressão 3D.

Numa impressão a primeira etapa consiste na criação de um modelo 3D que depois de exportado para um ficheiro STL é convertido em *g-code* para posteriormente ser construído camada a camada.

É nesta fase em que *software* cria o ficheiro em *g-code* onde armazena todos os parâmetros e instruções referentes ao modelo a ser impresso, pronto a ser inserido e interpretado pela máquina. Esses *softwares* CAM são designados por *slicers*, pelo facto de terem a função de transformar o modelo STL num modelo em camadas.

A linguagem utilizada assemelha-se muito à utilizada nos equipamentos CNC, embora haja especificações que foram detalhadamente alteradas para as impressoras 3D.

Para além da capacidade de *slicing* muitos dos *softwares* possibilitam a conexão de dados, sendo assim possível o controlo da impressão através do computador ao invés do controlo direto através do *firmware* da impressora. Neste projeto foi utilizado essencialmente o *software* Cura, pois como primeira abordagem no mundo da impressão 3D é dos *softwares* mais fáceis e intuitivos para se trabalhar. A figura 2.12 mostra um exemplo da programação de um *g-code* para realizar a impressão de um modelo usado neste projeto. É possível observar que foi usado um preenchimento de 20% com a criação de suportes automática, ou seja, o programa gera suportes onde achar necessário, as respetivas temperaturas do extrusor (200°C) e da base de construção (60°). Estas temperaturas variam de acordo com o material que se está a utilizar, neste caso foi usado como filamento o PLA.

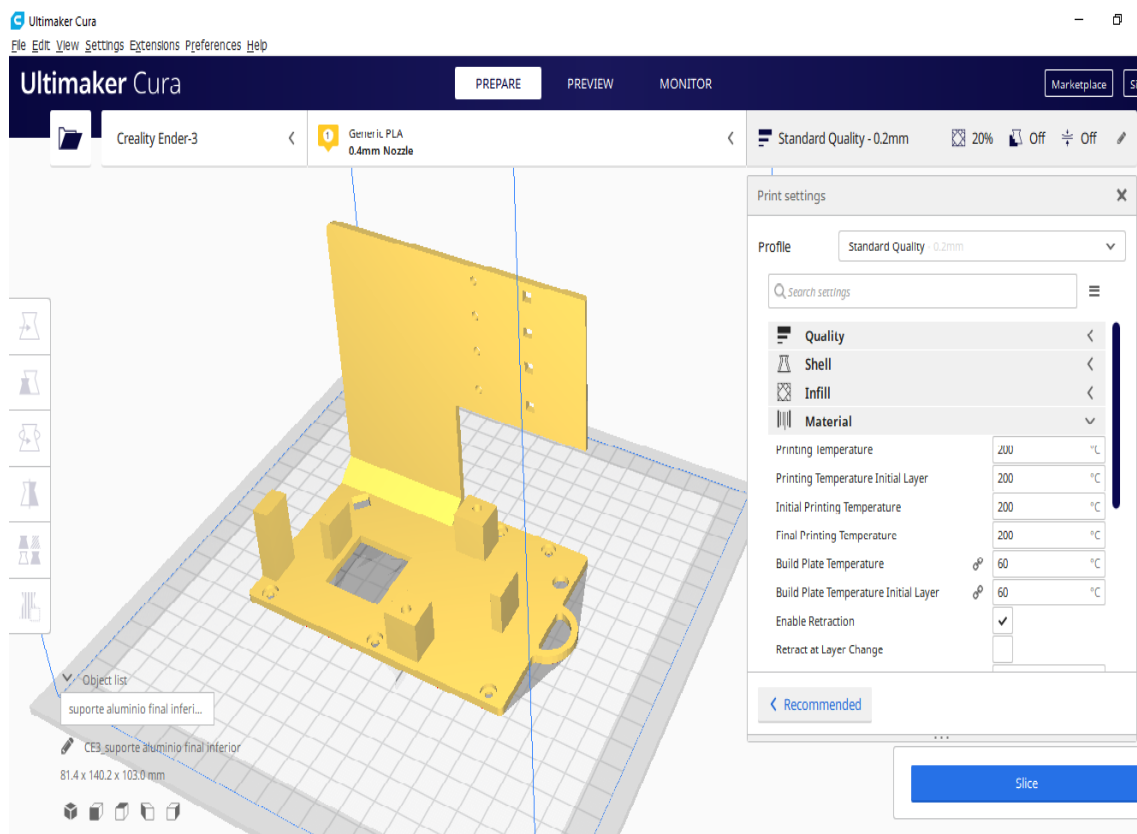


Figura 2.12: Interface do software cura.

A tabela 2.5 apresenta alguns dos *softwares* CAM disponíveis mais utilizados e as suas principais características.

Tabela 2.5: Softwares CAM e de controlo disponíveis no mercado (28)-(16).

Software	CAM	Controlo	Acesso	Nível de utilizador
Cura	Sim	Não	Livre	Iniciante
Repetier-Host	Sim	Sim	Livre/Pago	Intermédio
MatterControl	Sim	Sim	Livre/Pago	Iniciante
Slic3r	Sim	Não	Livre	Profissional
Simplify 3D	Sim	Sim	Pago	Profissional
Pronterface	Não	Sim	Livre	Intermédio
CraftWare	Sim	Sim	Livre	Iniciante
Octoprint	Sim	Sim	Pago	Intermédio

2.8 Parâmetros de impressão

Todo o processo de construção de um modelo é definido pelos parâmetros de construção, são eles que influenciam todo o resultado final dos modelos impressos por FDM. De seguida são apresentados os principais parâmetros do processo.

Altura da camada

A altura da camada define a altura dos filamentos nas camadas depositadas. Um valor baixo permite uma melhor uma maior resolução dos objetos produzidos e melhor adesão das camadas. Um valor mais alto possibilita impressões num menor espaço de tempo. Ambas as situações estão diretamente ligas ao diâmetro do bico extrusor.

Largura de camada

Define a largura do filamento na camada. O valor é múltiplo do diâmetro do bico (16).

Ângulo de impressão

É definido pela trajetória que o bico extrusor percorre ao longo da base de construção enquanto imprime o modelo. Tipicamente percorre um movimento retilíneo, nos ângulos de 0° / 45° e 90° embora haja outras configurações.

Orientação de construção

Tipicamente definida pelo ângulo que o modelo faz com a base de construção. Devido à natureza tipicamente anisotrópica dos componentes fabricados por FDM, terá influência na resistência das peças.

Preenchimento

É definido pela quantidade de material que é composto o interior do modelo, trata-se da densidade da peça e é definido em percentagem como é possível ver na figura 2.13. Uma maior percentagem de preenchimento aumenta a resistência da peça bem como o tempo e o material gasto. Todos os protótipos deste projeto foram construídos com um preenchimento de 20% ou 30% .

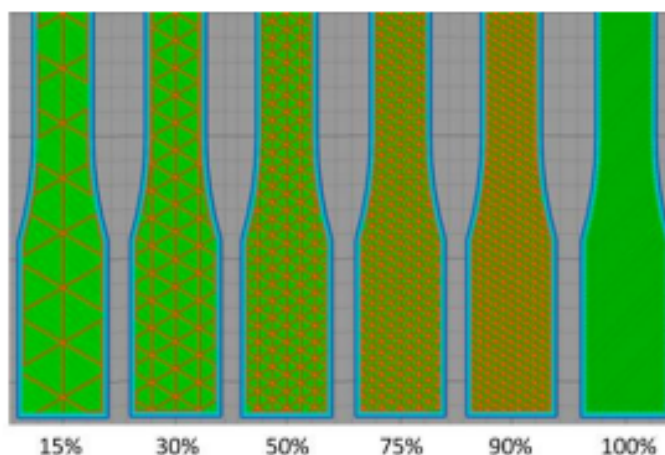


Figura 2.13: Diferenças dos diversos *infill* (31).

Velocidade de impressão

Velocidade que o extrusor atinge durante a impressão. Ao longo de uma impressão o extrusor atinge diferentes velocidades de acordo com a zona que está a construir, essas velocidades são controladas nos *softwares* CAM. Diferentes velocidades de impressão influenciam a taxa de material depositado (37).

Temperatura de extrusão

É a temperatura a que o bico extrusor deve-se encontrar durante a impressão. A temperatura varia com cada tipo material e as de acordo com as suas características (37).

Temperatura da base de construção

É a temperatura a que a base de construção deve-se de encontrar para realizar a correta adesão do material à mesa de construção. Essa também muda de acordo com as características de cada material.

Algumas temperaturas de acordo com o material estão representadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Temperatura da base de construção recomendada para alguns filamentos (19).

Filamento	Temperatura da base em C°
ABS	90-100
PLA	20-60
PVA	50
HIPS	115
PET	20-65
PC	85-95
ASA	100-110
Nylon	Ambiente

Fluxo do material

É referente a quantidade de material extrudido. O controlo deste parâmetro é de elevada importância para a qualidade final obtida nos modelos. O fluxo de material é controlado pelo multiplicador de extrusão, sendo que, este parâmetro tem influência na qualidade dimensional dos modelos obtidos (38).

Retração

Designa-se de retração o movimento de recuo do filamento durante uma fase sem extrusão. Este parâmetro impossibilita a extrusão involuntária aliviando a pressão no filamento. Este movimento de retração não remove o material presente no bico extrusor.

2.9 Hotend

Os primeiros *hotend* vêm de uma longa linha de desenvolvimento. Começaram por ser estudados e desenhados por Adreian Bowyer e pela sua equipa de investigação na Universidade de *Bath* com o projeto chamado de *RepRap*, depois com o famoso J-Head. Estes componentes foram sendo usados e melhorados a cada nova geração.

Fio *NiChrome*

Se analisar estas gerações e voltar atrás no tempo, em 2007, a impressora 3D *Darwin* e mais tarde chamada de *Charles Darwin* foi uma das primeiras, criada por Adrian Bowyer. Esta impressora usa o *thermoplast extruder* (extrusor termoplástico), um dos primeiros, mais eficazes e mais simples *hotend* fabricados (39).

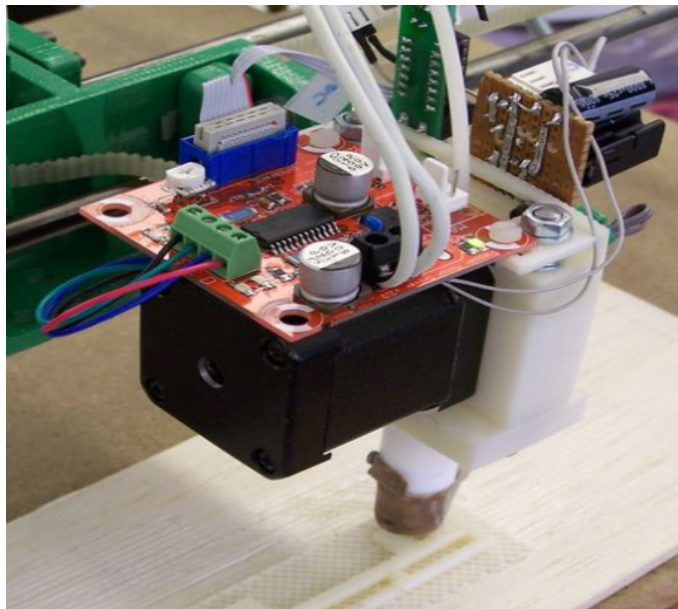


Figura 2.14: Primeiro sistema de extrusão (40).

A figura 2.14 representa o extrusor de termoplásticos com a sua placa de eletrónica acoplada no qual seria o primeiro sistema de extrusão. É um PTFE *hotend* com um sistema de acionamento direto. Este foi o sistema mãe para todas as novas gerações provenientes.

O *hoten* na secção do aquecedor usa um fio de *NiChrome*. Este é um tipo de fio resistivo muito utilizado em elementos de aquecimento. É uma solução muito eficiente e confiável, pois como o propósito do *NiChrome* é aquecer e a sua temperatura operacional máxima está muito além da que se utiliza nas impressoras 3D (40).

Resistor de alta temperatura

O *J-Head* tem sido um dos *hotend* mais populares. A sua estrutura foi desenhada para facilitar a sua utilização e tem um desempenho incrível, a complexidade da sua construção e o número de

componentes foram mantidos no mínimo possível para reduzir o número de partes maquinadas e assim manter o seu preço reduzido. É um dos primeiros a usar PEEK como material principal. Os modelos mais típicos são os *J-Head Mark V-B*, com bloco de aquecimento de latão e corpo PEEK ranhurado (41).

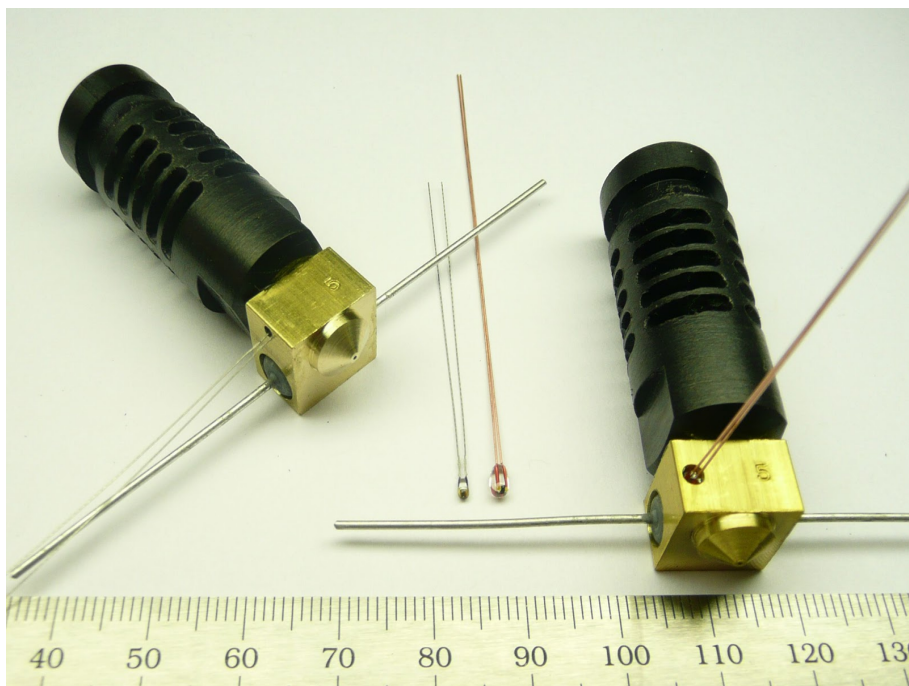


Figura 2.15: *J-Head Mark V-B* (41).

Este sistema usa uma resistência do tipo *Riedon*, com as especificações de $5.6\ \text{ohm}$, com uma dissipação máxima de $5\ \text{W}$. A temperatura nominal máxima é de 250°C , o que é praticamente suficiente para imprimir a maioria dos polímeros, como é possível constatar na tabela 2.2.

O grande avanço em usar uma resistência de alta temperatura é a possibilidade de a montar no sistema de extrusão em apenas alguns minutos e trocar, se as especificações não forem as desejadas na mesma quantidade de tempo. A sua forma prática de se utilizar tornou este sistema fácil de se usar por qualquer utilizador (40).

Aquecedor tipo cartucho

Por volta de 2012, começou-se a usar cada vez mais os aquecedores tipo cartucho (*heater Cartridge*) nas impressoras 3D. Como por exemplo, nas impressoras tipo delta da *BerryBot3D*. Este sistema de tipo cartucho foi bem adaptado à situação. O seu interior é constituído por um fio de aquecimento, cerâmica isolante e a caixa exterior é em aço. É um aquecedor independente no qual se pode assemelhar aproximadamente ao mesmo formato de uma resistência de aquecimento, ou do inglês *heating resistor*. Em vários projetos começou-se a trocar o resistor *J-Head* por este novo tipo de resistência.

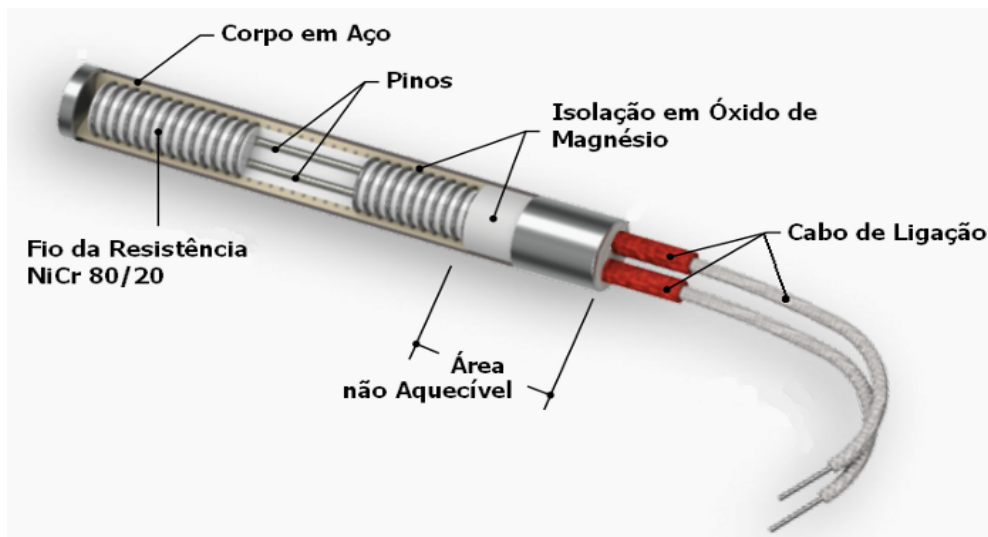


Figura 2.16: representação do sistema *heater cartridge* (42).

A necessidade de melhoramento

Todos os diferentes tipos de *hotend* têm as suas vantagens e desvantagens embora todos eles tenham sido melhorados comparando com os seus antecessores.

De acordo com a empresa Dyze Design, uma nova geração de *heaters*, *sprial heaters*, espera-se que venham a ser cada vez mais usados nas impressoras 3D devido as suas características.

Construção

A simplicidade oferecida pelo *resistor* ou pelo *heater cartridge* levaram a necessidade de construção de um suporte, designado por bloco. Este bloco de aquecimento é termocondutor, feito através de alumínio, cobre, latão ou aço. Projetado para transferir o calor proveniente do *hotend* para o bico extrusor e seguidamente para o polímero. Há diferentes tipos de blocos com diferentes montagens, desde a montagem com o sistema aquecedor em uma direção paralela ou na perpendicular. De igual modo para os métodos de fixação. Estes podem ser encontrados desde ranhura, roscas para parafusos de fixação, encaixe por pressão entre outros diversos métodos. Como é esperado, quanto maior for a complexidade do bloco e da sua forma de fixação mais é de esperar que o seu preço seja elevado, ou seja, cada restrição pode tornar uma peça simples cada vez mais complicada e os custos serão diretamente proporcionais a esse nível de complexidade.



Figura 2.17: Bloco de aquecimento em alumínio.

Deverá ter-se em consideração que um dos pontos fracos deste tipo de sistema é a uniformidade da temperatura. Sendo o bloco considerado um objeto frio que absorve calor proveniente do seu centro, pode-se constatar que quanto mais nos aproximamos do exterior mais frio este se encontra. Após a observação da figura 2.18 pode-se concluir que ter um aquecedor lateral provoca muitas oscilações da temperatura. O teste foi feito a uma temperatura de 255°C com um resistor de 20W a uma velocidade de 5mm/s, concluindo-se assim que há diferentes regiões com diferentes temperaturas.

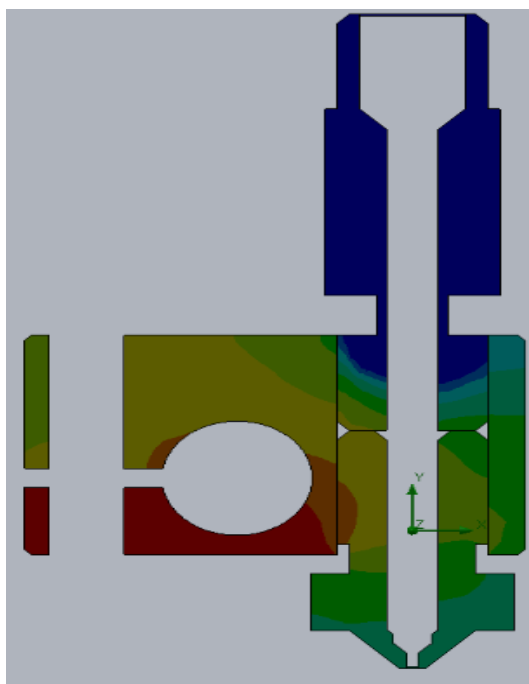


Figura 2.18: Simulação de um sistema de extrusão (40).

Para resolver este problema, empresas como a Dyze design, têm vindo a estudar as possíveis melhorias que possam ser efetuadas, pois uma temperatura uniforme é essencial para uma impressão precisa. Uma impressão demasiado quente irá degradar as propriedades do polímero, enquanto que demasiado frio, o filamento torna-se muito difícil de extrudir. Ter um gradiente de 10°C num

comprimento de 15mm pode ser problemático e essa diferença fica mais acentuada em polímeros de alta temperatura como é o caso do PEEK.

Spiral heater

Tendo em conta estes problemas, foi lançado um novo sistema de aquecimento para superar os problemas descritos. *Spiral heaters* é um novo conceito de aquecedor. Uma vez que o polímero em forma de filamento percorre um curso em formato redondo, surgiu a ideia de transformar o bloco de aquecimento num formato cilíndrico. Com este design, o calor corre naturalmente para o interior enquanto o filamento o absorve. A distância entre a fonte aquecedora e o filamento é sempre a mesma, assegurando assim a uniformidade da temperatura ao longo do curso de impressão. A zona de fusão cilíndrica também requer um novo tipo de aquecedor. Este novo formato é fácil de adaptar, podendo escolher o número certo de voltas, espaçamento e a potência aplicada. Conseguindo assim obter uma região de aquecimento uniforme através da longa zona de fusão como é possível ver na figura 2.19.

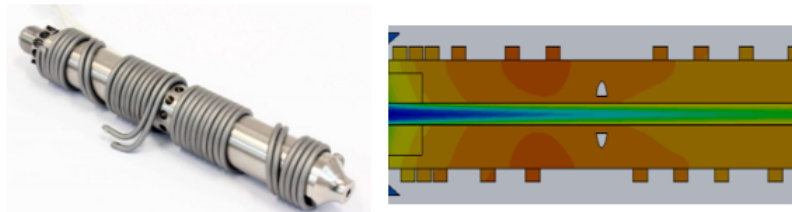


Figura 2.19: Novo aquecedor *Typhoon* com duas resistências espirais à volta da zona cilíndrica de fusão vs a dissipação de calor no seu interior adaptado de (40).

Ao longo de toda a evolução pode-se reparar que a diferença de temperatura no bloco de aquecimento precisava de algum melhoramento. É onde o novo design, estrutura cilíndrica com as resistências espirais, proporciona melhor uniformidade de temperatura, melhor distribuição de energia e maquinação simplificada (40).

Capítulo 3

Metodologia - Seleção dos componentes a utilizar

Esta fase inicial refere-se aos componentes que foram modificados, todos os equipamentos que são referidos foram atualizados devido aos que se encontravam na impressora terem propriedades mecânicas relativamente fracas comparados aos da nova geração.

3.1 *Mosquito Hotend*

Decidiu-se trocar o *hotend* existente na impressora devido as baixas temperaturas que atingia. O novo *hardware* permite imprimir a temperaturas significativamente mais elevadas e obter modelos com melhor qualidade superficial.

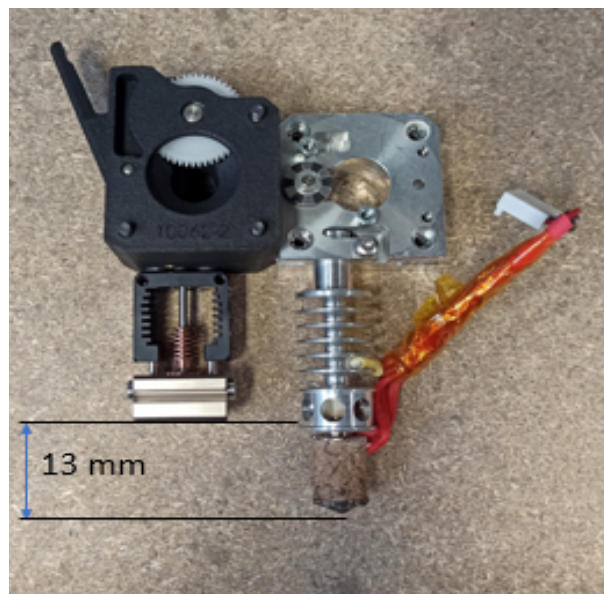


Figura 3.1: Comparação entre o novo e o antigo *hotend*, já acoplado ao *Bondthec*.

Devido as suas diferenças geométricas, foi necessário formular alterações no corpo da impressora como será discutido no capítulo 4.

Slice Engineering é uma marca Americana que desenvolveu o "Mosquito" que imprime mais rápido do que qualquer outro *hotend* do mercado. Com o "*The Mosquito Hotend™*", a impressora 3D pode oferecer a mais alta resolução e usar plásticos que anteriormente não eram possíveis. Com a particularidade de imprimir linhas mínimas de camadas e extrema precisão. Com este componente pode-se trabalhar com plásticos até temperaturas de 450°C, isto possibilita a impressão de peças mais robustas, tais como, peças de automóveis, dispositivos médicos, entre outros. Com a particularidade de que este "mosquito" é adaptável a praticamente qualquer impressora podendo assim ser instalado em qualquer FDM de baixo custo. É representado na seguinte figura 3.2 o Mosquito usado no projeto.

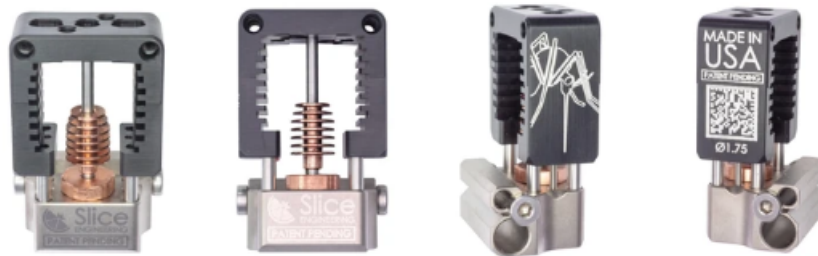


Figura 3.2: *Mosquito Hotend* (43).

Especificações adicionais

O seu design, com uma quebra de calor que conduz menos 85% para o dissipador do que uma rutura de rosca típica, permite que o *hotend* seja de fácil montagem. Pois este é montado através de um adaptador plástico impresso com poucos riscos para a segurança do mesmo. Mais especificamente:

- A liga de cobre de alta temperatura não amolece 550°C;
- As roscas no bloco quente não se deformam a altas temperaturas, permitindo assim a troca de bicos após vários ciclos de calor de elevadas temperaturas;
- Possui até 5 padrões de montagem possíveis para permitir a adaptação a praticamente qualquer impressora;
- A sua baixa massa permite movimentos rápidos no eixo do X;
- Maior rigidez estrutural;
- Classificação de 450°C para maior faixa operacional de temperaturas.

3.2 Extrusor Bondtech BMG-M

O *Bondtech BMG-M* tem como principal destaque o alto rendimento combinado com o seu reduzido peso. Estas duas características tiveram uma grande influência na escolha do equipamento a usar, pois apesar da grande possibilidade de escolha, este representa as melhores características para o projeto em causa. Todo este desempenho é devido ao facto de este ser equipado com um acionamento de dupla engrenagem, algo que até então era desconhecido no mundo da impressão 3D. Este sistema utiliza engrenagens de aço endurecido de grande pressão geométrica maquinadas em CNC com uma razão de 3:1 para fornecer-lhe uma potência compacta, essencial para trabalhar com uma grande diversidade de materiais.

Possibilitando assim realizar impressões de alta resolução com nozzles de pequeno diâmetro. Tais como impressões de grande volume utilizando um *nozzle* de grande diâmetro e retratações de grande velocidade. Este sistema de dupla engrenagem proporciona boa aderência ao filamento, o que leva a que possa trabalhar com velocidades altas com a precisão necessária.

Iniciado por a *E3D-On-line com o TiTan Extruder e o Titan Aero*, o *Bondtech BMG* continua com o desenvolvimento de extrusores compactos e potentes. Com o lançamento do *TiTan Aero* houve uma grande revolução no mundo da impressão 3D pois este ofereceu um extrusor muito reduzido em comparação com extrusores anteriormente utilizados. Como por exemplo ao *Greg Wade*, com uma razão de engrenagens melhorado (3:1), com tampa frontal transparente e o facto de poder utilizar materiais flexíveis sem problemas. O promissor *Bondtech* conta com a maioria dessas vantagens incluindo a disposição do sistema *Dual-Drive* para se transformar no extrusor definitivo multi-material.



Figura 3.3: Extrusor *Bondtech* (44).

O sistema *Dual-Drive* com que o extrusor vem equipado oferece um empurrar constante do filamento, onde nas condições mais exigentes, como por exemplo, numa impressão 3D de longa

duração com milhares de retratações, não corre o risco de temer que o filamento patine ou seja "mordido" proporcionando deste modo uma grande precisão. Levando a que não se verifique qualquer tipo de degradação no filamento ou na peça final.



Figura 3.4: Engrenagens do sistema *Dual-Drive* (44).

Projetado para transferir todo tipo de material com total confiança, desde nylon escorregadios e filamentos flexíveis (TPU e TPE) até aos de alta resistência mecânica que contém fibras de carbono, muito rígidos e por vezes frágeis. O *Bondtech* está desenhado para trabalhar com filamentos de 1,75 mm, embora a empresa assegura que é capaz de mover filamentos com diâmetros entre 1,5 mm até 2 mm, o que proporciona elevada segurança quando se imprimi independentemente das tolerâncias de cada filamento que se esteja a usar na impressão. A trajetória do filamento ao *hotend* está totalmente guiada ao longo do comprimento do extrusor, sendo que o oco entre o *Dual-Drive* e a carcaça está ajustada ao máximo para minorar as possibilidades de erro de alimentação quando se utilizam materiais flexíveis ou a velocidade de extrusão muito elevadas.

Outra característica que realçam este sistema é o facto de a tensão ser ajustável. O parafuso de ajuste manual permite configurar a pressão exercida entre as duas engrenagens de transmissão de acordo com as características de cada filamento que se esteja a usar para a impressão. O *Bondtech* dispõe de uma alavanca de fácil acesso que ao ser pressionada liberta a tensão entre as duas engrenagens possibilitando deste modo a mudança de filamento num curto espaço de tempo.

Este extrusor pode ser utilizado tanto para sistemas de extrusor tipo direto ou Bowden, dando assim aos operadores a flexibilidade para todo o tipo de impressoras 3D.

O seu design possibilita a sua instalação na grande maioria das impressoras 3D FDM ou FFF disponíveis no mercado, graças a existência de uma larga gama de suportes de montagem em função do modelo da impressora que pretenda ser instalado. Este extrusor está desenhado para adaptar-se perfeitamente ao motor passo-a-passo Nema17 com eixo de 5mm, tal como está de igual forma desenhado para adaptar-se perfeitamente ao *Mosquito / Mosquito Magnum hotends*, com um sistema de fixação de bloqueio de torque integrado para tornar a interface forte e facilitar a troca de *nozzle* (bicos). Proporcionando assim uma montagem simples, segura e livre de oscilações com apenas dois parafusos.

Com a instalação do extrusor *Bondtech BMG* a uma impressora tipo FDM ou FFF assegura-se a eliminação dos típicos problemas dos extrusores convencionais, tais como: peso excessivo no eixo X, dificuldades para imprimir materiais flexíveis, médias-baixas velocidades de impressão e de retração, fluxo descontínuo, processo de mudança de filamento descontrolável e lento, entre outros (44).

3.3 Placa de controlo (*Duet 2 Wifi*)

A *Duet 2 Wifi* foi a placa controladora escolhida para este projeto devido ao seu elevado desempenho comparada com as outras da sua categoria disponíveis no mercado. A *Duet 2 Wifi* possui uma eletrónica avançada de 32 bits usada para controlar impressoras 3D e máquinas CNC (comando numérico computadorizado). Tem características semelhantes à *ethernet*, distinguindo-se essencialmente por fornecer uma conectividade *Wifi*.

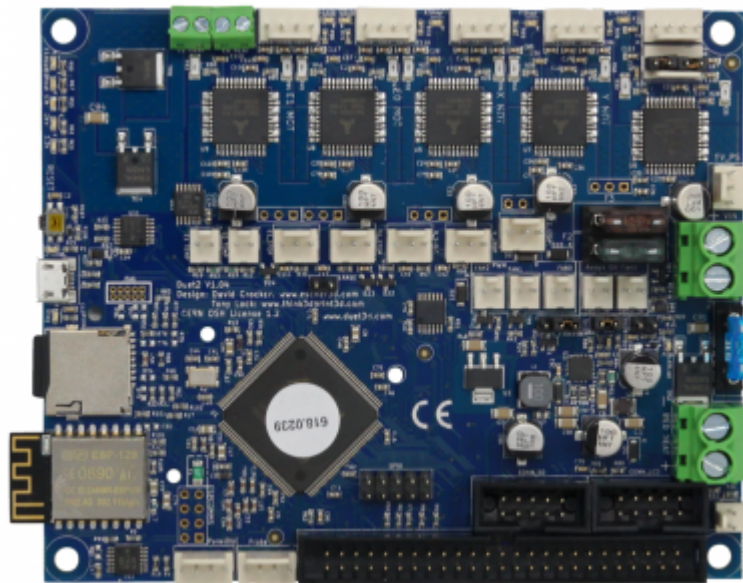


Figura 3.5: Placa de controlo *Duet 2 Wifi* (45)

Equipada com um processador de 32 bits, possui um módulo *Wifi* com interface explícita e de fácil manuseamento, a *networking* é comandada por um módulo separado, deixando o processador principal livre para executar um sincronismo preciso e robusto. Destaca-se, ainda, por:

- Silenciosos controladores de motores, até 256 *microstepping*. O *wardware* suporta a variação dos *microstepping* e da corrente para obter uma melhor precisão e eficiência da velocidade dos motores;
- Cartão SD de alta velocidade e capacidade para um segundo cartão externo se necessário;
- Extrusoras duplas com ligação disponível para três termistores para a cama aquecida;
- Três controladores PWM e duas ligações para as ventoinhas de refrigeração;

- Cada drive de passo é capaz de suportar 2.8A de corrente para cada motor;
- Todas as geometrias das impressoras são compatíveis;
- Possível extensão até sete extrusores com suporte de *firmware* para bicos de mistura e remapeamento de eixos para usar drivers externos de alta potência.

Conectividade

A placa conecta com o computador via USB, usando qualquer programa standard de controladores de impressoras 3D, neste projeto foi escolhido o programa YAT. A *Duet 2 Wifi* pode também ser conectada através de uma rede segura. A forma mais direta de controlar as placas é acessar a uma interface controladora através da rede de trabalho (*network*). Todas as placas possuem um cartão SD, o qual, não é aconselhável remover pois as interfaces de rede fornecem a transferência de arquivos rápida o suficiente para que se possa evitar a sua remoção.

Distribuição de energia

A placa funciona com dois circuitos básicos de energia. A eletrônica digital é fornecida por um circuito de 5V, que é internamente convertido para 3.3V que aciona o MCU. Este circuito também alimenta todos os LEDs, sensores e pode ser configurado para alimentar as ventoinhas.

Os dispositivos de alta potência, especificamente os motores de passo e os aquecedores (*heaters*), são alimentados por uma voltagem superior, geralmente de 12V ou 24V. Esse circuito 12/24V pode ser acionado ou desligado através do pino PS ON, sem interferir no MCU. Se necessário, a Duet pode drenar energia deste circuito para alimentar o circuito de 5V.

Desde a versão 1.04 em diante a Duet vem equipada com três fusíveis em lâmina para proteção da placa:

- 1A para as ventoinhas;
- 7.5A para os aquecedores (*heaters*) e motores;
- 15A para a cama de aquecimento.

Movimento

Esta placa pode controlar independentemente até 5 motores de passo (45). Na figura 3.6 representa os principais componentes da placa e as respectivas ligações.

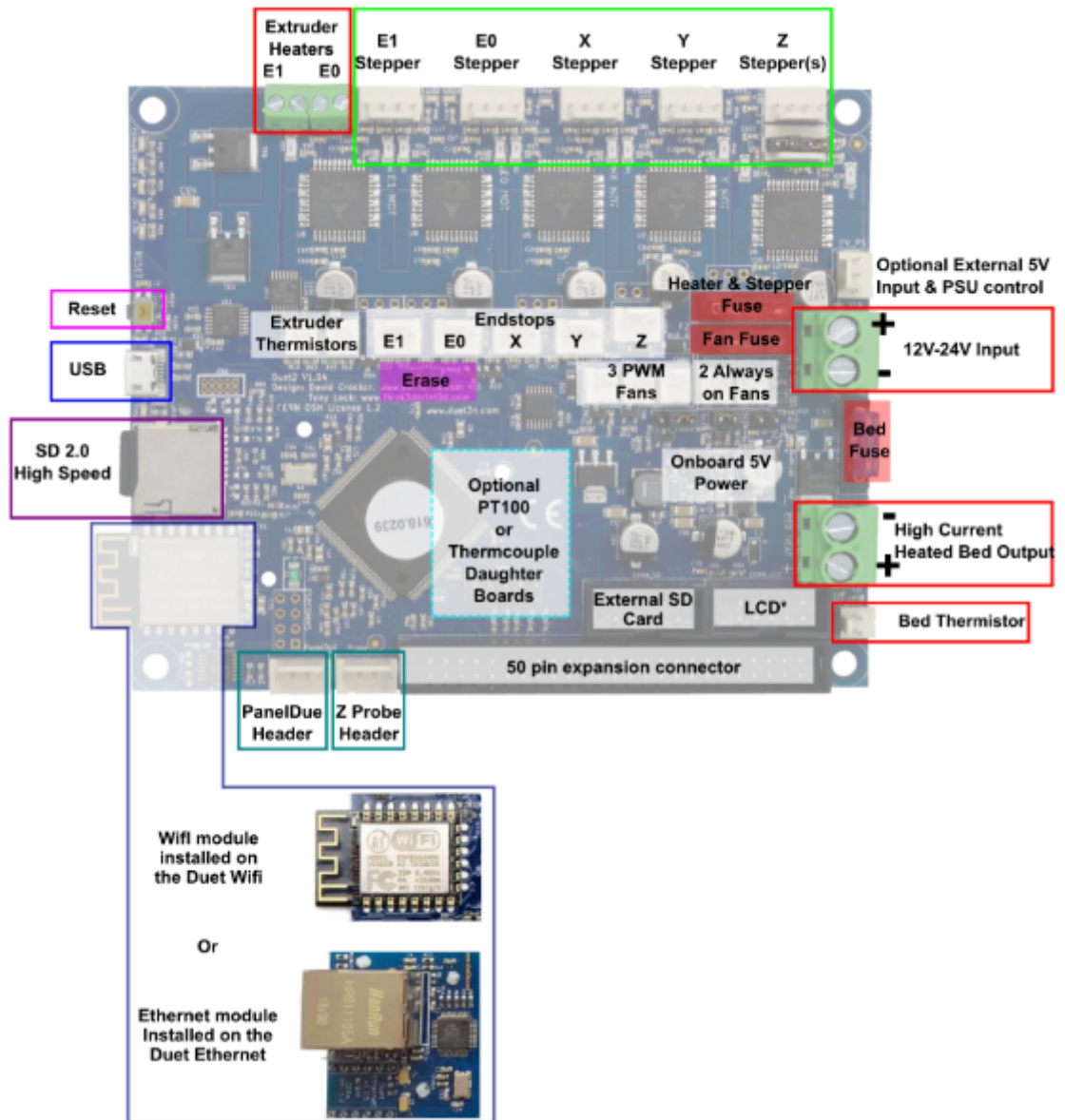


Figura 3.6: Placa com os principais componentes (46)

Capítulo 4

Conversão da impressora/Parte estrutural

O objetivo neste passo visa proceder ao estudo e manuseamento de todas as ligações que contém a impressora e realizar as devidas alterações necessárias na estrutura da mesma. Para tal foi usado o laboratório no DEMec, o LDPS, onde foram disponibilizadas todas as ferramentas necessárias para concluir o projeto.

4.1 Localização das partes a modificar

Para iniciar o projeto foram analisados todas as peças, *hardware* e *firmware* que deviam ser atualizados.

Após ter encomendado todos os componentes fundamentais, foi necessário abrir a impressora, estudar todas as ligações e visualizar quais seriam os componentes a retirar e a atualizar. Como os novos componentes possuem dimensões diferentes, foi crucial proceder à alteração de algumas partes mecânicas da impressora. Analisando as novas peças concluiu-se que era imprescindível alterar o suporte do módulo de extrusão, bem como, a fixação do suporte da placa de controlo.

4.2 Design do novo suporte do módulo de extrusão

Devido aos novos componentes, *Bondtech* e extrusor, terem medidas e posições de fixação diferentes foi necessário desmontar o antigo suporte/carruagem e desenvolver um modelo novo com o design pretendido para proceder a fixação dos componentes. A figura 4.1 representa o suporte original do motor.



Figura 4.1: Suporte original do sistema de extrusão.

O desenho de um novo suporte/carruagem é fundamental na maioria das modificações das impressoras 3D. Neste caso, foi possível utilizar parte da carruagem sendo somente necessário desenhar a parte superior onde foram afixados os componentes. Na figura 4.2 pode-se visualizar a parte superior da impressora depois de ser desmontado o suporte, permanecendo as guias do mesmo.



Figura 4.2: CubePro sem o suporte do motor, apenas a carruagem foi mantida.

A ideia inicial, o primeiro passo, foi decidir como todo o sistema de extrusão iria ficar disposto. Para ter uma ideia mais próxima da realidade foi montado à parte o extrusor com o *hotend*, para que assim, fosse possível visualizar e idealizar a posição ideal de montagem do suporte e como planejar a passagem dos cabos de alimentação.

No segundo passo foi utilizado o *software CAD, SolidWorks*, para desenhar os ficheiros necessários à criação do suporte. Foram cuidadosamente medidas todas as furações de fixação bem como as dimensões dos componentes para desenhar o mais próximo possível da realidade o suporte, o que após várias tentativas erro, chegou-se ao suporte ideal para o projeto. A figura 4.3 representa o design do novo suporte/carruagem do extrusor e do *hotend*. Todas as especificações sobre o suporte estão em anexo B figura B.1.

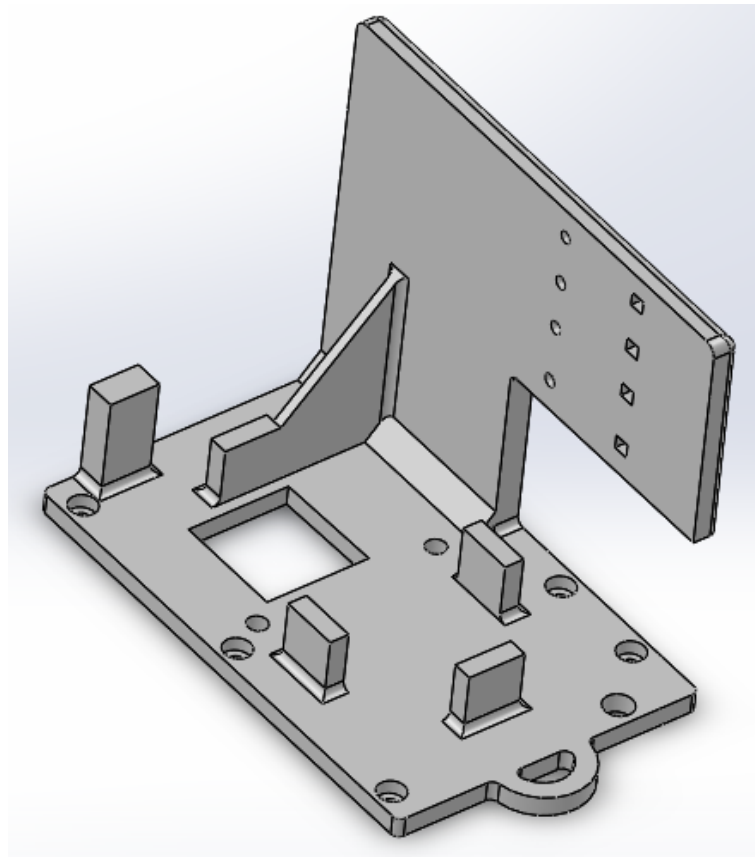


Figura 4.3: Suporte/carruagem dos novos componentes versão PLA.

Uma vez que o suporte está desenhado, procedeu-se à impressão 3D do mesmo para que fosse possível montar o sistema de extrusão. O protótipo foi impresso em PLA, numa impressora Ender 3 existente no LDPS. Inicialmente tinha-se como objetivo imprimir o protótipo em ABS, mas devido a várias tentativas falhadas não foi possível imprimir, anexo A figura A.4, optando-se por imprimir em PLA para efetuar os testes. Uma vez impresso, foi montado na impressora, como se pode constatar na figura 4.4, para testar manualmente a sua eficiência. Para isso foi preciso

desativar os motores, utilizando o código M84, para possibilitar a deslocação do suporte nos eixos X e Y.

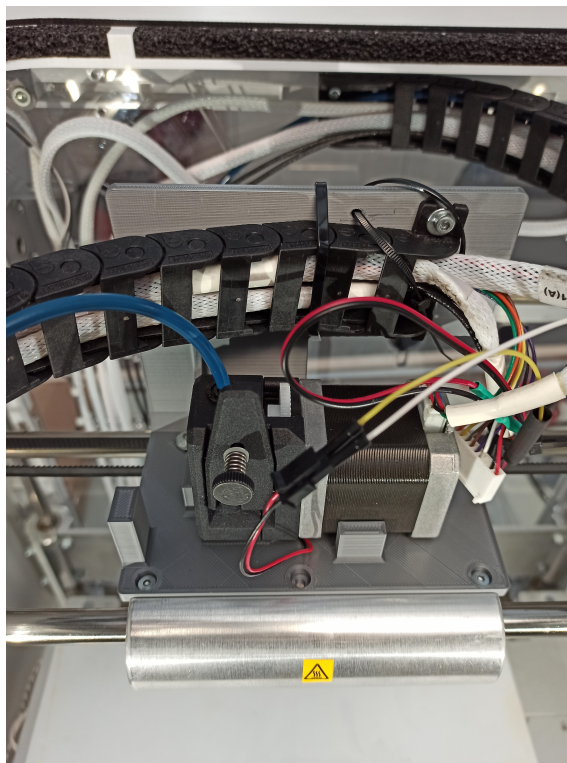


Figura 4.4: Protótipo montado para teste do sistema de extrusão.

Ao longo dos testes, o protótipo sofreu em algumas medidas, pois foi sendo ajustado conforme a necessidade de manter todo o sistema de extrusão o mais estável possível. A figura 4.5 ilustra a última estrutura do suporte impresso em PLA, que foi usada para testes funcionais. Os desenhos técnicos do suporte encontram-se no Anexo B figuras B.1 e B.2.

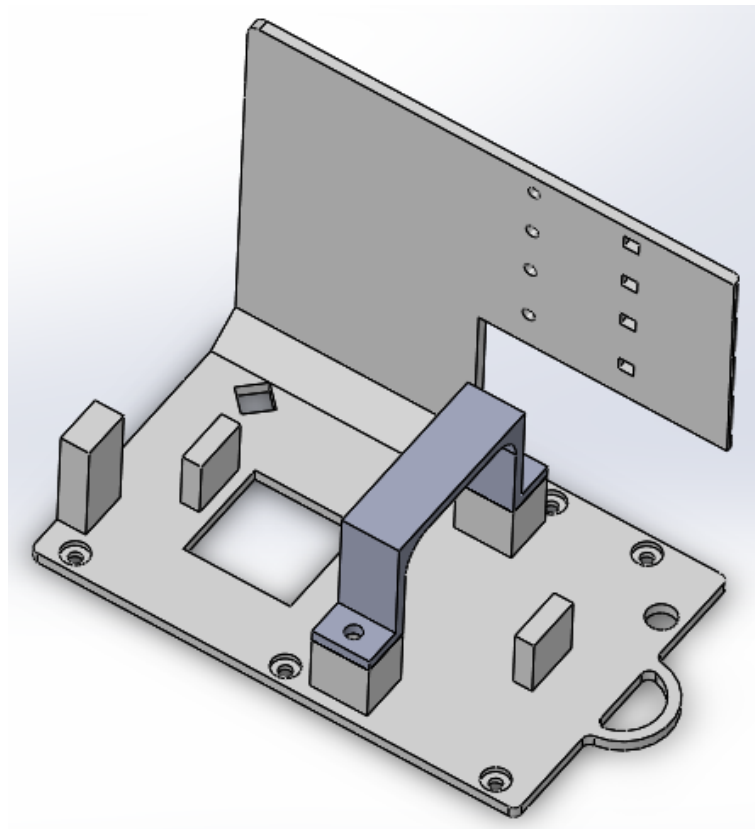


Figura 4.5: *Assembly* do suporte do motor versão PLA.

Realizados todos os testes considerados necessários para verificar a sua funcionalidade, o suporte foi de seguida projetado para ser fabricado pelo processo de quinagem. Inicialmente o suporte estava projetado para ser fabricado por maquinagem, mas devido à sua complexidade, concluiu-se que a melhor opção seria através do processo de corte e quinagem. A figura 4.6 representa o suporte modificado, sendo que foi usado o comando *sheet metal* no *software Solidworks* para desencadear todo o processo.

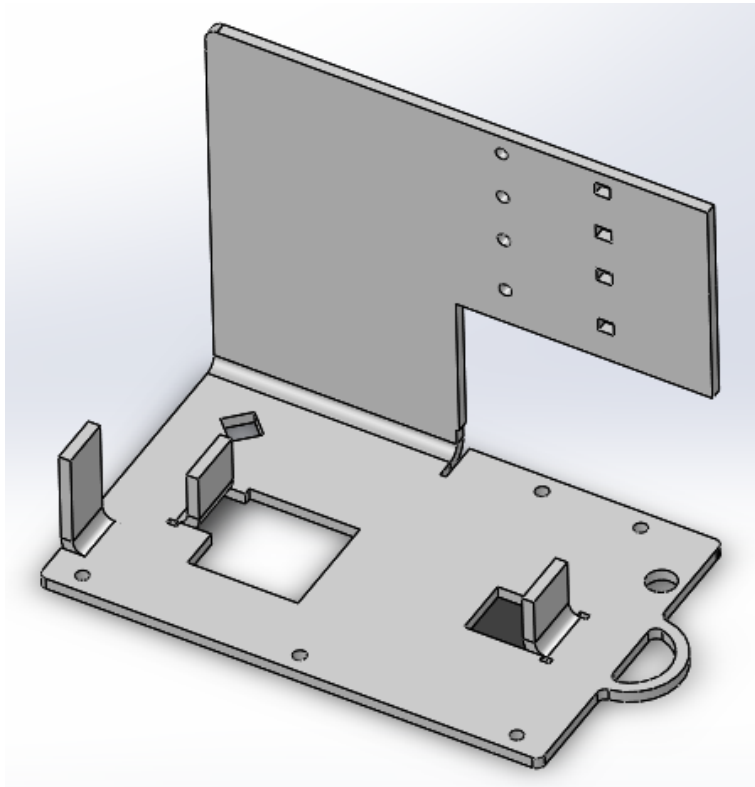


Figura 4.6: Suporte do motor versão *sheet metal*.

O processo pelo qual o suporte foi fabricado passa pelo corte e quinagem de uma chapa de alumínio de 3 mm de espessura. A figura 4.7 representa as dimensões da chapa. O desenho técnico encontra-se no anexo B.3.

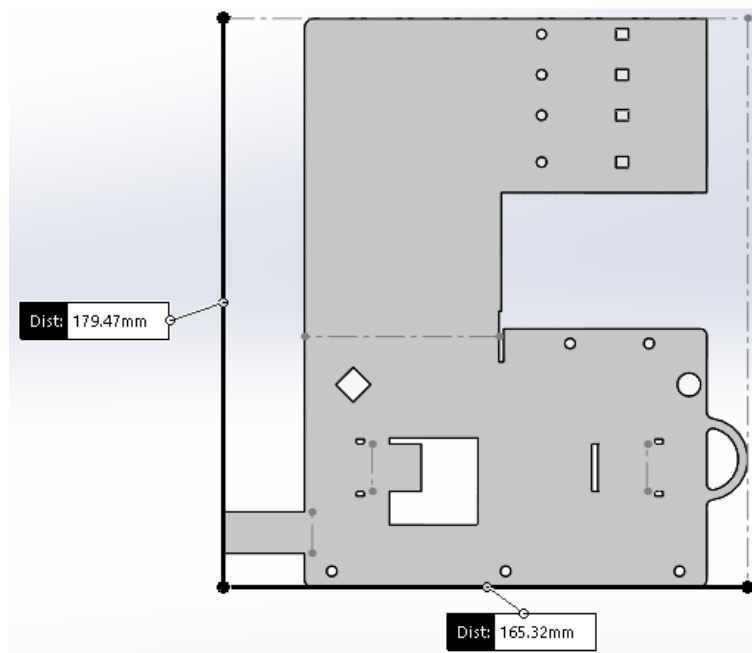


Figura 4.7: Dimensões da chapa.

No terceiro passo foi necessário desmontar a placa inferior da impressora que funciona como meio de proteção para todo o sistema eletrónico da máquina. Esta fase foi a mais complexa do projeto, visto que, se tentava manter o máximo de fios já existentes. Foi necessário estudar todos as ligações existentes para que fosse possível substituir pelas novas.

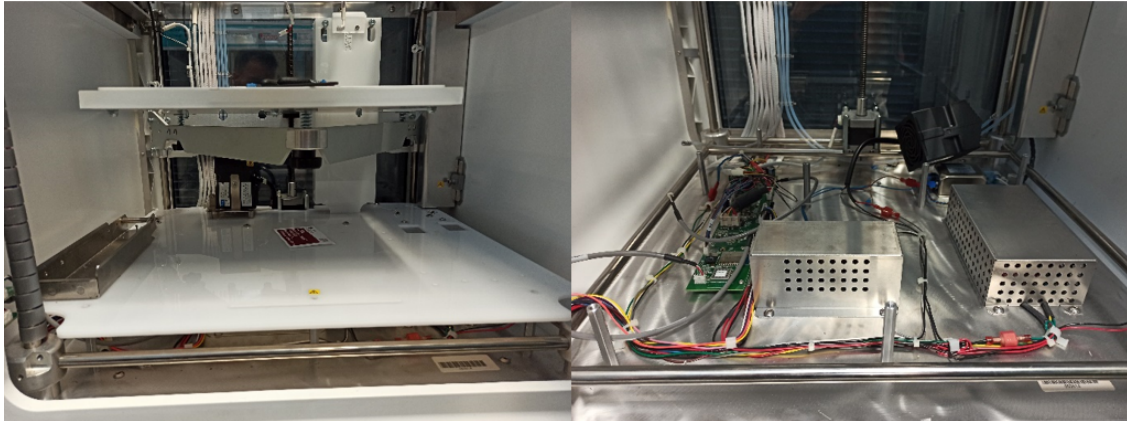


Figura 4.8: Desmontagem da parte inferior da impressora para ter acesso aos componentes elétricos.

Nesta fase já é possível ver todo o circuito elétrico que envolve a impressora. A proteção resguarda todo o sistema eletrónico envolvente na impressora, a qual, uma vez removida é possível ver os cinco principais elementos:

- Redução de ruído (*Noise reduction input*);
- Fonte de corrente 24V DC (*power supply*);
- Relé da placa de controlo;
- Placa de controlo (*main board*);
- Aquecedor.

Novamente é primordial testar todo circuito e as suas ligações para que seja possível retirar todos os cabos e ligações que estejam em excesso de acordo com a atualização idealizada. Para testar todas as ligações foi usado um voltímetro para teste de continuidade do circuito e foram de seguida etiquetados todos os cabos e mudadas as suas fichas, com o intuito de fazer as ligações com a placa de controlo (*Duet 2 Wifi*).

Posteriormente, revistas todas as ligações, foi retirada a antiga placa de controlo para que se pudesse instalar a nova e tornar o sistema num *open source*. Na figura 4.9 pode-se observar que todos os cabos foram devidamente selecionados e todos os que estavam em excesso foram retirados. Nesta fase todos os fios se encontravam montados com as novas fichas, adequadas para conectar com a *Duet*, e etiquetados para quando chegasse a fase de realizar as ligações à placa de

controlo não correr o risco de trocar as ligações e possivelmente queimar a placa de controlo ou algum componente eletrónico da impressora.

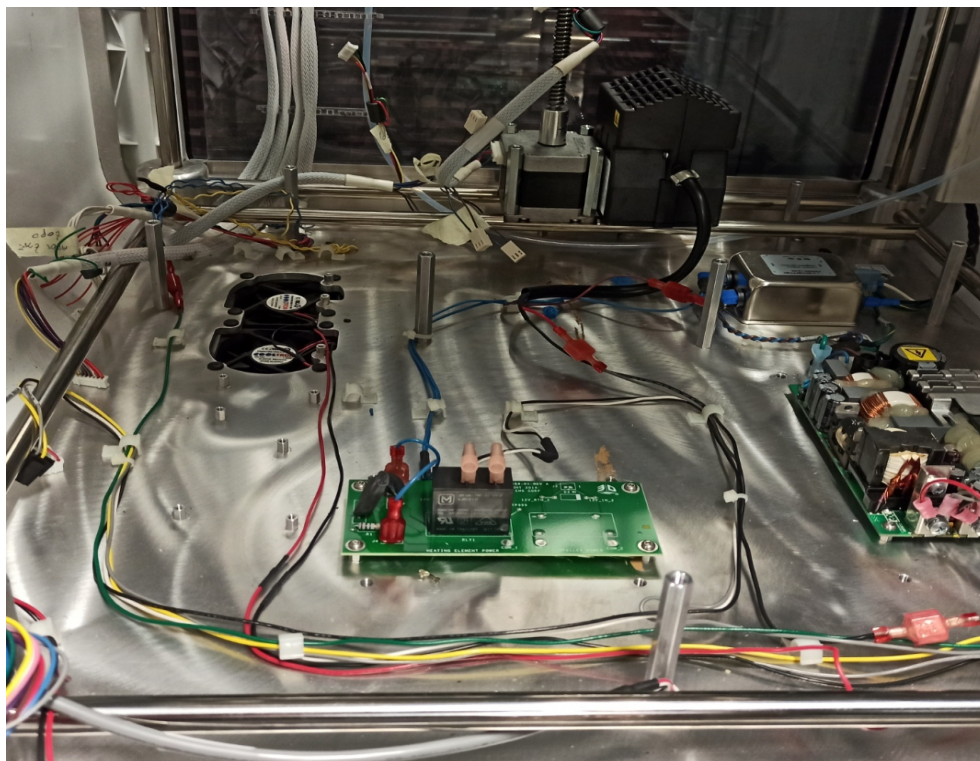


Figura 4.9: Seleção dos fios, teste de continuidade.

4.3 Design suporte *Duet 2 Wifi*

Uma vez que as ligações estavam todas prontas a serem efetuadas, verificou-se que era necessário fixar a nova placa de controlo para que esta tivesse estabilidade suficiente para à posteriori não se deslocar nos testes do novo circuito elétrico. O suporte foi desenhado de acordo com as medidas da placa de controlo e foi colocado cuidadosamente sob as ventoinhas existentes na base da estrutura da Cube, para se efetuar o arrefecimento do circuito prevenindo assim o sobre aquecimento dos componentes elétricos. O design do suporte foi pensado para que a placa tivesse o maior aproveitamento possível do sistema de refrigeração. O desenho técnico do suporte encontra-se em anexo [B.5](#).

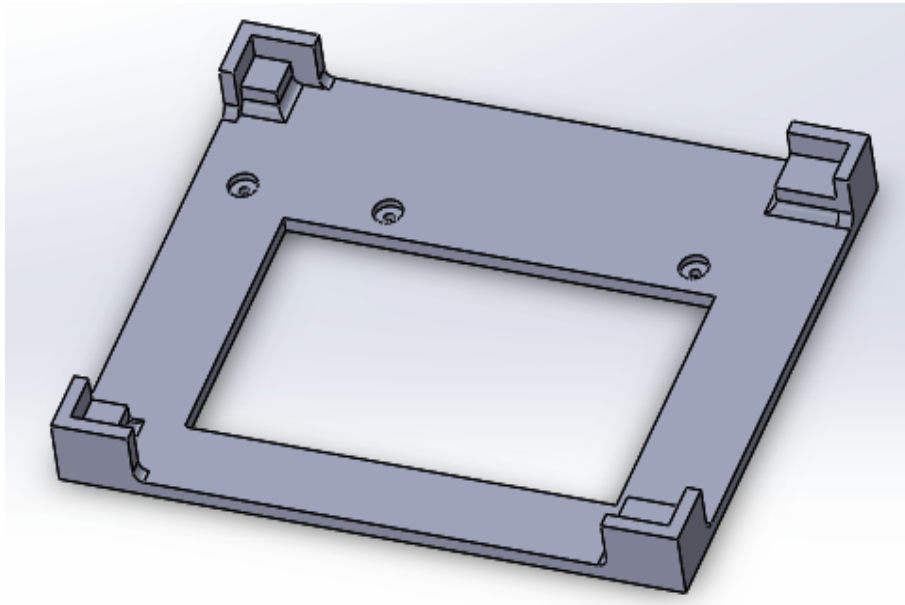


Figura 4.10: Suporte da *Duet 2 Wifi* através do programa *solidworks*.

O suporte, representado na figura 4.10, foi impresso em PLA, para testar a sua aplicação, pois a sua impressão é de maior facilidade ocorrendo um menor risco da peça sair deformada. Testou-se toda a funcionalidade, com o objetivo da peça final ser maquinada em CNC, utilizando uma liga de alumínio maquinável como material.

Na figura 4.11 pode-se observar a estrutura final da parte inferior da impressora, na qual foram alterados alguns componentes, como por exemplo, o acréscimo do relé e a modificação da placa de controlo, mantendo-se a fonte e a ventoinha de aquecimento originais da cube. Resumidamente o lado direito da figura 4.11 foi mantido com os componentes originais, enquanto que, no lado esquerdo foram todos substituídos. Neste passo todas as ligações estavam devidamente efetuadas à placa de controlo, sendo assim possível passar à fase de calibração de todos os parâmetros de controlo para que seja possível obter impressões com boa qualidade.

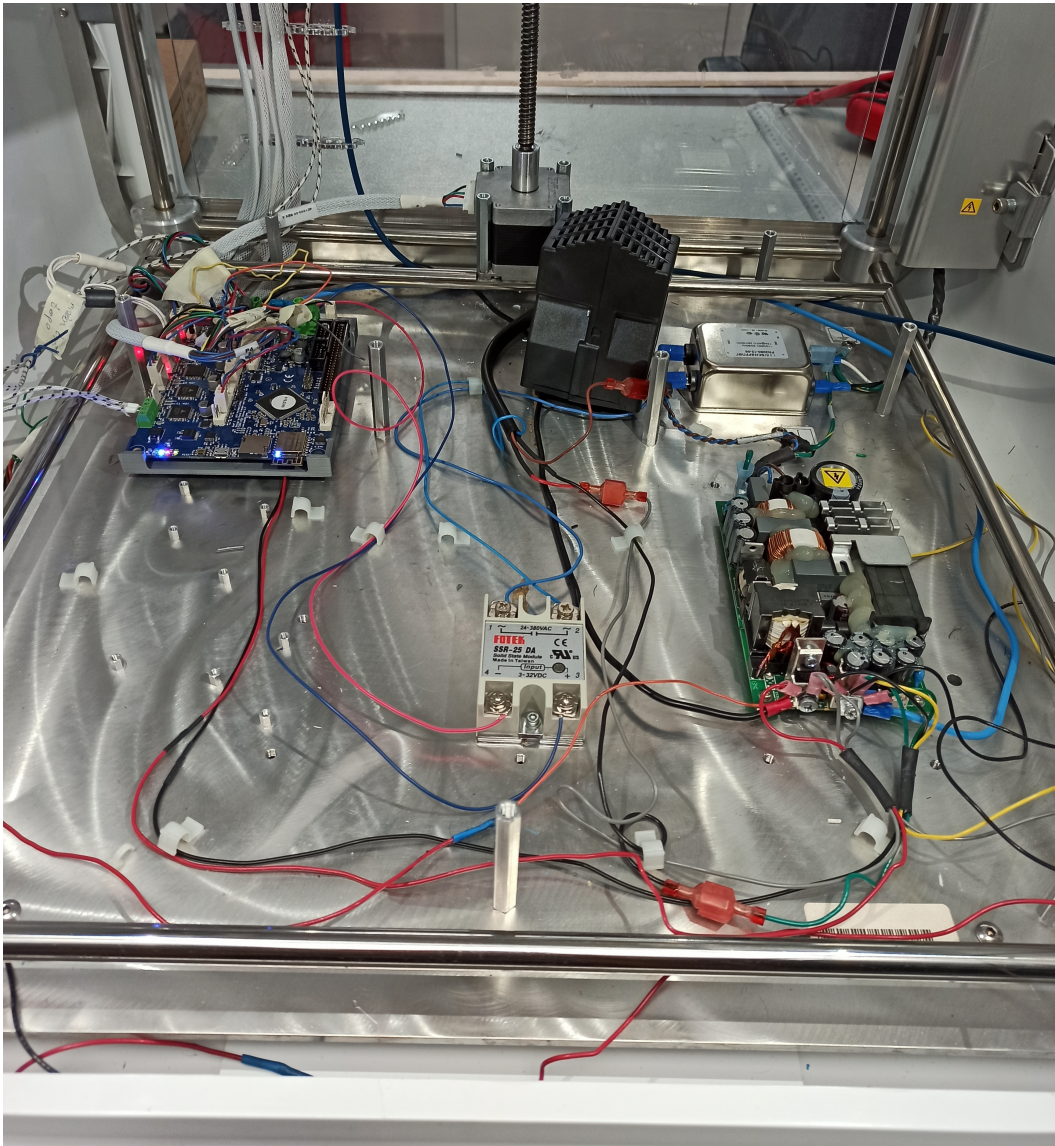


Figura 4.11: Parte inferior da impressora com todas as ligações eletrónicas realizadas.

Eletrónica

A chave para toda a conversão situa-se nesta etapa, a eletrónica dita o sucesso do projeto. Existem variadas e excelentes opções disponíveis no mercado, sendo na maioria conhecidas como *firmware*. Globalmente as mais utilizadas nas impressoras são:

- *Marlin firmware*: Provavelmente este é o mais comum no mundo das impressoras devido à sua compatibilidade com a maioria das placas de controlo. É usualmente a melhor opção para impressoras de baixo custo;
- *Repetier firmware*: Muito semelhante ao Marlin;
- *Smoothieware*: Ideal para alto desempenho;

- *Revolve*: Possui *full HD*, OS e excelente controlador lógico;
- *Duet Wifi*: Fácil de usar, sistema poderoso e conveniente.

Como referido anteriormente, no capítulo 2, foi escolhida a placa de controlo *Duet 2 Wifi* devido às suas características versáteis. Esta placa possui a sua própria *web interface*. É uma grande vantagem pois possibilita que seja enviado o código de controlo a partir de qualquer dispositivo que tenha acesso ao *browser*. Neste caso, usou-se o computador para fazer as calibrações, embora também fosse possível fazer as calibrações diárias através do telemóvel. Esta placa possui a particularidade de remover a necessidade da impressora possuir um LCD. A placa é de fácil configuração e todo o *g-code* é acessível para se trabalhar. Os motores de passo da *Trinamics* estão cada vez mais popularizados e a *Duet Wifi* usa-os. No decorrer do projeto notou-se uma grande diferença na suavidade com que este move os motores, comparado com os *Allegro A4988* ou os *TI DRV8825*.

Alimentação

Foram mantidos os 24V de alimentação de corrente, como é possível verificar na figura 4.11 no canto direito. A corrente nominal é suficiente para os motores e o *hotend* de 24V, o resto do circuito funciona a 12V, como por exemplo, as ventoinhas e outros componentes pequenos.

Como se pode observar na figura 4.11, foi adicionado um módulo de relé de estado sólido. Nesta etapa, foi necessário ter todo o sistema de alimentação e controlo de corrente devidamente montado para prosseguir aos seguintes passos que serão abordados à posteriori.

O relé torna possível controlar através da *board* a temperatura ambiente da impressora que é aquecida por uma ventoinha *Cirrus 60*. Funciona com cargas de até 25A e uma tensão entre 24 e 380 VAC. Na figura 4.12 é possível ver o relé selecionado e a sua respetiva ligação.

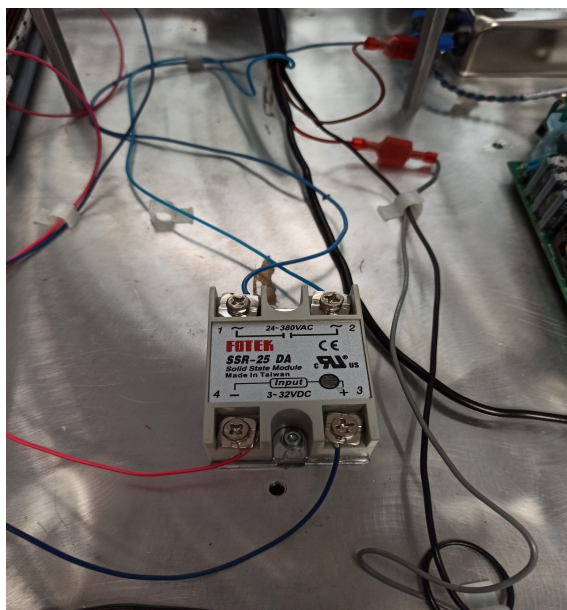


Figura 4.12: Relé estado solido SSR-25.

Interface

Como mencionado anteriormente foi desligado o LCD que vinha na impressora e não foi repostado nenhum no seu lugar. As interfaces utilizadas foram as possibilitadas pela web da *Duet Wifi*, uma solução eficaz que não depende de nenhum *hardware* extra.

A *web interface* é compatível com diferentes tamanhos de ecrãs. O menu e os recursos estão bem categorizados o que facilita a programação dos parâmetros da impressora.

4.4 Reposição da bobine de filamento

Originalmente a impressora incorpora todos os sistemas vitais à impressão, englobando a bobine de filamento do inglês *filament cartridge*, como pode ser observado no anexo C figura C.2. Como o objetivo principal deste projeto passa por transformar a máquina numa *open-source*, implica também a utilização dos diversos tipos de termoplásticos disponíveis no mercado. Termoplásticos que vêm em bobines normalizadas e de diferentes tamanhos das que são disponibilizadas pela *3D Systems*, para esta impressora em específico, a comparação das bobines pode ser constatada no anexo C na figura C.3. Como as novas bobinas de filamento têm dimensões superiores, foi preciso de igual modo pensar numa solução para as reposicionar.

Para aproveitar ao máximo o volume de construção disponível foi projetado um novo sistema de suporte das bobines de filamento. Essa remodelação passa por deixar as bobines no exterior da impressora, como se pode observar na figura 4.13.

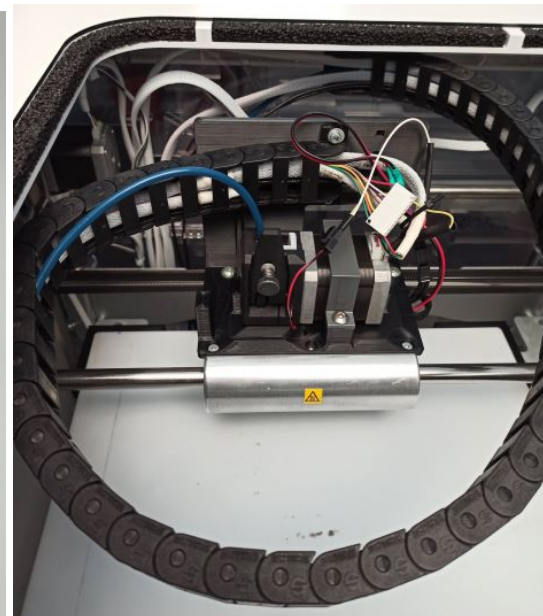


Figura 4.13: Novo sistema de alimentação de filamento.

Foi instalado um tubo *bowden capricorn* para fazer de guia, entre a bobine de filamento até ao módulo de extrusão como é possível averiguar na figura 4.14a e 4.14b.



(a) Tubo *bowden capricorn*



(b) Tubo ligado ao módulo de extrusão.

Como meio de ligação entre o corpo da impressora e o exterior foi projetado um encaixe, figura 4.15a e 4.15b, utilizando uma cavidade já existente na impressora evitando dessa forma

efetuar modificações no exterior da mesma. Nessa cavidade encaixa a peça projetada em ASA, que contém no seu interior um cilindro metálico com rosca, o qual fixa o tubo *bowden*. O desenho técnico do encaixe encontra-se em anexo B figura B.7.



(a) Vista exterior do encaixe.



(b) Vista interior do encaixe.

4.5 Atualização da *Duet*

As placas de controlo são baseadas para processadores de 32 bit, correndo o sistema da *ReprapFirmware*.

Para realizar a atualização da placa de controlo foram seguidos os passos disponibilizados pela própria empresa (47).

4.5.1 Configuração do novo *Firmware*

Como recomendado pela *Duet*, sempre que se pretende utilizar a placa de controlo é importante confirmar qual a versão que vem instalada e se necessário descarregar a nova versão disponível na *Reprap*. Assim, nesta etapa, conectou-se a placa ao computador via USB e, de seguida, instalaram-se as *drives* para se poder aceder à placa.

Para conectar a uma rede de trabalho, foi necessário instalar também um programa que permitisse enviar códigos para a placa de controlo. O programa que foi utilizado para essa interface foi o *YAT*, recomendado para utilizadores do *Windows*. Uma das suas principais vantagens é poder ser descarregado gratuitamente. Depois das *drivers* devidamente instaladas e o *software YAT* estar operacional, configuraram-se as portas COM de forma a conectar o computador com a placa.

Após os programas estarem funcionais, confirmou-se qual a versão do *firmware* que estava instalada na placa de controlo. Estes dados estão ilustrados na figura 4.16.



Figura 4.16: Dados relativos ao *Firmware* instalado e a sua versão.

Para a obtenção do *firmware*, foi enviado o comando M115 para a *Duet*, passado alguns instantes aparece no *display* a versão que está a correr. Possuindo a informação de qual a versão instalada, confirmou-se no portal *Github* se havia algum *firmware* mais recente e caso houvesse, dever-se-ia descarregar e arrastar diretamente para a placa de controlo.

Como foi usada a *Duet 2 Wifi* foi necessário conectar a placa à rede *Wifi* de trabalho. Um pequeno LED de cor azul acoplado na placa, indica quando está devidamente conectada. Foram utilizados os seguintes comandos para a configuração:

- M552 S-1, para desligar o *Wifi* da placa que vem por defeito ativado;
- M552 para confirmar o estado, deverá aparecer *WiFi module is disabled*;
- M552 S0;
- M587, inserir a rede e a passe do *Wifi* que se pretende usar;
- M587 S para confirmar se a rede *Wifi* escolhida esta a funcionar e escolher uma *password*;
- M552 S1 para ativar a conexão via *Wifi* e retirar o endereço IP.

Quando o LED azul no canto da placa de controlo permanecer ligado, significa que a placa foi ligada à rede de trabalho o que permite a utilização da *Duet Web Control* durante os próximos passos.

Após ter sido atribuído o novo IP - 192.168.1.119, foi possível aceder à interface do *firmware da Duet*, inserindo o número do IP associado à placa de controlo em qualquer programa de navegação. Sendo assim, possível aceder à interface criada pela *Duet*, a *Duet Web Control* como mostra a figura 4.17.

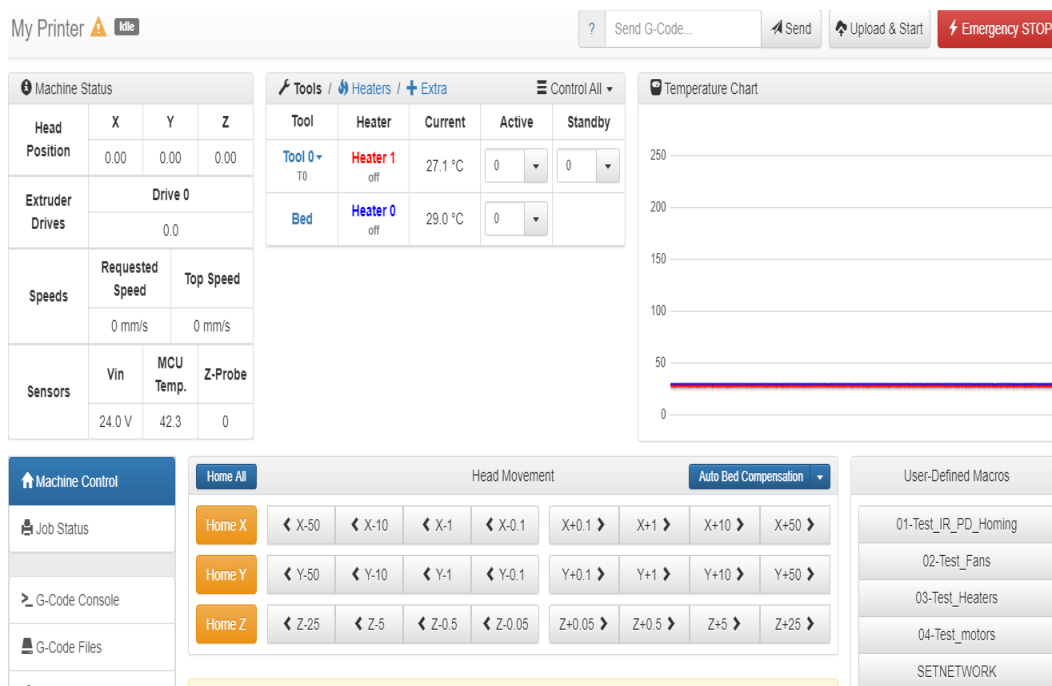


Figura 4.17: Interface criada pela *Duet 2 Wifi*.

O código G pode ser enviado através da *interface Duet Web Control*, via USB, utilizando o programa *Pronterface* ou através de um controlador externo como é o caso do ecrã *PanelDue*. Uma das possíveis formas de configurar facilmente a impressora sem necessitar de editar o código G é a utilização do *website* de configuração disponível pela *RepRap*. Com esta ferramenta de configuração *online* foi possível a introdução de todos os dados relativos à impressora sem necessidade de interpretar todo o código G. Os dados utilizados para controlar a impressora encontram-se em código G, no ficheiro “*config.g*” da interface de trabalho da *Duet*. Todos os códigos estão disponíveis em anexo [A.2](#).

4.6 Configuração dos parâmetros de impressão

4.6.1 Endstops

Para ter perceção dos limites da mesa de construção existem os *Endspots*, que fornecem à *board* a informação de quando está no limite e assim deverá cortar a corrente aos motores de forma a suspender o movimento. Para esta calibração, começou-se por fazer manualmente e com uma corrente dos motores bastante reduzida para prevenir o risco de um dos *endstops* não estar em funcionamento e consecutivamente queimar os motores de passo. Os limites máximos utilizados neste projeto estão na tabela [4.1](#).

Tabela 4.1: Limites máximos de deslocação dos motores.

Eixo cartesiano	Limite máximo (mm)
X	270
Y	290
Z	180

4.6.2 Nivelção da base de construção

Durante a utilização da máquina, a operação de calibração mais decorrente será sempre garantir a correta nivelção da base de construção. É de extrema importância garantir que se obtém uma distância correta do bico extrusor em toda a área da base. Só assim pode-se obter uma boa deposição e adesão da primeira camada de filamento na qual é crucial para o sucesso de qualquer impressão. Se não houver nenhuma falha ou se por ventura houver a necessidade de trocar o bico extrusor esta é a única calibração que se deve repetir com frequência. Após várias impressões efetuadas é normal ter de repetir todo o processo de calibração.

A nivelção da base é realizada manualmente através de três parafusos de ajuste com auxílio de uma mola na parte inferior do suporte, como é possível observar na figura 4.18.

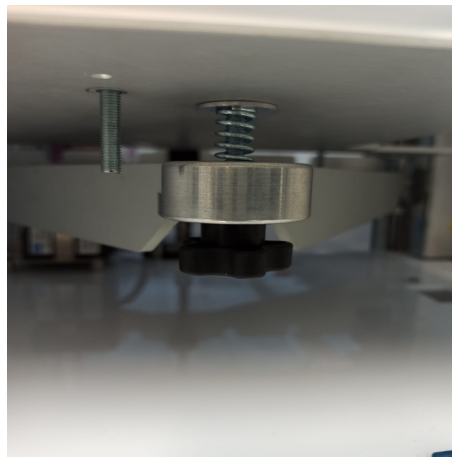


Figura 4.18: Parafuso de ajuste da nivelção da base de construção.

Para manter a distância correta entre o bico e a base de construção foi necessário elevar a base. O processo mais rápido e simples para contornar este problema foi criar três retângulos, figura 4.19, de 13 mm de altura por 50 mm de comprimento. Os mesmos foram colocados entre a plataforma e a base de construção, com furações no seu centro para que passasse um parafuso que serve como meio de fixação entre a base inferior da plataforma e encosta ao ímã da mesa para tornar todo o sistema fixo.

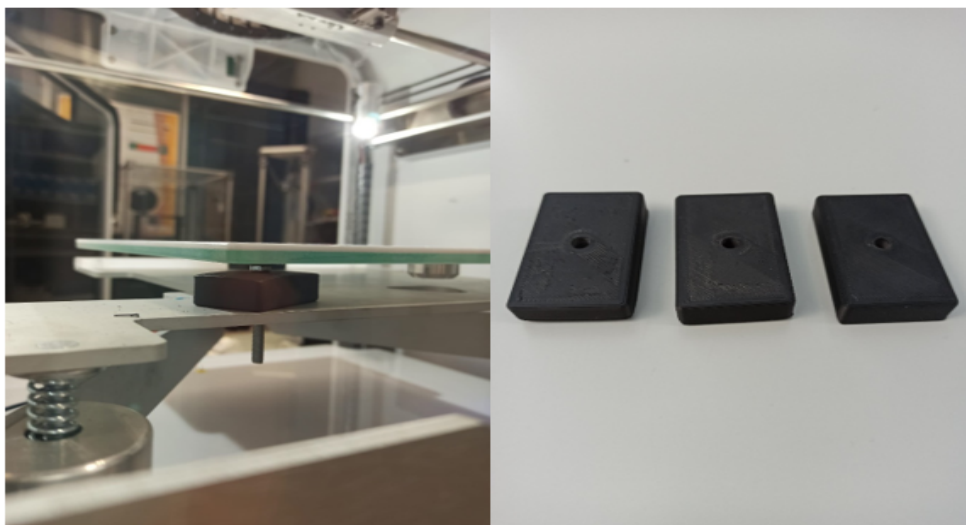


Figura 4.19: Base elevada através dos retângulos de 13mm de altura.

Após efetuadas algumas impressões verificou-se que a plataforma de construção estava bastante instável e provocava deformações na peça imprimida. Uma nova solução, figura 4.20, foi encontrada para manter a base mais estável. Foram adicionados aos retângulos um rebordo, para que a mesa de construção encaixasse e impedisse a deslocação nos eixos X e Y. Esta melhoria facilita não só, na fase de calibração da mesa, como também facilita remoção da peça impressa.

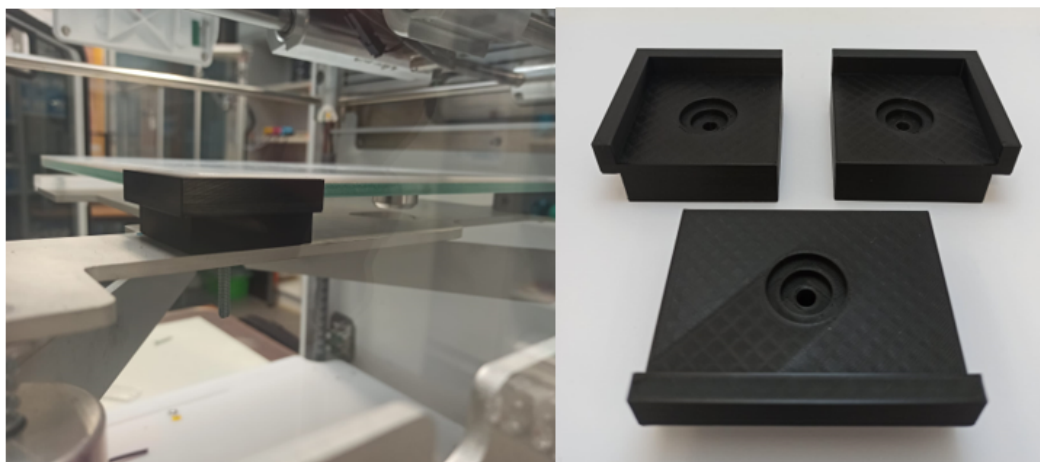


Figura 4.20: Protótipo final da elevação da base de construção.

Este procedimento foi necessário pois o novo módulo de extrusão é mais curto do que o original da impressora como pode ser observado no capítulo 3 na figura 3.1.

4.6.3 Calibração dos motores passo-a-passo de movimentação

É necessário assegurar que os microcontroladores (*drivers*) dos motores passo-a-passo forneçam a tensão correta para os motores. Uma baixa voltagem poderá causar a falha de passos,

enquanto, por outro lado, uma tensão alta provocará sobreaquecimento dos motores. Como os motores de movimentação deste projeto não foram alterados, recorreu-se à *datasheet* dos mesmos para saber qual a corrente nominal correta a aplicar nos motores passo-a-passo, como é possível constatar na figura 4.21. Nos motores dos eixos X e Y aplicou-se uma tensão de 900 (mA) e no eixo Z de 800 (mA).

```
M203 X6000.00 Y6000.00 Z1200.00 E1800.00 ; set maximum speeds (mm/min)
M201 X500.00 Y500.00 Z250.00 E250.00 ; set accelerations (mm/s^2)
M906 X900 Y900 Z800 E900 I30 ; set motor currents (mA)
```

Figura 4.21: Tensão aplicada nos motores.

4.6.4 Calibração do motor do módulo de extrusão

O processo de calibração do motor de passo-a-passo do módulo de extrusão é semelhante ao utilizado no módulo de movimentação nos eixos X e Y uma vez que o motor é da mesma classe (Nema 17). Foi aplicado de igual modo uma tensão de 900 (mA) para manter o seu correto funcionamento.

4.6.5 Teste dos *heaters*

Configuração das constantes de controlo dos parâmetros de aquecimento. Numa fase inicial é necessário fornecer ao *firmware* as constantes de controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativa) para cada um dos sistemas de aquecimento - a câmara de construção aquecida (H0) e o bico extrusor (H1). Este é um parâmetro necessário para aproximar a curva de aquecimento o mais rapidamente possível da temperatura alvo. Uma vez que não se sabe o valor exato, é possível, com a utilização da funcionalidade *auto-tuning*, obter estes valores.

Após a montagem de todo o sistema de aquecimento procedeu-se ao teste dos devidos equipamentos para testar a sua funcionalidade.

O primeiro teste foi efetuado à temperatura ambiente apenas com o propósito de verificar se a leitura dos termistores estava correta. Confirmada essa leitura passou-se de seguida ao aquecimento da câmara da impressora e ao aquecimento do bloco de extrusão. O primeiro teste foi realizado a temperaturas relativamente baixas, com 40°C para a câmara e 80°C no bloco.

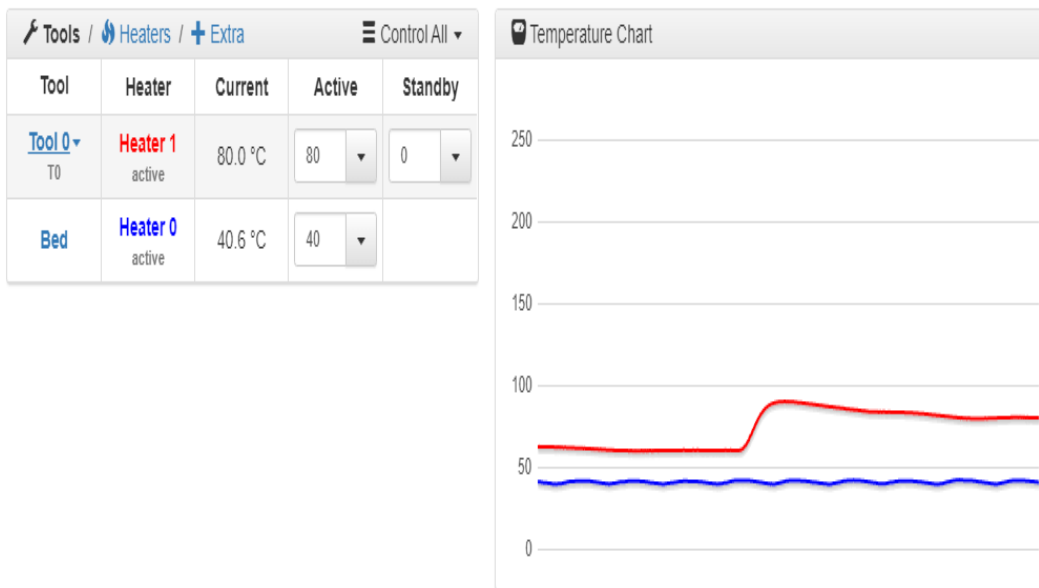


Figura 4.22: Teste dos heaters.

Como é possível constatar na figura 4.22 tanto o *heater 1* como o *heater 0* foram ativos. Pode-se então constatar que ambos aqueceram à temperatura desejada com a variante do *heater 1* aquecer primeiro até aos 90°C e só depois, passado aproximadamente 2 minutos, a temperatura estabiliza nos níveis ordenados. Com os devidos ajustes nos parâmetros do código G, foi possível controlar a temperatura mantendo-a estável e assim concluir que é possível obter uma temperatura controlada no interior da Cube.

4.6.6 Calibração da alimentação de filamento

Neste tipo de processo, FDM, o material em forma de filamento é "empurrado" pelo motor de alimentação ou pelo extrusor. Esses motores empurram o filamento através de um bico aquecido que funde o material e posteriormente deposita-o na plataforma de construção. Como referido no capítulo 2 é necessário que o bico se encontre à temperatura indicada para que permita a fusão do polímero, temperatura essa que varia de acordo com o tipo de polímero que se esteja a utilizar. É de igual importância que os extrusores forneçam a quantidade correta de filamento.

Para teste inicial usou-se, como se pode observar na figura 4.23, a extrusão livre de filamento para ter a percepção de como o filamento era extrudido.



Figura 4.23: Teste da alimentação do filamento com um bico de 0.4mm.

O perfil retilíneo do filamento extruído é uma forma empírica de se observar que a calibração está correta. A calibração desse filamento foi obtida de forma iterativa (16).

A calibração da alimentação de filamento é realizada em duas partes:

- Calibração dos motores passo-a-passo do módulo de extrusão;
- Calibração de alimentação no *firmware*.

Calibração da alimentação no *firmware*

Garantido a calibração dos drivers dos motores passo-a-passo, é necessário que os alimentadores de filamento forneçam a quantidade exata de filamento. Para isso com ajuda de um paquímetro digital mediram-se 100 mm no filamento e marcaram-se no mesmo. De seguida no *software* de controlo, envia-se o comando de extrusão de filamento de 100 mm. Volta-se a medir para confirmar se realmente extruiu os 100 mm, e em caso de necessidade, é ajustado esse valor de passos por mm do extrusor de alimentação nas definições do *firmware*. Este procedimento é realizado com a regra de três simples, onde o novo valor de passos por mm é obtido através do valor de passos existente no *firmware* multiplicado por 100 mm a dividir pelo o valor extruído de filamento obtido na medição anterior. Este processo é executado até que o extrusor, extruda o mais aproximadamente possível dos 100 mm.

Obtendo o valor indicado de passos por mm, esse valor é então alterado no *firmware*, figura 4.24, ou então diretamente através da *interface* do *software* de controlo (Duet 2 Wifi).

```
M92 X87.9 Y87.9 Z1066.67 E420,9 ; set steps per mm  
M566 X900.00 Y900.00 Z12.00 E120.00 ; set maximum instantaneous speed  
M203 X6000.00 Y6000.00 Z1200.00 E1800.00 ; set maximum speeds (mm/min)
```

Figura 4.24: Definição dos passos/mm no *firmware*.

Capítulo 5

Resultados obtidos

Após realizadas todas as alterações na impressora, foram impressas várias peças para testar a sua funcionalidade e obter conclusões relativamente ao seu desempenho.

A figura 5.1 é referente às primeiras impressões efetuadas após a atualização de todo o sistema. Foi usado o mesmo ficheiro *gcode* nos três casos, uma caixa com as dimensões de 20 x 20 mm. As impressões realizaram-se a uma velocidade de 50 mm/s com a câmara aquecida a 35°C.



Figura 5.1: Primeiras impressões realizadas na CubePro.

Na tabela 5.1 estão representados os comprimentos obtidos em milímetros dos diferentes eixos de construção.

Tabela 5.1: Medições das caixas nos diferentes eixos em milímetros.

Caixa	Eixo X (mm)	Eixo Y (mm)	Eixo Z (mm)
1º	20,23	20,21	10,64
2º	20,07	20,06	12,59
3º	20,04	20,06	19,7

A tabela 5.2 apresenta a altura que foi impressa em cada caixa, bem como a percentagem que a impressora realizou quando comparado com o que se modulou. Isto permitiu verificar que o eixo com maior problema é o eixo Z.

Tabela 5.2: Medições do eixo Z.

Caixa	Eixo Z (mm)	Taxa de construção (%)
1º	10.64	53.2
2º	12.59	62.95
3º	19.7	98.4

Nas duas primeiras impressões, verificou-se que a impressora não realizou a leitura completa do código para obter o modelo criado em *software*. Sendo possível averiguar que o problema reside na altura da peça, no eixo Z da máquina. Os motivos que podem ter levado a que isso acontecesse são diversos. Embora os mais comuns nas impressoras de baixo custo sejam:

- Escorregamento do filamento. Este acontecimento pode ter levado ao entupimento do sistema de extrusão e conseqüentemente à falha de deposição de material (38);
- Dificuldade em calibrar a distância entre o bico e a plataforma de construção. A altura entre a base e o bico deve ser de aproximadamente 0,2 mm (48). Neste projeto, houve bastante dificuldade em conseguir ajustar essa calibração podendo ocorrer riscos, como a colisão entre o bico e a base ou a falha na adesão das primeiras camadas construídas à base.

Após a correção dos problemas mencionados foi possível proceder à impressão de objetos com maior dimensão e alta qualidade superficial, como é possível constatar na figura 5.2.

As impressões foram realizadas a uma velocidade de 50 mm/s com uma altura de camada de 0,2 mm e um bico de 0,4 mm. O material utilizado nas primeiras impressões foi o PLA.

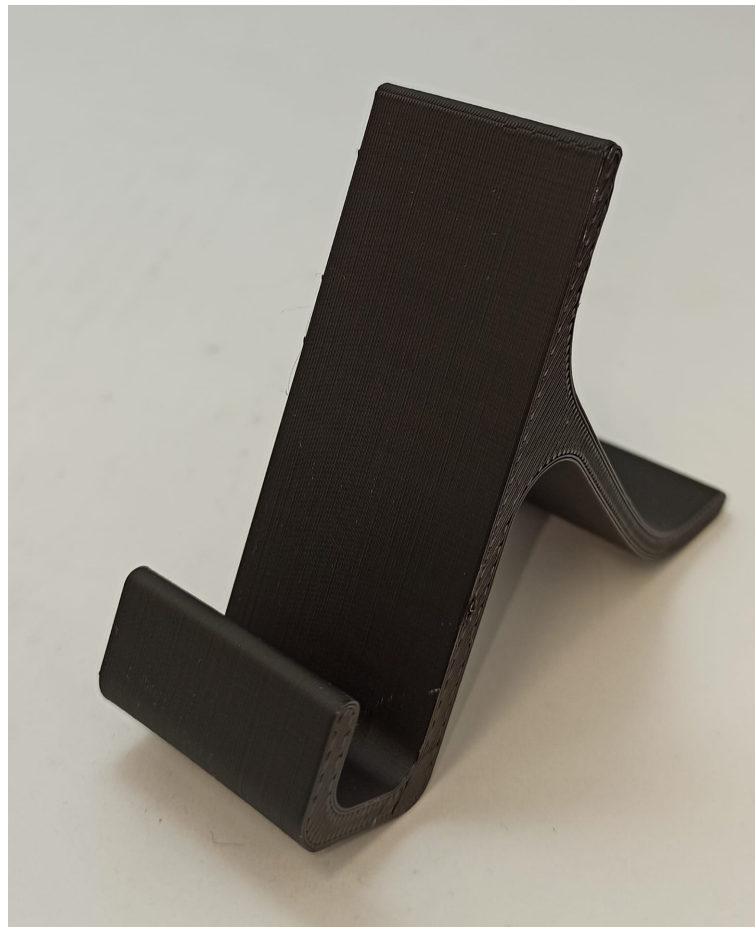


Figura 5.2: Impressão 3D de um suporte para *smartphones*.

Para estabelecer uma comparação entre diferentes impressoras foi realizada uma impressão. Na figura 5.3, pode-se observar que existem duas peças impressas. A da esquerda foi impressa na CubePro, enquanto que a da direita foi impressa numa impressora Ender. Desta forma, é possível constatar que a principal diferença está no acabamento superficial. A peça impressa na CubePro apresenta melhores detalhes nos acabamentos, visualizando-se uma menor espessura entre camadas, enquanto que na peça impressa pela Ender pode-se visualizar as diversas camadas de construção.



Figura 5.3: Comparação de impressões.

Com a finalidade de testar velocidades mais elevadas foi também impresso um vaso (figura 5.4) com 75 mm de altura. Para tal, foi usada uma velocidade de 70 mm/s. Como é possível observar no topo do vaso a impressão começou a desfigurar. Este fenómeno pode ser explicado pela elevada velocidade a que se estava a imprimir ou por uma possível anomalia no arrefecimento. Quando se imprime uma peça com diâmetro reduzido a elevada velocidade este fenómeno pode acontecer.



Figura 5.4: Impressão de um vaso para testes de detalhe.

Para testes de qualidade foram impressas várias peças (anexo A figura A.10). Durante a observação da extrusão do material em zonas mais complexas e na verificação da qualidade superficial das peças, constata-se que o material não solidificou totalmente, o que provocou defeitos visuais nas peças. Para solucionar isto seria fundamental a implementação de uma ventoinha que transmitisse o fluxo de ar através de um canal, arrefecendo o material à saída do bico de extrusão, sem provocar alterações significativas da temperatura no interior do bico extrusor. Caso o fluxo de ar fosse de tal forma intenso ao ponto de provocar o arrefecimento do bico extrusor, podia ocorrer o entupimento deste por diminuição precoce da temperatura do filamento.

O acréscimo desse canal de arrefecimento poderia resolver o problema referido na figura 5.4.

Estado atual da impressora

Na tabela 5.3 estão referidos os principais componentes existentes no corpo da CubePro, representando assim o atual estado da impressora.

Tabela 5.3: Software e hardware do estado atual da impressora CubePro.

Software/Hardware	Descrição
Software de interface	Duet Web Control
Firmware	Duet Wifi 2.05.1
Placa de controlo	Duet 2 Wifi
Drivers dos motores de passo-a-passo da movimentação	TMC2660
Motores de passo-a-passo	Nema 17 eixo X e Y Nema 23 eixo Z
Bico extrusor	Mosquito hotend
Extrusor	Bondtech BMG-M
Mesa de construção	Vidro coberto por 3 mm de <i>sheet glue</i>
Câmara aquecida	Cirrus 60
Sensor de temperatura	Termístor NTC 100K
Volume de impressão	270 x 280 x 230 (mm)

A figura 5.5 apresenta o estado final da impressora onde é possível ver o novo módulo de extrusão bem como os suportes de elevação da base. A parte inferior - eletrónica - já se encontra protegida pela placa de acrílico.

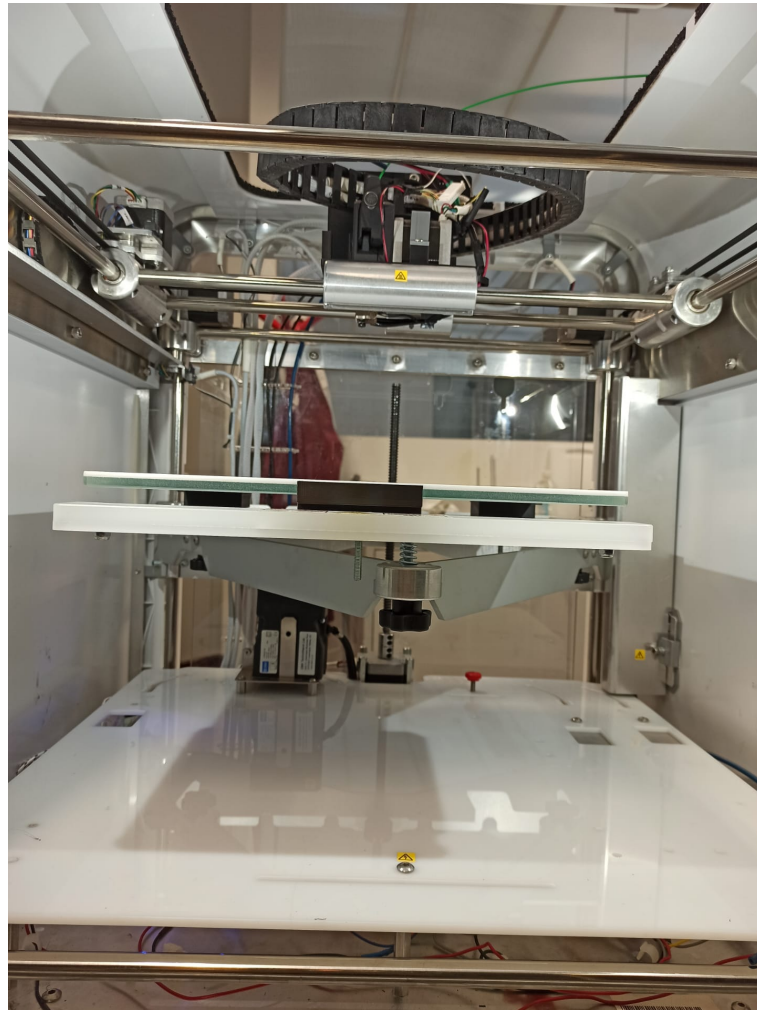


Figura 5.5: Estado final na impressora.

A mesa de construção original da impressora foi mantida, pois esta apresenta boa adesão do filamento nas primeiras camadas quando se utiliza PLA como filamento. Porém, para outros filamentos, como por exemplo, ABS ou ASA é necessário usar uma cola aderente para facilitar adesão do material nas primeiras camadas de construção.

Devendo-se assim ponderar a possibilidade de alterar a mesa existente para uma mesa com base aquecida, o que melhora significativamente o desempenho da máquina.

5.1 Sistema de refrigeração

Como foi proposto o uso de mesa aquecida é de elevado interesse rever o sistema de refrigeração.

Como sistema de refrigeração existem duas possibilidades, o uso de ventoinhas de alto desempenho ou um sistema de refrigeração líquido. Ambos devem ser colocados nos locais mais necessitados, como por exemplo, o motor do extrusor, o *hotend* e a *board*.

O uso de ventoinhas, embora seja o mais comum e possivelmente o mais rápido de instalar, não

demonstra ser o mais eficaz. Os sistemas de refrigeração líquida foram montados pelas empresas em impressoras 3D semelhantes *Dyze design e Formtech*.

Filamentos tipo PET, PEEK, PSU ou outros polímeros mecanicamente mais resistentes necessitam de temperaturas da base de construção bastante elevadas, alguns na ordem dos 200°C. Como o presente trabalho envolve uma impressora de câmara fechada, todo o sistema de extrusão encontra-se dentro do ambiente aquecido. Consequentemente, os componentes mais críticos estão sujeitos a temperaturas elevadas e podem prejudicar a qualidade de impressão. A maior parte dos motores de passo-a-passo vêm com uma isolamento térmica própria, pois estes possuem classes de isolamento de acordo com os materiais com que são construídos. A classe mais comum é a classe B, em que os motores são projetados para trabalhar quentes, com tolerância a uma temperatura máxima até 130°C. Isto significa que a temperatura exterior do motor de passo-a-passo pode chegar aos 90°C ou mais, antes da falha. Estes motores de passo são projetados para operar a altas temperaturas, devido ao facto de serem controlados por sistemas de malha aberta ou do inglês *open-loop*. A tabela 5.4 apresenta as diferentes classes de motores e a sua temperatura máxima de funcionamento.

Tabela 5.4: Classe dos motores

Categoria de isolamento	Temperatura máxima (°C)
Classe A	105
Classe B	130
Classe F	155
Classe H	180

Ainda que, os motores aguentem altas temperaturas, há outros materiais que se devem ter em consideração, apesar de serem mecanicamente menos visíveis apresentam preocupações. Engrenagem, rolamentos e outros elementos rotativos terão uma vida útil bastante reduzida, uma vez que a maior parte das ligas e revestimentos de superfícies não são projetados para trabalhar constantemente a altas temperaturas. No entanto, neste projeto a temperatura ambiente foi estabelecida para 60°C (temperatura máxima atingida pelo sistema de aquecimento), o que torna uma ventoinha apta para arrefecer partes críticas. Uma ventoinha de alto desempenho aguenta temperaturas até 85°C, o que possibilita a utilização de uma mesa aquecida. Todavia, um sistema de refrigeração líquido pode trabalhar além dessa temperatura, sendo uma mais valia, e portanto, o mais indicado.

Como referido, se o objetivo for imprimir com materiais mecanicamente mais resistentes, possivelmente terá que se rever o sistema de refrigeração. Um sistema de refrigeração bem elaborado possibilita trabalhar a temperaturas mais elevadas mantendo os componentes mais críticos a baixas temperaturas.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

A utilização de processos de fabrico aditivo é, cada vez mais, alvo de um forte estudo e investigação, sendo atualmente considerado um processo de produção de produtos finais. Desta forma, evidencia-se a importância do estudo e desenvolvimento desta tecnologia.

As impressoras tipo CoreXY distinguem-se das restantes, pelo facto de possuírem um sistema de eixos que permite o controlo preciso nos eixos X e Y, quando comparadas com as impressoras convencionais. Estas apresentam uma cinemática de movimentação paralela com os motores fixos na estrutura, conhecida por permitir maiores velocidades de movimentação.

O trabalho realizado, nesta dissertação, consistiu no desenvolvimento de um equipamento de impressão 3D por extrusão de filamento. Esse equipamento foi uma impressora 3D tipo CoreXY do Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços.

Foram estudados todos os módulos da impressora, de modo a possibilitar impressões dos diversos tipos de termoplásticos com a qualidade desejada. Assim, realizaram-se algumas alterações com o objetivo de melhorar alguns sistemas.

Alterou-se o mecanismo de extrusão de modo a garantir maiores temperaturas no *hotend* e um melhor controlo de precisão da alimentação de filamento, evitando o problema de escorregamento do mesmo.

O sistema de controlo foi substituído por uma placa de maior capacidade de processamento e com *stepper drivers* integrados de melhor resolução. Com esta atualização, conseguiu-se uma movimentação mais silenciosa e precisa dos motores de passo-a-passo. As peças impressas apresentaram uma boa qualidade superficial, com especial relevância na impressão de peças complexas.

A mesa de construção foi adaptada ao novo módulo de extrusão, de forma a tornar a calibração o mais rápida e precisa possível.

Decidiu-se colocar a bobine de alimentação fora da impressora de forma a otimizar o volume de construção.

Os parâmetros relativos à impressora CoreXY foram calibrados, contudo, estes não foram suficientes para a eliminação completa de defeitos superficiais. Para se conseguir melhorar a impressão, seria necessário implementar um sistema de arrefecimento do filamento à saída do bico extrusor.

Concluindo, esta dissertação permitiu resolver os problemas inicialmente identificados. Com a instalação dos novos componentes verificou-se que a impressora ficou com melhores propriedades. Os motores de passo-a-passo tornaram-se muito mais silenciosos e o novo módulo de extrusão permitiu atingir temperaturas elevadas possibilitando a impressão de uma vasta gama de termoplásticos.

6.2 Trabalhos Futuros

Realizadas todas as modificações, inicialmente propostas na impressora, existem ainda atividades que seriam interessantes levar a cabo, de forma a dar solução a vários problemas identificados. São sugeridos como trabalhos futuros:

- Instalação de uma ventoinha junto ao bico extrusor para melhorar o acabamento superficial das peças impressas;
- Modificar a mesa de construção, alterando-a para uma mesa de base aquecida. Facilitando, dessa forma, a impressão de termoplástico mecanicamente mais resistentes;
- Instalar um sistema de refrigeração líquido ou com ventoinhas de alto desempenho, de forma a proporcionar longevidade e repetibilidade. Seria útil verificar todo o sistema de refrigeração dos componentes vitais à impressão e remodelar todo o sistema de forma a otimizá-lo.

Anexo A

Anexo A

A.1 Duet 2 Wifi

Gráfico usado para realizar todas as ligações da placa.

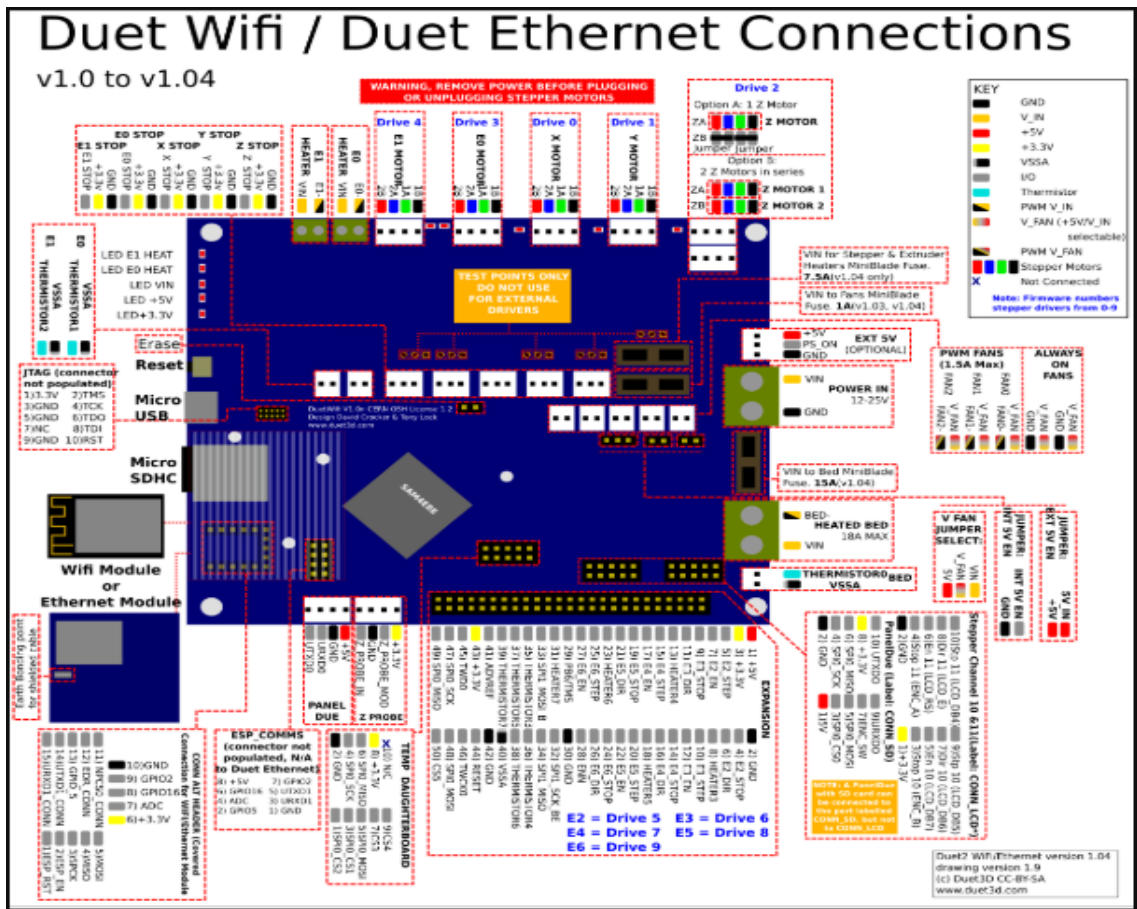


Figura A.1: Duet 2 wifi wiring.

A.2 G-Code

G-code utilizado na calibração da impressora.

```

; Configuration file for Duet WiFi (firmware version 2.03)
; executed by the firmware on start-up
;
; generated by RepRapFirmware Configuration Tool v2.1.8 on Mon Mar
09 2020 16:29:13 GMT+0000 (Hora padrão da Europa Ocidental)

; General preferences
M208 X0:20 Y0:20 Z0:20
M83 ; ...but relative extruder moves
M550 P"My Printer" ; set printer name
M111 S0 ; Debugging off
G21 ; Work in millimetres
G90 ; Send absolute coordinates...
M555 P2 ; Set firmware compatibility to look like Marlin
M208 X0 Y0 Z0 S1 ; Set axis minima
M208 X300 Y290 Z180 S0 ; set axis maxima

; Network
M552 S1 ; enable network
M586 P0 S1 ; enable HTTP
M586 P1 S0 ; disable FTP
M586 P2 S0 ; disable Telnet

; Drives
M569 P0 S1 ; physical drive 0 goes forwards
M569 P1 S1 ; physical drive 1 goes forwards
M569 P2 S1 ; physical drive 2 goes forwards
M569 P3 S1 ; physical drive 3 goes forwards
M584 X0 Y1 Z2 E3 ; set drive mapping
M350 X16 Y16 Z16 E16 I0 ; configure microstepping with
interpolation
M92 X87.9 Y87.9 Z1066.67 E420,9 ; set steps per mm
M566 X900.00 Y900.00 Z12.00 E120.00 ; set maximum instantaneous
speed changes (mm/min)
M203 X6000.00 Y6000.00 Z1200.00 E1800.00 ; set maximum speeds (mm/min)
M201 X500.00 Y500.00 Z250.00 E250.00 ; set accelerations (mm/s^2)
M906 X900 Y900 Z800 E900 I30 ; set motor currents (mA) and

```

```

                                     motor idle factor in per cent
M84 S30                               ; Set idle timeout

; Endstops
M574 X1 Y2 Z2 S0                       ; set active low and disabled endstops

; Z-Probe
M558 P0 H5 F120 T6000                   ; disable Z probe but set dive h
                                     eight, probe speed and travel speed
M557 X15:215 Y15:195 S20               ; define mesh grid

; Heaters
M305 P0 T100000 B3950 R4700             ; set thermistor + ADC parameters for heater 0
M143 H0 S60                             ; set temperature limit for heater 0 to 120C
M305 P1 T500000 B3800 R4700            ; set thermistor + ADC parameters for heater 1
M143 H1 S280                           ; set temperature limit for heater 1 to 280C

; Fans
M106 P0 S0 I0 F500 H-1                 ; set fan 0 value, PWM signal inversion and
                                     frequency Thermostatic control is turned off
M106 P1 S1 I0 F500 H1 T45              ; set fan 1 value, PWM signal inversion and
                                     frequency Thermostatic control is turned on

; Tools
M563 P0 D0 H1 F0                         ; define tool 0
G10 P0 X0 Y0 Z0                          ; set tool 0 axis offsets
G10 P0 R0 S0                             ; set initial tool 0 active and standby
                                     temperatures to 0C

; Custom settings are not defined
```

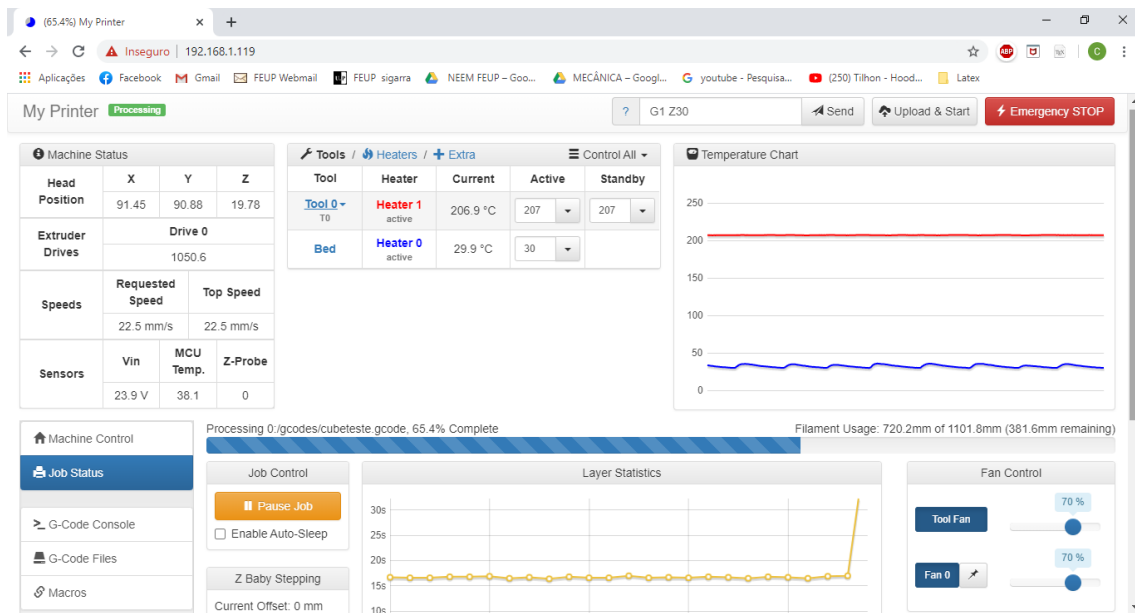


Figura A.2: Interface *web control* durante impressão.

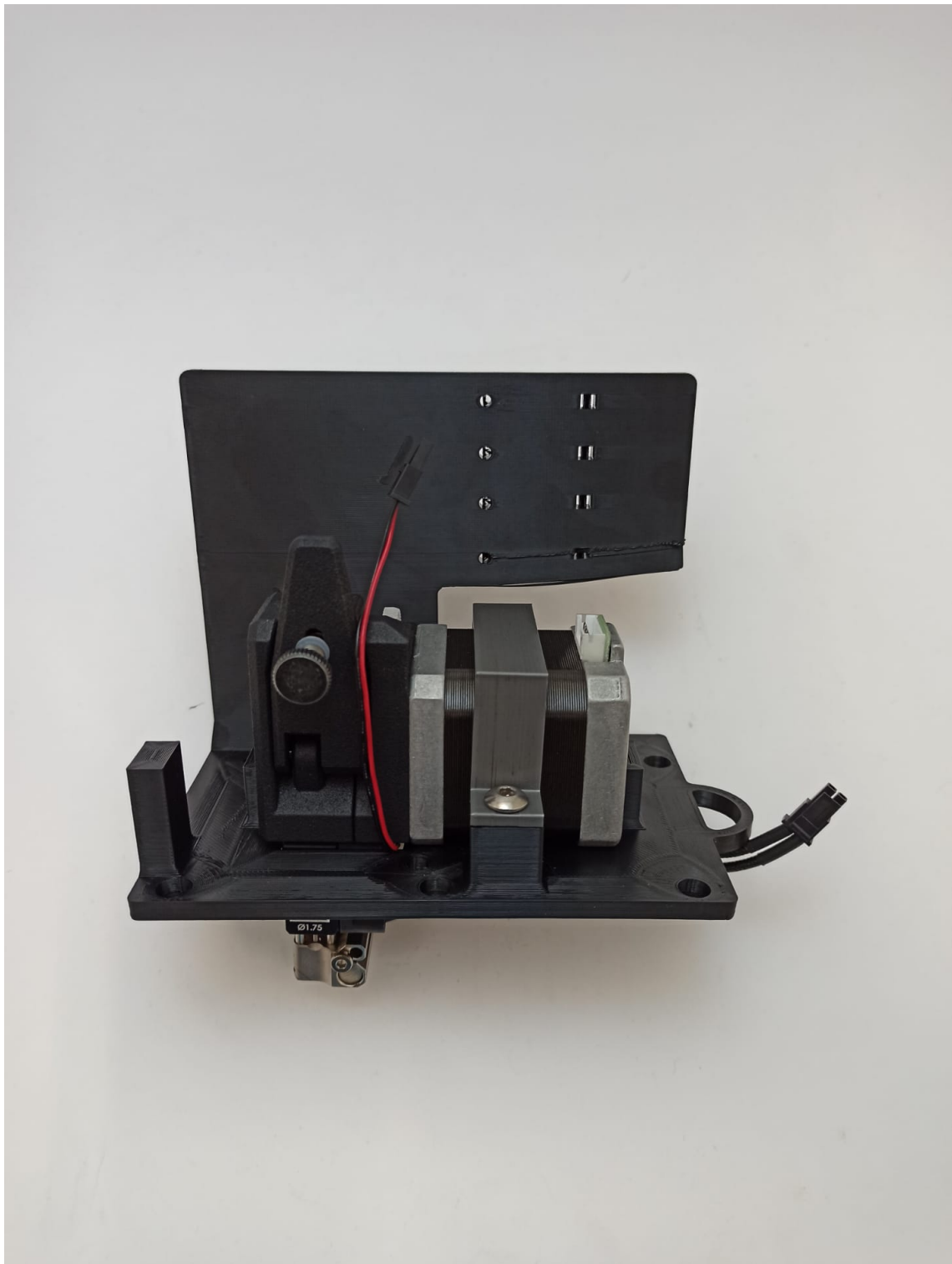


Figura A.3: Módulo de extrusão montado num protótipo com filamento ASA.

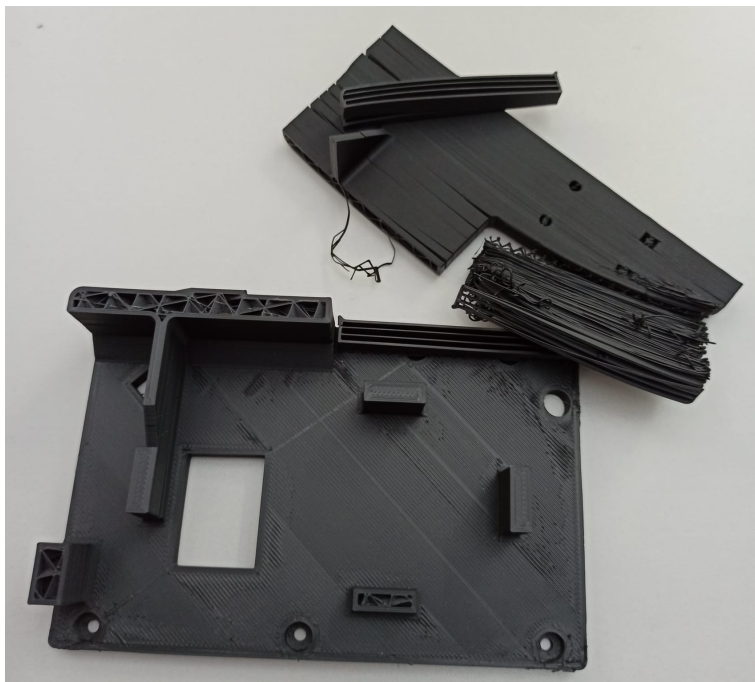
Tentativa falhada de impressão do suporte em ABS.

Figura A.4: tentativa de impressão.

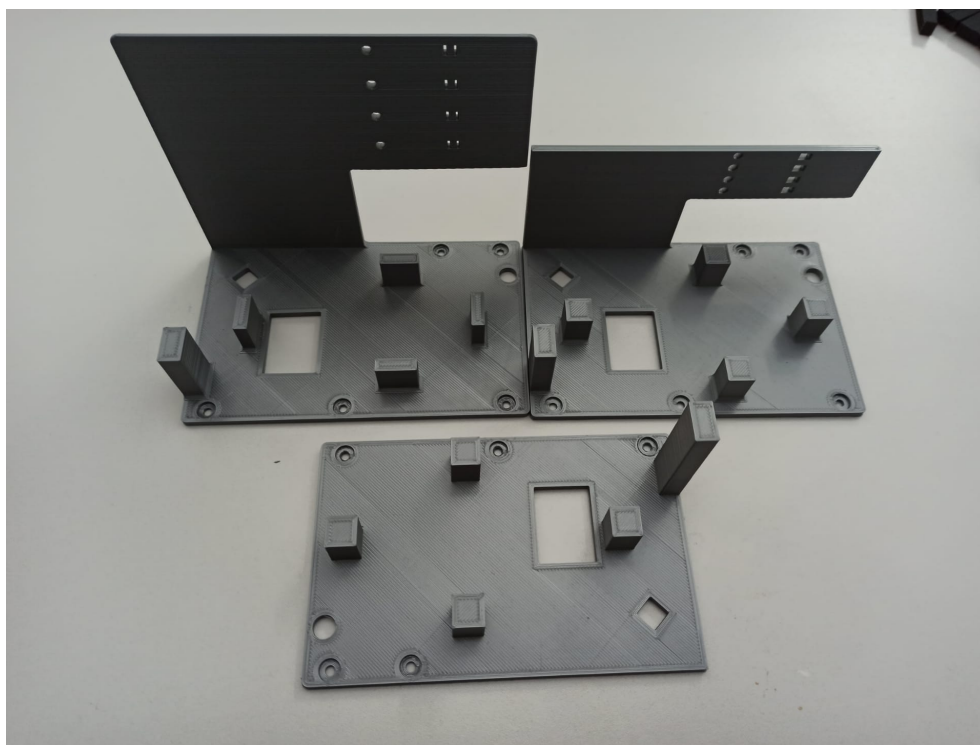


Figura A.5: Alguns exemplares dos protótipos impressos.

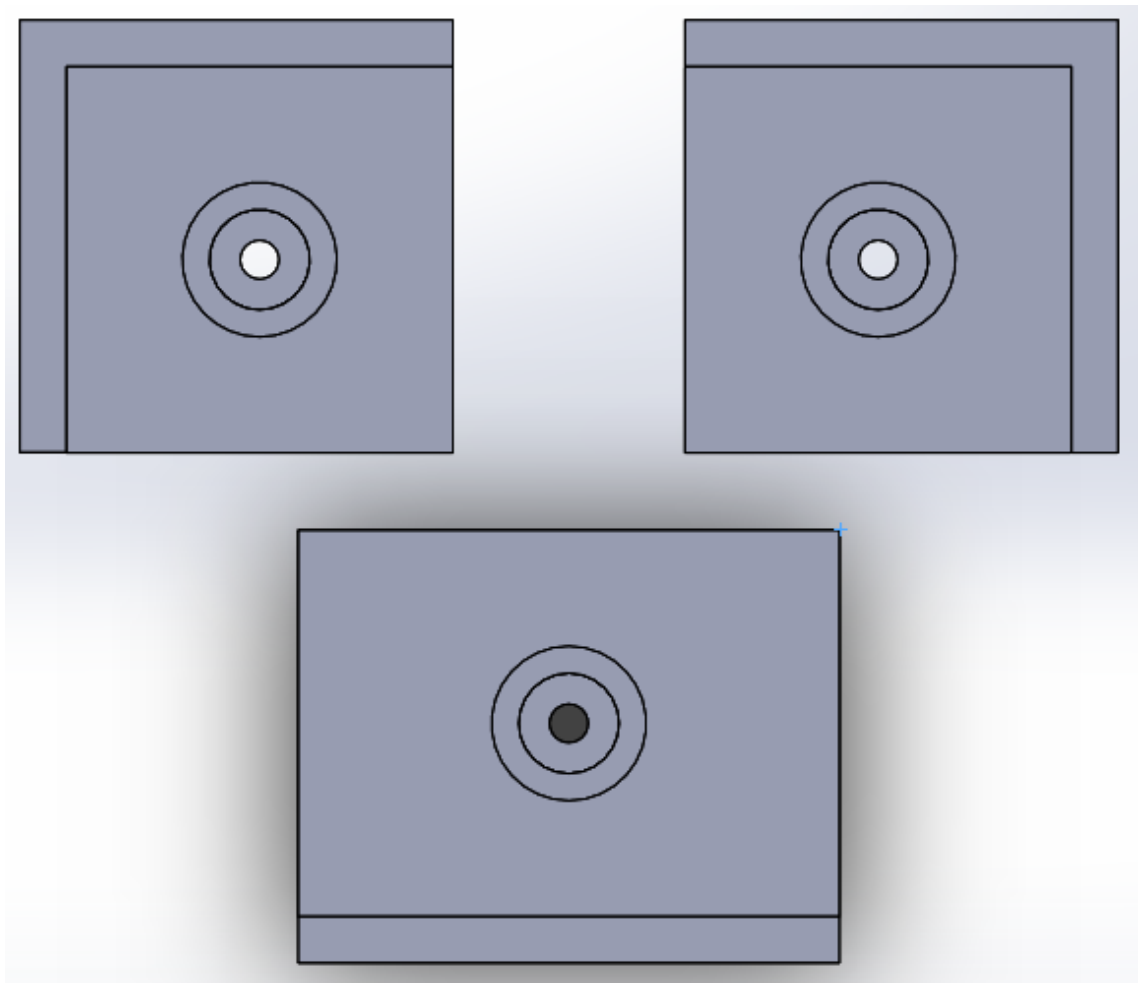


Figura A.6: Suporte de elevação da mesa, *solidworks*.



Figura A.7: Protótipo de fixação da base de construção em ASA.

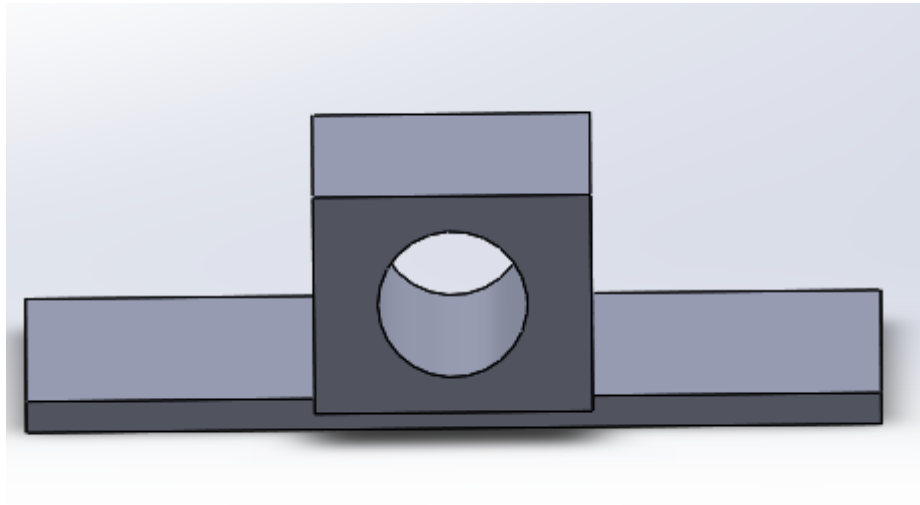


Figura A.8: Vista *solidworks* do encaixe do filamento.



Figura A.9: Primeiro protótipo do suporte da *Duet*.

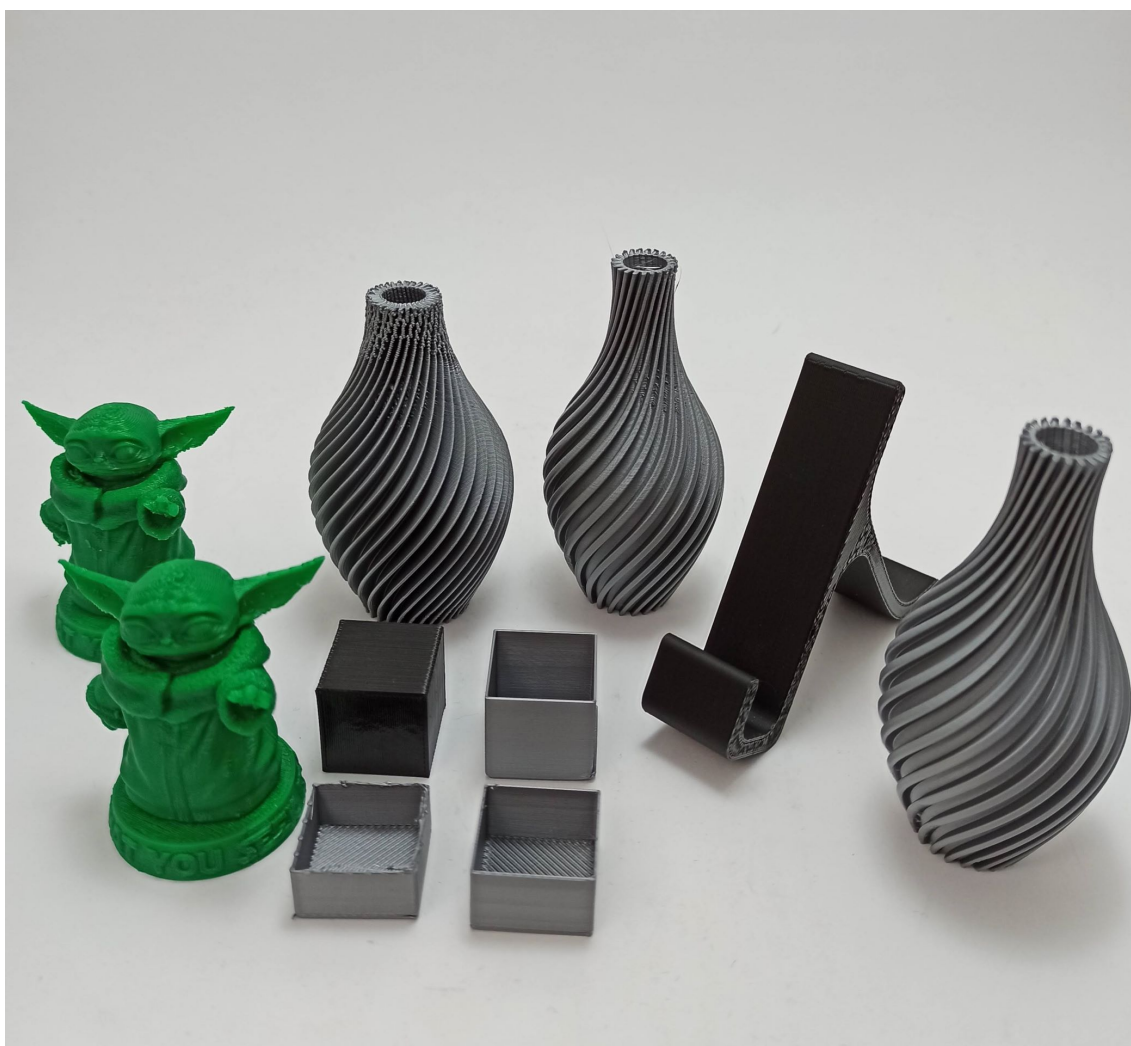


Figura A.10: Impressões realizadas na *CubePro* para testes.

Anexo B

Desenhos técnicos

Dimensões gerais do suporte do sistema de extrusão versão PLA e ASA

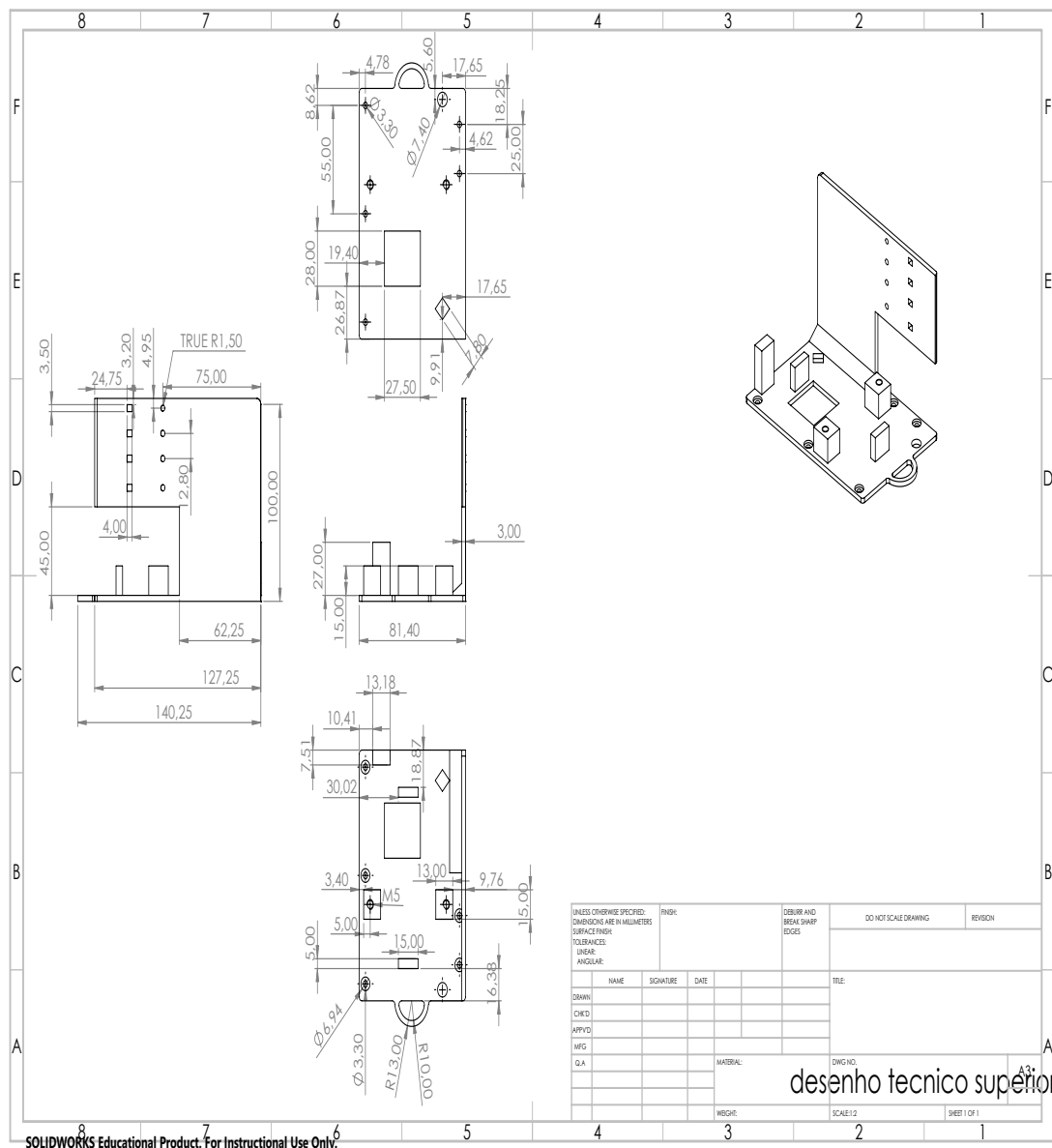


Figura B.1: Desenho técnico parte inferior versão PLA.

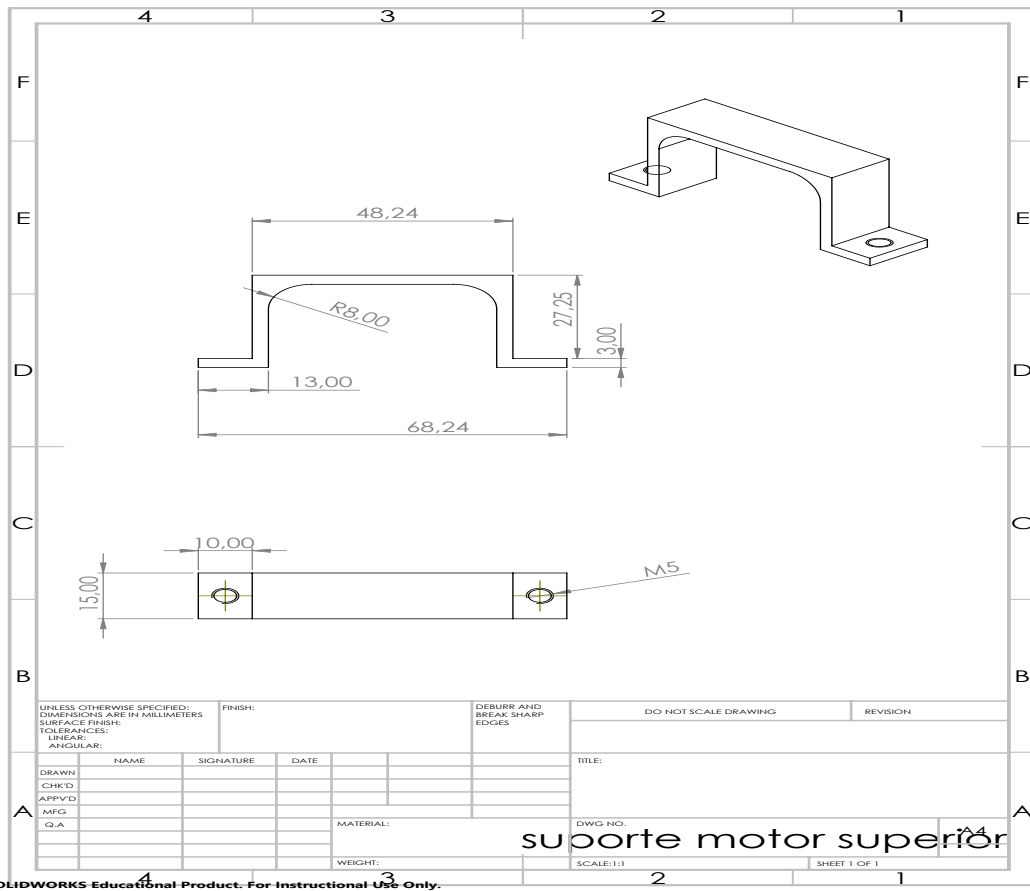


Figura B.2: Desenho técnico parte superior versão PLA.

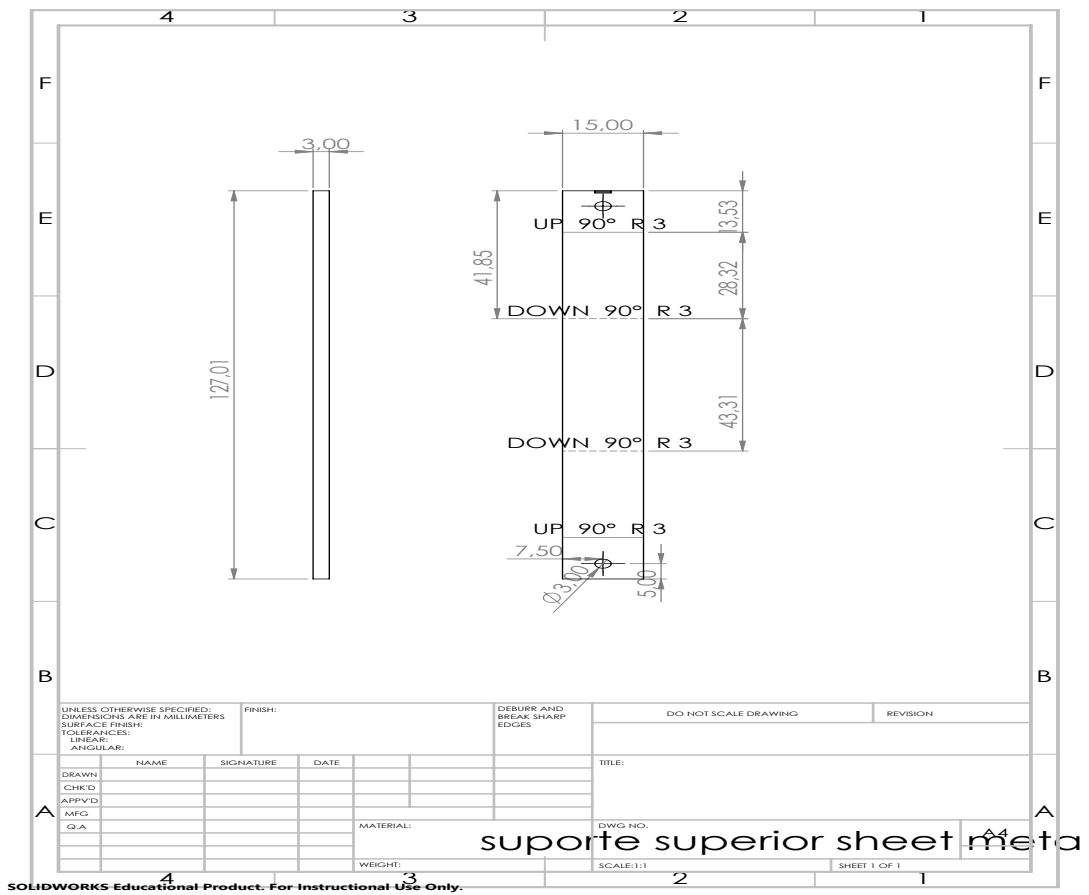


Figura B.4: Suporte superior versão *sheet metal*.

Dimensões do suporte da *Duet*

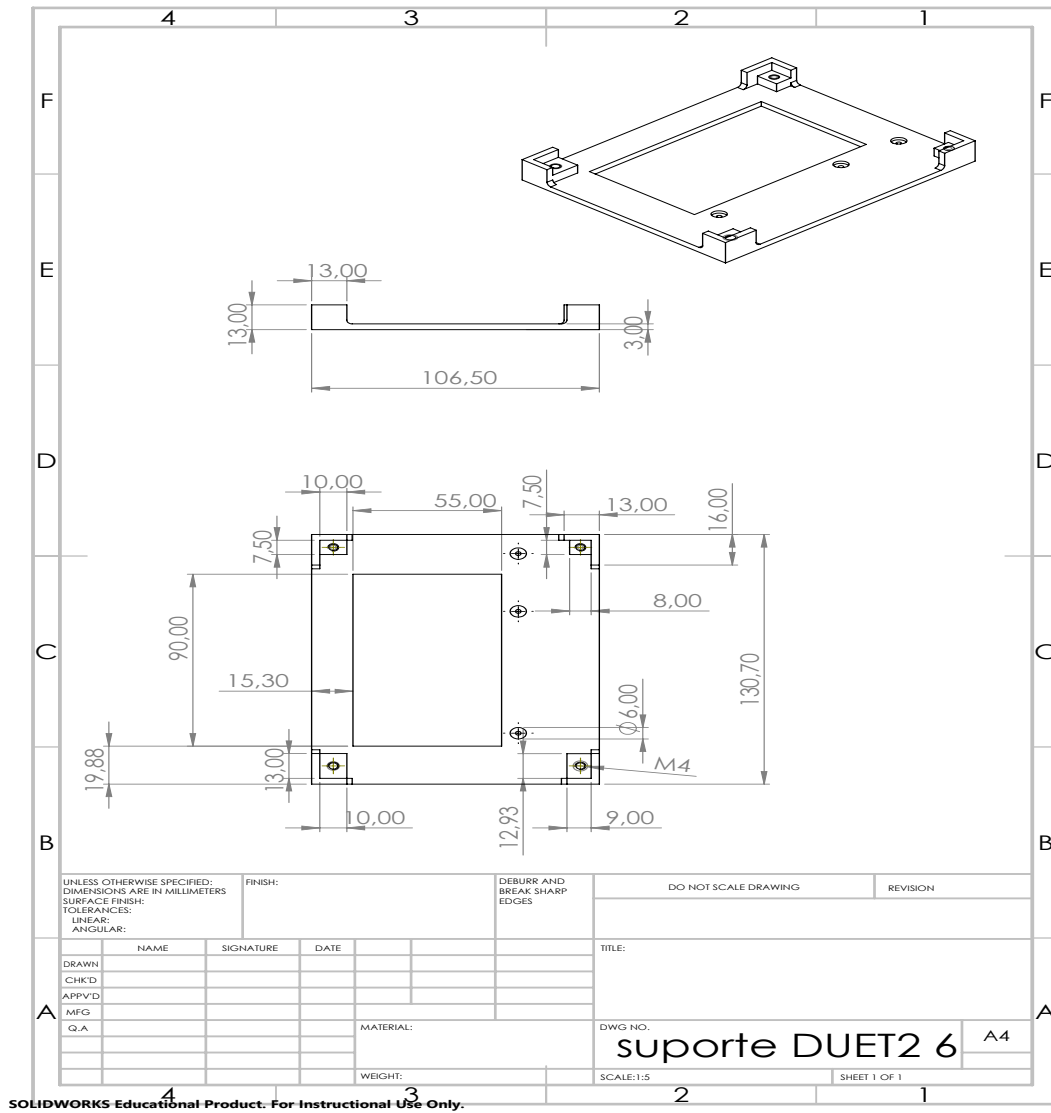


Figura B.5: Desenho definição suporte *Duet*

Dimensões dos apoios da base de construção

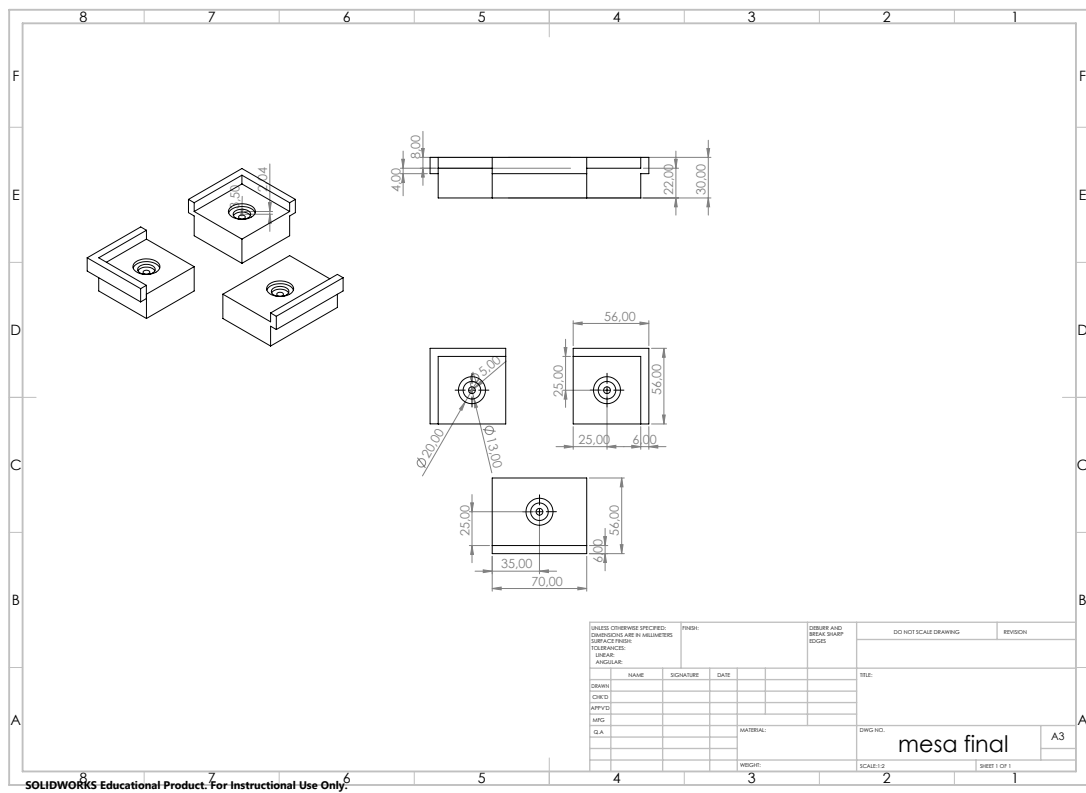
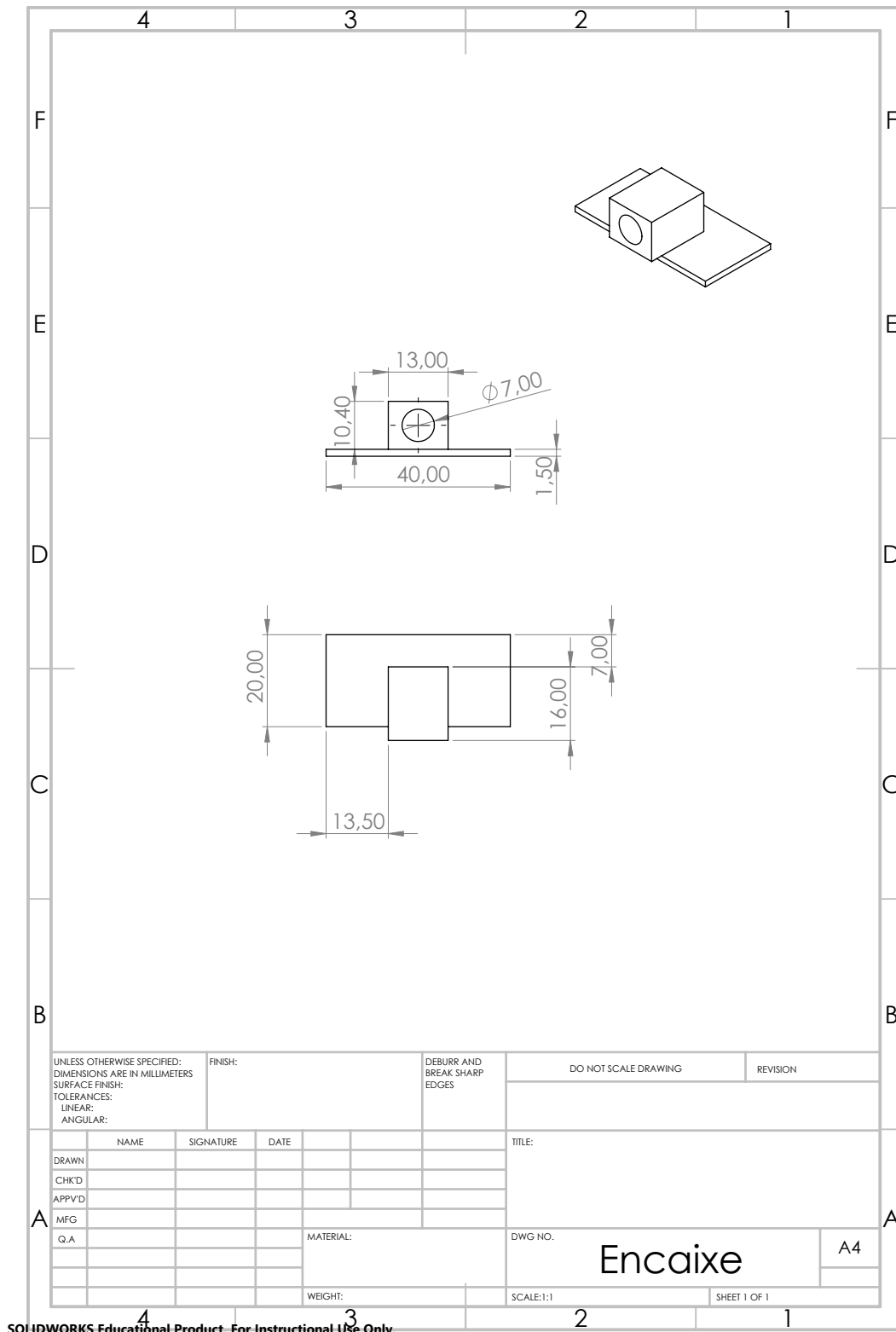


Figura B.6: Desenho técnico apoios da base de construção.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Figura B.7: Desenho técnico do encaixe.

Anexo C

Componentes originais da impressora

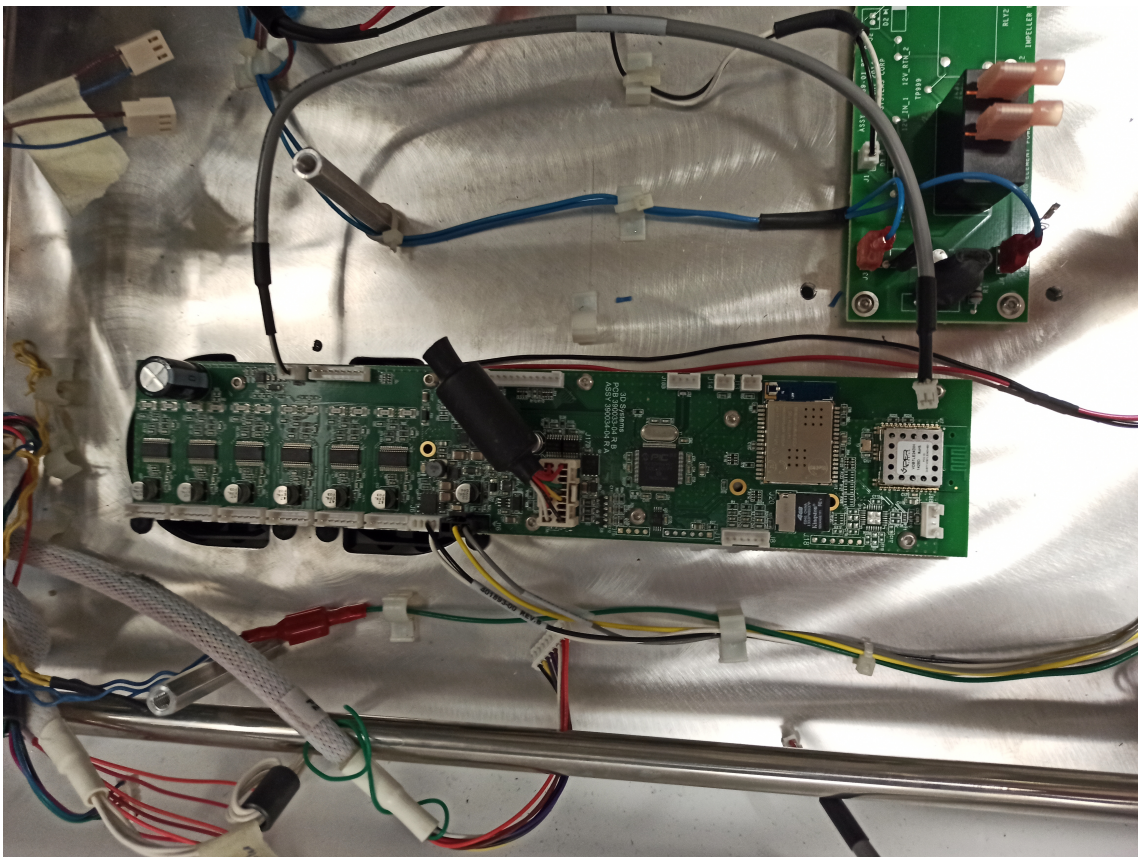


Figura C.1: Placa original da CubePro

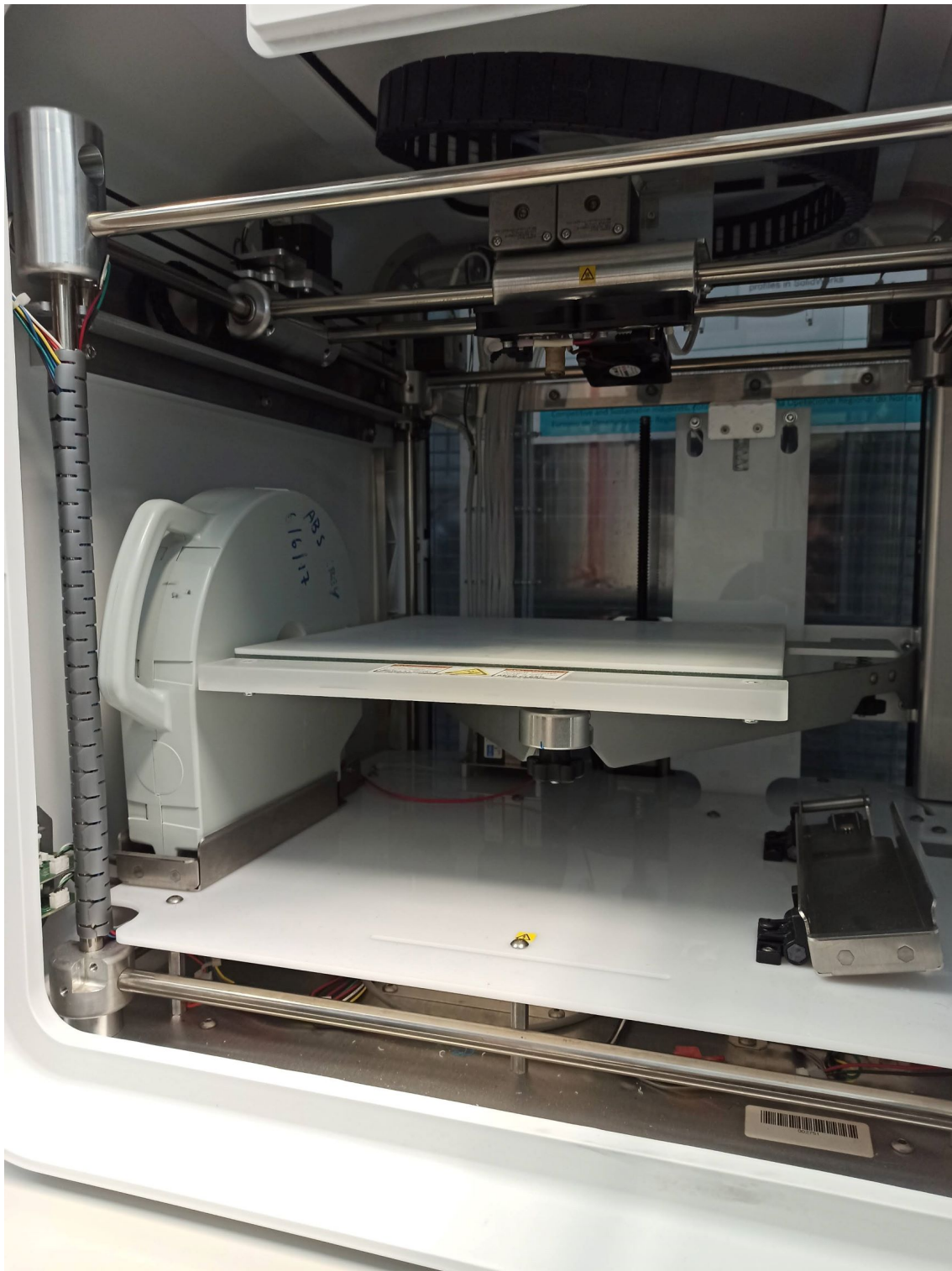


Figura C.2: Sistema original de alimentação de filamento.

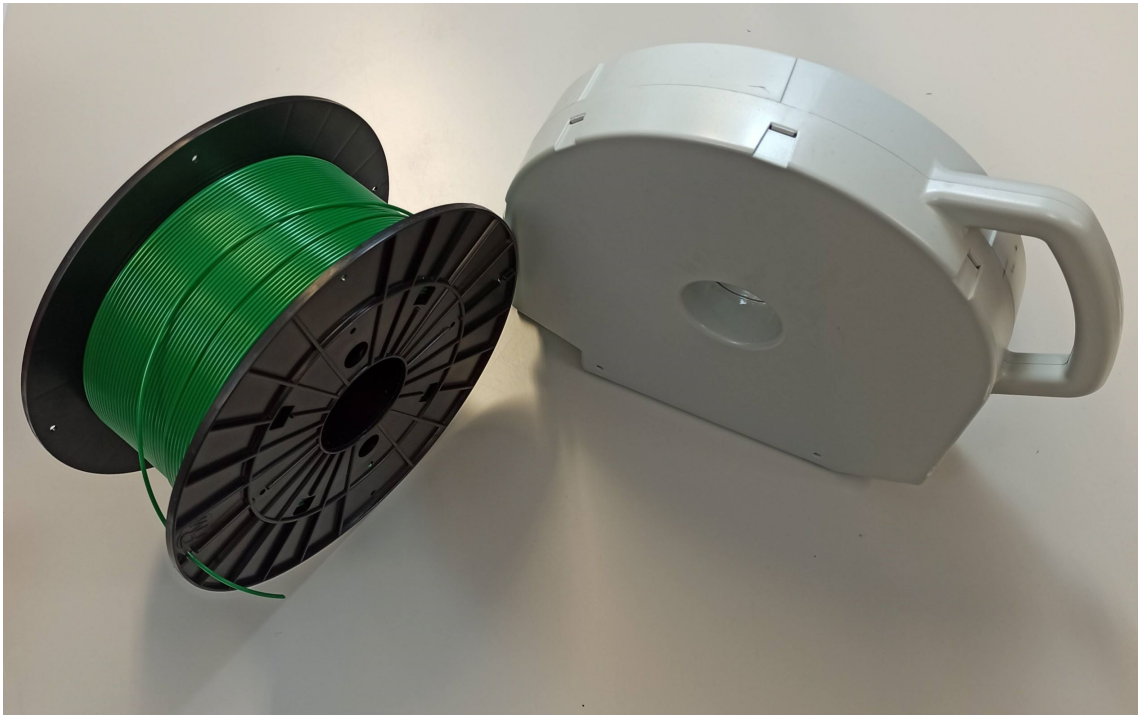


Figura C.3: Comparação das bobines.

Referências

- [1] 2017 ROJKO, p. 77. Is 3d printing transforming the project management function in the aerospace industry? | vieira | the journal of modern project management. <https://www.journalmodernpm.com/index.php/jmpm/article/view/187>. (Accessed on 03/19/2020).
- [2] Marques. A corrida da indústria 4.0 | revista pesquisa fapesp. <https://revistapesquisa.fapesp.br/2017/09/22/a-corrida-da-industria-4-0/>, Setembro 2017. (Accessed on 03/19/2020).
- [3] Lima Pinto 2019. Indústria 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, 16(2):299–311, dez. 2019.
- [4] Wohlers. Wohlers associates. <https://wohlersassociates.com/2020report.htm>, 2020. (Accessed on 03/21/2020).
- [5] Carlos Relvas. O mundo da impressão 3d e o fabrico digital. <https://www.booki.pt/userfiles/files/loja/preview/9789898927026.pdf>, 2018. (Accessed on 03/21/2020).
- [6] Iso / astm52900- standard for additive manufacturing technologies. 2015.
- [7] Teraiya S. Panghal D. Vyavahare, S. and S. (2020) Kumar. Fused deposition modelling: a review | emerald insight. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-04-2019-0106/full/pdf?title=fused-deposition-modelling-a-review>, January 2020. (Accessed on 03/23/2020).
- [8] Anoop K. Sood, Raj K. Ohdar, and Siba S. Mahapatra. Experimental investigation and empirical modelling of fdm process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1):81 – 90, 2012.
- [9] Neri Volpato. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3d - neri volpato - google livros. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=ni9dDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=Volpato,+N.+2017.+Manufatura+aditiva:+tecnologias+e+aplica%C3%A7%C3%B5es+da+impress%C3%A3o+3D.+Editora+Blucher.&ots=Jp9MisyxXQ&sig=hRE23NOMRGggg7D0Qpby5idXlFE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, 2017. (Accessed on 03/27/2020).
- [10] RepRap. Fused filament fabrication — rewrap, 2019. [Online; accessed 27-May-2020].
- [11] Coogan and Kazmer. Prediction study on bond strength and modulus of fused deposition modeling product. <http://jtp.cnki.net/bilingual/detail/html/HGSZ201907034>, 2017. (Accessed on 03/25/2020).

- [12] Trevor J. Snyder, Mike Andrews, Mark Weislogel, Peter Moeck, Jennifer Stone-Sundberg, Derek Birkes, Madeline Paige Hoffert, Adam Lindeman, Jeff Morrill, Ondrej Fercak, Sasha Friedman, Jeff Gunderson, Anh Ha, Jack McCollister, Yongkang Chen, John Geile, Andrew Wollman, Babak Attari, Nathan Botnen, Vasant Vuppuluri, Jennifer Shim, Werner Kaminsky, Dustin Adams, and John Graft. 3d systems' technology overview and new applications in manufacturing, engineering, science, and education. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(3):169–176, 2014. PMID: 28473997.
- [13] Stratasys. What is 3d printing | stratasys. <https://www.stratasys.com/explore/article/what-is-3d-printing>, 2020. (Accessed on 06/03/2020).
- [14] Stratasys. History of 3d printing | stratasys. <https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>, 2020. (Accessed on 06/03/2020).
- [15] Creality. Creality ender 3 3d printer | creality 3d. https://creality.com/creality-ender-3-3d-printer-p00244p1.html?gclid=Cj0KCQjw1N32BRCCARIsADZ-J4sgibIV1J4krm6SapqPtWOFEXd7pNpGFpEsecG2C41CyiH_KBkfPzAaAhYvEALw_wcB, 2020. (Accessed on 06/03/2020).
- [16] André Filipe Brandão Moreira da Silva. Impressora fdm tipo delta: estudo de impressão de cor e comparação de propriedades. 2018.
- [17] Joshua M. Pearce Gerald C. Anzalone, Bas Wijnen. Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta reprop 3-d printer | emerald insight. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-09-2014-0113/full/html?casa_token=txzaQS_nntgAAAAA:xbn5B_VvA3-1jSNxQYae5fhC9G4g3EBSgTNRkkv5hTjXkTb5MftQ1zVApIKv6n_OX375VnqEVyKs2dSL55peqgrH3Oh_2RH89_yAyFog26zLVliZWpdH, 9 2015. (Accessed on 06/08/2020).
- [18] RepRap. File:graber3.jpg - reprop. <https://reprop.org/wiki/File:Graber3.jpg#filelinks>. (Accessed on 06/08/2020).
- [19] Charles Bell. 3d printing with delta printers - charles bell - google livros. https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=mDcwCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP3&dq=3D+printer+delta+hardware&ots=qXUsp4a2Pp&sig=vGK1N_S6plP1ljgZis8svMVqrS4#v=onepage&q&f=true, 2015. (Accessed on 06/08/2020).
- [20] Pintstein. Delta printer experience – pintstein. <https://pintstein.wordpress.com/2016/01/22/delta-printer-experience/>. (Accessed on 06/09/2020).
- [21] Gabriel Gaál, Tatiana A. da Silva, Vladimir Gaál, Rafael C. Hensel, Lucas R. Amaral, Varlei Rodrigues, and Antonio Riul. 3d printed e-tongue. *Frontiers in Chemistry*, 6:151.
- [22] Ilan E. Moyer. Corexy | cartesian motion platform. <http://corexy.com/theory.html>, 2012. (Accessed on 04/07/2020).
- [23] GABRIEL MAXIMIANO. Desenvolvimento de sistema de movimentação corexy para impressora 3d. http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10149/1/CT_DAMEC_2016_2_19.pdf, 2015. (Accessed on 05/31/2020).

- [24] RepRap. Corexy - rewrap. <https://reprap.org/wiki/CoreXY>. (Accessed on 06/13/2020).
- [25] EUGÊNIO DE ARAÚJO. Void3d: Impressora 3d de baixo custo. https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/26477/1/VOID3DImpressora3D_Ara%c3%baajo_2018.pdf, 2018. (Accessed on 05/31/2020).
- [26] 3DSystems. Features and benefits | cube pro. <http://infocenter.3dsystems.com/cubepro/user-guide/features-and-benefits>. (Acesso em 02/13/2020).
- [27] Adrián Rodríguez-Panes, Juan Claver, and Ana María Camacho. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: A comparative analysis. *Materials*, 11(8), 2018.
- [28] Joaquim José Linhares Moreira Regadas. Otimização de uma impressora 3d delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores. 2017.
- [29] Zhengyu Jin, Yaoqi Tian, and Jinpeng Wang. *Chemistry and Thermodynamic Properties of Lactic Acid and Lactide and Solvent Miscibility*, chapter 2, pages 19–25. John Wiley Sons, Ltd, 2010.
- [30] Elisabete Maria Saraiva Sanchez e Maria Isabel Felisberti. Degradação fotooxidativa do asa, instituto de química – universidade estadual de campinas. <http://gppol.iqm.unicamp.br/Congressos/14CBECIMAT/TC404-011.pdf>. (Accessed on 06/22/2020).
- [31] Jesse J. French Gabriel A. Johnson. Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3d printing materials. <https://core.ac.uk/download/pdf/228834597.pdf>, Julho 2017. (Accessed on 06/22/2020).
- [32] Filament2print. Filamentos asa para impressão 3d fabricado por filamentum - filament2print. <https://filament2print.com/pt/203-asa>. (Accessed on 06/23/2020).
- [33] All3DP. 5 best 3d printer controller boards | all3dp. <https://all3dp.com/2/5-fantastic-3d-printer-controller-boards/>, 2020. (Accessed on 04/03/2020).
- [34] Souza. Desenvolvimento de uma placa de controle utilizando o microcontrolador 16f877a. <https://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/10045/1/DESENVOLVIMENTO%20DE%20UMA%20PLACA%20DE%20CONTROLE%20UTILIZANDO%20O%20MICROCONTROLADOR%2016F877A.pdf>, Setembro 2008. (Accessed on 04/03/2020).
- [35] Smoothieware. smoothieboard [smoothieware]. <http://smoothieware.org/smoothieboard>, 2020. (Accessed on 04/03/2020).
- [36] 3DAddicted. 32 bit 3d printer board comparison chart | 3daddict. <https://3daddict.com/32-bit-3d-printer-board-comparison/>, 23-01 2018. (Accessed on 06/12/2020).
- [37] L. Yuan. Preliminary research on development of a fiber-composite, curved fdm system,”. *National University of Singapore, Singapura*, 2008.

- [38] Florianópolis L. Santana, dissertação de mestrado UFSC. Avaliação de uma impressora 3d baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em pla. 2015.
- [39] Sascha Dickel Jan-Peter Ferdinand, Ulrich Petschow. The decentralized and networked future of value creation: 3d printing and ... - google livros. https://books.google.pt/books?id=964qDAAAQBAJ&printsec=copyright&hl=pt-PT&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false. (Accessed on 06/09/2020).
- [40] DYZE DESIGN. Spiral heaters are the next step in 3d printing - dyze design. <https://dyzedesign.com/2020/04/spiral-heaters-are-the-next-step-in-3d-printing/>, Abril 2020. (Accessed on 04/22/2020).
- [41] J head nozzle - reprop. https://reprap.org/wiki/J_Head_Nozzle. (Accessed on 06/09/2020).
- [42] allbiz. Resistências cartucho buy in são paulo on portuguesa. <https://all.biz/br-pt/resistencias-cartucho-g101057>. (Accessed on 06/09/2020).
- [43] Slice Engineering. The mosquito™ hotend – slice engineering. https://www.sliceengineering.com/products/the-mosquito-hotend%E2%84%A2?_pos=1&_sid=5be6af1f3&_ss=r. (Accessed on 03/11/2020).
- [44] Bondtech mini geared (bmg) extruder for mosquito hotends. <https://www.bondtech.se/en/product/bmg-m-extruder/>. (Accessed on 03/18/2020).
- [45] Duet. Duet 2 wifi. <https://www.duet3d.com/DuetWifi>, 2020. (Accessed on 06/10/2020).
- [46] Duet. Duet 2 wifi/ethernet wiring diagrams - duet3d. https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Duet_Wiring_Diagrams. (Accessed on 06/10/2020).
- [47] Duet3D. 1.) getting connected to your duet - duet3d. [https://duet3d.dozuki.com/Guide/1.\)+Getting+Connected+to+your+Duet/7](https://duet3d.dozuki.com/Guide/1.)+Getting+Connected+to+your+Duet/7). (Accessed on 04/08/2020).
- [48] Leonardo Santana. (pdf) avaliação de uma impressora 3d baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em pla | leonardo santana - academia.edu. https://www.academia.edu/23730628/AVALIA%C3%87%C3%83O_DE_UMA_IMPRESSORA_3D_BASEADA_EM_PROJETO_DE_C%C3%93DIGO_ABERTO_NA_FABRICA%C3%87%C3%83O_DE_PE%C3%87AS_EM_PLA, 2015. (Accessed on 05/30/2020).