

# Conceção de uma arquitetura de impressora tridimensional com 5 eixos

*Tiago Miguel dos Reis Marques Domingues*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Professor Fernando Gomes de Almeida

Orientador no INEGI: Engenheiro João Paulo Pereira



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Setembro de 2017



*“Mas a lição final é sentarmo-nos e escrever.*

*E é tudo.”*

*Wole Soyinka*



## Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo o estudo de soluções para a realização de uma impressora FDM tridimensional com 5 eixos, que seja capaz de imprimir PEEK. Este trabalho surge na tentativa de colmatar falhas no processo de FDM comum, como o uso de estruturas de suporte ou efeito de *steeping*. As especificações mínimas para a máquina foram definidas em função de impressoras já existentes, com três eixos, que imprimem PEEK. Foram estudados diferentes tipos de manipuladores para servir de estrutura à máquina, diferentes opções de hardware controlador, diferentes opções de software necessário ao processo FDM e as diferentes opções dos componentes principais, como a base de impressão, o extrusor, os sensores de temperatura, os sistemas de transmissão de movimento e os motores. Após a seleção destes elementos, foi efetuada uma análise tendo-se concluído que se deveria usar uma estrutura delta, um controlador por software baseado em PC, que era necessário produzir um *slicer* de 5 eixos. Quanto aos componentes, concluiu-se que se deveria usar uma base com aquecimento com filme *Kapton* e com superfície PEI (Polieterimida), um extrusor do tipo *Bowden*, RTD (termorresistências) como sensores de temperatura, sistemas de correias como sistemas de transmissão e movimento e servomotores híbridos como elementos de atuação.



# Designing a three-dimensional 5-axis printer architecture

## Abstract

The work developed in this dissertation had as objective the study of solutions for the realization of a FDM three-dimensional printer with 5 axes, that is able to print PEEK. This work arises in an attempt to overcome failures in the common FDM process, such as the use of support structures or steeping defects. The minimum specifications for the machine have been defined based on existing three-axis printers that print PEEK. Different types of manipulators for machine structure, different controller hardware options, different software options and the different options of the main components, such as the printing base, the extruder, the temperature sensors, the transmission systems and motors were studied in order to discover the different solution options available. After doing this research, an analysis was made of these constituent elements and it was concluded that a delta structure and a PC-based software controller, should be used, which required the production of a 5-axis slicer. As for the components, it was concluded that a heating base with Kapton film and a PEI (Polyetherimide) surface, a Bowden type extruder, RTD (temperature resistances) as temperature sensors, belt systems as transmission and movement systems and the hybrid servomotors as actuation systems should be used.





## **Agradecimentos**

Ao Professor Fernando Gomes de Almeida e ao Eng. João Paulo Pereira, meus orientadores, agradeço toda a disponibilidade ao longo deste percurso, bem como o conhecimento transmitido e motivação, essenciais para o sucesso deste trabalho.

A todos os que são próximos, que caminharam comigo neste percurso com entreatuda e amizade.

A toda a minha família, pelo apoio incondicional, proporcionando todas as condições para completar a minha formação de forma bem-sucedida.

A presente tese de mestrado integrado foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais Através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia.



# Índice de Conteúdos

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2. Objetivos do Projeto .....	1
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
2. O processo de FDM .....	3
2.1. FDM - Fused Deposition Modeling.....	3
2.2. Princípios Básicos no design de uma impressora de FDM.....	6
2.3. Materiais usados para FDM .....	8
3. Definição do problema.....	11
3.1. Necessidade de Impressão com 5 eixos .....	11
3.2. Especificações mínimas de uma impressora de FDM tridimensional com 5 eixos .....	13
4. Impressora tridimensional com cinco eixos.....	17
4.1. Estrutura da Arquitetura de 5 eixos .....	17
4.2. Solução de Automação .....	25
4.3. Escolha de componentes .....	31
5. Arquitetura proposta para um processo FDM a 5 eixos .....	41
5.1. Estrutura .....	41
5.2. Controlo .....	55
5.3. Componentes.....	58
6. Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	63
7. Referências.....	65



## Siglas

3D – Tridimensional

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

AC – Corrente Alternada

AMF - Do Inglês “Additive Manufacturing File Format”

ASTM F42 -Comité da American Society For Testing And Materials, Dedicado Ao Fabrico Aditivo

BMP – Do Inglês “Bitmap”

CAD - Desenho Assistido Por Computador

CNC - Comando Numérico Computadorizado

CPU - Unidade Central de Processamento

DC – Corrente Contínua

DLP - Do Inglês “Digital Light Projetor”

DXF – Do Inglês “Drawing Exchange Format”

FDM - Do Inglês “Fused Deposition Modeling”

FET - Transístor De Efeito De Campo

FFF - Do Inglês “Fused Filament Fabrication”

HIPS - Poliestireno De Alto Impacto

HPGL - Do Inglês “Hewlett-Packard Graphics Language”

I/O - Entrada/Saída

INEGI - Instituto De Ciência E Inovação Em Engenharia Mecânica E Engenharia Industrial

JPG - Do Inglês “Joint Photographic Experts Group”

MPP – Motor Passo A Passo

NTC - Do Inglês “Negative Temperature Coeficient”

SLA - Do Inglês “Stereolithography”

PA 6 - Poliamida Ou Nylon 6

PA 66 - Poliamida (Nylon 66)

PAI - Poliamida-Imida

PC – Computador Pessoal

PC - Policarbonato

PCB - Placa de Circuito Impresso

PEEK - Poliéter Éter Cetona;

PEI – Polieterimida

PEI - Polieterimida (ULTEM)

PET - Polietileno Tereftalato

PI – Poliimida

PLA Ácido Polilático

PPP - Poli-para-Fenileno

PPS - Polissulfeto de P-Fenileno;

PPSU - Polifenilsulfona

PVA - Acetato de Polivinilo

RAM - Memória de Acesso Aleatório

RPM - Revoluções por Minuto

RTD - Termorresistências

SCARA - Do Inglês “Selective Compliance Assembly Robot Arm”

SLS - Do Inglês “Selective Laser Sintering”

STL - Do Inglês “Standard Triangle Language”

TPE - Elastómero Termoplástico

TPU - Poliuretano Termoplástico

## Índice de Figuras

Figura 1 - Proposta de máquina FDM da Patente US005121329A.....	4
Figura 2 - Processo de execução de um impressão com FDM.....	4
Figura 3 - Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas PEEK - Poliéter éter cetona; PEI - Polietierimida (ULTEM);PI – Poliiimida; PAI - Poliamida-imida; PPS - Polissulfeto de p-fenileno; PPSU – Polifenilsulfona ;PPP - Poli-(para-fenileno) e PA 66 - Poliamida (Nylon 66) .	10
Figura 4 - Efeito de <i>steeping</i> numa impressão com FDM .....	11
Figura 5 - Representação lateral de uma impressão FDM onde temos o contorno pretendido a verde e o obtido a preto. Adaptado da referência .	12
Figura 6 - Impressora produzida por <i>Øyvind Kallevik Grutle</i> .	19
Figura 7 – Impressora da empresa <i>5AXISMAKER</i> .....	19
Figura 8 - Plataforma de Stewart .....	21
Figura 9 - Impressora projetada por Hermes Gibertia, Matteo Strano and Massimiliano Annoni .	21
Figura 10 - Impressora produzida por William S. Yerazunis. John C. Barnwell III, Daniel N. Nikovski no Laboratório de Desenvolvimento da Mitsubishi .....	22
Figura 11 – Impressora de 6 eixos para fabrico aditivo por FDM .....	23
Figura 12 - Impressora baseada num manipulador articulado .....	24
Figura 13 – Exemplo de uma placa PCB .....	32
Figura 14 – Exemplo de uma placa de aquecimento com CLAD Heaters .....	33
Figura 15 - Representação do Extrusor do tipo Direct .....	35
Figura 16 - Representação do Extrusor do tipo Bowed .....	36
Figura 17 - Exemplo de utilização de um sistema de correias na impressora <i>Ultimaker</i> .....	38
Figura 18 - Configuração XY da Impressora Hbot .....	43
Figura 19 - Configuração XY - CoreXY .....	44
Figura 20 - Configuração XY da Impressora Ulitmaker .....	45
Figura 21 - Outras configurações possíveis XY .....	46
Figura 22 – Solução de base rotativa com 2 eixos angulares desenvolvida por <i>Grutle</i> .	47
Figura 23 - Solução de base rotativa com 2 eixos angulares desenvolvida por <i>William Yerazunis</i> .	47
Figura 24 – Estrutura cartesiana com três eixos lineares .....	48
Figura 25 – Representação a permitir perceber como calcular corretamente a velocidade angular a partir da velocidade linear.....	49
Figura 26 - Curva de funcionamento do motor M-1719-1.5 .....	53
Figura 27 – Representação da eliminação da necessidade de estruturas de suporte usando eixos rotativos na base de uma impressora FDM. A- Impressão FDM com a base numa posição perpendicular ao extrusor; B - Impressão FDM com a base numa posição ótima.....	55

Figura 28 - Esquema didático para a escolha de um motor elétrico .....	60
Figura 29 - Curva característica do motor passo a passo - M-3445-6.3 .....	61
Figura 30 - Curva característica do motor K42xxxF-L w/P6000 .....	62



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Materiais típicos de uso em impressoras FDM .	8
Tabela 2 - Plásticos de alta performance de uso em impressoras FDM.	9
Tabela 3 – Estudo comparativo da tensão de cedência de peças de Nylon 645 e T-glase ployester produzidas com 3 e 5 eixos. Adaptado de	13
Tabela 4 - Impressoras capazes de realizar processos de FDM com PEEK e sua caraterísticas.	14
Tabela 5 - Especificações mínimas para a impressora PEEK com 5 eixos – INEGI.	15
Tabela 6 - Características de Controladores CNC possíveis de usar numa máquina de 5 eixos.	26
Tabela 7 - Programmable Physical Circuit Boards possíveis para o controlo da impressora e características potenciais máximas.	29
Tabela 8 - Software CAD	30
Tabela 9 - Software Slicer para impressoras a três eixos	31
Tabela 10 - Características comum de bases de aquecimento dos diferentes tipos.	33
Tabela 11 - Soluções <i>Wolfbite</i> para diferentes materiais usados em FDM	34
Tabela 12 - Comparação de parâmetros de sensores de temperatura	37
Tabela 13 - Comparação de sistemas de transmissão de movimento.	39
Tabela 14 – Coeficiente de fricção par <i>leadscrew threads</i>	51



## 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento do projeto e motivação

A impressão tridimensional, também conhecida por fabrico aditivo, é uma tecnologia que tem visto a sua popularidade aumentar, quer na indústria quer para o público em geral. Esta tecnologia é tão apelativa devido à grande facilidade e rapidez com que qualquer um consegue produzir os seus próprios produtos em quase qualquer lugar e por um preço muito económico.

Os processos de fabrico aditivo são definidos pelo Comité Técnico ASTM F42 (comité da *American Society for Testing and Materials*, dedicado ao fabrico aditivo) como “o processo de juntar materiais para criar objetos a partir de um modelo tridimensional (3D), normalmente camada sob camada, em oposição às metodologias de fabrico subtrativas” [1]. Estes adquirem hoje em dia um papel de importância na indústria dos processos produtivos, uma vez que permitem uma redução no tempo de ciclo produtivo, são mais eficientes economicamente em produção de séries baixas, e possibilitam novas hipóteses no que diz respeito ao design de produtos.

O INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, é um instituto localizado na Universidade do Porto que tem como principal missão o desenvolvimento, inovação e transferência de tecnologias e conhecimentos de base tecnológica. Este instituto realiza a sua atividade desde 1986, e conta atualmente com mais de 200 colaboradores que trabalham para o desenvolvimento de conhecimentos e de produtos na área da tecnologia [2]. No âmbito do fabrico aditivo, o INEGI encontra-se atualmente a trabalhar em várias áreas, tais como o desenvolvimento de novas tecnologias de impressão tridimensional ou melhoramentos em processos de fabrico aditivo, de forma a permitir a produção de produtos com materiais de melhor qualidade e que apresentem melhores propriedades mecânicas. O trabalho que desenvolvemos encontra-se inserido num projeto envolvendo vários parceiros, que tem como propósito a criação de sistemas avançados de impressão tridimensional, como uma máquina de impressão tridimensional de cinco eixos interpolados simultaneamente, capaz de produzir peças em plásticos de alto desempenho. O desejo de produção desta máquina surge numa tentativa de tentar colmatar algumas limitações associadas ao processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM), que discutiremos posteriormente, como a falta de precisão em termos de acabamentos superficial, ou a incapacidade de produzir estruturas suspensas sem a utilização de mecanismos de suporte.

### 1.2. Objetivos do Projeto

O INEGI, como Instituto de Ciência e Inovação, tem a missão de desenvolver avanços tecnológicos e novas áreas de investigação tecnológica. Na persecução destes objetivos, encontra-se atualmente a trabalhar numa linha investigação mais alargada que visa o desenvolvimento de sistemas avançados de impressão tridimensional. Enquadrado nessa linha de investigação, o INEGI planeia desenvolver uma impressora tridimensional que funcione com 5 eixos interpolados simultaneamente. Para alcançar esse objetivo, será necessário completar diversas fases, como o estudo do estado atual do conhecimento e de possíveis soluções, o desenvolvimento de protótipos, de forma a testar essas soluções, e a construção final da máquina.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo desenvolver as duas primeiras fases, no sentido de alcançar o objetivo de construir a impressora. Mais concretamente, este trabalho tem como objetivo principal a procura e proposta de soluções possíveis para a estrutura do equipamento, para o hardware de controlo e para o software principal indicado, para que a máquina funcione de acordo com as especificações estabelecidas. Em suma, pretende-se que este trabalho selecione as melhores opções no sentido de selecionar a melhor tecnologia que permita produzir uma impressora tridimensional com 5 eixos funcional e que seja útil para estudar este novo processo de fabrico.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, correspondendo cada um deles a um dos passos que foram necessários para atingir o objetivo proposto:

No primeiro capítulo deste trabalho, denominado “Introdução” são referidas as premissas iniciais associadas a esta dissertação. Primeiramente, apresenta-se o enquadramento que justifica a origem deste trabalho e, em seguida, apresentam-se os objetivos que este pretende atingir e, por fim, explana-se a forma como a dissertação está organizada.

O segundo capítulo é denominado “O processo de FDM”. Este nome foi escolhido pois nesta secção é realizado o estudo do processo FDM e da tecnologia a ele associado. Este estudo foi realizado de forma a permitir a compreensão da tecnologia associada à máquina que se pretende produzir. Neste capítulo fala-se também dos princípios básicos que são necessários considerar na idealização de uma máquina deste tipo, bem como dos materiais que podem ser utilizados.

Em seguida, no terceiro capítulo, abordam-se duas grandes questões deste problema, “o porquê?” e o “o quê?”. Associado à primeira questão, reflete-se sobre a necessidade de uma impressora de cinco eixos e quais as razões que originam essa necessidade. A segunda questão prende-se com o que é que se pretende especificamente com a máquina, ou seja, quais as especificações e requisitos que lhe estão associados.

No quarto capítulo, denominado “Impressora Tridimensional com Cinco Eixos”, realiza-se um estudo extensivo sobre os elementos constituintes de uma impressora tridimensional de cinco eixos. Esse estudo inclui a apresentação e explicação de várias possibilidades de solução dos elementos: estrutura do manipulador, *hardware* e *software* associados à solução de automação e aos principais componentes da máquina.

O quinto capítulo, denominado “Arquitetura proposta para um processo FDM a 5 eixos”, debruça-se sob a conceção de uma proposta de solução para o problema posto, tendo em conta o estudo realizado no capítulo anterior. Para isso, é feita uma análise das diferentes possibilidades de solução para cada elemento constituinte da máquina, sendo no final feita uma análise do sistema como um todo.

Finalmente, no sexto e último capítulo, conclui-se sobre o trabalho desenvolvido e sobre o projeto em si. Tendo em conta o conhecimento adquirido e as soluções desenvolvidas, propõe-se o caminho a seguir no desenvolvimento de uma impressora FDM de cinco eixos e dos trabalhos que devem ser realizados para atingir esse objetivo.

## 2. O processo de FDM

O fabrico aditivo, também correntemente conhecido como impressão 3D, é um termo usado para descrever um conjunto de tecnologias que criam objetos 3D, adicionando sucessivamente camada após camada de material. Embora estes moldes de operação genéricos se mantenham para todos os processos de fabrico aditivo, existem diferentes formas de fazer a adição sucessiva de camadas, o que dá origem a diferentes processos. Entre os mais recorrentes podemos destacar: a) processos de foto-polimerização, como o SLA e DLP, que usam tecnologias de luz para curar resinas de foto-polímeros; b) processos de extrusão, como o FDM, que aquecem e extrudem filamentos de plástico para uma base; c) o processo de *Material Jetting*, conceptualmente semelhante a impressão a jato, só que em vez de borrifar tinta para um papel extrudem-se gotículas de um foto-polímero líquido, depois sujeitas a um processo de cura com UV; d) processos de *Binder Jetting*, em que um pó é unido usando um agente aglutinante formando assim camadas; e) Processos *Power bed fusion*, como o processo SLS (*Selective Laser Sintering*) em que se usa um laser e um sistema espelhado para derreter um pó, polimérico ou metálico, que depois solidifica formando uma camada; f) *Direct energy deposition*, semelhante ao FDM mas em que se derrete o material aquando da deposição usando uma fonte de energia como um laser.; g) *Sheet lamitaion* é um processo que envolve empilhar camadas de material umas em cima das outras, após este ter sido cortado com um determinado contorno. Embora existam todos estes processos este trabalho dedica-se exclusivamente sobre o mais popular destes processos, o FDM [3], [4].

### 2.1. FDM - Fused Deposition Modeling

O FDM (*Fused Deposition Modeling*) é o processo mais popular de fabrico aditivo na atualidade. Este é uma técnica de fabrico aditivo criada e registada pela empresa *Stratasys* em 1989, com a patente US005121329A, que introduz o conceito deste processo, bem como o seu modo de execução [5]. Assim, e como dita a patente, a técnica de FDM baseia-se num processo de extrusão de plásticos, como ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) ou HIPS (Poliestireno de Alto Impacto), usando uma máquina extrusora como a que pode ser vista na Figura 1. Recentemente, esta técnica passou também a ser denominada por FFF ou *Fused Filament Fabrication*, tendo esta nova denominação surgido com o objetivo de criar uma designação que se desligasse da empresa *Stratasys*.

Existem vários tipos de máquinas com diferentes configurações e princípios de funcionamento que realizam impressões 3D por processos FDM: todavia, todas elas têm características comuns que estão presentes desde a primeira proposta de impressora na Patente US005121329A. A primeira característica é possuírem os mesmos componentes principais, como a base onde é depositado o plástico representada na Figura 1 pelo número 108. Adicionalmente, todas possuem um extrusor responsável por aquecer e empurrar o filamento (representação número 22, figura 1) e 3 eixos de movimento, que movem a cabeça em X, Y e Z (números 24, 20 e 30 da figura 1). Para além disso, todas as impressoras operam com os mesmos tipos de software (CAD, *slicer* e *software* controlador), e com o mesmo princípio básico de funcionamento.

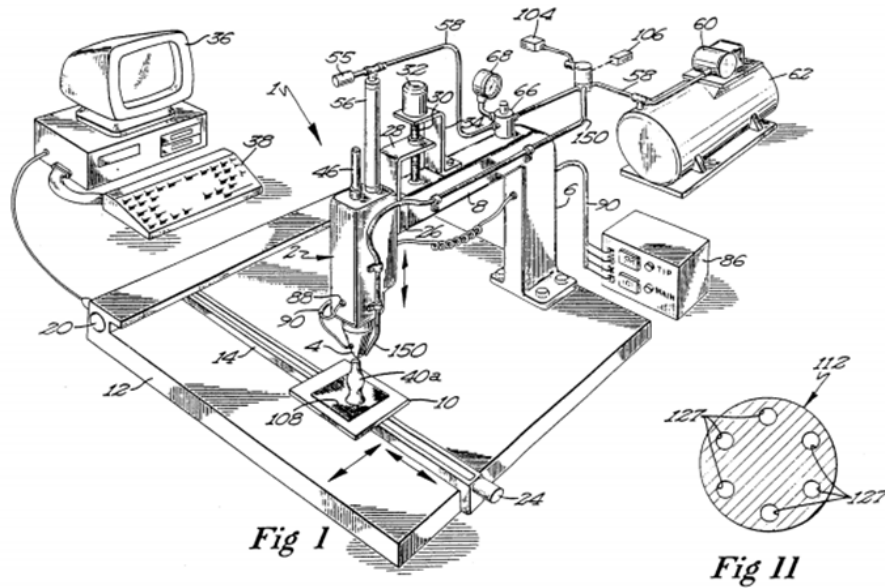


Figura 1 - Proposta de máquina FDM da Patente US005121329A [5].

A realização de peças em FDM, assim como em todos os processos de fabrico aditivo, envolve várias etapas desde a conceptualização da peça até à obtenção do produto final. As etapas podem variar em função do grau de complexidade da peça e da sua finalidade, mas de uma forma geral, todos os processos de fabrico aditivo consistem em vários passos, conforme mostrado na Figura 2: a conceptualização e desenho CAD (desenho assistido por computador), a conversão para STL (*Standard Triangle Language*), a conversão do STL para código G usando um *slicer*, a transferência para a máquina de fabrico aditivo, a definição dos parâmetros da máquina, a construção da peça, a remoção e limpeza da peça, o pós-processamento e acabamentos finais (revisto em [3]).

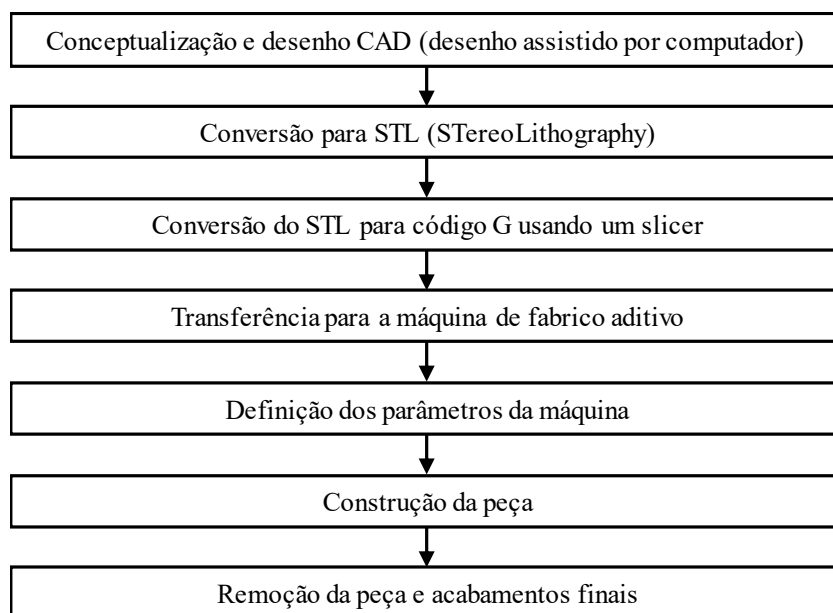


Figura 2 - Processo de execução de um impressão com FDM.

A primeira etapa do processo consiste na conceptualização do produto e na concretização desse conceito, sobre a forma de um desenho CAD. Na conceptualização do produto é necessário considerar a finalidade do produto, por exemplo, se este será um protótipo ou um produto final e quais os requisitos para o mesmo. Em seguida, é necessário esboçar essa ideia, sobre a forma de desenhos, textos descritivos ou modelos representativos. Por fim, deve executar-se uma modelação exata em CAD 3D que represente fielmente o resultado final pretendido para a peça a fabricar.

O segundo passo é a transformação do ficheiro CAD 3D num ficheiro STL. Um ficheiro STL é apenas uma forma de representar de forma simples somente as características geométricas de um desenho CAD. Neste processo, a geometria existente é geralmente representada numa série de faces triangulares. Este é um processo, geralmente automático, realizado pelos softwares de desenho CAD, e que somente necessita de intervenção humana em caso de erro. Recentemente, surgiu um novo formato, o AMF, que surge como tentativa de evolução do STL. Este novo formato representa também a geometria da peça usando as facetas trianguladas, mas para além disso, inclui também informações sobre a cor, as dimensões, o material e outras características. Teoricamente, estes ficheiros estariam imediatamente prontos para passar à próxima fase do processo produtivo, mas na realidade o processo exige algumas etapas intermédias. Assim, é necessário verificar visualmente que o ficheiro STL se encontra aparentemente correto, sendo posteriormente necessário optar pela orientação da peça, assim como a zona da máquina em que esta vai ser produzida. Para além disso, pode ainda ser necessário ajustar a dimensão da peça ou seccioná-la, devido à impossibilidade de ser executada de uma só vez.

O ficheiro STL gerado, representativo da peça a produzir, é então convertido em um formato que possa ser interpretado pela máquina e que permita a sua produção. Para realizar este feito recorre-se ao *software* denominado *slicer* [3], que transforma o ficheiro em formato STL num código, dividindo a peça fornecida no STL em camadas e sucessivamente gerando para cada camada um percurso da cabeça extrusora que permita conceber a mesma.

Antes de se dar início à deposição de material, é ainda necessário introduzir algumas configurações, quer físicas, quer a nível de *software*. A maior parte das máquinas tem parâmetros programáveis que necessitam ser ajustados em função de outras variáveis operacionais, como por exemplo, do material a utilizar, da temperatura, da velocidade de operação e da resolução, entre outras. Para além disso, é normalmente necessário definir manualmente alguns aspetos associados à máquina, tais como verificar se esta se encontra na posição inicial própria para iniciar o processo, ou verificar se esta está carregada com o material que vai ser depositado.

A etapa seguinte é o processo de extrusão em si, no qual o material escoia pelo orifício devido à diferença de pressão entre a câmara de aquecimento e o exterior. Neste processo, o sistema automático responsável pelo movimento dos eixos da máquina realiza os percursos e trajetórias predefinidos e de acordo com os contornos da peça. A conjugação simultânea destas duas ações é que permite a formação da peça por fabrico aditivo.

Estando a peça feita, é agora necessário removê-la da máquina e iniciar o processo de pós processamento. Primeiramente, é necessário remover a peça da base em que foi produzida e remover o excesso de material depositado que não faz parte da peça. Para além disso, é também necessário remover as estruturas de suporte, caso existam. Estas estruturas são muitas vezes necessárias, uma vez que os materiais usados não se apresentam totalmente rígidos durante a deposição e, portanto, não se conseguem suportar a si mesmos até endurecerem. Isto acontece, por exemplo, em situações em que se pretendam produzir peças com partes suspensas. Depois da remoção da peça da máquina e das estruturas de suporte, existem ainda um conjunto de processos de pós-processamento que podem ser aplicados à peça, incluindo [3], [6]:

a) Colar as diferentes partes da peça, caso a dimensão do produto final tenha sido superior à área de trabalho da impressora e, portanto, tenha existido a necessidade de a seccionar.

b) Preencher cavidades, usando resina *Epoxy*, por exemplo, originárias do processo de remoção de estruturas de suporte ou devidas a incompatibilidades na geração dos percursos de contorno da peça.

c) Sujeitar a peça a acabamentos finais, como um banho de acetona, que cria uma dissolução superficial conferindo-lhe um melhor acabamento; para além disso, existem outros acabamentos superficiais como lixar a peça (de modo a permitir suavizar a sua superfície e eliminar o efeito de escada inerente aos processos de extrusão), a pintura da peça, a aplicação revestimento ou a realização de algum tipo de polimento.

## 2.2. Princípios Básicos no design de uma impressora de FDM

De forma semelhante a qualquer processo de extrusão, também o FDM tem várias etapas e problemáticas que são necessárias considerar e definir, uma vez que, para o processo se dar corretamente, todos os parâmetros a elas associados devem estar corretamente ajustados. As etapas mais importantes a considerar são o carregamento do material, a fusão do material, a aplicação de pressão causadora do movimento do material a extrudir, o processo de extrusão e a solidificação. Estas serão descritas em seguida, apresentado algumas das problemáticas a considerar [3]:

a) Carregamento do material– O problema do carregamento do material prende-se especialmente com o estado físico em que este é fornecido e das implicações daí provenientes. De uma forma geral, este pode encontrar-se sob a forma de *pelletes*, granulado, pó ou como um filamento. Se o material for fornecido sob a forma de *pellet*, granulado ou pó, muitas vezes, para além de usar a gravidade para movimentar o material, cria-se também a necessidade de implementar um sistema extrusor do tipo parafuso, por exemplo, que empurre o material. Caso este seja um filamento, que é o caso mais usual, este poderá ser apenas empurrado usando, por exemplo, um sistema de tração.

b) Processo de fusão– Caso o material a extrudir se encontre num estado que não o líquido, este precisa de ser aquecido de modo a fundi-lo. O processo típico de liquidificação ocorre numa câmara térmica envolta por resistências responsáveis pelo aquecimento. Neste processo, a propriedade a controlar é a temperatura, de modo a garantir que esta é a certa para liquidificar o polímero, não podendo ser muito baixa pois não executa o processo corretamente nem muito alta para não danificar o material.

c) Processo de extrusão– Uma das etapas que é preciso também considerar é a extrusão em si, ou seja, o momento em que o fluido abandona a cabeça extrusora. Nesta etapa, primeiro, é necessário considerar o diâmetro do orifício da cabeça extrusora, que afeta a rapidez do processo e por sua vez o tempo de operação, a qualidade do acabamento da peça e a dimensão mínima dos pormenores da peça. Para além disso, é também necessário controlar a temperatura e a pressão dentro da câmara de liquidificação ao longo de todo o processo, de forma a garantir que o escoamento do fluido se dá fluentemente.

d) Solidificação do material depositado– Após a extrusão dá-se a solidificação do material depositado, que deveria ser uma etapa em que, idealmente, o formato e o tamanho do material se mantivessem inalterados. No entanto, fatores como a gravidade e a tensão superficial podem levar a alteração do formato enquanto a peça não atinge um estado rígido. Para além disso, durante o arrefecimento, o material pode encolher e/ou alterar a sua rugosidade, em resultado do processo de arrefecimento não linear. De forma a minimizar este efeito, deve-se tentar



minimizar a variação de temperatura entre o ambiente e a peça, usando por exemplo uma câmara térmica e, por consequência, tornar o arrefecimento o mais lento possível.

Para além das etapas anteriormente descritas, existem outros aspetos que necessitam ser definidos corretamente, uma vez que afetam o funcionamento da impressora 3D e consequentemente a qualidade do produto final:

a) Controlo posicional– Um aspeto que levanta muitas questões a considerar na conceção de uma impressora tridimensional de FDM é a dinâmica do sistema. Os movimentos executados podem ser do tipo uniforme ou não uniforme, sendo que a primeira opção é muito difícil de obter, visto que o sistema tem uma dada massa à qual serão requeridas mudanças bruscas de direção, o que invariavelmente causará acelerações. Sendo então o movimento não uniforme, é necessário fazer um ajuste contínuo da taxa de deposição de material de forma a ajustá-la à velocidade para permitir uma deposição consistente. Para além disso, é preciso ainda considerar efeitos de *backlash* e descalibração, devidos ao desgaste por uso, que poderão também afetar a consistência da deposição do material. Por fim, é relevante ponderar também sobre o facto de nem todas as zonas da peça exigirem os mesmos requisitos em termos de consistência. Por exemplo, os contornos exteriores e a parte central não necessitam do mesmo acabamento, podendo então haver o ajuste dinâmico dos parâmetros de operação.

b) Adesão entre camadas– Outro aspeto relevante é o processo de adesão entre camadas. Para que este processo se dê corretamente é necessário que o material se encontre a uma temperatura suficiente ou o uso de agentes adesivos. Caso contrário, a adesão até pode acontecer, mas as camadas poderão não ficar unidas corretamente o que poderá comprometer estruturalmente a peça, podendo mesmo levar a uma fratura por atuação de determinados esforços. Por outro lado, se a temperatura for demasiado alta o material pode não solidificar, apresentar fenómenos de escorrência ou mesmo ficar queimado.

d) Estruturas de suporte– Determinadas peças necessitam de estruturas de suporte auxiliar para fornecer apoio estrutural durante a sua produção. Existem soluções de estruturas de suporte que se baseiam na utilização do mesmo material da peça a produzir ou de material diferente. Caso sejam do mesmo material, a maior questão é como proceder para as remover da peça. Pode-se usar a temperatura, diminuindo-a durante a formação, quer diminuindo efetivamente a temperatura da câmara ou aumentando a distância entre a extrusora e base de deposição, enfraquecendo assim o material depositado, permitindo que seja depois partido para concretizar a remoção. A outra solução é usar para estrutura de suporte materiais diferentes do da peça em si. Essa variação permite identificar e remover mais facilmente a estrutura de suporte, usando materiais mais fracos, ou usando materiais que possam ser removidos usando um solvente. É de notar que o uso de materiais diferentes tem como implicação que o sistema tem que ter duas cabeças extrusoras.

e) Geração dos percursos e trajetórias– Por fim, outra problemática a ter em conta é a geração dos percursos e trajetórias que o sistema irá efetuar para formar a peça. Como nos restantes processos de fabrico aditivo, a peça é fornecida sob a forma de um ficheiro STL, onde está representada sob a forma de superfícies triangulares, e os contornos são definidos pela intersecção destas superfícies com o plano de extrusão. Estando os contornos definidos, é ainda preciso considerar se no percurso de deposição não há intersecções com material previamente depositado, qual o padrão de enchimento a escolher e qual a distância entre duas linhas de deposição.

### 2.3. Materiais usados para FDM

A técnica FDM permite produzir peças de uma grande gama de termoplásticos com diferentes propriedades mecânicas. Na Tabela 1 estão apresentados vários polímeros tipicamente aceites pelo processo FDM, bem como algumas das suas propriedades físicas e temperaturas de operação. Os polímeros caracterizam-se por diversos parâmetros importantes que refletem o seu comportamento mecânico. Entre esses, os mais importantes são a sua densidade, dureza, módulo de Young, e tensões e cedência e rotura. Para além disso, existem ainda outros parâmetros cruciais na definição do processo produtivo, como a temperatura de fusão e de decomposição do termoplástico ou a temperatura a que o extrusor deve estar. Os polímeros mais frequentemente utilizados são ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), HIPS (Poliestireno de alto impacto), PA 6 (Poliamida ou Nylon 6), PC (Policarbonato), PET (Polietileno Tereftalato), PVA (Acetato de polivinilo), TPE (Elastómero termoplástico) e PLA (Ácido polilático), que são apresentados na Tabela 1, tal como as respetivas propriedades suprarreferidas.

Tabela 1 - Materiais típicos de uso em impressoras FDM [7].

	DESIGNAÇÃO	TEMP. DE FUSÃO	TEMP. DO EXTRUSOR	TEMP. DE DECOMP.	DENSIDADE (kg/m <sup>3</sup> )	Dureza (Shore D)	MÓDULO DE YOUNG (GPA)	TENSÃO DE CEDÊNCIA/ROTURA MÁX. (MPa)
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno	230°C	265°C	350°C	1.02 – 1.20	67-80	2.1 – 2.4	50/55
HIPS	Poliestireno de alto impacto	220°C	230°C	340°C	1.04	95	1.9	25/60
PA 6	Poliamida (Nylon 6)	220°C	260°C	350°C	1.03 – 1.29	76-83	0.35-3.5	40/80
PC	Policarbonato	260°C	275°C	390°C	1.19 – 1.26	79-80	1.79-3.24	70/74
PET	Polietileno Tereftalato	260°C	270°C	380°C	1.16 – 1.40	73-75	1.16-4.15	70/80
PVA	Acetato de polivinilo	200°C	215°C	290°C	1.19	58-80	2.0-3.0	46/65
TPE	Elastómero termoplástico	260°C	260°C	420°C	0.85-1.82	11-55	0.01-2.10	12/69
PLA	Ácido polilático	220°C	220°C	300°C	1.00 – 2.47	59-77	0.23-3.5	66/114

No projeto corrente, pretende-se a criação de uma máquina capaz de criar peças de alta complexidade geométrica conjugada com excelentes propriedades mecânicas. Uma das soluções a considerar para criar avanços nesse sentido, é inovar no âmbito dos polímeros depositados juntamente com uma melhoria na tecnologia de deposição dos mesmos. A Tabela 2 apresenta um grupo plásticos de alta performance que tem grande potencialidade de utilização na tecnologia FDM para a produção de peças de maior qualidade. Este grupo apresenta

propriedades mecânicas melhores, como a tensão de cedência ou o módulo de Young, o que permite criar peças mais resistentes e capazes de suportar maiores esforços. No entanto, esta melhoria tem a desvantagem de se ter que trabalhar com temperaturas superiores durante o processo de extrusão, o que implica máquinas mais potentes, uma vez que estes polímeros apresentam maiores temperaturas de fusão.

Tabela 2 - Plásticos de alta performance de uso em impressoras FDM (\*já se comercializam sob a forma de bobinas de filamento para aplicação em impressoras 3D) [7].

	DESIGNAÇÃO	TEMP. DE FUSÃO	TEMP. DO EXTRUSOR	TEMP. DE DECOMP.	DENSIDADE (G.CM <sup>-3</sup> )	DUREZA (SHORE D)	MÓDULO DE YOUNG (GPA)	TENSÃO DE CEDÊNCIA/ROTURA MÁX. (MPA)
<b>PEEK*</b>	Poliéter éter cetona	343°C	395°C	400°C	1.30 – 1.48	84.5	3.0 – 9.5	95/213
<b>PEI*</b>	Polieterimida (ULTEM)	350°C	380°C	420°C	1.27 – 1.51	79.5	3.2-9.5	105/164
<b>PI</b>	Poliimida	360°C	395°C	400°C	1.35 – 1.51	89	4.0-22.6	86.2/116
<b>PAI</b>	Poliamida-imida	370°C	371°C	410°C	1.42 – 1.61	86-90	4.5-14.5	120/221
<b>PPS</b>	Polissulfeto de p-fenileno	280°C	340°C	370°C	1.40 – 1.51	86	3.7-14	105/185
<b>PPSU</b>	Polifenilsulfona	365°C	380°C	400°C	1.29	84	2.34	70/121
<b>PPP</b>	Poli-(para-fenileno)	346°C	350°C	400°C	1.21	23	8.3	207/207
<b>PA 66</b>	Poliamida (Nylon 66)	260°C	295°C	300°C	1.14	83	3.1	80/116

Em suma, pensa-se que a seleção de plásticos de maior qualidade como os apresentados na Tabela 2 poderá ser uma nova abordagem interessante para o processo FDM. Estes poderão trazer grandes vantagens em termos de qualidade das peças produzidas, uma vez que melhoram as suas propriedades mecânicas, mas por outro lado implicaram máquinas melhores que trabalhem a temperatura mais altas e que tenham um melhor controlo de temperatura. Tal deve-se ao facto de estes materiais terem uma gama de temperaturas em que é possível trabalhar muito menor, comparado com os materiais tradicionais (Figura 3). Nesta figura, estes novos polímeros estão representados a laranja e os plásticos de uso coerente estão representados a azul. Assim, é necessário considerar se as melhorias associadas a esta evolução superam as consequências em termos de custos e de dificuldades acrescida ao processo.

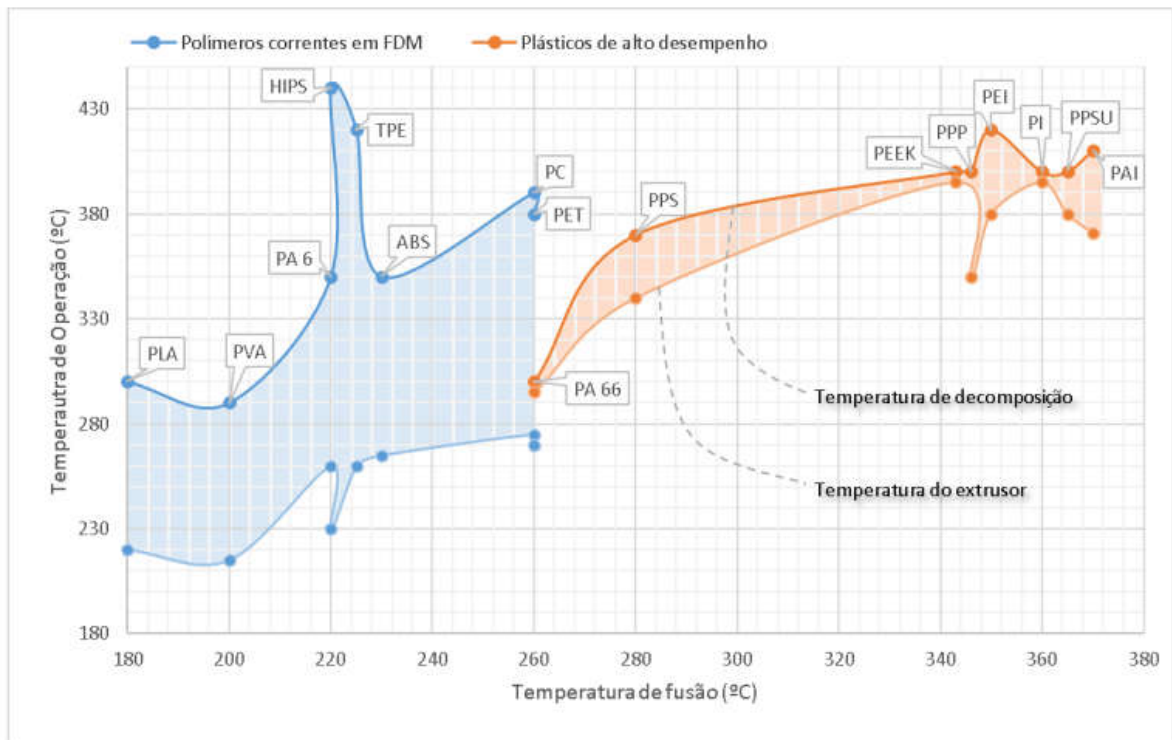


Figura 3 - Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas PEEK - Poliéter éter cetona; PEI - Polieterimida (ULTEM); PI - Poliimida; PAI - Poliamida-imida; PPS - Polissulfeto de p-fenileno; PPSU - Polifenilsulfona; PPP - Poli-(para-fenileno) e PA 66 - Poliamida (Nylon 66) [7].

### 3. Definição do problema

O tema da presente dissertação surge no âmbito de um projeto mais alargado por parte do INEGI que visa o desenvolvimento de sistemas avançados de impressão tridimensional. A proposta para esta dissertação pressupõe a conceção de uma arquitetura para o sistema, o estudo dos principais sistemas mecânicos e também seleção da solução de automação, sendo que esta última inclui o *hardware* de controlo e o *software*. A conceção de um sistema deste tipo é muito relevante no sentido em que poderá resolver alguns dos problemas associados com o processo de fabrico aditivo por FDM. Algumas das limitações que esta nova tecnologia poderá corrigir são, por exemplo, a falta de precisão, em termos de acabamentos superficial, ou a incapacidade de produzir estruturas suspensas sem usar mecanismos de suporte. Assim neste trabalho propõe-se estudar diversas soluções para a conceção de um sistema FDM de cinco eixos. Este estudo incluirá o estudo da estrutura da máquina, bem como da solução de controlo (*hardware* e *software*).

#### 3.1. Necessidade de Impressão com 5 eixos

O processo de fabrico aditivo o *FDM* trouxe muito benefícios enquanto processo produtivo, como a maior facilidade no planeamento de peças ou a possibilidade de executar peças geometricamente complexas, até então impossíveis de executar. No entanto, este processo apresenta alguns problemas inerentes ao processo de adição camada a camada, como a falta de precisão em termos de acabamentos superficiais, denominado efeito de *steeping*, a grande necessidade do uso de mecanismos de suporte, a variação das propriedades mecânicas das peças em função da direção de deposição e a dificuldade de construir peças à volta de estruturas já existentes [8]. A Figura 4 mostra claramente os dois primeiros problemas uma vez que podemos ver o efeito de *steeping* na representação da esquerda e estrutura de suporte que foi necessário usar para suportar construção do joelho da Figura 4 “O pensador”. Assim, pensa-se que a construção de um sistema de cinco eixos poderá contribuir para a resolução de grande parte dos problemas mencionados.



Figura 4 - Efeito de *steeping* numa impressão com FDM [9].

O primeiro problema mencionado, o efeito *stepping*, é originário do processo de deposição por camadas. Caso se queira, por exemplo, criar uma superfície oblíqua, esta será apenas uma interpolação de várias camadas, criando assim o efeito de *steeping*, como representado na Figura 5, onde temos o contorno pretendido a verde e o obtido a preto. Este problema poderia ser resolvido pela a adição de dois eixos, uma vez que permitiria a deposição de material paralelamente à superfície pretendida.

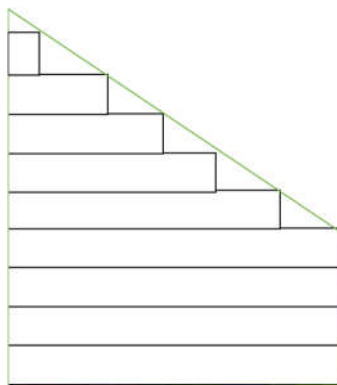


Figura 5 - Representação lateral de uma impressão FDM onde temos o contorno pretendido a verde e o obtido a preto. Adaptado da referência [10].

Outro problema com a estratégia de fabrico aditivo por camadas é o não aproveitamento máximo das propriedades do material usado. Esta desvantagem deve-se ao facto de a deposição das camadas não ser feita na direção ótima em toda a peça, uma vez que com o processo atual de FDM (3 eixos) a direção da deposição em cada camada tem de ser realizada num só plano, e os planos de todas as camadas depositadas serem paralelos. Este problema poderia ser resolvido usando uma impressora de cinco eixos, uma vez que este cenário permitiria a deposição das camadas em direções diferentes. O estudo desta solução já foi realizado no “*Mitsubishi Electric Research Laboratories*”, em que foi criada uma impressora tridimensional de cinco eixos, e foram testadas peças produzidas por esta máquina com 5 e 3 eixos e comparadas as resistências destas peças à pressão [11]. Os resultados deste estudo estão apresentados na Tabela 3. No estudo realizado foram produzidas peças em dois materiais, *Nylon 645* e *T-glase ployester*, usando o processo de FDM convencional e com cinco eixos, que permite, como vimos, uma orientação de deposição melhorada. Conforme podemos concluir através da análise da tabela o processo de cinco eixos permite obter peças muito mais resistentes, no caso do *Nylon* 4,59 vezes e no do *polyester* 2,23 vezes.

Tabela 3 – Estudo comparativo da tensão de cedência de peças de Nylon 645 e T-glase ployester produzidas com 3 e 5 eixos. Adaptado de [11].

<b>Material e processo usados</b>	<i>Nylon 645 Cúpula em processo convencional</i>	<i>Nylon 645 Cúpula em processo com 5 eixos</i>	<i>T-glase polyester Cúpula em processo convencional</i>	<i>T-glase polyester Cúpula em processo com 5 eixos</i>
<i>Medida da pressão de rutura MPa</i>	1.12 MPa	4.46 Mpa	1.22MPa	3.95 MPa
<i>Pressão de rutura dos ensaios individualmente em MPa e variância do ensaio</i>	0.1 0.1 0.4 1.5 3.5 $\sigma^2 = 1.68$	4.05 4.1 4.1 4.3 4.35 5.9 $\sigma^2 = 0.42$	0.2 0.8 1.6 1.6 1.9 $\sigma^2 = 0.39$	2.2 2.95 3.0 5.3 5.3 $\sigma^2 = 1.68$
<i>Relação entre resistência e peso em MPa / gramas</i>	0.132	0.607	0.138	0.446
<i>Vantagem do processo de 5 eixos em Z (S/wt)</i>		4.59 vezes mais forte		3.23 x vezes mais forte

Finalmente, na construção de peças pelo processo de FDM é muitas vezes necessário recorrer a estruturas de suporte, como referido anteriormente. A adição dos cinco eixos provavelmente não resolverá esta situação em toda a sua extensão, no entanto prevê-se que poderá facilitar a execução deste tipo de objetos devido ao aumento de possibilidades, em termos de orientação e configurações de impressão, que esta nova solução virá trazer. Outro problema inerente ao processo de FDM que uma impressora de cinco eixos poderia resolver, é a impossibilidade de construir à volta de estruturas já existentes, como por exemplo fios elétricos [12]. Em suma, podemos afirmar que existem de facto alguns problemas associados ao processo tradicional de 3 eixos FDM. Assim, a sua eliminação poderia conferir grandes melhorias ao processo de FDM, como a produção de peças de maior qualidade. Efetivamente já foram dadas algumas provas de que uma máquina de cinco eixos conseguiria colmatar as falhas mencionadas. Assim, conclui-se que a impressão FDM a cinco eixos com a tecnologia atual é uma hipótese que poderá trazer grandes evoluções para o processo e, portanto, deverá ser estudada.

### 3.2. Especificações mínimas de uma impressora de FDM tridimensional com 5 eixos

Antes de avançar para o estudo das soluções possíveis é preciso definir aos objetivos para máquina que se pretende construir. Assim, é necessário definir as características principais que lhe estão associadas, como a velocidade de operação, qual a resolução mínima com que esta é capaz de trabalhar, qual a dimensão máxima de peças que consegue produzir e quais os materiais com que deve ser capaz de trabalhar. Sendo a máquina a produzir um projeto piloto que dará origem a um protótipo com o principal objetivo de testar o conceito de FDM a cinco eixos com plásticos de alto desempenho, pensa-se que será apropriado construir uma impressora com especificações iguais a uma impressora presente no mercado capaz de imprimir PEEK mas com uma solução de 5 eixos.

O primeiro passo para definir as características da impressora a construir será então fazer uma análise das impressoras já existentes no mercado que são capazes de imprimir PEEK. A Tabela 4 mostra um conjunto de impressora que são capazes de realizar o processo e FDM com

o material PEEK, assim como as suas características que são relevantes para este trabalho. Da análise da Tabela 4 podemos inferir quais as especificações mínimas, em termos de temperatura do extrusor, temperatura da base de aquecimento, temperatura do ambiente envolvente, para conceber uma impressora que seja capaz de imprimir PEEK. Adicionalmente, podem-se também definir as características de funcionamento associado a esta gama de impressora, tais como a velocidade máxima de operação, o volume de trabalho e a resolução usada.

Tabela 4 - Impressoras capazes de realizar processos de FDM com PEEK e sua características.

<i>Impressora</i>	<i>Tipo manipulador</i>	<i>Temp. max. Extrusor(°C)</i>	<i>Temp. máx. base (°C)</i>	<i>Temp. máx. camara (°C)</i>	<i>Volume de trabalho (mm)</i>	<i>Velocidade max. (mm/s)</i>	<i>Resolução (micron)</i>	<i>Ref</i>
<b><i>ROBOZE ONE +400</i></b>	Cartesiana	Mais de 400	150	---	x- 200 y- 200 z- 200	80	50	[13]
<b><i>Apium P155</i></b>	Cartesiana	420	120	---	x- 140 y- 135 z- 148	---	x / y - 500 z - 100	[14]
<b><i>AON-M</i></b>	Cartesiana	450	Mais de 150	Mais de 70	x- 454 y- 454 z- 640	500	x / y - 25 z - 1 (valores teóricos)	[15]
<b><i>T650P RTP</i></b>	Paralela	---	---	---	Ø -180 z- 180	300	10	[16]
<b><i>VSHAPER PRO</i></b>	Cartesiana	450	150	70	x- 270 y- 270 z- 200	---	50 a 300	[17]

Uma vez que a máquina que se planeia conceber neste momento é apenas um protótipo experimental que visa provar a funcionalidade do conceito, definimos que será apenas necessário cumprir com os requisitos mínimos no que diz respeito às suas características:

a) No que diz respeito ao valor de temperatura máxima necessária no extrusor, há dois fatores a considerar. O primeiro é, conforme podemos ver no subcapítulo 2.3, a temperatura recomendada para trabalhar com PEEK, que é de 395°C. O segundo é que a temperatura máxima de valor mais baixo apresentado pelas impressoras da Tabela 4 é de 400 °C. Assim conclui-se que o valor mínimo para a temperatura máxima do extrusor dever ser 400°C.

b) No que diz respeito à temperatura da base, o valor mais baixo apresentado pelas impressoras no mercado é de 120°C, portanto esse deve ser o valor mínimo a que a base deve aquecer.

c) Relativamente à temperatura ambiente, nem todas as soluções apresentadas apresentam sistemas de aquecimento direto para o ambiente envolvente da área de impressão, portanto não será obrigatoriamente necessário instalar um sistema desse tipo. No entanto, é preciso notar que



todas estas impressoras operam em camaras fechadas o que aumenta a temperatura envolvente da área de impressão, logo esse terá de ser um requisito mínimo.

d) Quanto ao volume de trabalho iremos também optar por um volume de trabalho mínimo apresentado para impressoras deste tipo, uma vez que, sendo um protótipo funcional, não terá necessidade de imprimir grandes peças, mas, no entanto, tem que ter o tamanho mínimo para apresentar resultados realistas. Portanto o volume proposto será de 140mm\* 135mm\*148mm para uma impressora cartesiana e de Ø180mm\*180mm para uma impressora delta.

e) Quanto ao valor mínimo para a velocidade máxima de operação será usado o valor de 80mm/s uma vez ser o valor mais baixo apresentado na Tabela 4. Embora este seja um valor baixo, enquadra-se com os objetivos do projeto, uma vez que o objetivo principal da criação de uma máquina de cinco eixos é o aumento na qualidade das peças.

f) Conforme foi dito anteriormente, a qualidade das peças é um fator importante, portanto é também importante que a máquina tenha baixos valores de resolução. Observando a tabela podemos ver que para um eixo genérico o valor mais baixo apresentado é de 10 micron, que deverá ser um bom valor de referência para a máquina a produzir.

Os parâmetros definidos como especificações mínimas para a impressora, que estão resumidos na Tabela 5, são então os seguintes: 400 °C para a temperatura máxima do extrusor, 120 °C para a temperatura da base de aquecimento, a existência de um ambiente fechado sem aquecimento direto, um volume de trabalho de 40mm\*135mm\*148mm para uma impressora cartesiana e de Ø180mm\*180mm para uma impressora delta, uma velocidade máxima de 80 mm/s e uma resolução mínima de 1º micrómetro. Estando os parâmetros definidos é agora possível avançar para o estudo das soluções a apresentar.

Tabela 5 - Especificações mínimas para a impressora PEEK com 5 eixos – INEGI.

	<i>Temp. max. Extrusor(°C)</i>	<i>Temp. máx. base (°C)</i>	<i>Temp. máx. camara (°C)</i>	<i>Volume de trabalho (mm)</i>	<i>Velocidade max. (mm/s)</i>	<i>Resolução (micron)</i>
<i>Impressora PEEK com 5 eixos - INEGI</i>	400	120	---	Cartesiana x- 140 y- 135 z- 148 Paralela Ø -180 z- 180	80	10



## 4. Impressora tridimensional com cinco eixos

No início de qualquer projeto deve-se realizar o estudo das soluções possíveis e do conhecimento atual que possa ajudar à sua realização. Neste trabalho, essa pesquisa passa por primeiramente estudar os estilos de manipulador que são possíveis de usar. Depois, deverá ser pensado como se realiza o controlo desse manipulador, tanto a nível de hardware como de software e, por fim, devem-se escolher os componentes que constituirão a máquina. Em termos de estilos de manipuladores será importante estudar os diferentes estilos possíveis e verificar se já foram usados para realizar impressões 3D a cinco eixos. Quanto à solução de automação, é necessário estudar os tipos de controladores que possivelmente poderão controlar este sistema e quais os tipos de software necessários, bem como as opções dentro de cada de tipo. Por fim, é necessário estudar quais serão os tipos de componentes que deverão constituir a máquina em questão bem como quais a soluções mais apropriadas dentro de cada tipo. Uma vez terminado este estudo, estará então reunida toda a informação que permite começar a avaliação das melhores soluções.

### 4.1. Estrutura da Arquitetura de 5 eixos

Um dos principais pressupostos associados a este projeto é a definição da disposição e configuração dos eixos da máquina, bem como a configuração da estrutura a usar. Ou seja, a primeira grande opção deverá ser o tipo de manipulador a usar como base para a impressora a desenvolver. Existem vários aspetos e características a ponderar na opção de um tipo de manipulador, tais como [18]:

- a) A configuração – Especificação da composição e disposição dos elementos principais do manipulador.
- b) Os graus de liberdade – Existem 3 de posicionamento (x, y e z) e 2 de orientação, uma vez que a rotação segundo o eixo do extrusor não é necessária.
- c) O espaço de trabalho – Corresponde ao volume total a que a ferramenta do manipulador consegue aceder.
- d) Fonte de energia – Hidráulica, pneumática ou elétrica.
- e) Repetibilidade – Capacidade de o manipulador repetir a mesma tarefa múltiplas vezes tentando alcançar os mesmos pontos.
- f) Rigidez – Relação inversa entre as forças exteriores e a deformação da estrutura
- g) Tipo de junta – Revoluta, prismática, universal ou esférica.
- h) Geometria – Que tipo de juntas usa o manipular e em que ordem. A geometria pode ser dividida em duas grandes áreas, série e paralela.

Existem atualmente inúmeros tipos de robots que apresentam diferentes combinações das características apresentadas anteriormente, entre os mais relevantes, manipuladores cartesianos, manipuladores articulados, manipuladores SCARA, manipuladores de estrutura paralela (Plataforma de Stewart e Robots Delta), manipuladores polares e manipuladores cilíndricos, que serão discutidos seguidamente [19].

#### 4.1.1. Manipulador Cartesiano

Os manipuladores cartesianos são as estruturas mais utilizadas em máquinas para fabrico aditivo. Este tipo de manipulador é caracterizado por utilizar 3 juntas prismáticas que correspondem aos 3 eixos ortogonais perpendiculares, usualmente x y e z e, conseqüentemente, movimentar a sua carga ou ferramenta (neste caso o extrusor) dentro de um espaço de trabalho retangular. Podem ser acrescentados um ou dois de revolução para adicionar possibilidades de orientação da ferramenta. Se o manipulador estiver montado sobre uma estrutura superior à área de trabalho, este tem a designação comum de “*Gantry Robot*”[20], [21].

Os manipuladores cartesianos são normalmente usados para situações em que se trabalhe com cargas elevadas ou operações com grandes áreas de trabalho. Em termos de aplicações, este tipo de manipuladores tem como utilizações comuns o transporte de cargas em armazéns, realização de soldadura, realização de operações de corte, entre outros [22]. É também importante referir que as máquinas ferramenta por arranque de apara usam, normalmente, esta cinemática. Estes manipuladores apresentam como vantagens principais a sua fácil programação, a potencialidade para lidar com cargas elevadas e o facto de serem relativamente baratos. Como desvantagens desta configuração podemos destacar a obrigatoriedade de uma área de trabalho retangular [23].

Devido às suas características, os manipuladores cartesianos são a solução mais frequentemente encontrada em máquinas de impressão 3D. De facto, máquinas como a *Ultimaker 2+* [24] ou a *MakerBot Replicator+* [25] recorrem a esta solução muito em parte por possuir os 3 eixos necessários a implementação do processo, mas também por ser mais simples matemática e mecanicamente. No entanto, quando transpomos estes manipuladores para máquinas com 5 eixos, a solução encontrada até agora tem sido acrescentar 2 eixos angulares ao sistema de 3 ortogonais já existente, quer seja na base, como na máquina desenvolvida por *Øyvind Kallevik Grutle* [10], quer na cabeça, como na solução apresentada pela empresa *5AXISMAKER* [26].

A solução de *Øyvind Kallevik Grutle* [10] nasce de um estudo académico realizado na Universidade de Oslo. A solução ali desenvolvida passou por acrescentar uma mesa com 2 eixos rotativos a uma impressora de manipulador cartesiano já existente. O resultado da arquitetura obtida é o da Figura 6. De uma forma geral esta máquina funcionava bem, sendo os maiores problemas encontrados a intersecção da cabeça extrusora com a mesa e a falta de um *slicer* 3D para 5 eixos. Quanto ao primeiro problema, este foi resolvido usando um eixo auxiliar para rodar a cabeça extrusora. Quanto ao segundo problema este foi resolvido gerando um Código G para fabricar duas peças, usando programas específicos em *Java*, que embora permitissem a impressão de peças, não funcionavam com os 5 eixos interpolados simultaneamente [10].

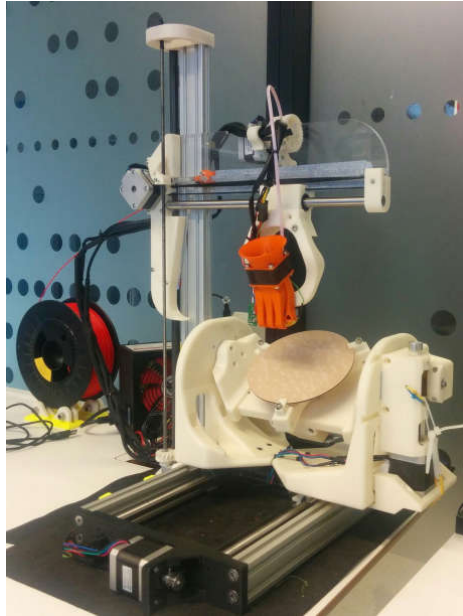


Figura 6 - Impressora produzida por Øyvind Kallevik Grutle [10].

Como referimos, a outra solução existente no mercado é uma impressora da empresa *5AXISMAKER* [26]. Esta máquina funciona numa configuração de 3 eixos ortogonais e 2 eixos angulares na cabeça, como pode ser visto na Figura 7. Esta solução foi desenvolvida para poder funcionar como máquina de maquinagem ou de impressão 3D. No entanto, em aplicações como impressora 3D, funciona apenas com três eixos devido à falta de *software* capaz de gerar código G para realizar impressão a cinco eixos [26].

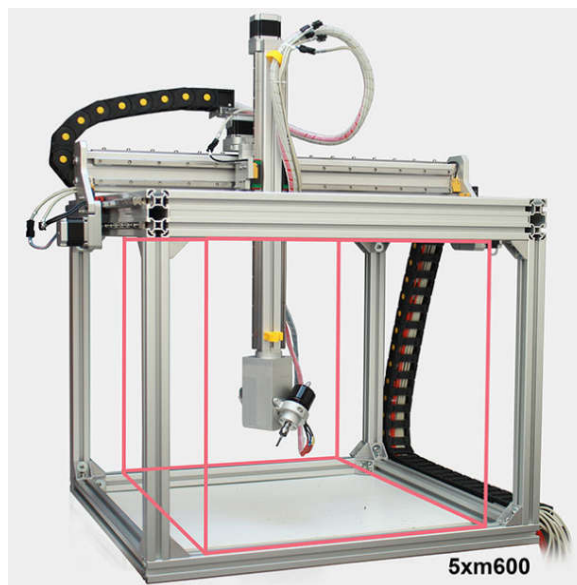


Figura 7 – Impressora da empresa *5AXISMAKER* [26].

Concluindo, os manipuladores cartesianos são caracterizados por terem 3 juntas prismáticas que correspondem aos 3 eixos ortogonais perpendiculares, usualmente x y e z. Já foram construídas duas impressoras usando FDM que operam com 5 eixos, a de Øyvind Kallevik Grutle [10] e da empresa *5AXISMAKER* [26], o que significa que esta é uma solução, em princípio, viável. Posteriormente, no Capítulo 5. “Arquitetura proposta para um processo FDM a 5 eixos” será discutida a pertinência destas soluções.

#### 4.1.2. Estrutura Paralela

Um manipulador robótico de estrutura paralela é composto por várias cadeias cinemáticas fechadas, nas quais a atuação final (plataforma móvel), está conectada por, pelo menos, duas cadeias cinemáticas independentes. Normalmente, o número de membros do manipulador é igual ao número de graus de liberdade a este associado [20], [21]. Este tipo de manipuladores é normalmente usado em cenários que requerem boa precisão e elevada rapidez. Alguns exemplos de situações deste género são robôs que realizem o posicionamento de peças ou manipuladores que realizem operações “*Pick and Place*” [22]. Em termos de características, estes robots têm como pontos fortes principais a elevada rigidez estrutural, uma boa relação entre a força que conseguem exercer e o seu peso, elevadas velocidades e acelerações e boa precisão. Como pontos fracos, podemos destacar o espaço de trabalho reduzido tendo em conta a dimensão da estrutura, o facto de possuírem uma cinemática complexa e serem difíceis de calibrar [23]. Em termos de uso em processos de fabrico aditivo, este tipo de manipulador é bastante comum, existindo já varias soluções comercializadas, tais como a impressora *ORION Delta 3D Printer* [27] ou a *Rostock Max™ V3 Desktop 3d Printer* [28].

Atualmente, ainda não existem soluções comercializadas de manipuladores robóticos de estrutura paralela que realizem impressões tridimensionais por extrusão com cinco eixos. Todavia, foram descritos na literatura três protótipos de estudo utilizando esta abordagem: um realizado por *Lars Skaret*, no âmbito de um estudo académico na Universidade de Oslo, que o executou através de uma *Plataforma de Stewart* [18], outro, realizado no *Politecnico de Milano*, por *Hermes Giberti, Matteo Strano e Massimiliano Annoni* [8], que utiliza um sistema delta de 3 eixos mais uma plataforma com dois eixos angulares. E por fim, um manipulador realizado por *William S. Yerazunis, John C. Barnwell III e Daniel N. Nikovski*, dos laboratórios de investigação da *Mitsubishi Electric* [11], que acrescentaram uma mesa com dois eixos angulares a uma impressora delta já existente.

O trabalho realizado por *Lars Skaret*, da Universidade de Oslo [18], tinha por objetivo criar uma impressora 3D com um simulador para esse manipulador e um software que realizasse percursos de impressão otimizados. Nesse trabalho, foram produzidos, mas não testados, alguns designs de *Plataformas de Stewart* para realizar a impressão 3D. Este é um tipo de robot de estrutura paralela com seis juntas prismáticas, tipicamente elétricas ou hidráulicas, que se unem em duas superfícies, conforme se pode ver na Figura 8. Adicionalmente, foi criado um simulador simples, capaz de executar códigos G escritos manualmente e foi também criado um algoritmo que permitiu melhorar os percursos feitos durante a impressão. Deste trabalho concluiu-se que seria interessante construir uma impressora deste tipo. Existem, no entanto, alguns problemas, tais como o controlo da existência de singularidades e o controlo da estrutura de forma a evitar colisões, bem como a necessidade de conceção de um *software* que crie o código G [18].

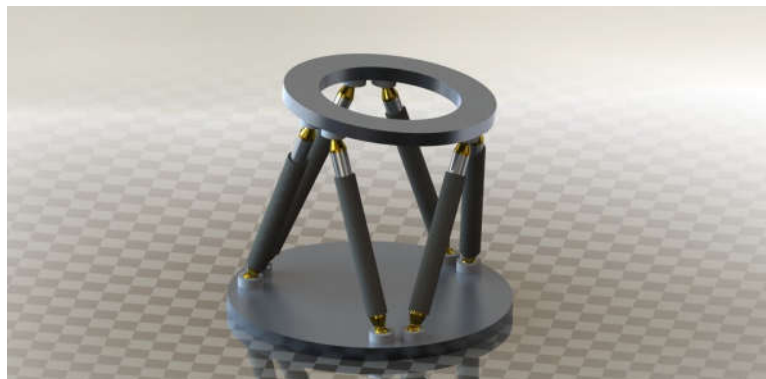


Figura 8 - Plataforma de Stewart [29].

Num estudo realizado por *Hermes Giberti* [8], planeou-se criar uma impressora tridimensional por extrusão de maneira a permitir que a peças produzidas apresentassem um melhor acabamento superficial. Adicionalmente, pretendia-se que esta impressora permitisse uma redução na necessidade de uso de estruturas de suporte [8]. Neste estudo, foram equacionadas diversas opções de manipuladores, tendo no final prevalecido a opção de usar uma estrutura paralela com uma mesa rotacional com dois graus de liberdade (Figura 9). Segundo os autores, a estrutura paralela traria, em princípio, maior estabilidade e precisão e a estrutura rotacional, caso fosse colocada na cabeça extrusora em vez de na base, adicionaria muito peso e inércia à cabeça extrusora o que dificultaria o movimento da mesma e reduziria a precisão. No final, foi desenvolvido um protótipo funcional, que permitiu realizar alguns testes de impressão [8].

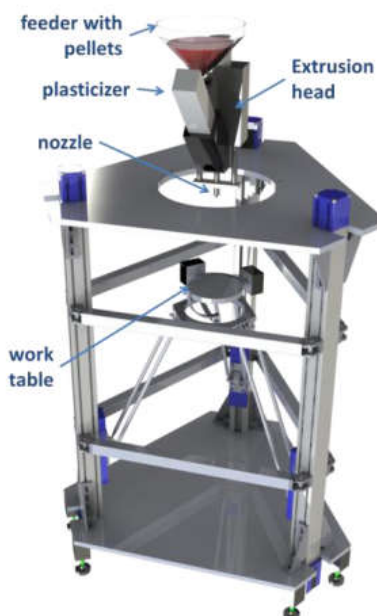


Figura 9 - Impressora projetada por Hermes Gibertia, Matteo Strano and Massimiliano Annoni [8].

Outra solução desenvolvida, foi produzida no laboratório de desenvolvimento da *Mitsubishi* com o objetivo de testar qual seria a melhoria das propriedades mecânicas de peças criadas com um sistema de 5 eixos [11]. Para executar esse estudo, existiu a necessidade de criar uma máquina de 5 eixos, e, portanto, foi criado um sistema delta com 3 eixos de topo e uma mesa com dois eixos rotativos como podemos ver na Figura 10. Foi também criado um *software* que

permitisse escrever automaticamente Código G para 5 eixos. Foi possível imprimir com a impressora, tendo sido concluído que esta efetivamente produz peças de melhor qualidade [11].

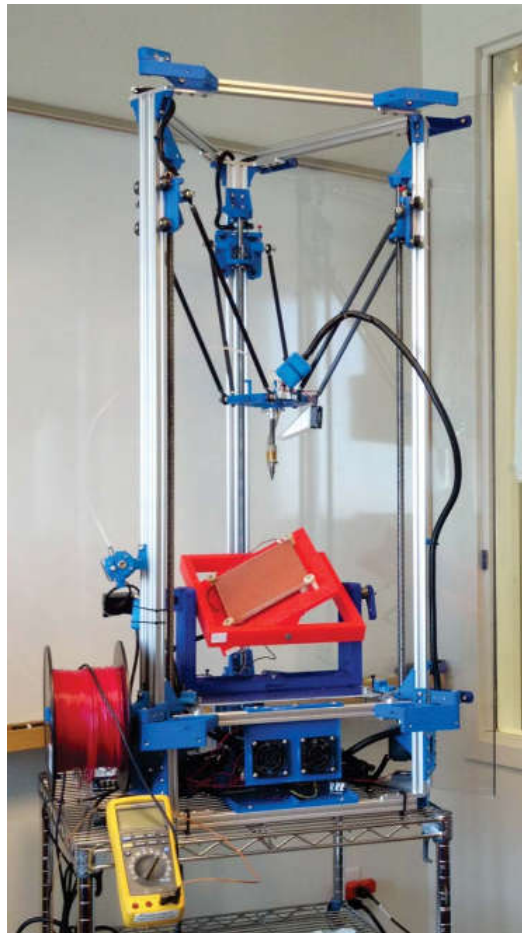


Figura 10 - Impressora produzida por William S. Yerazunis, John C. Barnwell III, Daniel N. Nikovski no Laboratório de Desenvolvimento da Mitsubishi [11].

A última máquina, desenvolvida por *Xuan Song, Yayue Pan, Yong Chen*, consiste também numa *Plataforma de Stewart* de 6 eixos [12]. Neste trabalho, estudaram-se diferentes abordagens para este tipo de máquina, tendo os autores optado por uma *Plataforma de Steawrt*. Esta máquina foi projetada (conforme apresentado na Figura 11) e construída, tendo permitido realizar teste de impressão [12]. No final do estudo foi concluído que era possível construir um manipulador deste tipo de forma não muito dispendiosa e que o manipulador se movimentava com uma boa velocidade. Adicionalmente, os autores concluíram que o manipulador era capaz de imprimir em direções múltiplas e que este tipo de solução seria capaz de colmatar algumas das limitações do processo de FDM comum, tais como a construção à volta de estruturas existentes.



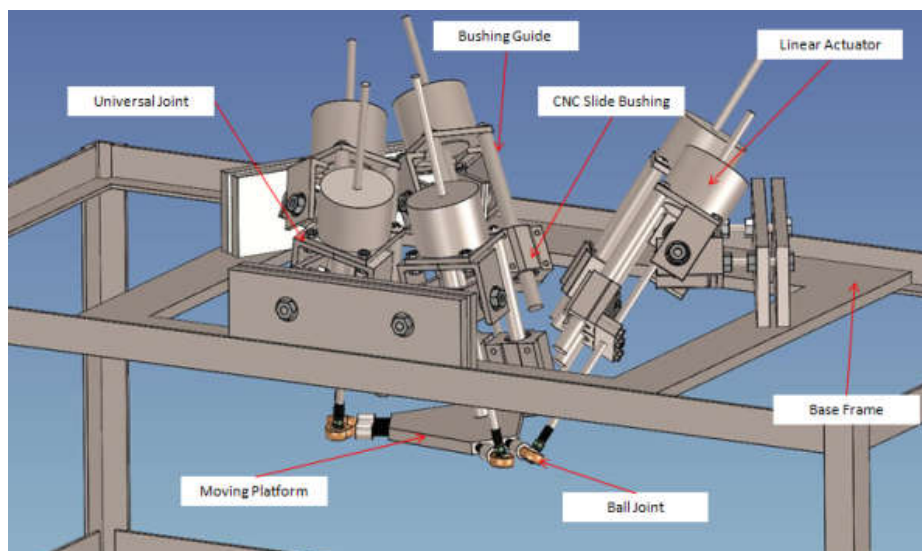


Figura 11 – Impressora de 6 eixos para fabrico aditivo por FDM [12].

Em suma, os robots de estrutura paralela são caracterizados por possuírem cadeias cinemáticas fechadas, nas quais a atuação final (plataforma móvel), está conectada por pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes. Até à data, foram encontradas duas soluções usando plataformas de *plataformas de Stewart* [12], [18] e duas usando robots delta [8], [11]. Todas estas soluções demonstraram ter características adaptadas à solução procurada, conforme discutiremos posteriormente.

#### 4.1.3. Robots de Estrutura Articulada

Existe uma grande variedade de robots de estrutura articulada no mercado, tendo este, na sua maioria, seis eixos de movimento, sendo todos eles de revolução. A configuração articulada pode ser caracterizada por um conjunto de corpos rígidos ligados em série por intermédio de juntas rotativas, formando uma cadeia articulada aberta, ficando uma extremidade da cadeia cinemática fixa a uma base de suporte e a outra livre, permitindo o acoplamento de ferramentas [30]. A eficiência no espaço de trabalho e destreza de movimentos associados a este tipo de robots, são excelentes para configurações com 5 ou mais eixos. Este tipo de manipulador é muito versátil no que diz respeito à sua aplicabilidade. Tal deve-se à sua facilidade em se movimentar no espaço de trabalho e de adquirir diferentes configurações, o que o torna ideal para diferentes aplicações, incluindo processos complexos de remoção e instalação de peças, soldadura, pintura com spray. Em termos de vantagens, os manipuladores de estrutura articulada apresentam um grande espaço de trabalho envolvente, uma grande flexibilidade e uma elevada rapidez de trabalho. Por outro lado, como desvantagens podemos referir um custo mais elevado, o facto de possuir muitos componentes e trabalhar com algoritmos complexos, sendo pouco rígido, especialmente no alcance máximo [20].

Em termos de aplicação dos manipuladores de estrutura articulada para o fabrico aditivo, qualquer solução desenvolvida terá à partida pelo menos 5 eixos, visto que a maior parte destes manipuladores possui pelo menos 6 eixos. Existe já uma solução de FDM com 8 eixos, desenvolvida utilizando esta tecnologia, que consiste num manipulador articulado de 6 eixos da empresa *KUKA* mais um sistema adicional de 2 eixos numa base independente que roda em torno de dois eixos independentes (Figura 12) [31]. Para trabalhar com este sistema, foi proposto um método de *slicing* próprio. Este projeto permitiu desenvolver uma peça

geometricamente complexa, tendo-se concluído que este sistema simplifica o planeamento deste tipo de peça e poupa tempo de produção da mesma [31].

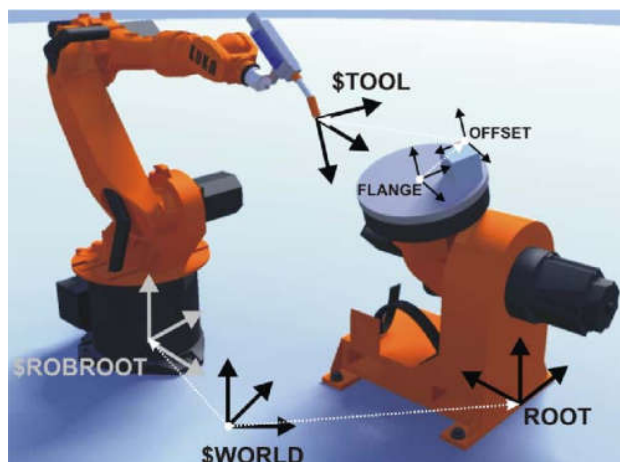


Figura 12 - Impressora baseada num manipulador articulado [31].

Um robot de estrutura articulada é caracterizado por uma cadeia articulada aberta, ficando uma extremidade da cadeia cinemática fixa a uma base de suporte e a outra livre, permitindo o acoplamento ferramentas. Foi encontrada uma solução FDM com mais de 5 eixos para realizar este processo [31]. Esta solução mostra capacidade de usar esta tecnologia para realizar o projeto em causa e será posteriormente comparada com as outras tecnologias estudadas.

#### 4.1.4. Manipulador SCARA

Os robôs SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) são um tipo especial de robot que pode ser encontrado na indústria. Este tipo de robots caracteriza-se por ter duas juntas do tipo revoluto e uma do tipo prismático, sendo os eixos destas 3 juntas, normalmente, paralelos e alinhados com o sentido da gravidade. Assim, com esta configuração comum, o robot apresentará 3 graus de liberdade, não sendo comum encontrar-se configurações com mais graus de liberdade [20]. Este tipo de manipulador possui um espaço de trabalho praticamente cilíndrico e é normalmente adequando para realizar trabalhos no plano, como trabalho rotineiro de “*Pick and Place*”, montagem de componentes ou transporte de cargas. Os manipuladores SCARA apresentam como características positivas uma boa rigidez estrutural, poucas juntas, uma grande velocidade de operação, boa capacidade de carga e uma excelente repetibilidade. Como desvantagens podemos apontar as restrições de movimento e a pouca flexibilidade [23].

Em termos de aplicação deste tipo de manipuladores a fabrico aditivo com 5 eixos, não se conhece atualmente nenhuma aplicação deste tipo. No entanto existem manipuladores SCARA que realizam o processo FDM, tais como a impressora *RepRap Morgan Pro 2* [32]. Posteriormente irá ser considerado o uso deste tipo de solução para a realização do projeto.

#### 4.1.5. Manipuladores Polares

Os robots que trabalham em coordenadas polares podem dividir-se em duas grandes famílias, compreendendo os de configuração esférica e os de configuração cilíndrica. Os Robots em coordenadas polares de configuração esférica trabalham com uma configuração  $r, \theta, \varphi$ , tendo o primeiro robot industrial, o “*Unimate*”, utilizado esta configuração [19]. Os robots em coordenadas polares podem também ter uma configuração cilíndrica, ou seja, movimentar-se no espaço  $r, z, \theta$  [19]. Os robots com configuração esférica são normalmente usados para carregamento de máquinas, sendo especialmente adequados para alcances longos em trajetórias retilíneas. Os robots de configuração cilíndrica têm como principais aplicações operações de montagem de componentes elétricos ou operações de “*pick and place*” [19]. Os manipuladores polares apresentam como vantagens o facto de serem facilmente programáveis e controláveis, são rápidos e apresentam uma boa precisão e repetibilidade. Como desvantagens podemos apontar o facto de, devido ao efeito de alavanca causado pela carga e comprimento do braço, quanto mais afastado da região interna do volume de trabalho e quanto maior for a carga, pior será a resolução deste robot.

Em termos de aplicação deste tipo de manipuladores para impressão tridimensional existe apenas um fabricante que aplica esta tecnologia, a empresa 3D polar, mas apenas o faz para impressoras de sistemas de três eixos [33]. Posteriormente irá ser considerada a adaptabilidade deste tipo de solução para a realização da máquina proposta.

#### 4.2. Solução de Automação

Para executar o anteprojecto desta máquina é preciso, para além de definir a estrutura, escolher o controlador responsável pelo controlo dos movimentos da máquina e de todos os equipamentos auxiliares. Em termos de requisitos necessários para efetuar o controlo desta máquina é necessário que o sistema seja, primariamente, capaz de controlar os movimentos dos cinco eixos associados ao movimento principal da máquina. Para além desta ação de controlo principal, existem vários sistemas auxiliares a ter também em conta. O primeiro é o controlo da velocidade de avanço do cordão de plástico a depositar. A este propósito, é importante referir que, em muitos casos, o eixo que empurra o cordão da bobine para a cabeça de fusão é interpolado com os eixos principais de movimento, de modo a garantir uma relação entre o comprimento de cordão debitado e o comprimento do percurso realizado pela cabeça. Para além disso, é também necessário realizar o controlo de temperatura da cabeça de fusão, da mesa sobre a qual a peça vai ser depositada, do ambiente interior da máquina onde a peça está a ser construída e da temperatura da peça. Por fim, será ainda necessário controlar outras funções de automação, como a verificação do estado das portas de aceso, a disponibilidade na bobine, e outros eventuais sistemas.

Para satisfazer este largo conjunto de requisitos existem várias soluções de controladores possíveis. Uma das soluções possíveis será obter-se um controlador CNC clássico que se adeque aos requisitos em questão. Outro tipo de solução possível seria usar um PC industrial e uma solução *SoftPLC*, como os *softwares Codesys, Twincat3* ou *Linux CNC*. Por fim, podemos também optar pela solução mais comum de controlo de impressoras 3D, usando um “*Programmable Physical Circuit Board*” como, por exemplo, o *Arduino*. Seguidamente apresentaremos as principais características destas opções de forma a propor uma solução para o projeto que estamos a desenvolver.

### 4.2.1. Hardware

Uma das opções possíveis para realizar o controlo de uma impressora tridimensional de cinco eixos é a escolha de um CNC clássico a ser adquirido a um fabricante e que possa ser configurado para esta aplicação em específico. Este tipo de solução de controlador é, normalmente, fechado e executa a função de ler e interpretar as instruções codificadas para o funcionamento da máquina, bem como implementar essas instruções e realizar o controlo dos movimentos associados a todos o processo. Este tipo de controlador deve ser adquirido a fabricantes como a *Fagor*, a *Fanuc* ou a *Siemens*, entre outros.

Tendo então em conta os requisitos mínimos de número de eixos que a máquina terá de controlar, 5 eixos de movimento mais 1 para extrusor, foram escolhidos três controladores de três fabricantes diferentes. Da empresa *Fagor* selecionou-se o controlador *CNC 8055 POWER* [34], da empresa *Fanuc* selecionou-se o controlador *30i-B* [35] e da empresa *Siemens* selecionou-se o controlador *Simotion D425-2DP* [36]. A Tabela 6 apresenta resumidamente as características de cada um dos controladores selecionados.

Tabela 6 - Características de Controladores CNC possíveis de usar numa máquina de 5 eixos.

	<i>Fagor CNC 8055 POWER</i>	<i>Fanuc 30i-B</i>	<i>Siemens Simotion D425- 2DP</i>
<i>Número Máximo de eixos controláveis</i>	8	24	16
<i>Memória RAM</i>	1 MB	64KB - 8MB	64 MB
<i>Memória de dados</i>	2 GB	---	300 MB
<i>Máximo número de entradas/saídas digitais</i>	232/120	4096 / 4096	16/16
<i>Comunicações disponíveis</i>	Sercos, CAN, Ethernet, USB	Ethernet, EtherNet,PROFINET FANUC I/O-Link i, FL-net AS-i, PROFIBUS DP, DeviceNet, CC-Link, Modbus TCP	DRIVE-CLiQ interfaces, USB, Ethernet, PROFIBUS
<b>Ref.</b>	[34]	[35]	[36]

Outro tipo de solução de controlo que permitiria o controlo de uma máquina como uma impressora tridimensional de cinco eixos seria a junção de um PC industrial com um software com funções de controlo. Para aplicar este tipo de solução é simplesmente necessário adquirir um computador industrial, a marcas como por exemplo à *Beckhoff* [37], onde será depois instalado um *software* de controlo como *Codesys* [38], *Beckhoff TwinCAT* [37], *Mach3* [39] ou *LinuxCNC* [40]. Este tipo de solução já foi implementado com sucesso em duas impressoras tridimensionais de cinco eixos. Na primeira vez, foi criada uma máquina de 5 eixos que realizasse um processo aditivo “Layerless” [41]. Neste caso, foi utilizado o *software Mach3* para gerar o código G, sendo depois usada uma placa controladora não identificada pelo autor para executar o mesmo. Outra ocasião de uso deste tipo de solução, é da responsabilidade da empresa *5axismaker*, que comercializa uma máquina com 5 eixos que pode funcionar como fresadora

ou impressora tridimensional [26]. O sistema de controlo indicado pela empresa para o controlo desta é uma solução ordinária de PC usando o software *Mach3* como controlador.

Os PC's industriais são computadores em tudo semelhantes aos PC's domésticos executando as mesmas funções e correndo, geralmente, o mesmo *software*. Tipicamente, a grande diferença entre os computadores industriais e os ditos normais é a sua construção. Os computadores industriais têm melhores materiais de construção e são fabricados de forma a que tenham maiores tempos de vida ou consigam trabalhar em ambiente mais agrestes como ambientes de altas temperaturas, que contenham poeiras ou sejam muito húmidos [42]. Embora para esta aplicação em específico talvez fosse possível usar um computador ordinário a solução mais apropriada seria usar um PC industrial. Um exemplo de um PC industrial que poderia ser usado neste caso seria o modelo *CP22xx* da empresa *Beckhoff* [43], que é solução integral com ecrã *multi-touch* mais simples que esta empresa oferece. Outra alternativa seria o modelo *CX8000* [43], que é um PC modular, ou seja, permite a adição de outros módulos com outros componentes e funções em função das necessidades, sendo este também o mais simples que esta empresa oferece. Este tipo de computador pode ser adquirido a outras várias marcas como, *ELMA* (*ELMA electronic, Fremont, USA*), *Advantech* (*Advantech Corporation, Taipei, Taiwan*), *Kontron* (*Kontron AG, Augsburg, Germany*), entre outras. É, no entanto, necessário, aquando da escolha do PC, ter em consideração a correspondência dos requisitos mínimos de operação do software que se quer utilizar com as características do PC.

Em complemento ao Hardware (computador industrial) é necessário um *software* que seja capaz de aplicar a lógica de controlo da máquina a realizar. Existem hoje em dia várias opções de *softwares* deste tipo que executam todo o tipo de funções desde emularem funções de PLC's, de controladores CNC ou de controladores de movimento. Entre as opções disponíveis no mercado destacamos os *softwares* *Codesys*, *TwinCat* e *LinuxCNC*. O *Codesys* é um software produzido pela empresa *3S-Smart Solutions* (*3S-Smart Software Solutions GmbH and CODESYS, Kempten, Germany*), que tem o propósito geral, segundo o próprio fabricante, de executar a função de controlador industrial, segundo a Norma IEC 61131-3 [44]. Para aplicação de controlo em questão neste trabalho, as funções do módulo base do *Codesys* poderão não ser suficientes devido à falta de funções de controlador de movimento ou de aplicação de código CNC. No entanto, a empresa *3S-Smart Solutions* disponibiliza uma expansão ao programa base denominada *Codesys Motion+CNC* [45] que permite acrescentar essas funções às funções normais de programação lógica da versão base. Segundo o fabricante, os únicos requisitos para aplicação desta solução são a existência de um PC industrial com *Microsoft Windows 7/8/10* e uma interface *Fieldbus* para atuação dos *drivers* (*CAN* ou *Sercos*) ou uma porta *Ethernet* (*EtherCAT*).

O *TwinCAT3* (*The Windows control and Automation Technology*) é um software *open source* da empresa *Beckhoff* [37] que implementa sistemas abertos de automação baseados em PC. Este *software*, agora na sua terceira versão, permite a qualquer computador ser transformado num controlador em tempo real com sistemas múltiplos de *PLC's*, *NC's* e *CNC's*. O *TwinCAT3* [43], possui vários módulos com várias funções diferentes, que devem ser escolhidos em função das necessidades da situação. Para a solução que pesquisamos, seriam interessantes, para além do módulo base, os módulos *TwinCAT 3 Controller* e o *TwinCAT 3 Motion Control* uma vez que possuem bibliotecas que facilitariam a implementação de funções necessárias. Em termos de requerimentos para permitir o uso deste software é apenas pedido pelo fabricante que se tenha um determinado sistema operativo, que varia em função dos módulos, mas será usualmente *Windows XP*, *Windows 7/8/10* ou *Windows CE*.

*Mach 3* [39] é um software da empresa *Newfangled Solutions* [46] que permite a um computador comum executar funções de um controlador CNC. Entre as funções principais indicadas pelo fabricante pode-se destacar as capacidades de controlar 6 eixos CNC usando motores servos e passo a passo, de importar ficheiros nos formatos DXF, BMP, JPG, e HPGL, de visualizar códigos G, e de gerar códigos G. Em termos de requerimentos gerais para permitir

o uso deste software é indicado pelo fabricante que é necessário uma versão um dos seguintes sistemas operativos, *Windows 2000*, *Windows XP*, *Windows Vista*, um CPU com 1Ghz e uma RAM de 52MB.

O *LinuxCNC* [40] é um software de controlo gratuito e *open source* desenhado por voluntários, que implementa capacidade de controlo numérico em computadores com objetivo de controlar máquinas CNC. Este é um *software* de controlo bastante completo que executa funções de interpretação e execução de Códigos G, de PLC's e mesmo de controlador, podendo controlar até 9 eixos CNC simultaneamente. O *Linux CNC* é um *software* desenhado para trabalhar em sistema operativo *Linux*, e é indicado pelo fabricante que para este sistema funcionar corretamente deve ter como requisitos mínimos de *Hardware* um processador 700 MHz x86, 384MB de RAM, um disco duro de 8GB, uma placa gráfica de pelo menos 1024x768 de resolução e uma ligação à internet.

A ultima solução aqui apresenta são as denominadas *Programmable Physical Circuit Boards*, que são componentes eletrónicos de tamanho reduzido e relativamente baratos usualmente usados para realizar o controlo de sistemas através do uso de lógica programada e de *inputs* e *outputs* físicos e digitais. É importante notar que este tipo de solução é o mais comum quando se fala de controlo de impressão tridimensional.

Este tipo de solução foi já usado várias vezes em contextos de impressão tridimensional com cinco eixos de movimento. Uma dessas ocasiões foi a propósito da construção de uma impressora por parte do laboratório "*Mitsubishi Electric Research Laboratories*", em que foi desenvolvido um sistema de uma impressora delta comum de três eixos com a adição uma base com dois eixos rotativos, que usava como sistema controlador do uma *Motherboard Azteeq X3 Pro* [11]. Outra aplicação deste tipo de solução foi na construção de uma impressora baseada numa "Plataforma de *Stewart*" [12]. A máquina contruída tinha seis eixos de movimento e o sistema escolhido de controlo foi um sistema de placa de controlo e respetivo driver *KFLOP+2KSTEP (Dynomotion)* [8]. Para além disso, foi também usada uma solução deste tipo para uma adaptação de um robot articulado de seis eixos, ao qual foi adicionado uma mesa rotativa de dois eixos, para realizar impressão tridimensional com um sistema de oito eixos no total [31]. Para realizar o controlo desse sistema foi escolhido placa de I/O para PC, *PCI-6221* da *National Instruments*, sendo ainda referido no artigo que foi usado *LabVIEW* como ferramenta de programação do sistema [31]. Por fim, outra dessas ocasiões foi a conceção de uma solução para impressão a cinco eixos produzida por Grutle [10]. Neste trabalho foi usado um controlador *Duet* com a sua expansão *Duex4* para controlar um manipulador cartesiano de três eixos ortogonais mais uma base com dois eixos rotativos [10].

Um caso particular do tipo de controladores *Programmable Physical Circuit Boards* é a plataforma *Arduino* [47]. Esta é uma plataforma "open source" usada para construir projetos eletrónicos, constituída por um "Programmable Circuit board" e um software proprietário que corre em PC e permite programar a placa. As soluções *Arduino* são amplamente utilizadas, tendo já, inclusive, sido propostas para realizar o controlo de impressoras tridimensionais de cinco eixos. Por exemplo, utilizou-se um *ArduinoMega* para controlar uma plataforma de *Stewart* que serviria de estrutura base para uma impressora tridimensional de seis eixos [18].

Tendo em conta os requisitos mencionamos no início desta secção (permitir o controlo de pelo menos 6 motores e 4 sistemas de controlo de temperatura) foram selecionados três controladores do género *Programmable Physical Circuit Boards*, que se pensam capazes de realizar essa função. A seleção feita está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Programmable Physical Circuit Boards possíveis para o controlo da impressora e características potenciais máximas.

Nº máximo que é possível controlar de:	RepRap RUMBA	Azteeg x3	Duet + Duex5
<i>Driver's para MPP</i>	6	8	5+5
<i>Extrusores</i>	3	5	2+5
<i>Bases de aquecimento</i>	1	2	1+5
<i>Camaras de aquecimento</i>	1	0	3+5
<i>Termístores</i>	5	6	3+5
<i>Termopares</i>	0	0	0+2
<i>Ref.</i>	[48]	[49]	[50], [51]

Existem ainda muitas outras opções de placas controladoras que poderão realizar o controlo desta máquina, especialmente considerando a possibilidade de utilizar expansões associadas a esses controladores. A título de exemplo, mostra-se aqui duas soluções usando por base a versão atual do controlador *Duet*. A placa mencionada só por si permite controlar cinco *driver's* para *MPP*, três FET's (Transistor de Efeito de Campo) (*base de aquecimento*, *E0*, *ventoinha*) e três *termístores*. O controlador sozinho não consegue realizar o controlo da máquina que se pretende construir, no entanto com a adição da expansão *Duex 5* adicionamos as funções já existentes a possibilidade de controlar mais cinco *MPP*, cinco FET's e cinco *termístores* o que torna o sistema possível. Outra opção viável também seria usar o mesmo *Duet* com o "*shield*" *RADDS*, que permitiria no total controlar seis *MPP*, uma base de aquecimento, três sistemas de aquecimento, duas ventoinhas e cinco *termístores*.

#### 4.2.2. Soluções de Software

O processo de impressão tridimensional tem, para estar completo, três partes fundamentais, estando a cada parte associado um determinado tipo de *software*. A primeira é o desenho da peça que se pretende fabricar. Para realizar esta ação é necessário um *software* que permita criar digitalmente o objeto a ser impresso e exportá-lo sob a forma de um ficheiro compatível com os softwares que gerem os processos seguintes, normalmente em formato *.stl*. Este tipo de *software* corresponde, normalmente, a sistemas computacionais de desenho assistido por computador (CAD). A segunda etapa do processo de impressão tridimensional é a conversão do ficheiro obtido anteriormente num conjunto de informação que possa ser lido pela máquina que vai fazer a peça. O *software* normalmente responsável por esta função é denominado de *slicer*, e transforma um desenho em formato *.stl* num código G. A última fase do processo de impressão é a implementação do código G por parte da máquina. Este processo é, normalmente, executado pelo controlador e o seu respetivo *software*, tendo esta fase sido discutida na secção anterior desta dissertação.

Os sistemas computacionais *CAD* (*Computer-Aided Design*) são programas que permitem ao seu utilizador projetar e desenhar objetos usando um computador. Como foi referido anteriormente, este é o primeiro tipo de *software* no processo de criação de uma peça por impressão tridimensional e existem muitas opções de softwares deste tipo com vários tipos de funcionalidades e preços. A Tabela 8 apresentada alguns dos softwares mais populares no mercado.

Tabela 8 - Software CAD [52].

Nome	Nível de Utilização	Sistema operativo	Preço	Formatos
<i>Autocad</i>	Profissional	Windows e Mac	1400€/ mês	dwg, dxf, pdf
<i>123D Design</i>	Amador	Windows, Mac e iOS	Gratuito	123x, step, stl, x3d, vrml
<b>Fusion 360</b>	Industrial	Windows e Mac	499.80 €/ano, Licenças Educacionais Gratuitas	catpart, dwg, dxf, f3d, igs, obj, pdf, sat, sldprt, stp
<b>FreeCAD</b>	Intermédio	Windows, Mac e Linux	Gratuito	step, iges, obj, stl, dxf, svg, dae, ifc, off, nastran, Fcstd
<b>Inventor</b>	Industrial	Windows e Mac	2.060 €/ano	3dm, igs, ipt, nx, obj, prt, rvt, sldprt, stl, stp, x_b, xgl
<b>Rhino 3D</b>	Profissional	Windows e Mac	495€ Educacional	3dm, 3ds, cd, dae, dgn, dwg, emf, fbx, gf, gdf, gts, igs, kmz, lwo, rws, obj, off, ply, pm, sat, scn, skp, slc, sldprt, stp, stl, x3dv, xaml, vda, vrml, x t, x, xgl, zpr
			1695€ Comercial	
<i>Sketch up</i>	Intermédio	Windows e Mac	Gratuito, 657€ Versão Pro	dwg, dxf, 3ds, dae, dem, def, ifc, kmz, stl
<b>Solidworks</b>	Industrial	Windows	9.950 €	3dxml, 3dm, 3ds, 3mf, amf, dwg, dxf, idf, ifc, obj, pdf, sldprt, stp, stl, vrml
<b>Thinker CAD</b>	Amador	Browser	Free	123dx, 3ds, c4d, mb, obj, svg, stl
<b>CATIA</b>	Industrial	Windows	7.180 €	3dxml, catpart, igs, pdf, stp, stl, vrml

O segundo *software* necessário no processo de impressão tridimensional é o *slicer*. Este é um software responsável por gerar o código G que irá produzir a peça, a partir do desenho fornecido em formato *.stl*, ou formato semelhante. Tal como o próprio nome do *software* indica, este software secciona o modelo fornecido em fatias e, para cada fatia, gera um percurso que o extrusor deve executar. Depois, no processo produtivo, essas camadas são criadas sucessivamente umas sobre as outras até se dar origem à peça. Atualmente, apenas existe software *Slicer* para impressoras que funcionam a três eixos, como mostrado na Tabela 9. Tal significa que, atualmente, não existe *software* capaz de produzir código que trabalhe com cinco eixos interpolados simultaneamente e, portanto, não será possível de operar uma máquina deste tipo na plenitude das suas funcionalidades. No entanto, apesar de ainda não existirem soluções completas deste tipo de *software*, já existem vários estudos feitos em várias universidades no sentido de tentar produzir um [53]–[57].



Tabela 9 - Software Slicer para impressoras a três eixos [58].

Software	Função	Nível de Utilização	Preço	Sistema operativo
<i>Cura</i>	Slicer, 3D Printer Host	Amador	Gratuito	PC, Mac, Linux
<i>CraftWare</i>	Slicer, 3D Printer Host	Amador	Gratuito	PC, Mac
<i>Simplify3D</i>	Slicer, 3D Printer Host	Profissional	132 €	PC, Mac, Linux
<i>Slic3r</i>	Slicer	Profissional	Gratuito	PC, Mac, Linux

### 4.3. Escolha de componentes

Uma parte importante da execução de qualquer projeto mecânico é a seleção dos componentes que irão constituir o sistema. A importância de escolher corretamente os diferentes componentes é muito grande pois ela afeta as gamas de operação de todos os parâmetros de funcionamento da máquina, como a temperatura de operação e, conseqüentemente, os materiais que esta pode utilizar, os esforços que esta pode suportar e a dimensão das peças que esta pode imprimir, bem como as velocidades máximas que a máquina pode atingir, que estão diretamente relacionadas com o tempo de operação da mesma. Neste capítulo discutiremos o tipo de soluções possíveis para os seguintes componentes: base de impressão, extrusor, sensor de temperatura, sistemas de transmissão de movimento e motores.

#### 4.3.1. Base de impressão

A base de impressão corresponde à superfície onde os objetos a imprimir serão depositados. No momento da escolha de uma base, existem basicamente dois grandes fatores a ter em conta, sendo um deles o aquecimento da mesma e o outro o tipo de superfície a usar. A base de impressão pode ou não ser aquecida, no entanto as bases aquecidas são substancialmente melhores, uma vez que aumentam muito substancialmente a qualidade das peças produzidas. Esse aumento é devido ao facto de a base manter o plástico extrudido quente evitando que este se deforme. Caso contrário, dar-se-ia uma deformação causada pelo facto de as superfícies exteriores do plástico arrefecerem mais depressa do que o interior, sendo este acontecimento identificado pelo levantamento dos cantos da peça na mesa de extrusão. Existem várias tecnologias e opções possíveis como soluções para realizar o aquecimento da base:

a) PCB - Uma das soluções possíveis para usar como base aquecida para um processo de FDM seria usar um PCB (*Printed Circuit Board*) [59], que é uma placa produzida por um processo de *etching* [60], tipicamente usada para suportar e conectar componentes elétricos usando caminhos de cobre. Para esta aplicação, criar-se-ia uma placa com a configuração como a mostrada na Figura 13, que funcionaria com uma resistência, produzindo calor. Este tipo de solução tem uma implementação muito simples e compacta, tendo como principal defeito o facto de demorar algum tempo a aquecer. Como exemplo de uma base que usa este tipo de solução pode -se consultar a informação sobre a base MK2B [61].

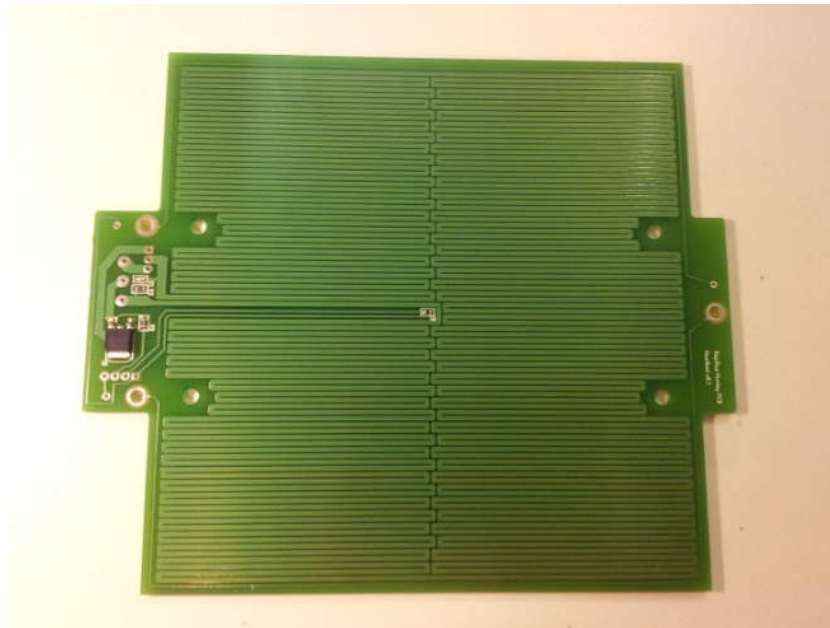


Figura 13 – Exemplo de uma placa PCB [62].

b) Tapete de silicone aquecido - Outra possibilidade de solução de uma base para um processo FDM seria usar um tapete de silicone aquecido, que basicamente consiste num elemento resistivo envolto em dois painéis de silicone. Esse elemento resistivo pode ser de dois tipos, nomeadamente, um fio condutor ou uma placa PCB, como a referida anteriormente. Para além de ser uma solução fácil de instalar e compacta, este tipo de base é bastante vantajosa, pois o silicone é um material isolante elétrico e com boa transferência térmica. Como exemplo deste tipo de solução podemos destacar o base “*Keenovo silicone heating pad*” [63].

c) Tapete de aquecimento usando filme de Kapton - A solução de uma base aquecida usando filme de Kapton é uma solução bastante semelhante à apresentada anteriormente, só que em vez de usar silicone como elemento envolvente, usa um filme de Kapton. O Kapton [64] é um material muito vantajoso para este tipo de situação uma vez que permanece estável numa grande gama de temperaturas (entre  $-269^{\circ}$  e  $400^{\circ}$ ). Este tipo de solução tem como grande benefício, para além de ser muito compacta, fácil de instalar e de rápido aquecimento, o facto de ter uma boa adesão aos materiais ABS e PLA.

d) CLAD Heaters - Outro tipo de solução possível, mas que requereria o uso de uma base metálica seria o uso de CLAD Heaters [65]. Neste tipo de solução seriam usados elementos resistivos como os mostrados na Figura 14, que consistem em elementos bobinados envoltos por uma estrutura cerâmica, que podem ser usados com elementos aquecedores. Esta é uma solução complicada de instalar apesar de ser bastante eficiente.

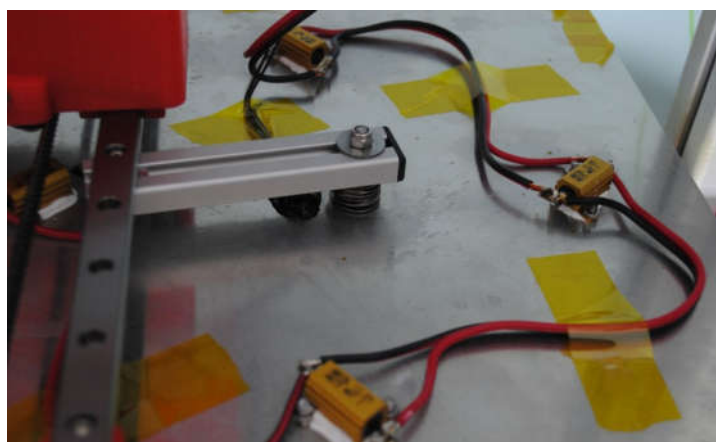


Figura 14 – Exemplo de uma placa de aquecimento com CLAD Heaters [66].

Em suma, podemos concluir que existem vários tipos de bases de aquecimento possíveis de usar. Estas tem no entanto características diferentes, conforme podemos observar pela análise da Tabela 10. Posteriormente será feita a análise de qual o melhor tipo para o projeto a realizar.

Tabela 10 - Características comum de bases de aquecimento dos diferentes tipos.

	<i>PCB</i>	<i>Tapete de silicone</i>	<i>Filme de Kapton</i>	<i>CLAD Heaters</i>
<i>Temperatura máxima</i>	180 °C	200°C	260°C	230°C
<i>Peso</i>	0,062 g/cm <sup>2</sup>	<i>Wire wound</i> - 0,21 g/cm <sup>2</sup> <i>Etched</i> - 0,05g/cm <sup>2</sup>	0.04 g/cm <sup>2</sup>	1,62g/cm <sup>2</sup>
<i>Ref.</i>	[67]	[68]	[69]	[70]

Para além do sistema de aquecimento, a escolha do material a usar na superfície é bastante importante devido à adesão da primeira camada depositada. Quando o processo de FDM se inicia, a primeira camada é depositada diretamente sobre a base e necessita de aderir a esta. Caso contrário, o material depositado pode mover-se ou ser arrastado pelo extrusor, o que estragará a peça a produzir. De modo a garantir que esta adesão se dê, é necessário garantir uma combinação certa entre o material da base e o material a extrudir. Existem diversas situações em que se poderá imprimir diretamente sobre a base aquecida, mas também poderá ser muito benéfico adicionar algum material à superfície para melhorar a adesão, sendo que existem muitas possibilidades para este fim [65], [66]:

a) *Blue painter's tape* - Um dos materiais comumente usados como superfície de impressão é um tipo fita adesiva, também comumente designada de “Blue painter's tape” (composição: 50 a 55% de Polyacrylate e 45 a 50% de papel) por ser usada para pintura. Esta solução tem boa adesão com os marteirais PLA, PET e TPU.

b) *Kapton tape* - outro material também muito usado é filme de Kapton, também conhecido como filme de Poliimida. Este é um filme muito fino e suave, capaz de aguentar elevadas temperaturas. Tem muito boa adesão com o material ABS.

c) *Heated Glass* - outra possibilidade é depositar o material diretamente numa placa de vidro aquecido. Embora seja preciso limpar constantemente o vidro, esta solução permite uma fácil remoção das peças produzidas. Esta solução é compatível com os materiais PLA e PET.

e) *Wolfbite* - existem também empresas especializadas que produzem superfícies para impressão tridimensional adequadas a cada tipo de material, como as produzidas pela empresa AirWolf3D que produz as soluções *Wolfbite* [71] Tabela 11.

Tabela 11 - Soluções *Wolfbite* para diferentes materiais usados em FDM [71].

	ABS	TPE	TPU	PC	PLA	Nylon	Polypropylene	Polycarbonate	Preço
<i>WolfBite Bed Adhesion Solution</i>	x	x	x						≈17€
<i>Wolfbite MEGA</i>	x			x				x	≈17€
<i>WolfBite Nano</i>					x				≈17€
<i>WolfBite NITRO</i>						x			≈17€
<i>Wolfbite Ultra</i>							x		≈34€

f) Garolite - uma boa solução que tem mostrado bons resultados para impressões realizadas com Nylon é usar uma placa de Garolite, que é um laminado de fibra de vidro e epoxy (*Natural linen Le Phenoli sheet*).

g) PEI - também uma boa solução, é usar um a base de PEI (*Polyetherimide*), comumente conhecido como *Ultem*. Esta solução é bastante boa no sentido de não necessitar de manutenção nem de adesivos adicionais, o que a torna muito conveniente. Esta solução é compatível para materiais como PLA, ABS e PEEK.

Em suma podemos concluir que existem diferentes tipos de materiais para a base, compatíveis com diferentes materiais de impressão. Posteriormente será analisado qual o melhor tipo de superfície de impressão para o projeto a realizar.

### 4.3.2. Extrusor

Um dos componentes principais de uma impressora tridimensional da tecnologia FDM é o seu extrusor. O extrusor é o dispositivo responsável por aquecer e amolecer o material a depositar bem como aplicar o movimento sobre o mesmo. Um extrusor é constituído por um conjunto roda dentada e rolamento, responsáveis por empurrar o filamento, por um dissipador, responsável pela dissipação de calor de forma a evitar que este chegue ao filamento antes do desejado e por um “Heater Cartridge”, que é um elemento resistivo responsável por aquecer o filamento. Existem dois tipos principais de extrusores, os *Direct* e os *Bowden*, que serão descritos em seguida.

Os extrusores do tipo *Direct* são os mais antigos e convencionais, sendo chamado de *Direct* uma vez que empurram direta e imediatamente o filamento para o *HotEnd*, onde este é amolecido e empurrado através de um orifício. Neste tipo de extrusor, o filamento é agarrado entre a roda dentada e o rolamento, conforme mostrado na Figura 15. O movimento da roda dentada por um motor causa então o movimento do filamento. O movimento pode dar-se nos dois sentidos, ascendente caso se queira remover o filamento, ou descende, durante o processo de extrusão, onde o filamento é empurrado para o *Hotend* e extrudido. Este extrusor é vantajoso pois tem o sistema que causa o movimento perto do *Hotend*, apresentando uma melhor resposta e menor histerese, um melhor movimento do filamento, especialmente no sentido ascendente. Adicionalmente permite imprimir mais facilmente materiais flexíveis e necessita de usar motores menos potentes pois o atrito é menor. Como grande desvantagem, realça-se o facto de

este tipo de solução implicar a existência de mais massa a mover pelo sistema, pois tem de mover todo o sistema de extrusão [72]–[74].

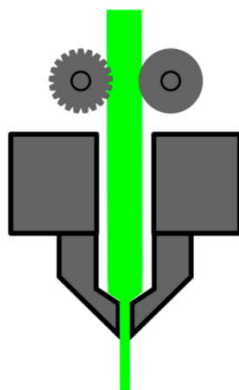


Figura 15 - Representação do Extrusor do tipo Direct [73].

O outro tipo de extrusor existente no mercado é o extrusor do tipo *Bowden*. Este tipo de solução é caracterizado por ter o elemento de aquecimento e o responsável pela criação de movimento em localizações diferentes e é muito comumente usada em impressoras com estrutura delta. Em termos de princípios de funcionamento, este tipo de extrusor é muito semelhante ao *Direct*. A grande diferença é que o elemento extrusor, constituído pelo conjunto roda dentada e o rolamento, encontra-se numa localização diferente do *HotEnd*, como representado na Figura 16, não estando assim no local da extrusão mas, tipicamente, num ponto fixo da estrutura. Como consequência, o filamento é empurrado desde o elemento de extrusão até ao Hot End dentro de um tubo. A grande vantagem deste tipo de solução é que a massa a transportar é muito menor, uma vez que só é transportado o *HotEnd*, o que permite uma movimentação mais rápida da cabeça de extrusão. No entanto, esta solução acarreta algumas desvantagens, tais como a presença de um maior efeito de histerese, a necessidade de maior momento para mover o filamento, devido a ter de combater as forças de atrito criadas no tubo, e a maior dificuldade em imprimir materiais mais flexíveis [72]–[74].

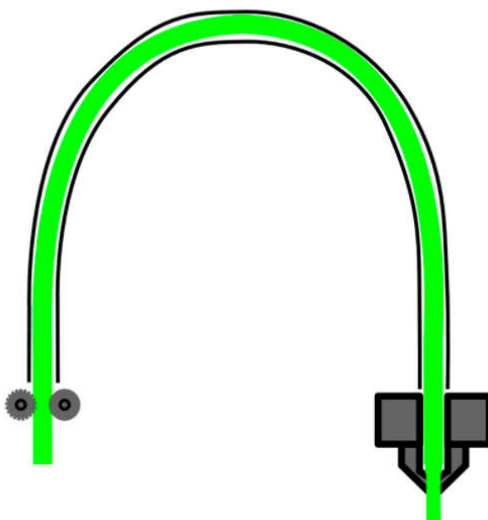


Figura 16 - Representação do Extrusor do tipo Bowden [73].

Em suma, existem atualmente extrusores de tipo *Direct* e de tipo *Bowden*. Estes extrusores apresentam vantagens e desvantagens, que dependem da aplicação definida. Posteriormente será analisado qual o melhor tipo de extrusor para o projeto a realizar.

#### 4.3.3. Sensor temperatura

Num sistema de impressão tridimensional há várias situações em que é necessário executar uma medição da temperatura, e para este fim é necessário usar sensores. Para aplicações de impressão 3D, são usualmente usados três tipos de soluções, o termistor, o RTD (termorresistência ou RTD do inglês Resistance Temperature Detector) e o termopar, Tabela 12:

a) Um termistor é um sensor do tipo resistivo, em que o valor resistivo do mesmo muda em função de temperatura, sendo constituído por semicondutores, nomeadamente silicone e germânio. O tipo de termistor mais usado em impressão 3D é o NTC (*Negative temperature coefficient*), o que significa que um aumento na temperatura provoca uma diminuição no valor da resistência [75], [76].

b) Um sensor RTD é muito semelhante ao termistor em termos operacionais, no entanto, em vez de ser constituído por materiais semicondutores, este é feito de metais como a platina o níquel ou cobre. Outra diferença a notar é que, tipicamente, este sensor tem uma variação linear direta na relação temperatura-resistência. Um exemplo deste tipo de sensor é o PT100 [75], [76].

c) O termopar é um tipo de sensor completamente diferente em termos de funcionamento, dos outros dois anteriormente apresentados. Estes são constituídos por dois materiais metálicos diferentes que geram diferenças de potenciais diferentes em função da temperatura. Existem diferentes tipos destes sensores dependendo dos materiais utilizados, sendo que o mais comum para aplicações de impressão 3D é o do tipo K, que é feito de crómio e alumínio [75], [76].

Tabela 12 - Comparação de parâmetros de sensores de temperatura [75].

	Termístor	RTD	Termopar
<i>Temperatura máxima</i>	Normalmente até 300°C	Até 850°C	Mais de 1500°C
<i>Custo aproximado</i>	<8.5€	8.5€ - 17€	12.5€ - 25€
<i>Tempo de Resposta</i>	2 a 3 segundos no ar	15 segundos no ar	5 segundos no ar
<i>Linearidade</i>	Não linear	0.8% de erro para uma equação de 1ª ordem	2.5% de erro para uma equação de 1ª ordem
<i>Exatidão a 200°C</i>	1°C sem calibração	~ 0.6°C sem calibração	2.2°C sem calibração

Concluindo, existem três tipos de sensores de temperatura comumente usados em aplicações de máquinas FDM. As três soluções têm características diferentes, conforme se pode analisar pela Tabela 12. Posteriormente será analisada qual a será a melhor solução para o caso em questão.

#### 4.3.4. Sistema de Transmissão do Movimento

Outro tipo de componente que é necessário selecionar é o sistema de transmissão de movimento, que engloba todo o conjunto de componentes responsáveis por transmitir o movimento dos motores até aos atuadores finais. Neste sistema existem movimentos lineares e angulares, sendo necessário escolher a melhor solução para transmitir estes movimentos tendo em conta os requisitos de performance e o custo associado às soluções.

Um dos tipos de solução muito usado para sistemas lineares de impressão 3D são os sistemas de correias, Figura 17. Estes sistemas são constituídos por uma correia dentada atuada por uma roda dentada acoplada a um motor, onde está presa a carga que se quer movimentar. Este tipo de sistema é muito usado nos eixos X e Y em impressoras 3D de três eixos, uma vez que apresenta diversas características vantajosas para esta utilização. Uma dessas características é o facto de apresentar baixos valores de *backlash* o que, dado as constantes trocas no sentido de movimento destes eixos, é um parâmetro muito importante. Outra característica positiva é o facto deste sistema ser capaz de atingir valores de velocidade superiores, o que significa menores tempos de construção. Para além destas, este sistema tem ainda como vantagens serem mais baratos que os sistemas de fuso, serem melhores para grandes distâncias e exigirem menos manutenção uma vez que não necessitam de lubrificação. No entanto, é preciso ter especial atenção em manter a tensão da correia bem ajustada, caso contrário o sistema tornar-se-á impreciso [77], [78].

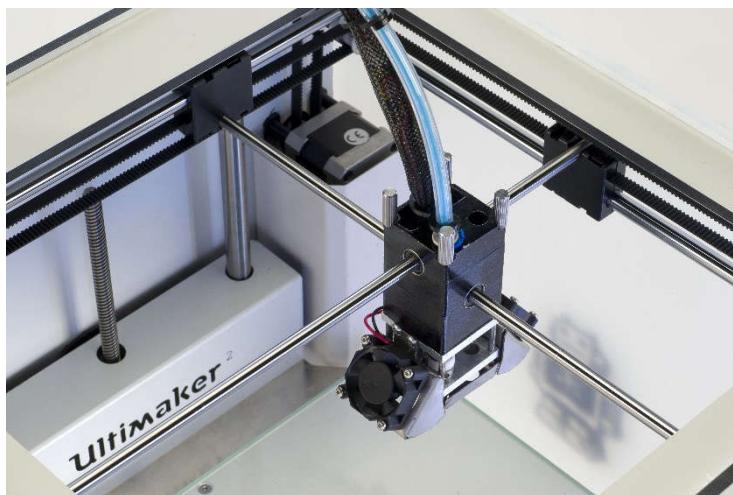


Figura 17 - Exemplo de utilização de um sistema de correias na impressora *Ultimaker*[24].

As soluções de fuso são um meio simples de converter movimento angular em movimento linear. Estes sistemas consistem tipicamente num fuso rodado por um motor que faz mexer uma porca a ele associado, criando assim um movimento linear. Este tipo de solução é muito encontrado em impressão 3D associado ao eixo Z devido à capacidade de executar bloqueio automático do movimento, mesmo o motor estando desligado. Este tipo de solução, como todas as outras, apresenta vantagens e desvantagens. Como pontos fortes podemos realçar o facto de estes sistemas poderem exercer grandes valores de força e, como já foi dito, o facto de poderem realizar o bloqueio automático do movimento. Como desvantagens podemos apontar o desgaste que estes sistemas sofrem, inerente do seu princípio de funcionamento que implica escorregamentos, e a necessidade de lubrificação periódica de maneira a reduzi-lo. Para além disso, este tipo de sistema é tipicamente barulhento e apresenta efeito de *backlash*, que é especialmente preocupante nos eixos que mudam constantemente de direção. Existem vários tipos de soluções de fuso, todavia aqui estudaremos apenas 3 considerados mais relevantes [77], [78]:

a) Os fusos do tipo dito normal podem ser usados para fazer a transmissão de movimento, embora não sejam desenhados para realizar este tipo de função. As consequências de optar por este tipo de solução são ter um sistema pouco eficiente, com grandes valores de *backlash* e que apresenta grandes valores de desgaste rapidamente. Tendo dito isto, a única razão que poderá levar ao uso deste tipo de solução é o facto de ser extremamente barata.

b) Os ACME são fusos com um perfil trapezoidal desenhados para transmitir movimento. Este tipo de solução é muito mais preciso e resistente ao desgaste do que os fusos normais e apresentam um efeito de *backlash* significativamente menor. No entanto continuam a ser soluções pouco eficientes e que necessitam lubrificação constante, sendo também mais caras que os normais.

c) Os fusos de esferas são o tipo de solução e fuso que apresenta melhor performance em transmissão de movimentos, sendo, no entanto, o tipo de solução mais dispendiosa. Este tipo de solução usa um fuso, tal como as duas soluções anteriores, mas com uma porca que integra rolamento de esferas, o que praticamente elimina o deslizamento existente nas outras soluções. Apesar de ser uma solução mais cara e de necessitar lubrificação, esta solução é bastante usada por ser mais precisa, apresentar menos *backlash* e ser muito mais eficiente do que as outras soluções de fuso, o que se traduz em menores requisitos de potência para o motor.

Em suma podemos resumir as características dos tipos de sistemas de transmissão de movimento seguinte tabela (Tabela 13).



Tabela 13 - Comparação de sistemas de transmissão de movimento[77], [78].

	<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
<i>Fuso Normal</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barato</li> <li>• Fácil de obter</li> <li>• Funcionamento simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa precisão</li> <li>• Grande velocidade de desgaste</li> <li>• Necessita de lubrificação</li> <li>• Muito ineficiente</li> <li>• Grandes valores de <i>backlash</i></li> </ul>
<i>Fuso ACME</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa relação preço qualidade</li> <li>• Grande precisão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisa de lubrificação</li> <li>• Relativamente ineficiente</li> <li>• Valores moderados de <i>backlash</i></li> </ul>
<i>Fuso de esferas</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande precisão</li> <li>• Grande eficiência</li> <li>• Pouco <i>backlash</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caro</li> <li>• Necessita de lubrificação</li> </ul>
<i>Sistema de correias</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes distancia de movimento</li> <li>• Preço</li> <li>• Grande velocidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A correia pode esticar</li> </ul>

Concluindo, foram encontrados dois grandes tipos de soluções normalmente usado para transmissão de movimento em sistema FDM. Ambas as soluções tem os seus pontos fortes e fracos, conforme pode ser visto na Tabela 13. Posteriormente será analisado qual o melhor tipo de solução a usar.

#### 4.3.5. Motor

Para criar o movimento responsável por pôr a máquina em funcionamento é necessário escolher um motor. Existem muitos motores de diferentes tipos e com princípios de funcionamento distintos, mas para esta aplicação será usado um motor elétrico. Mesmo dentro dos motores elétricos existem também muitos tipos de motores (motores elétricos com escovas, motores elétricos síncronos, motores elétricos assíncronos) mas para este tipo de aplicação normalmente recorre-se a um de dois grandes tipos de motores: os motores passo a passo e os servomotores.

Os motores passo a passo são um dos tipos de motores muito usado em aplicações de automação, sendo os mais comuns em aplicações de impressão 3D. Este tipo de motor é um motor DC sem escovas, que pode ou não ser de imane permanente, que divide a rotação do eixo em vario “passos” discretos. Para tal, usam-se várias bobines, colocadas à volta do rotor (normalmente imane permanente), que estão organizadas em fases e, energizando cada uma dessas fases, faz-se o motor girar um segmento de cada vez. Esta configuração de motor é muito popular pois permite que se execute um controlo de posição e velocidade sem ter que recorrer a uma solução de controlo de malha fechada. Estes motores têm como grandes vantagens, para além de poderem controlar posição e movimento sem necessitarem de feedback, o facto de serem consideravelmente simples em termos de construção e, portanto, bastante baratos quando comparados com outras soluções no mercado. Para além disso, devido à sua configuração, estes motores são muito bons para situações em que se pretenda suportar momentos com o motor

parado ou para suportar grandes momentos com baixas velocidades. Como grandes defeitos deste tipo de motor podemos realçar o facto de aplicarem momentos muito baixos a grandes velocidades de rotação. Para além disso, não são adequados para realizar operações que impliquem grandes acelerações, pois as forças de inércia podem levar a que alguns passos sejam saltados, o que leva a erros de posição. Por fim, estes motores são bastante ineficientes uma vez que trabalham sempre com a totalidade da corrente necessária independentemente da carga que lhes é aplicada [79], [80].

Um servomotor não corresponde a uma classe específica de motor, mas sim à combinação de um conjunto específico de características. O que define então um servomotor é ser um servomecanismo de malha fechada que usa feedback para realizar o controlo de velocidade e posição de um motor (que pode ser AC ou DC). Este tipo de solução é das mais usadas em termos industriais, quer em aplicações robóticas ou de CNC, entre outras. Para além do facto de trabalharem em malha fechada, as características que fazem esta solução muito popular são o facto de poderem trabalhar com velocidades e momentos muito grandes (enquanto que os motores passo a passo estão normalmente limitados a velocidades de 2000RPM), sendo muito eficientes. Para além disso, são motores relativamente silenciosos e que não sofrem de problemas de vibrações e ressonância. Como defeitos deste tipo de motor podemos salientar o facto de possuírem um modo de funcionamento e uma implementação muito mais complexa do que os motores passo a passo, sendo também mais dispendiosos. Outro fator importante de mencionar é o facto de associado a um servomotor normalmente ser necessário usar uma caixa redutora de maneira a permitir que motores mais pequenos produzam momentos mais elevados e, além disso, ajudar a resolver problemas dinâmicos causado pela inércia das massas a transportar. Conforme foi dito, os servomotores não um tipo específico de motor e, portanto, existem vários tipos de servomotores associados aos vários motores usados no sistema [79], [80].

## 5. Arquitetura proposta para um processo FDM a 5 eixos

Tendo sido realizada a pesquisa sobre os tipos de soluções já desenvolvidas e existentes para os principais componentes da impressora a produzir, é agora possível fazer uma avaliação ponderada das soluções. Assim, é necessário ponderar qual o tipo de manipulador que servirá de base e como será a configuração da impressora. Seguidamente, é necessário escolher qual o tipo de controlador a usar bem como o software. Para além disso, é necessário escolher os componentes mais apropriados para as especificações da máquina a criar. Terminado este processo, será possível no final decidir qual o conjunto de soluções mais adequado para realizar uma impressora tridimensional de 5 eixos que seja capaz de imprimir o material PEEK, de acordo com as especificações descritas na secção 3.2.

### 5.1. Estrutura

O primeiro parâmetro que será avaliado será a estrutura, que é provavelmente a característica mais definidora e que afeta a escolha de muitos outros elementos constitutivos. A primeira decisão tomada será que serão apenas consideradas configurações paralelas ou cartesianas, pois são as mais utilizadas em processos FDM, de 3 ou 5 eixos, e, portanto, existe mais conhecimento e experiência associado a elas o que será vantajoso. Tomada esta decisão é então agora necessário analisar estas configurações individualmente e em seguida compara-las, de modo a entender qual será a melhor solução.

#### 5.1.1. Análise da utilização de uma configuração cartesiana.

Uma vez que uma das opções mais comuns na escolha de configurações para impressoras 3D é a escolha de uma estrutura cartesiana, iremos então analisar as implicações da escolha deste tipo de estrutura para realização de uma impressora de cinco eixos. Para além do facto de ser uma opção frequentemente utilizada, este sistema tem a vantagem de poder usar o sistema de um manipulador cartesiano já existente. De uma forma geral, o sistema cartesiano, para a impressão 3D com 5 eixos, tem como vantagem o facto de ser muito comum, portanto ter maior *input* em termos de informação e porque será, em princípio, mais simples mecanicamente e em termos de programação matemática.

A pesquisa realizada permite concluir que já existem máquinas cartesianas capazes de imprimir FDM com cinco eixos, sendo, portanto, uma solução exequível para este projeto. Dos vários tipos de soluções cartesianas, a análise inicial levou-nos a concluir que a solução desenvolvida pelo *Øyvind Kallevik Grutle* [10] é aparentemente a melhor solução. De facto, a solução alternativa [26] acrescenta muito peso à cabeça extrusora, o que pode causar problemas dinâmicos durante o funcionamento da impressora. Adicionalmente, aquela solução permite que a deposição de material se dê sempre numa posição aproximadamente vertical. Todavia, esta análise inicial carece de um estudo mais aprofundado de forma a escolher fundamentadamente a melhor solução.

A configuração cartesiana pode ter várias distribuições dos eixos e o estudo desta configuração deve começar por avaliar essas distribuições. Todos os eixos podem estar afetos a um de dois componentes da estrutura: a base, ou a cabeça extrusora. Começaremos por estudar

as possibilidades de distribuição dos eixos lineares X, Y e Z. Em termos de possibilidades de distribuição são as seguintes [81]:

- a) Os 3 eixos X, Y e Z estarem a afetar a cabeça extrusora;
- b) Os 3 eixos X, Y e Z estarem a afetar a base;
- c) Os eixos X e Y estarem a afetar a cabeça extrusora e o eixo Z estar a afetar a base;
- d) Os eixos X e Z estarem a afetar a cabeça extrusora e o eixo Y estar a afetar a base;
- e) O eixo X estar a afetar a cabeça extrusora e os eixos Y e Z afetarem a base;
- f) O eixo Z estar a afetar a cabeça extrusora e os eixos XY afetarem base.

Fazendo um estudo das impressoras presentes no mercado podemos concluir que as configurações c) (XY - Cabeça extrusora, Z – Base) e d) (XZ - Cabeça extrusora, Y - Base) são as configurações mais utilizadas. Iremos então optar por uma destas visto terem já dado provas de apresentarem boa níveis de desempenho.

Para este trabalho vamos optar pela configuração XY - Cabeça extrusora, Z – Base para os eixos lineares. Tal deve-se ao facto de, nesta configuração, não estarem associados componentes com muita massa aos eixos X e Y, como a base de impressão, de forma a reduzir a inércia associada a estes movimentos. De facto, os eixos X e Y serão os que terão de se movimentar mais e que mais afetam a velocidade de impressão, logo é ideal que tenham baixos valores de inércia a eles associados. Para além disso, a impressão de componentes de grandes dimensões, especialmente com o PEEK, que é muito denso, irá aumentar consideravelmente a massa associada a movimento da base. E como foi dito essa massa extra deve não afetar os eixos X e Y.

Para além dos eixos lineares, é necessário também considerar os dois eixos angulares (por exemplo:  $\alpha$  e  $\theta$ ). Para este fim, pode ser inicialmente feita uma análise para os lineares e, posteriormente, considerar a conjugação de ambos os tipos de eixos. Então, os eixos angulares podem também ser distribuídos de várias formas:

- a) Os dois eixos  $\alpha$  e  $\theta$  estarem ligados à cabeça extrusora;
- b) Os dois eixos  $\alpha$  e  $\theta$  estarem ligados à base;
- c) Estar um dos eixos, como  $\theta$ , ligado à cabeça extrusora e o outro,  $\alpha$ , à base.

Para configuração dos eixos não existem máquinas desenvolvidas suficientes para concluir empiricamente que existam soluções melhores do que outras. Para esta solução propõem-se a solução b) ( $\alpha\theta$  - Base) pelas seguintes razões:

a) Seria vantajoso evitar os ângulos de rotação na cabeça extrusora uma que, se esta estiver numa posição diferente da vertical, a gravidade não ajudará tanto no escoamento, podendo causar problemas de fluência.

b) A presença das rotações angulares exclusivamente na cabeça extrusora, embora permitam teoricamente solucionar o efeito de *steeping*, que é um dos problemas a solucionar, não trazem grandes benefícios em termos de evitar o uso de estrutura de suporte na criação de partes suspensas.

c) A separação dos eixos, em que um ficaria na base e outro na cabeça extrusora poderia ser uma boa opção para o funcionamento da impressora com 5 eixos interpolado simultaneamente. No entanto, atualmente não existem *slicer's* de 5 eixos o que limita bastante as possibilidades de operações a usar os 5 eixos simultaneamente, prevendo-se, portanto, que esta será usada em grande parte do processo produtivo com os 3 eixos normais. Se este for o caso, a adição de um eixo (e conseqüente mais massa) na cabeça extrusora irá prejudicar o movimento dos eixos X e Y pelas razões já mencionadas.

Escolhendo a configuração cartesiana com os eixos  $\alpha$ ,  $\theta$  e Z na base e os eixos X e Y na cabeça extrusora falta estudar as possibilidades de soluções construtivas que permitiram conceber o sistema idealizado. De modo semelhante ao feito anteriormente para decidir a localização dos eixos, iremos analisar separadamente as soluções construtivas para a cabeça extrusora e para a base. Começado por analisar as possibilidades de soluções construtivas para a cabeça extrusora, ou seja, os eixos X e Y, iremos fazer a análise de alguns sistemas usados em impressoras 3D típicas (Hbot, CoreXY, Ultimaker) e que permitiram atingir bons níveis de performance quer a nível de velocidade quer de precisão [81].

A primeira solução construtiva que iremos analisar para os eixos X e Y é a apresentada na Figura 18, que apresenta a solução construtiva da impressora Hbot [82]. Este sistema tem como princípio de funcionamento o uso de uma correia contínua (representada a vermelho) que cria todo o movimento através da atuação dos motores que geram os momentos M1 e M2. Por exemplo, se M1 e M2 tiverem a mesma magnitude e sentidos opostos, a estrutura mover-se-á no sentido do eixo Y. Se M1 e M2 tiverem o mesmo sentido e magnitude a estrutura mover-se-á segundo o eixo X. Apesar de ser uma boa solução construtiva, este sistema apresenta uma grande falha. Conforme indicado pelas setas a verde e azul na Figura 18, que representam o sentido de um movimento potencial do cinto e conseqüentemente também as forças aplicadas sobre a estrutura, é gerado um momento torsor sobre a estrutura central. Este problema é resolvido usando uma estrutura central rígida, mas esta falha torna esta solução pouco apelativa [81].

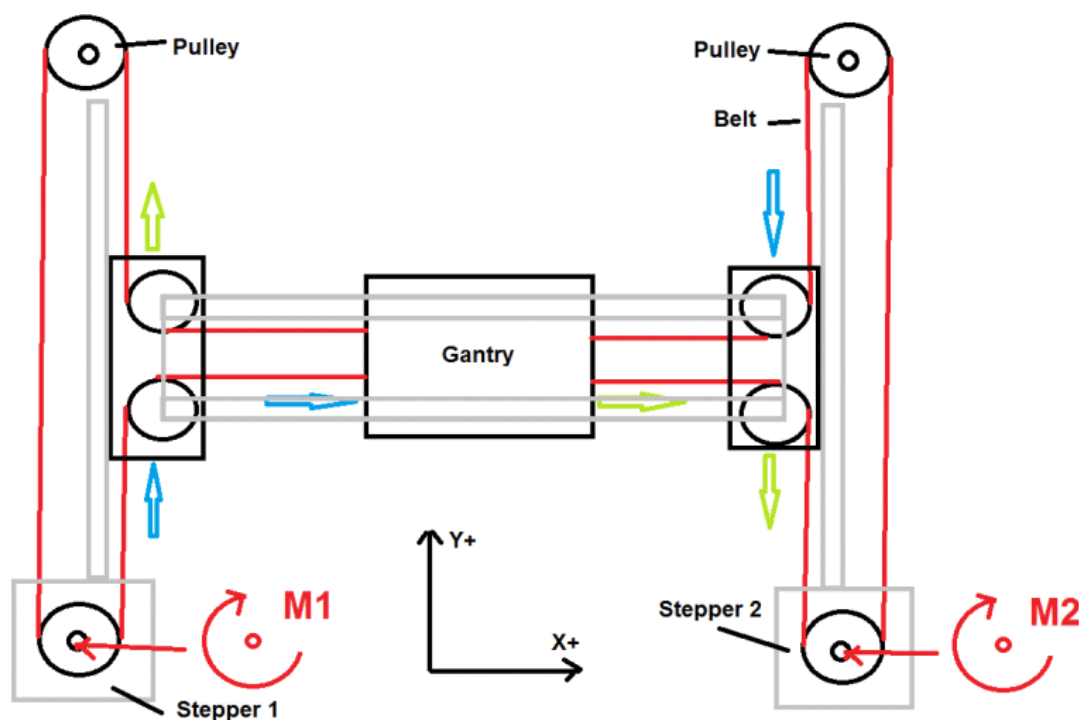


Figura 18 - Configuração XY da Impressora Hbot [81].

Outro sistema a analisar é o Core XY [83], que é muito semelhante ao referido anteriormente, mas soluciona o problema da geração de momento. A grande diferença entre soluções, e que evita a geração de momento sobre a estrutura central, é que são usadas duas correias em vez de uma e esta cruza-se no centro da estrutura, Figura 19. Este facto faz desta uma solução muito mais apelativa [81], quando comparada com a apresentada anteriormente.

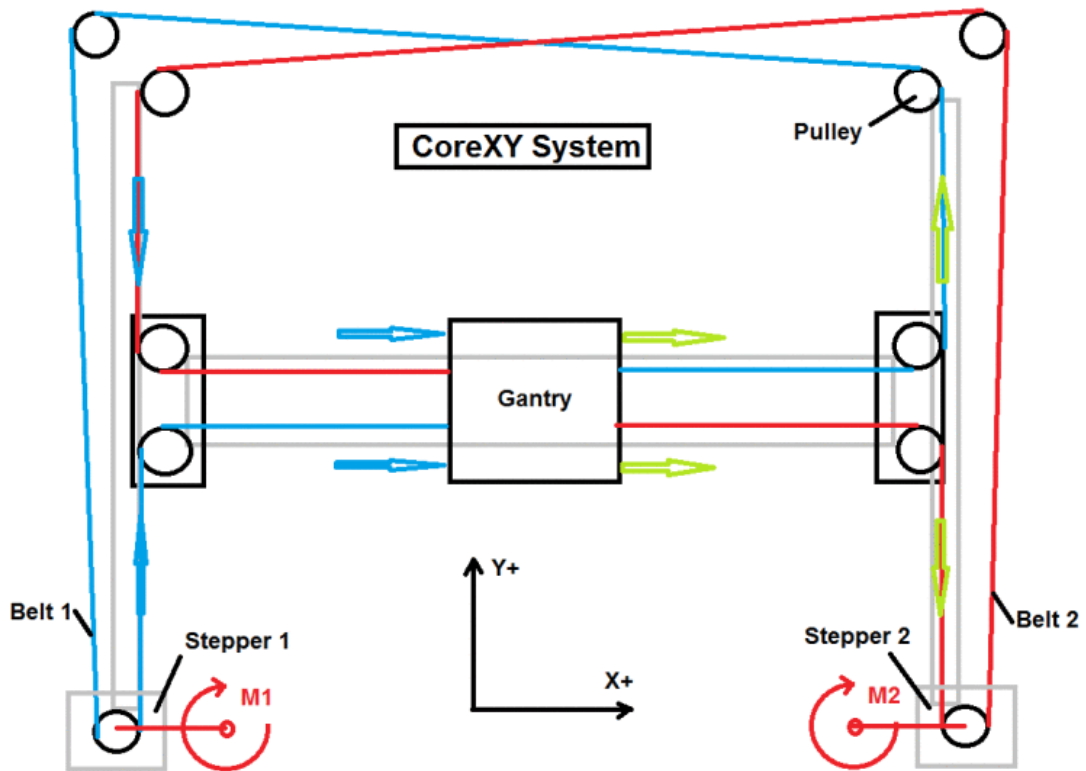


Figura 19 - Configuração XY - CoreXY [81].

Por fim, existe uma solução construtiva utilizando o conceito de impressoras como as Ultimaker. Esta solução construtiva tem um princípio de funcionamento diferente das duas apresentadas anteriormente. Nesta solução, a cabeça extrusora é atravessada por dois veios, sobre os quais desliza, e que simultaneamente a empurram nas direções X e Y. Estes eixos estão presos a duas correias (Belt 1 e 2 na Figura 20) que os movimentam com a rotação do motores. Esta é uma solução usada em várias impressoras no mercado e que tem mostrado ser capaz de apresentar bons resultados [81].

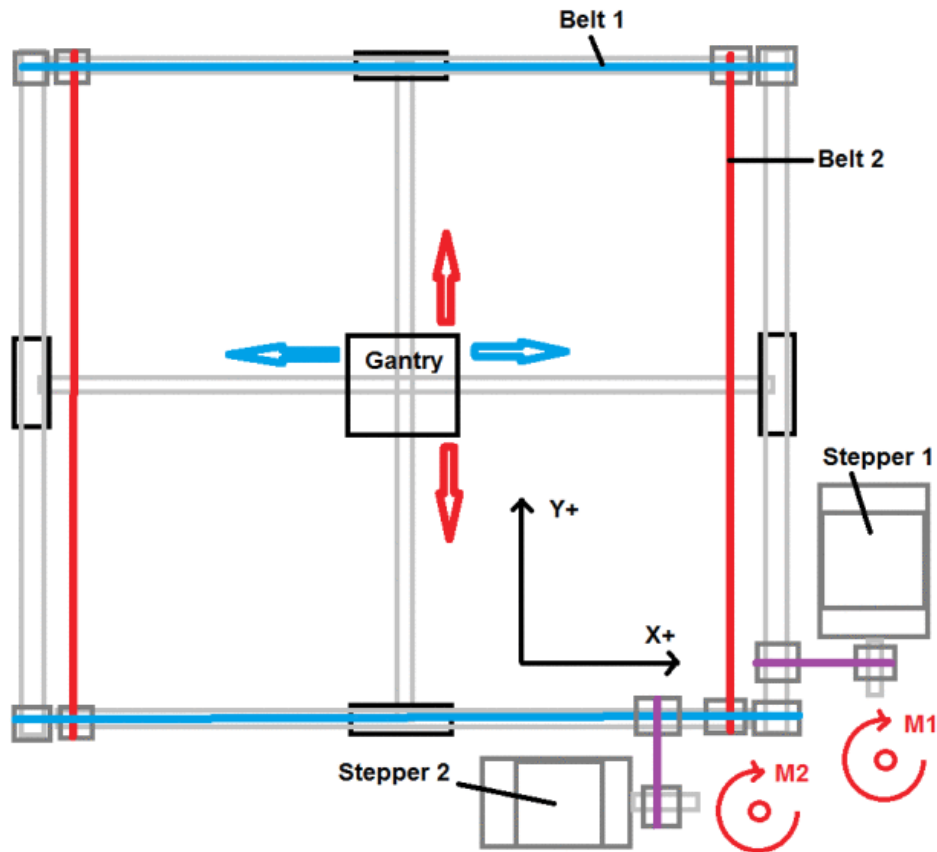


Figura 20 - Configuração XY da Impressora Ulitmaker [81].

Apesar de as três soluções apresentadas serem aparentemente as mais indicadas, uma vez que já tem provas dadas de que funcionam corretamente, existe um número muito grande de possibilidades de soluções construtivas usando diferentes componentes de transmissão de movimento, por exemplo, fusos de esferas. A Figura 21, mostra outras duas possibilidades de soluções construtivas possíveis de aplicar para o sistema em questão [81]. Estas hipóteses serão, no entanto, descartadas uma vez que as outras sendo soluções já testadas proporcionarão ao protótipo uma maior probabilidade de sucesso.

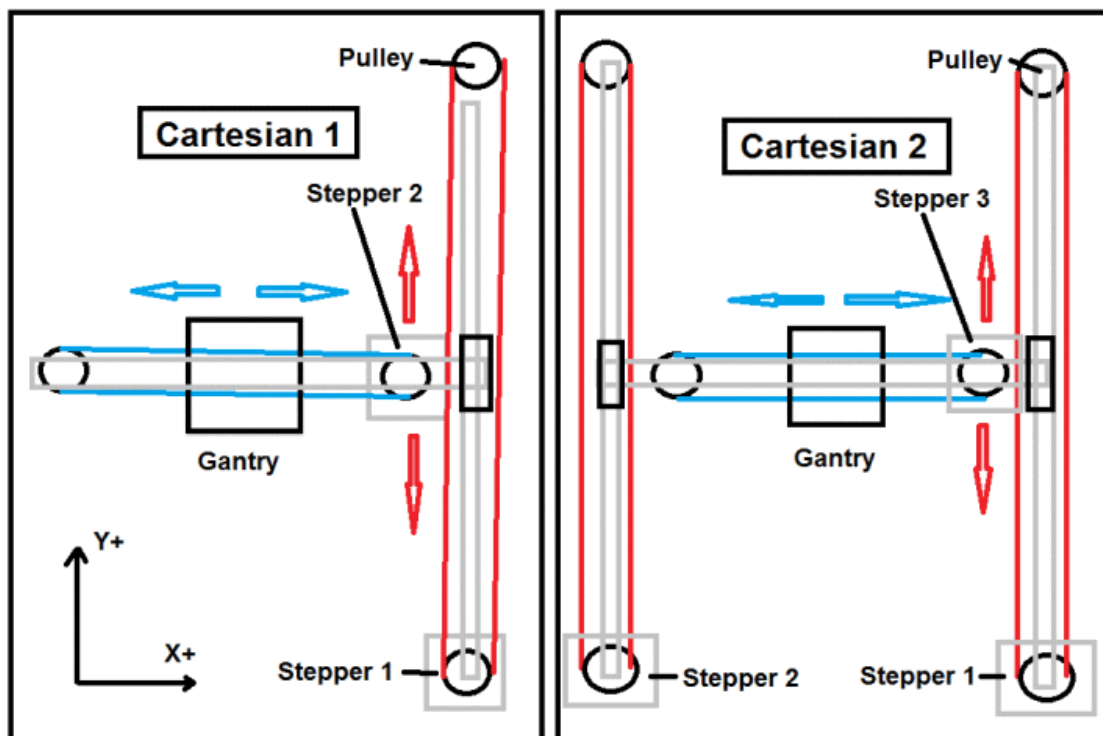


Figura 21 - Outras configurações possíveis XY [81].

Estando realizada a análise das soluções construtivas para a os eixos X e Y, falta agora analisar as possibilidades de soluções para a base para nos ser possível escolher qual a solução completa mais adequada. Conforme afirmarmos anteriormente, a esta secção está associada o movimento do eixo Z e dos dois eixos rotativos. Começaremos então por analisar as possibilidades de implementação do eixo Z e depois as possibilidades de bases com dois eixos angulares.

O movimento do eixo Z em impressoras 3D tem, em termos de soluções construtivas, muito poucas variações quando comparando as impressoras cartesianas existentes no mercado. Este usa praticamente sempre soluções de fuso, normalmente do tipo ACME ou mesmo regulares. Para o eixo Z é seleccionado este tipo de solução, uma vez que este tem que lidar com o efeito da gravidade. Adicionalmente, usar um sistema de correias não é tão indicado, uma vez que o motor teria de estar sempre em esforço, enquanto que o sistema de fuso consegue manter a posição da base mesmo estando motor desligado. Portanto, sugere-se que se use um sistema de fuso para elevar a base segundo o eixo Z.

A segunda grande problemática a ter em conta na conceção da base é como serão posicionados os eixos angulares. A primeira, e como usado por *Grutle* na construção da sua impressora de cinco eixos [10], é apresentada na Figura 22. Nesta solução construtiva, existe um eixo perpendicular à cabeça extrusora e paralelo à superfície da base e outro que é sempre perpendicular à superfície da base. A segunda solução, e que é usada na impressora desenvolvida por *William Yerazunis* nos laboratórios da Mitsubishi [11], é a apresentada na Figura 23. Nesta solução, existe um eixo sempre perpendicular à cabeça extrusora e outro eixo sempre coplanar com a superfície da base de impressão. Segundo os autores, ambos os sistemas funcionavam sem apresentar problemas, sendo, portanto, ambas as soluções em principio viáveis.





Figura 22 – Solução de base rotativa com 2 eixos angulares desenvolvida por *Grutle* [10].

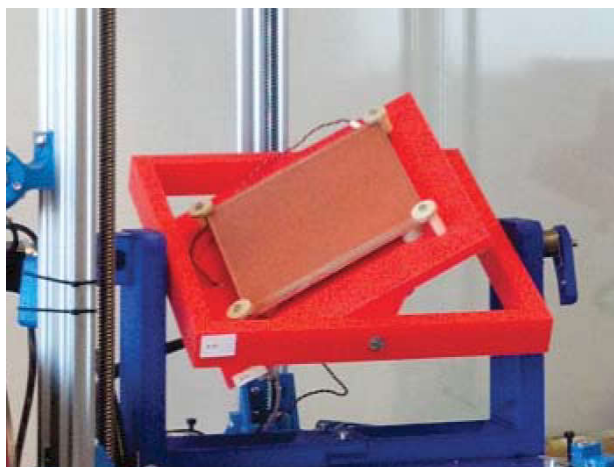


Figura 23 - Solução de base rotativa com 2 eixos angulares desenvolvida por *William Yerazunis* [11].

Após a análise individual de todos os componentes principais da estrutura, é necessário analisar qual a melhor solução completa. Antes de mais, é necessário garantir que existe a possibilidade de o sistema funcionar harmoniosamente e sem intersecções entre componente. Para isso, deve ser escolhida uma combinação de soluções estruturais que não cause intersecções de componentes em nenhuma situação. Para garanti-lo faremos a análise da situação mais crítica numa impressão a cinco eixos que será uma situação em que a base se encontra na posição indicada na Figura 23, e o extrusor esteja no ponto mais baixo da base. Esta é a situação crítica pois é onde existe mais problemas em garantir a não intersecção entre o sistema associado à cabeça de extrusão e o sistema de movimentação da base. Para que esta intersecção nunca ocorra, é necessário que a base seja mais pequena do que a estrutura do extrusor e assim esta consiga atravessa-la, e que os eixos da base e do topo não se cruzem, de modo a que a base possa atravessar a estrutura de topo. A condição que torna isto possível é a situação em que se usa a base de *Grutle* [10] e um sistema da cabeça que só tenha um veio a atravessar a secção da base. Usando por exemplo o sistema core XY, se o veio que atravessa a cabeça extrusora tiver a mesma direção do eixo rotativo paralelo à superfície da base, e estando ambos paralelos, é possível criar a situação crítica descrita anteriormente sem existirem intersecções.

Em suma, existem muitos designs possíveis e neste momento é apenas possível extrapolar qual o melhor ou melhores para a conceção de um sistema de cinco eixos. Mas tendo em conta que a máquina a desenvolver é um projeto preliminar e que não existe ainda um *slicer* de cinco eixos e, portanto, a máquina funcionará maioritariamente baseada em movimentos de três

eixos, a solução proposta é um sistema com os eixos X e Y na cabeça extrusora e os restantes na base. A solução seria semelhante à mostrada na Figura 24, com o sistema Core XY mais um sistema de fuso para o Z, mas adicionando à base os dois eixos rotativos com estrutura semelhante à desenvolvida por *Grutle* [10].



Figura 24 – Estrutura cartesiana com três eixos lineares [84].

Para avaliar se esta seria uma boa solução, é necessário avaliar os esforços críticos que esta solução envolveria. Neste caso, é importante avaliar qual a velocidade máxima de operação e qual o momento máximo aplicar no veio do motor. Quanto à velocidade de rotação máxima a que os motores estarão sujeitos, esta corresponderá certamente à associada à velocidade linear dos eixos X e Y que movimentam a cabeça extrusora, uma vez que este será, em princípio, o movimento mais rápido da máquina. Assumindo a configuração cartesiana descrita anteriormente, os movimentos que poderão causar os esforços máximos serão o movimento de rotação a base, estando esta totalmente carregada, ou o movimento em z associado ao levantamento da cabeça extrusora.

A velocidade de rotação máxima está inerentemente ligada a velocidade linear máxima que a cabeça extrusora pode atingir. Para executar uma estimativa dos valores com que terá de trabalhar, assumiremos que a velocidade linear máxima será de 400mm/s de acordo com o descrito na secção 3.2.

Então,

$$v_{max} = 400 \text{ mm s}^{-1} = 0,4 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{Equação 1})$$

Em seguida, é necessário fazer a análise do sistema de modo a permitir perceber como calcular corretamente a velocidade angular a partir da velocidade linear. Sendo, à partida, a velocidade máxima nos eixos X e Y, podemos inferir que a velocidade linear máxima será a velocidade da correia (Figura 25).

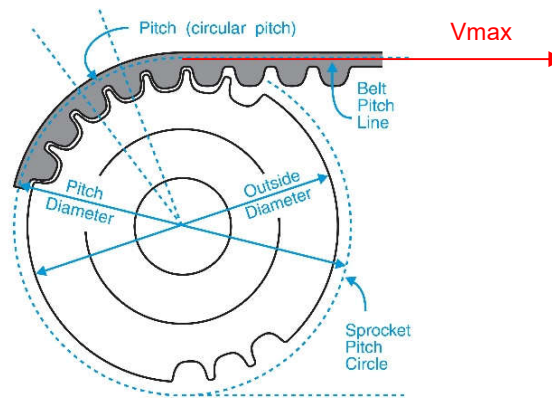


Figura 25 – Representação a permitir perceber como calcular corretamente a velocidade angular a partir da velocidade linear. (adaptando de [85]).

A partir da análise do diagrama (Figura 25), podemos concluir que a velocidade angular deve ser calculada da seguinte forma:

$$v = r \ w \Leftrightarrow w = \frac{v}{r} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

$v = 0,4 \text{ m s}^{-1}$ , corresponde à velocidade linear

$r = \frac{12,2}{2} \text{ mm}$ , corresponde ao raio da roda dentada. Neste caso foi usada como referência a roda usada (*GT2 Timing Driving Pulley*) [86] (roda dentada = 12,2mm).

Substituindo os valores,

$$w = \frac{0,4}{\left(\frac{0,0122}{2}\right)} \Leftrightarrow w \approx 65,6 \text{ rads s}^{-1} \quad (\text{Equação 3})$$

Uma vez que muitos dos catálogos de motores apresentam a velocidade angular em RPM então,

$$1 \text{ RPM} = \frac{2\pi}{60} \text{ rads} \quad (\text{Equação 4})$$

logo,

$$65,6 \text{ rads} \approx 627 \text{ RPM} \quad (\text{Equação 5})$$

Concluindo assim que  $w_{max}$  é igual a 65,6 rads ou 627RPM.

Em seguida será estimado o momento máximo aplicado sobre o veio do motor. Como afirmamos, o momento máximo poderá ser proveniente de duas situações distintas, ou associado à rotação da base carregada ou à subida da base. Faremos então uma análise de ambas as situações de maneira a aferir qual o caso mais crítico na estrutura da máquina.

Um das situações possivelmente mais críticas em termos de momento máximo aplicado sobre o veio do motor será a rotação da base, estando esta carregada com uma peça de grande dimensão produzida a partir de um material de grande densidade. Para calcular a massa que a base terá de rodar, consideramos a situação crítica de ter apenas metade do volume de trabalho totalmente preenchido de material, tendo em conta o volume de trabalho definido no capítulo das especificações (x- 140mm, y- 135mm e z- 148mm).

A situação descrita corresponde ao seguinte volume,

$$V = \frac{l}{2} l = \frac{0,135}{2} 0,140 0,148 \approx 0,0014 m^3 \quad (\text{Equação 6})$$

E assumindo então que se usa um material de alta densidade como o PEEK, calcula-se a massa que a base terá de rodar.

Sendo a densidade do PEEK,

$$\rho_{peek} = 1480 \text{ Kg } m^{-3} [7] \quad (\text{Equação 7})$$

A massa será então,

$$m = V \rho = 0,0014 1480 = 2,1 \text{ Kg} \quad (\text{Equação 8})$$

A partir da massa podemos então calcular a força que esta exerce,

$$F = m g = 2,1 9,8 \approx 21 \text{ N} \quad (\text{Equação 9})$$

Considerando o ponto de aplicação da força no centro da área da base que esta ocupa, podemos então calcular o momento exercido no veio.

$$M = F d = 21 \left( \frac{0,140}{4} \right) \approx 0,74 \text{ Nm} \quad (\text{Equação 10})$$

Para calcular a momento que será necessário, de forma a realizar a elevação da base, é primeiramente necessário calcular a força estática necessária para realizar essa mesma elevação.

$$F = m g \quad (\text{Equação 11})$$

Para isso é necessário determinar qual a massa elevar. Consideraremos então os seguintes componentes:

a) Sistema de aquecimento – Desprezável.

b) Os dois motores associados aos eixos de rotação – 8Kg, Considerando o caso crítico de usar os motores passo a passo mais pesado fornecido pela Schneider [87].

c) Peso máximo de uma peça a produzir - 10kg.

d) Estrutura da base – ( $\rho_{\text{alumínio}} \approx 2700 \text{ kg/m}^3$ [88])( $133*140*6\text{mm}=0,00011\text{m}^3$ )  $\approx 0,3\text{kg}$

$$m = 8 + 10 + 0,3 \approx 19 \text{ Kg} \quad (\text{Equação 12})$$

Com a massa (aproximada por excesso) podemos calcular o peso:

$$F = m g = 23 9,8 \approx 177 \text{ N} \quad (\text{Equação 13})$$

Sabendo a força e assumido que o movimento de levantamento da cabeça será realizado por um fuso do tipo ACME, calcula-se o momento da seguinte forma [89], [90]:

$$T_{\text{raise}} = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{1 + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m \mu l \sec \alpha} \right) \quad (\text{Equação 14})$$

Em que,

T = ? , Momento aplicado que se pretende calcular

F = 177 N, Força exercida sobre o fuso calculada na Equação 13

dm = 8mm, Diâmetro Médio [91], [92]

u = 0,13, coeficiente de fricção (retirado da Tabela 14)

l = 8 mm, [91], [92]

$\alpha = 29/2^\circ$  [90], Metade do “thread angle”

Tabela 14 – Coeficiente de fricção par *leadscrew threads* [89].

<i>Material do Fuso</i>	<i>Material da Rosca</i>			
	Aço	Bronze	Latão	Ferro fundido
<i>Aço</i>	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
<i>Aço com lubrificação</i>	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
<i>bronze</i>	0.08-0.12	0.04-0.06	-	0.06-0.09

Substituindo os valores,

$$T_{raise} = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{1 + \pi \mu d_m \sec\left(\frac{29}{2}\right)}{\pi d_m - \mu l \sec\left(\frac{29}{2}\right)} \right) = \frac{17\ 70,008}{2} \left( \frac{1 + \pi \cdot 0,13 \cdot 0,008 \sec\left(\frac{29}{2}\right)}{\pi \cdot 0,008 - 0,13 \cdot 0,008 \sec\left(\frac{29}{2}\right)} \right) \approx 29,5\ Nm$$

(Equação 15)

Em suma, depois desta análise conclui-se que uma solução cartesiana conforme foi aqui idealizada não será potencialmente a melhor opção uma vez que o momento máximo apresentado traduz um valor muito elevado, o que tem como implicação a incidência de esforços muito grandes sobre o sistema e valores de inércia maiores, logo a necessidade de motores muito mais potentes.

### 5.1.2. Análise da utilização de uma configuração Delta.

A segunda opção mais popular na escolha de configurações para impressoras 3D é a escolha de uma estrutura paralela. Existem estruturas de tipo muito diferentes e com implicações diferentes em termos de utilização. Mas, de uma forma geral, estes manipuladores tem uma boa relação peso/força aplicada, elevadas velocidades de operação e boa precisão, o que os torna potencialmente muito boas soluções para o projeto a desenvolver. Iremos então analisar as implicações da escolha deste tipo de estrutura para realização de uma impressora de cinco eixos e avaliar qual será melhor para o caso em estudo.

A pesquisa realizada encontrou soluções de dois tipos principais de estruturas paralelas, os robots delta e as plataformas de Stewart. Quanto aos robots delta, foi encontrada a solução produzida por William Yerazunis [11], que consiste no uso de uma impressora delta de 3 eixos lineares já existente a que, em seguida, foi acrescentada uma base de dois eixos angulares criando uma solução de 5 eixos. Para além desta, foi encontrada também a solução produzida por Giberti [8], que usa um robot delta 3 eixos lineares que move a base, colocado por baixo desta, a que foram posteriormente adicionados dois eixos angulares em cima da mesma. Entre as duas soluções descritas na literatura, a produzida William Yerazunis [11] parece mais apelativa uma vez a solução de Hermes Giberti [8] tem associado a todos os movimentos (X, Y, Z e os dois eixos angulares) o peso da base e estrutura, o que traduz em maiores efeitos de inércia associados ao sistema. Quanto a soluções que usem plataformas de *Stewart*, foram encontrados dois trabalhos realizado nesse sentido. Primeiramente, temos um estudo teórico académico realizado por Lars Skaret [18], que cria um conceito possível, mas não dá provas experimentais do seu funcionamento. Para além deste estudo, temos a impressora criada por Xuan Song [12], que consiste numa plataforma de Stewart com seis eixos que move o extrusor, tendo esta solução sido capaz de realizar alguns testes experimentais. Uma solução utilizando

a plataforma de *Stewart* parece ser uma boa solução e, dado já existem muito manipuladores deste tipo, poderiam ser facilmente adaptados para o efeito pretendido. Em suma, as soluções delta apresentadas talvez sejam melhores uma vez que imprimem sempre verticalmente, o que é bom porque o movimento do material é ajudado pela gravidade. Para além disso, as plataformas de *Stewart* com 5 ou mais eixos caso não evitam o uso estruturas de suporte. Tendo esse fator em conta, a solução de William Yerazunis [11] parece a melhor, mas esta análise inicial carece de um estudo mais aprofundado de forma a escolher fundamentadamente a melhor solução. Para além disso, existe um estudo comparativo, realizado por Robert J.A. Allen e Richard S. Trask [93], que indica que, para processo FDM não estratificado com 3 eixos, as impressoras do tipo delta eram mais rápidas, mais flexíveis e fiáveis, sendo, portanto, uma melhor solução. Este estudo é uma boa indicação que também, para uma máquina de 5 eixos, será melhor uma solução com uma estrutura delta, uma vez que se trata também de um processo FDM não estratificado.

Existem atualmente um inúmero tipo de solução de manipuladores paralelos com vários graus de liberdade diferentes, mas este estudo basear-se-á apenas em soluções delta e de plataformas de *Stewart*, uma vez que estes tipos de solução já foram usados em impressão 3D quer com 3 ou 5 eixos. Iremos então analisar as possibilidades de uso dos dois tipos de manipulador separadamente e depois compararemos as soluções de maneira tentar perceber qual a melhor solução.

Começando por analisar os robots do tipo delta existem duas grandes possibilidades, a primeira será usar um robot de 5 ou mais eixos delta como *Fanuc M-1iA/0.5AL* [94], e a adaptá-la para realizar um processo FDM. Esta será uma solução à partida descartada, uma vez que, estando todos os eixos na cabeça estrutura, não evita o uso de estruturas de suporte. O outro tipo de solução consiste em usar um manipulador delta de 3 eixos, como usado em muitas impressoras já existentes, por exemplo em [27], [28], e adicionar-lhe uma base de dois eixos. Para este tipo de solução existem como hipóteses a estrutura delta estar no topo e mover o extrusor ou a estrutura delta estar a mover a base por debaixo da mesma. Como referimos no paragrafo anterior a melhor opção é esta estar colocada no topo, usando por isso um sistema típico de três eixos de impressão FDM com um robô delta. Quanto às soluções de base rotativa, a situação aqui apresentada é igual à da análise de soluções cartesianas, discutida na secção anterior e a conclusão será, portanto, a mesma: uma base como desenvolvida por *Øyvind Kallevik Grutle* [10] será a melhor solução. Em suma, pensa-se então que um robot delta de 3 eixos no topo mais uma base rotativa como de *Øyvind Kallevik Grutl* [10] será, portanto, a melhor solução.

A outra possibilidade será usar uma plataforma *Stewart*, que é um manipulador paralelo com 6 graus de liberdade [18]. Quanto à colocação da plataforma, existem duas grandes hipóteses: a primeira é colocar o extrusor por baixo da plataforma e esta move-o apenas; a segunda é a plataforma de *Stewart* funcionar como base e o extrusor estar fixo. A primeira hipótese pode já ser excluída uma vez que não ajuda no suporte. A segunda solução será então a melhor em termos de aplicação de plataformas de *Stewart*.

Quando se comparam as duas soluções melhores de cada tipo, o manipulador delta com três eixos lineares e dois rotativos e a plataforma de *Stewart* a mover a base, parecem ambas boas soluções. No entanto, a opção delta poderá ser potencialmente melhor por duas razões: a primeira é o facto de permitir mais facilmente à máquina ter um maior volume de trabalho vertical; a segunda, já existem impressoras delta de 3 eixos deste tipo desenvolvidas e comercializadas, o que significa que já existe mais conhecimento empírico associado a estas soluções e que é só necessário desenvolver a adição dos dois eixos.

Para avaliar se esta seria uma boa solução ou não, é preciso avaliar os esforços críticos que esta solução envolveria. Neste caso, é importante avaliar qual a velocidade máxima de operação e qual o momento máximo aplicar no veio do motor. Quanto à velocidade de rotação máxima

a que os motores estarão sujeitos, esta corresponderá certamente à associada à velocidade linear dos três eixos que movimentam a cabeça extrusora, uma vez que estes serem, em princípio, os movimentos mais rápidos da máquina, assumindo a configuração delta de três eixos lineares mais dois angulares descrita anteriormente. O movimento que poderá causar os esforços máximos será o movimento de rotação da base, estando esta totalmente carregada.

A velocidade linear máxima foi definida no capítulo das especificações em 80 mm/s. Para saber ao certo qual o valor de velocidade angular em que isso se traduzirá seria necessário conhecer a estrutura e a sua cinemática. No entanto, podemos estimar uma velocidade máxima que o motor terá de ser capaz de realizar analisando os motores mais usados em impressoras 3D do tipo de delta, como os do tipo NEMA 17, que são usados na maioria das impressoras delta como a impressora “ROSTOCK MAX™ V3” (que tem uma velocidade linear de movimento máxima de 300mm/s). Então é relativamente seguro inferir que, sendo o nosso sistema semelhante às outras impressoras delta e querendo apenas atingir 80mm/s, e podendo um motor do tipo NEMA 17 alcançar velocidades de 300mm/s, e considerando o motor da classe NEMA 17 da Schneider com melhores características, o M-1719-1.5 [87], que se o nosso motor for igual ou superior a este cumprirá os requisitos da máquina em termos de velocidade máxima. E como podemos ver da curva de funcionamento do motor M-1719-1.5 [87] na Figura 26, este opera a uma velocidade máxima de 1800 RPM, que será o valor que usaremos como referência para a velocidade angular máxima usar nos motores. No entanto, este valor apenas serve de estimativa, devendo ser calculado propriamente tendo em conta os parâmetros da estrutura escolhidos, bem como a sua cinemática.

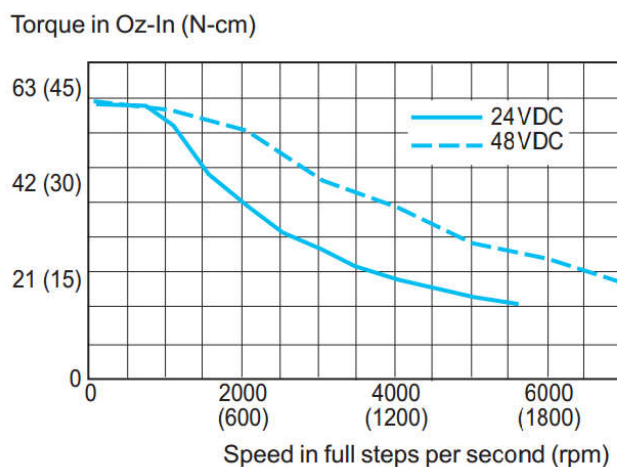


Figura 26 - Curva de funcionamento do motor M-1719-1.5 [87].

Para estimar o momento máximo iremos analisar a situação, presumivelmente mais crítica, em termos de momento máximo aplicado sobre o veio do motor da rotação da base, estando esta carregada com uma peça de grande dimensão produzida a partir de um material de grande densidade. Como anteriormente, para calcular a massa que a base terá de rodar, consideramos a situação crítica de ter apenas metade do volume de trabalho totalmente preenchido de material.

Tendo em conta o volume descrito no capítulo das especificações, Ø -180mm e z- 180mm. A situação descrita corresponde ao seguinte volume,

$$V = \frac{\pi r^2}{2} = \frac{\left(\frac{0,180}{2}\right)^2 \pi}{2} 0,180 \approx 0,0023 \text{ m}^3 \quad (\text{Equação 16})$$

E assumindo então que se usa um material de alta densidade como o PEEK, calcula-se a massa que a base terá de rodar:

$$\rho_{peek} = 1480 \text{ Kg } m^{-3} \quad (\text{Equação 17})$$

$$m = V \rho = 0,0023 \cdot 1480 = 3,4 \text{ Kg} \quad (\text{Equação 18})$$

A partir da massa podemos então calcular a força que esta exerce,

$$F = m \cdot g = 3,4 \cdot 9,8 \approx 33,2 \text{ N} \quad (\text{Equação 19})$$

Considerando o ponto de aplicação da força no centro da área da base que esta ocupa, podemos então calcular o momento exercido no veio.

$$M = F \frac{4r}{3\pi} = 33,2 \left( \frac{4 \cdot \frac{0,180}{2}}{3 \pi} \right) \approx 1,3 \text{ Nm} \quad (\text{Equação 20})$$

O valor apresentado relativamente ao momento máximo utilizando uma estrutura delta é um valor muito menor que o valor obtido para uma estrutura cartesiana, que era de 29,5Nm. Podemos concluir assim, que a escolha de uma estrutura cartesiana será uma solução que implicará trabalhar com menores esforço e, conseqüentemente, sofrerá de menos problemas dinâmicos, necessitará de estruturas menos rígidas e terá de usar motores menos potentes.

Em suma, podemos concluir que existem muitas hipóteses potencialmente viáveis de tipos de manipuladores, que podem ser usadas para concretizar o projeto de uma impressora tridimensional de cinco eixos. No entanto, é necessário escolher qual a configuração de manipulador mais adequada para realizar esta tarefa. As melhores opções serão usar um manipulador cartesiano ou um manipulador delta. De facto, o mercado indica serem estas as melhores soluções, uma vez que são aquelas em que as empresas dedicadas ao desenvolvimento deste tipo de máquinas mais investem. Para além disso, os estudos realizados não demonstraram existir outra configuração com maior potencial. Adicionalmente, como vimos, existe um número muito superior de estudos e trabalhos desenvolvidos sobre as impressoras cartesianas ou delta, e, portanto, uma base de conhecimento disponível superior, tornando-as uma solução mais apelativa. A primeira evidência retirada, no que diz respeito tanto a impressoras cartesianas como delta, é que existe um problema com usar manipuladores em que os eixos angulares não estão colocados na base, que é o facto destas estas configurações não resolverem um dos problemas principais com o processo de FDM típico, que é o uso de estruturas de suporte. Uma situação típica em que se teria de usar uma estrutura de suporte seria a situação representada na Figura 27A, na representação da direita. mas usando uma base com eixos angulares pode-se imprimir a peça como mostrado na Figura 27 na representação B, o que não implicaria estrutura de suporte. No entanto, se os eixos rotativos estiverem colocados na cabeça, a peça continua a ter se ser contruída da forma da Figura 27A, na representação da direita, o que não causa melhorias no processo. Concluindo, de maneira a evitar usar estruturas de suporte ao máximo deve-se colocar os eixos na base.



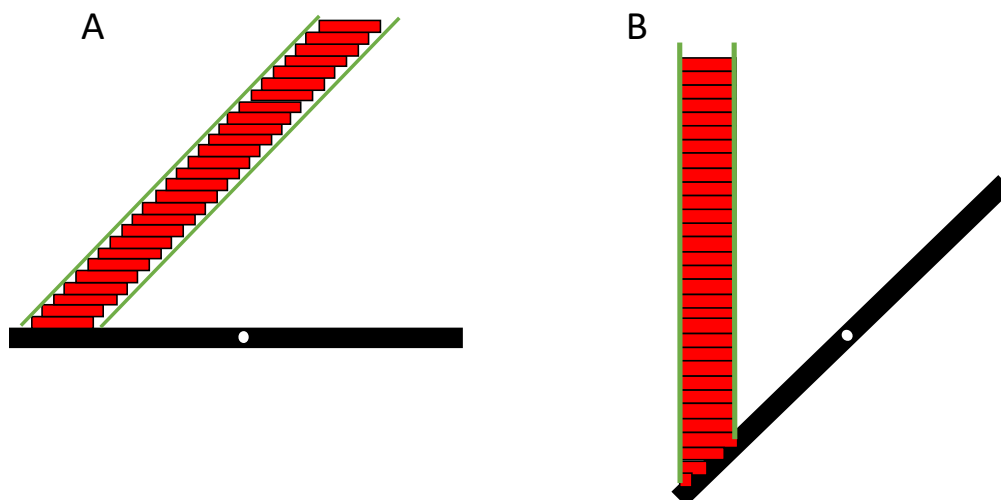


Figura 27 – Representação da eliminação da necessidade de estruturas de suporte usando eixos rotativos na base de uma impressora FDM. A- Impressão FDM com a base numa posição perpendicular ao extrusor; B - Impressão FDM com a base numa posição ótima.

Assumindo os eixos angulares na base, em termos de comparação entre as estruturas cartesianas e delta, propõe-se a estrutura delta como melhor opção para o desenvolvimento da máquina em questão. Isto porque tendo os eixos rotativos na base, existem três possibilidades plausíveis de colocação dos eixos lineares, XY no extrusor e Z na base, XZ no extrusor e Y na base ou XYZ no extrusor. No entanto, se usarmos a primeira opção o esforço suportado sobre o movimento Z seria muito grande, porque este teria que movimentar a base e o sistema de movimentos rotativo, o que não é uma situação favorável. Se usarmos a solução, XZ no extrusor e Y na base o movimento de Y terá que mover uma massa muito grande, a base mais o sistema de movimento angular, o que criará grandes momentos de inercia associados ao movimento e prejudicará o funcionamento da máquina. Se optarmos por usar uma estrutura cartesiana com XYZ no extrusor existem duas opções, primeira, o eixo Z mexer a estrutura toda x e y resultava mais uma vez em muito esforço associado ao eixo Z, ou a segunda opção, o eixo Z ser o último da cadeia cinemática, ou seja, ser atuado pelos eixos X e Y, o que exigiria uma estrutura muito rígida para este eixo de modo a garantir que este não sofreria efeitos de flexão devido às forças de inercia, o que não é um aspeto desejável. Todos estes problemas são evitáveis se usarmos uma estrutura delta, uma vez que estas tipicamente operam com sistema XYZ na cabeça extrusora, permitindo assim que se apliquem os dois eixos adicionais na base sem que este tenha implicações prejudiciais ao funcionamento normal dos eixos já existentes, o que poderá ser muito positivo.

## 5.2. Controlo

Estando estudada a configuração do manipulador para realizar a máquina pretendida, é necessário agora escolher a solução de automação que será responsável por exercer o controlo da máquina. Primeiramente, será necessário escolher o tipo de controlador que vai mais de encontro às necessidades da máquina, de entre as possibilidades controlador CNC clássico, controlador por software em PC industrial ou usar uma *Programmable Physical Circuit Board*. Para além disso, será também preciso analisar as possibilidades em termos de software utilizável para a impressora FDM de 5 eixos, quer seja de software CAD ou *software slicer*.

### 5.2.1. Controlador

Nesta secção será realizada uma ponderação sobre o controlador responsável pelo controlo dos movimentos da máquina e de todos os equipamentos auxiliares. Em termos de requisitos necessários para efetuar o controlo desta máquina, é necessário que o sistema seja, primariamente, capaz de controlar os movimentos dos cinco eixos associados ao movimento principal da máquina. Para além desta ação de controlo principal, existem vários sistemas auxiliares a ter também em conta. O primeiro é o controlo da velocidade de avanço do cordão de plástico a depositar. A este propósito, é importante referir que, em muitos casos, o eixo que empurra o cordão da bobine para a cabeça de fusão é interpolado com os eixos principais de movimento, de modo a garantir uma relação entre o comprimento de cordão debitado e o comprimento do percurso realizado pela cabeça. Para além disso, é também necessário realizar o controlo de temperatura da cabeça de fusão, da mesa sobre a qual a peça vai ser depositada, do ambiente interior da máquina onde a peça está a ser construída e da temperatura da peça. Por fim, será ainda necessário controlar outras funções de automação, como a verificação do estado das portas de aceso, a disponibilidade na bobine, e outros eventuais sistemas. Em suma, o controlador deve, no mínimo, ser capaz de controlar 6 eixos de movimento interpolados simultaneamente, 4 temperaturas, e ainda ter a possibilidade de ser expansível para acomodar outras opções de controlo para outras funções de automação.

Na escolha de controladores existem diversos fatores a ter em conta e que são necessários ponderar de modo a permitir fazer uma escolha acertada. Em seguida será apresentado um conjunto desses fatores [95]:

a) O ambiente circundante - O ambiente circundante é um aspeto importante a ter em conta, uma vez que fatores como a temperatura, a presença de poeiras ou de vibrações podem afetar o funcionamento do controlador. Na situação em estudo, pensa-se que isto não será um problema uma vez que a máquina será instalada num ambiente fechado e com temperaturas amenas.

b) Número de Entradas/Saídas Discretas - É importante considerar número de entradas e saídas discretas de um controlador, pois este limita o número de dispositivos que podem estar ligados ao mesmo. É, portanto, preciso escolher um controlador que respeite os requerimentos do número de dispositivos a ligar bem como o tipo (AC ou DC). Neste ponto já existem diferenças consideráveis entre os vários tipos de soluções apresentadas. Enquanto que os dois primeiros tipos de soluções (controladores clássicos e controladores por *software*) tem um número muito elevado deste tipo de entradas, a solução das *Programmable Physical Circuit Board* tem um número bastante pequeno. Este fator pode ser eliminatório caso se deseje ligar muitos sistemas auxiliares para além dos movimentos principais da máquina.

c) Número de Entradas/Saídas Analógicas - O número de entradas e saídas analógicas é importante pois limita o número de ligações analógicas ao controlador. É, portanto, necessário escolher um controlador que respeite os requerimentos do número de dispositivos a ligar bem como o tipo (Input: tensão, corrente, temperatura; Output: tensão ou corrente). Assim como o número de entradas e saídas analógicas, este é um fator decisivo na escolha do controlador, e mais uma vez, os controladores clássicos e os controladores por *software* têm um número muito mais elevado deste tipo de entradas do que a solução das *Programmable Physical Circuit Board*. Mais uma vez, este fator pode ser decisivo caso se deseje ligar muitos sistemas auxiliares para além do movimento principal da máquina.

d) Funções ou módulos especiais - Para realizar a escolha certa de um controlador é necessário saber se sobre este vai incidir alguma função especial, como contadores de alta velocidade, função de posicionamento, controlo de servomotores ou motores passo a passo, capacidade de programação, função de relógio em tempo real, ou outras. Para o trabalho em questão este é um ponto bastante importante uma vez que a máquina a criar terá que realizar

controlo de movimento, bem como o controlo de motores passo a passo. Poderiam usar-se servomotores, mas em geral os servomotores são melhores para aplicações de alta velocidade e momento elevado, enquanto os motores passo a passo são mais adequados para aplicações com menores acelerações e momentos constantes. Portanto, é necessário escolher um controlador que se adeque às funções a desempenhar e ao tipo de motor selecionado.

e) CPU - Outro fator decisivo na escolha do controlador são os requisitos incidentes sobre o CPU do mesmo. Esses requisitos incluem a memória disponível para armazenar os programas que este terá de correr e os dados que terá de guardar, bem como se terá de executar funções especiais como funções de um PID. Este é outro aspeto decisivo na escolha do tipo de controlador, uma vez que as placas programáveis estão à partida mais limitadas em termos de espaço e desempenho do que os controladores clássicos ou por *software*.

f) Localizações I/O - A localização das entradas e saídas é um fator importante a considerar, uma vez que pode ser necessário que estas se encontrem em localizações remotas e isso acarreta requisitos especiais sobre o controlador. Neste caso, este parâmetro não será decisivo pois não existirão ligações remotas.

g) Comunicações - Neste parâmetro é preciso considerar quais os requisitos de comunicação existentes, tais como o protocolo de comunicação que se pretende usar. Para esta aplicação, este é um fator também a considerar uma vez que as placas programáveis são mais limitadas em termos de opções do que as outras duas opções de controlador.

i) Facilidade programação - Neste parâmetro é necessário considerar o grau de complexidade e as funções envolvidas na programação do controlador do sistema. Isto é importante pois ter um controlador que já contenha instruções como contadores, temporizadores ou mesmo funções de PID pode ser muito mais vantajoso, uma vez que programá-las manualmente pode ser demasiado trabalhoso.

Na escolha do controlador a usar terão então de ser ponderados vários critérios de seleção como o ambiente circundante, o número de entradas e saídas analógicas e discretas, a necessidade de funções ou módulos especiais, a capacidade do CPU, as localizações I/O, o tipo de comunicação a usar e qual o grau de facilidade de programação do mesmo. Conforme foi mencionado na avaliação dos parâmetros acima descritos, o uso de *Programmable Physical Circuit Board* é desvantajoso em vários aspetos quando comparado com o uso de soluções CNC clássicos ou por *software*. Portanto, isto permite-nos concluir que o uso dessa solução não será o mais indicado. Quando comparamos as soluções CNC clássico e solução de *software*, conclui-se que a solução por *software* será potencialmente melhor por duas razões. A primeira é que o custo da solução de *software* e PC industrial é muito menor do que o custo de aquisição de uma solução CNC integrada. A segunda, é que, sendo o projeto a realizar um projeto piloto que visa a criação de um protótipo que poderá estar sujeito a alterações ou onde se queriam testar outras soluções e equipamentos, a solução por *software* será mais flexível e permitirá mais facilmente a aplicação de todo o tipo de modificações que se queiram realizar. Sugere-se então o uso de um *software* controlador conjugado com um PC industrial.

### 5.2.2. Software

Existem dois tipos de *softwares* usados associado ao processo de impressão, o CAD e o *slicer*. Quanto ao *software* CAD, qualquer uma das opções apresentadas servirá na produção de peças para a máquina, portanto o uso de qualquer um deles é uma opção satisfatória. Quanto ao *software slicer* o panorama é totalmente diferente uma vez que todos os *slicer's* a existentes no mercado não servem o propósito do projeto a realizar uma vez que todos eles trabalham apenas

com 3 eixos. Para além disso, a maioria dos estudos publicados até à data sobre este assunto são meramente propostas de métodos de como o processo de *slicing* deveria ser executado. A maior parte das propostas apresentadas, tais como [53]–[57], são semelhantes na abordagem ao problema e apresentam soluções de *slicing* de cinco eixos semelhantes. Essas soluções passam geralmente por seccionar o objeto a fabricar em partes mais pequenas de forma a permitir que cada uma dessas secções tenha um sentido de deposição diferente da peça anterior. Existe ainda, para além dos anteriores, um estudo realizado [96] que relata a adaptação de um código G obtido através de um software CAM para uma fresadora, sendo este posteriormente adaptado manualmente de forma a realizar um processo de fabrico aditivo. Por fim, é importante mencionar que a opção que tem sido usada maioritariamente para testar todas as máquinas de fabrico aditivo de cinco eixos produzidas passa por elaborar manualmente um código G simples, que permite demonstrar as funcionalidades de cinco eixos. Em conclusão, a opção mais interessante e que permitiria à máquina trabalhar em todo o seu potencial seria produzir um *slicer* que funcionasse com 5 eixos interpolados simultaneamente, mas tendo em conta a dimensão dessa tarefa e o facto de a impressora a realizar ser apenas o projeto piloto, provavelmente a melhor opção será escrever manualmente alguns códigos G manualmente que permitam testar o funcionamento da máquina e provar o seu conceito.

### 5.3. Componentes

Após tomadas as decisões sobre a estrutura e solução de controlo da impressora, deve-se seguir a escolha dos componentes a usar. A escolha deve ser feita de modo a garantir que os componentes que constituirão a máquina serão capazes de cumprir os requisitos impostos e permitir que esta funcione segundo as especificações definidas sem qualquer tipo de problema. Assim, realizar a escolha dos mesmos corretamente é muito importante pois afeta as gamas de operação de todos os parâmetros de funcionamento da máquina, como a temperatura de operação da mesma e conseqüentemente os materiais que esta pode utilizar, os esforços que esta pode suportar e conseqüente a dimensão das peças que esta pode imprimir, bem como as velocidades máximas que a máquina pode atingir, que estão diretamente relacionadas com o tempo de operação da mesma. Neste capítulo será feita a análise do tipo de soluções possíveis para os seguintes componentes: base de impressão, extrusor, sensor de temperatura, sistemas de transmissão de movimento e o motor.

Primeiramente iremos analisar os componentes a usar na base de impressão, quer como elemento de aquecimento, quer como superfície de impressão. Para o elemento de aquecimento sugere-se o uso de elemento de aquecimento com filme de *Kapton*, uma vez que analisando a Tabela 10, podemos concluir que esta é a solução mais leve, o que é bom pois queremos reduzir ao máximo o peso da base. Adicionalmente, esta solução é capaz de proporcionar maiores temperaturas, o que também é um aspeto importante uma vez que estamos a trabalhar com PEEK. Quanto à superfície de impressão sugere-se o uso de uma superfície em PEI [97], uma vez que é um material com boa adesão ao PEEK. Em suma, estas são as soluções para a base de aquecimento e superfície de impressão satisfaziam as especificações apresentadas inicialmente no Capítulo 3.

O segundo componente que é necessário definir é qual o tipo de extrusor a usar. Conforme foi dito no Capítulo 4.3.2, existem dois tipos de extrusores, os Direct e os Bowden. Para esta aplicação sugere-se o uso do extrusor do tipo Bowden, uma vez que se vai optar por uma impressora do tipo delta e este é o tipo de extrusor usado nestas impressoras, uma vez que reduz o peso associado ao movimento dos eixos X, Y e Z. Concluindo, sugere-se que se use um extrusor Bowden capaz de atingir uma temperatura máxima de 400°C, conforme especificado no Capítulo 3.2, como por exemplo o extrusor *E3D V6* [98].

Após o extrusor estar escolhido devemos agora fazer a análise de que tipo de sensor de temperatura a usar. Após a analisar a Tabela 13, sugere-se, para a aplicação em questão, o uso de um RTD, uma vez que um termistor não opera na temperatura máxima desejada de cerca de 400°C conforme definido no capítulo das especificações. Poder-se-ia usar um termopar, mas este é mais caro e o RTD apresenta as características necessárias suficientes. Em suma, sugere-se então o uso de um sensor do tipo RTD para esta aplicação.

Quanto à escolha dos elementos de transmissão de movimento, a pertinência da solução depende muito do tipo de movimento a que está associada. Se não existirem grandes esforços associados e for necessária grande velocidade de operação uma solução por correia será, potencialmente, uma melhor opção. Caso existam esforços grandes associados, ou seja, necessário uma função de autobloqueio de movimento, uma solução de fuso será melhor. Para o caso em questão sugere-se o uso de um sistema de correias uma vez que é este o sistema usado por impressoras delta [16] que já realizam um processo igual ao desejado, mas com 3 eixos. Conclui-se então que deverá ser feita a transmissão de movimento angular para linear usando um sistema de correias.

Por fim, falta-nos seleccionar o tipo de motor ideal para esta aplicação. Conhecendo os dois tipos de motores apresentados no Capítulo 4.3.5, é necessário seleccionar qual o mais adequado para a máquina em questão. Para isso iremos recorrer a um diagrama, representado na Figura 28, presente num “white paper” [79] produzido pela empresa Parker que tem por finalidade ajudar nessa mesma selecção.

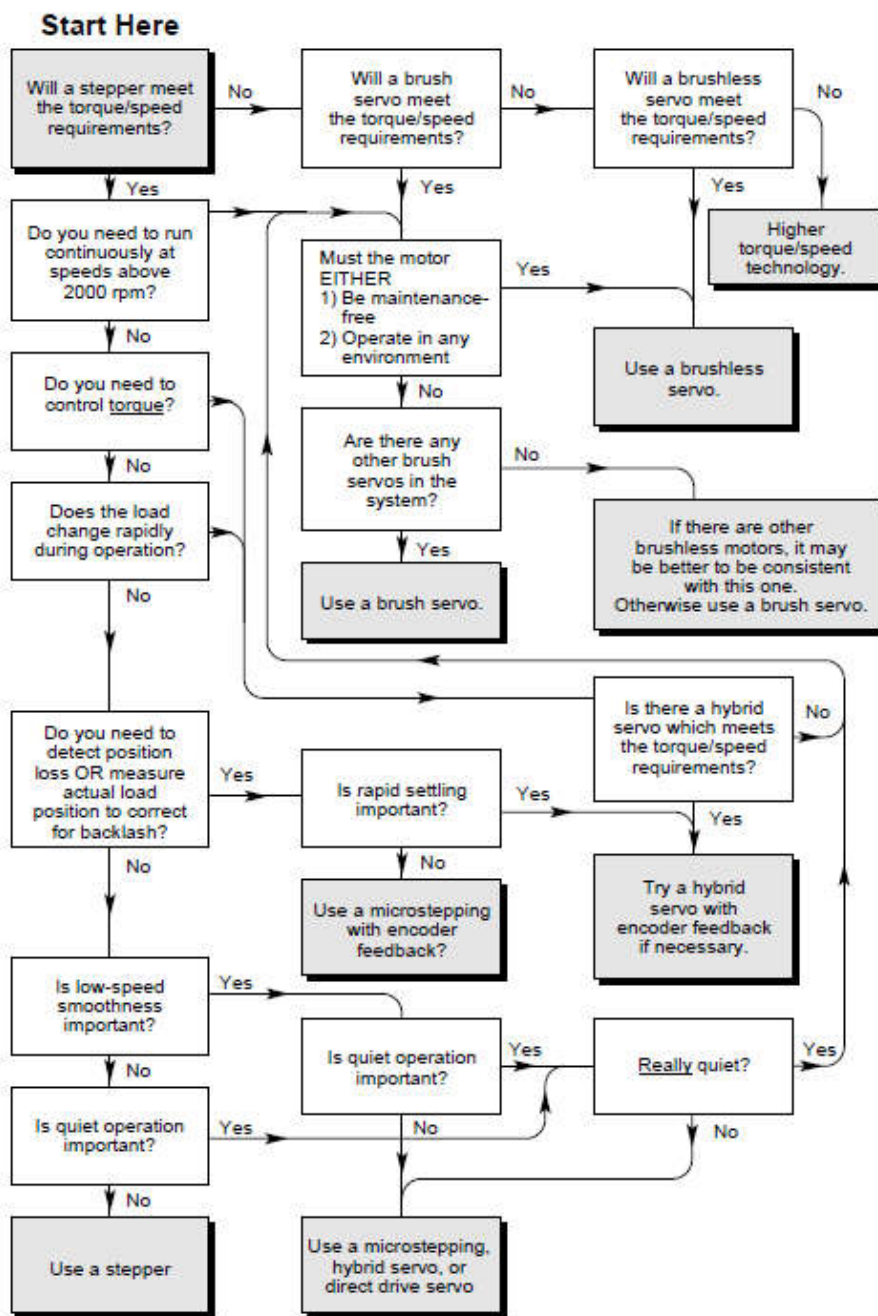


Figura 28 - Esquema didático para a escolha de um motor elétrico [80].

Seguiremos então o método sugerido pelo diagrama representado na Figura 28, seguindo todos os passos até encontrar a solução final:

a) Primeiro Passo - Existe um motor passo a passo capaz de satisfazer os requerimentos de momento e velocidade impostos? O primeiro passo sugerido é verificar se existem motores passo a passo que consigam satisfazer os requerimentos de momento e velocidade impostos pelo sistema. Assim, recorrendo aos valores estimados anteriormente, sabemos que o momento máximo a aplicar é de aproximadamente 3,6 Nm e a velocidade máxima é de aproximadamente 1800 RPM. Para além disso, é importante notar que o momento máximo e velocidade máxima nunca são simultâneos. Consultando o catalogo da empresa Schneider para motores passo a passo [87] podemos facilmente encontrar o motor passo a passo que consiga satisfazer estes requisitos, como o motor M-3445-6.3, cuja a sua curva característica está apresentada na Figura 29, então a resposta a esta pergunta é positiva.

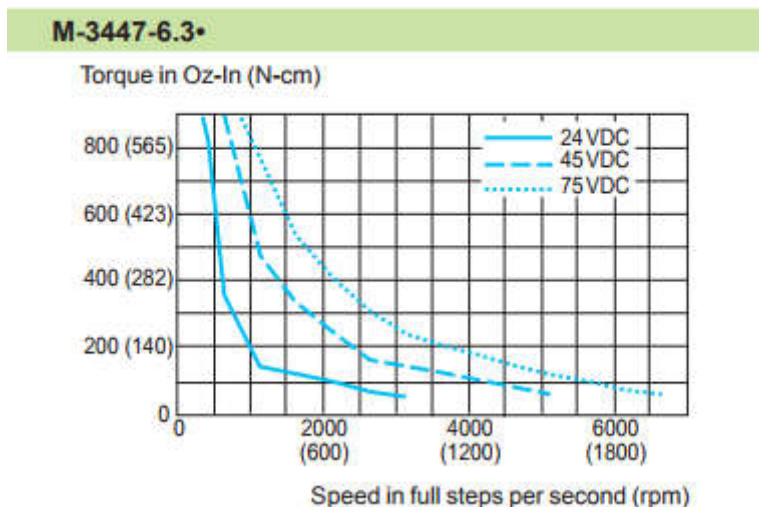


Figura 29 - Curva característica do motor passo a passo - M-3445-6.3 [87].

b) Segundo passo - É necessário que o motor trabalhe de forma contínua como velocidades superiores a 2000 RPM? Uma vez que a velocidade máxima estimada para o motor é de 1800 RPM, a resposta a esta pergunta é negativa.

c) Terceiro passo - É necessário que exista um controlo do momento aplicado? Não, uma vez que o dimensionamento do motor esteja bem feito e este nunca trabalhe fora da sua gama de velocidade/momento não existe necessidade de saber que o momento a aplicar seja constante.

d) Quarto Passo - Durante a operação, a carga muda de rapidamente de velocidade? Caso se queira que a máquina trabalhe com grande velocidade a resposta a esta pergunta é afirmativa porque tanto a base como a cabeça extrusora terão de trocar rapidamente de velocidade.

e) Quinto Passo - Existe algum servomotor híbrido que satisfaça os requisitos de momento e velocidade impostos? Mais uma vez recorrendo aos valores de momento e velocidade estimados anteriormente sabemos que o momento máximo a aplicar é de aproximadamente 3,6 Nm e a velocidade máxima é de aproximadamente 1800 RPM. Consultando um catálogo de servomotores híbridos da empresa Kollmorgen [99] podemos encontrar motores capazes de satisfazer os requisitos impostos, tal como o motor K42xxxF-L w/P6000 (Figura 30).

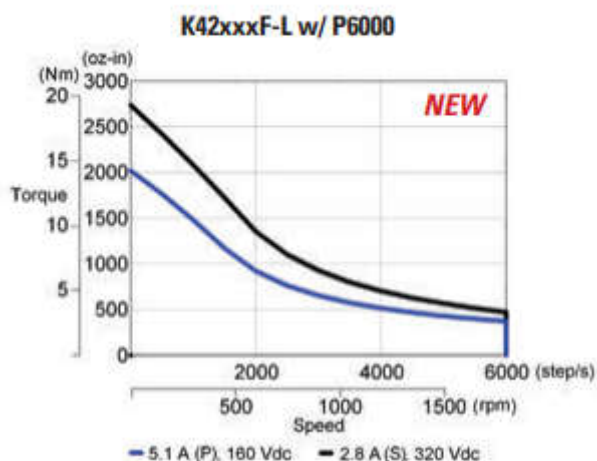


Figura 30 - Curva característica do motor K42xxxF-L w/P6000 [99].

Assim chegamos ao fim do método proposto pela empresa Parker [100] e concluímos que o motor que deveremos escolher para a aplicação em questão será um servomotor híbrido. Um servomotor híbrido é um motor fisicamente igual a um motor passo a passo, mas que possui um *encoder* que permite ao sistema trabalhar em malha fechada. Este tipo de solução é vantajoso porque tem todas as vantagens de um motor passo a passo, como o facto de ser bom para aplicar momento constante estando parado, mas permite um controlo de malha fechada o que evita problemas como o “salto” de passo oriundo de situações em que se dê a sobrecarga do sistema devido, por exemplo, a efeitos de inércia.

Concluímos assim a análise da escolha de componentes, tendo neste capítulo sido realizada a análise de soluções possíveis para os seguintes componentes: base de impressão, extrusor, sensor de temperatura, sistemas de transmissão de movimento e o motor. Para a base de impressão escolheu-se um sistema de aquecimento por filme *Kapton*, e uma superfície em PEI, para o extrusor sugeriu-se uma solução *Bowden*, para o sensor de temperatura sugeriu-se um sensor RTD, para o sistema de transmissão e movimento sugeriu-se um sistema de correias e para o motor escolheu-se um servomotor híbrido.



## 6. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo o estudo do estado atual do conhecimento e de possíveis soluções para a conceção de uma arquitetura de impressora tridimensional com 5 eixos. Mais concretamente, teve como objetivo a procura e proposta de soluções possíveis para a estrutura do equipamento, para o hardware de controlo e para o software principal indicado para que a máquina funcione de acordo com as especificações estabelecidas de modo a dar ao INEGI uma indicação de um caminho a tomar no sentido de produzir uma impressora tridimensional com 5 eixos funcional e que seja útil para estudar os benefícios associados a este novo processo de fabrico.

No estudo da solução estrutural foram encontradas soluções para o problema proposto usando vários tipos de manipuladores. Foram encontradas soluções usando manipuladores cartesianos, paralelos, articulados, SCARA e polares. Destes excluíram-se todas as soluções, excetuando os manipuladores do tipo cartesiano e paralelo, uma vez que não existia muito conhecimento de base sobre estes. Posteriormente, efetuou-se um estudo comparativo entre soluções paralelas e cartesianas onde se concluiu que as soluções paralelas com os eixos angulares posicionados na base seriam a melhor solução. As razões que levaram a esta conclusão foram que o não uso de eixos angulares na base não cria vantagens na eliminação de estruturas de suporte, o facto de a associação de eixos lineares à base criar problemas de dinâmica no sistema e o facto de os sistemas delta trabalharem, por natureza, muito melhor com configurações X, Y e Z no extrusor. Concluindo-se assim que a estrutura delta com os eixos angulares na base será a melhor solução.

No estudo da solução de automação foram ponderadas quais as soluções que poderiam ser usadas como controlador da impressora e quais os softwares deveriam ser usados associados à máquina. Quanto ao tipo de controlador a utilizar, conclui-se que o uso de um software controlador conjugado com um PC industrial são a melhor opção. As razões que levam a esta escolha são a grande flexibilidade que esta solução apresenta, tanto a nível de programação como a nível físico (numero de entradas analógicas e discretas, tipo de comunicação, etc.) o que é ideal quando se quer construir um protótipo piloto que poderá ser sujeito a alterações. Em termos software, conclui-se que existem muitas opções de softwares CAD que poderiam ser boas opções. No entanto, no que diz respeito ao software *slicer*, conclui-se que não existem atualmente soluções já desenvolvidas que permitam o funcionamento da impressora com 5 eixos interpolados simultaneamente. Portanto, propõe-se o desenvolvimento de um software *slicer* de 5 eixos ou, opcionalmente e de maneira a permitir testar a máquina até que o primeiro esteja terminado, a criação de códigos G simples de 5 eixos de forma manual.

Os componentes são os elementos que constituirão a impressora, portanto realizar a sua escolha corretamente é fulcral para que esta trabalhe bem. Neste trabalho foi feita a análise do tipo de soluções possíveis para a base de impressão, para o extrusor, para o sensor de temperatura, para o sistema de transmissão de movimento e para o motor. Quanto ao tipo de base a utilizar conclui-se que o melhor sistema de aquecimento seria usar elementos de aquecimento com filme de *Kapton*, uma vez que era o elemento mais leve e com capacidade de atingir maiores valores de temperatura. Para além disso, conclui-se que a melhor superfície para imprimir seria o PEI uma vez que é um material com boa adesão ao PEEK. Quanto ao tipo de extrusor, sugere-se o uso do extrusor do tipo *Bowden*, pois é o tipicamente usado em impressoras do tipo delta. Quanto ao tipo de sensores de temperatura a usar, sugere-se o uso de um RTD uma vez que um termistor não opera na temperatura máxima desejada de cerca de 400°C e um termopar tem um custo mais elevado. Quanto ao tipo de sistema de transmissão de movimento, sugere-se o uso de um sistema de correias uma vez que é este o sistema usado por impressoras deltas já existentes com princípio de funcionamento semelhante. Por fim

selecionou-se o motor tendo em conta os esforços estimados e as indicações do fabricante Parker e chegou-se à conclusão que um servomotor híbrido seria a melhor opção.

Em termos de trabalhos futuros sugerem-se duas tarefas principais. A primeira será a realização do projeto mecânico da máquina, que permitirá detalhar mais concretamente a estrutura da máquina, os esforços envolvidos e os componentes a usar. Para além disso, seria interessante realizar o desenvolvimento de um *slicer* de 5 eixos que permitisse usar a impressora em todo o seu potencial.

## 7. Referências

- [1] American Society for Testing and Materials, “ASTM F2792–10 standard terminology for additive manufacturing technologies,” ISO 10303-1:1994.
- [2] INEGI - Instituto De Ciência E Inovação Em Engenharia Mecânica E Engenharia Industrial, “Brochura - INEGI.” 2016.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [4] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing: technology, applications and research needs,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, Sep. 2013.
- [5] S. S. Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” US Patent 5,121,329, Jun-1992.
- [6] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [7] R. M. D. Moreira, “Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM”, M.S. thesis, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [8] H. Giberti, M. Strano, and M. Annoni, “An innovative machine for Fused Deposition Modeling of metals and advanced ceramics,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 43, p. 03003, 2016.
- [9] Ezdeale, “The 3D Printing Phenomenon,” 2017. [Online]. Available: <http://blog.ezdealio.com/3d-printing-phenomenon/>. [Accessed: 02-Mar-2017].
- [10] Ø. K. Grutle, “Designing a 5-axis 3D printer,” M.S. thesis, Department of Informatics, University of Oslo, Oslo, 2015.
- [11] W. Yerazunis, J. Barnwell, and D. Nikovski, “Strengthening ABS, Nylon, and Polyester 3D Printed Parts by Stress Tensor Aligned Deposition Paths and Five-Axis Printing,” presented at the International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2016.
- [12] X. Song, Y. Pan, and Y. Chen, “Development of a Low-cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing,” presented at the 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013, Austin, TX, 2013.
- [13] Roboze, “Roboze one +400,” 2017. [Online]. Available: [http://nextstep3d.com/wp-content/uploads/RobozeOne-400ENG\\_Web.pdf](http://nextstep3d.com/wp-content/uploads/RobozeOne-400ENG_Web.pdf). [Accessed: 27-Apr-2017].
- [14] Apium Additive Technologies GmbH, “Apium P 155,” 2017. [Online]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/56d7f84422482e044058dbe8/t/5828a0f737c58159b6d1c911/1479057656956/Apium+P+155.pdf>. [Accessed: 27-Apr-2017].
- [15] Anon3D, “AON-M,” 2017. [Online]. Available: <https://www.aon3d.com/static/marketing/docs/AON-M-Specs-Sheet.pdf>. [Accessed: 27-Apr-2017].
- [16] TRACTUS3D, “T650 RTP,” 2017. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/pricewatch/3d-printer/tractus3d-t650p-rtp/>. [Accessed: 27-Apr-2017].
- [17] VSHAPER, “VSHAPER Pro,” 2017. [Online]. Available: <http://www.tractus3d.com/nl/producten/>. [Accessed: 27-Apr-2017].

- [18] L. Skaret, “A stewart platform based replicating rapid prototyping system with biologically inspired path-optimization,” Department of Informatics, University of Oslo , Oslo, 2011.
- [19] D. J. Todd, *Fundamentals of Robot Technology: an introduction to industrial robots, teleoperators, and robot vehicles*, Ilustrada. Wiley, 1986.
- [20] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control- Theory and Practice*, 2, revista ed. CRC Press, 2003.
- [21] B. Klaus and Lung-Wen Tsai, *Robot Analysis- The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. Cambridge, New Jersey: John Wiley & Sons, 1999.
- [22] Z. Pandilov and V. Dukovski, “Comparison of the characteristics between serial and parallel robots,” *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, vol. 7, no. 1, p. 143, 2014.
- [23] S. Paatz, “Anatomy of a Robot,” *Engineering & Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 42–44, 2008.
- [24] Ultimaker, “Ultimaker 2+ - Specifications,” 2017. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus/specifications>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [25] MakerBot, “The All-New Makerbot Replicator+,” 2017. [Online]. Available: <https://www.makerbot.com/replicator/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [26] 5 AxisWorks Ltd, “5axismaker,” 2017. [Online]. Available: <http://www.5axismaker.com/support/>. [Accessed: 30-Mar-2017].
- [27] ORION Delta, “ORION Delta 3D Printer,” 2017. [Online]. Available: <https://www.seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [28] 3dhubs, “Rostock Max™ V3 Desktop 3d Printer,” 2017. [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/rostock-max>. [Accessed: 11-Mar-2017].
- [29] Mark, “Stewart-Gough Platform (Hexapod),” *grabcad*. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/stewart-gough-platform-hexapod-1>. [Accessed: 25-Aug-2017].
- [30] N. F. Rodrigues, “Célula Robótica industrial: aplicação de ferramentas CAD/CAM na programação de robôs,” M.S. thesis, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [31] Y. Ding, R. Dwivedi, and R. Kovacevic, “Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 44, pp. 67–76, Apr. 2017.
- [32] Morgan 3D Printers, “Morgan Pro 2,” 2017. [Online]. Available: <http://www.morgan3dp.com/product/morgan-pro-2/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [33] Polar#D, “A Revolution in 3DP,” 2017. [Online]. Available: <http://about.polar3d.com/printer/>. [Accessed: 05-Mar-2017].
- [34] Fagor Automation, “CNC 8055 Catalog,” 2017. [Online]. Available: [http://www.fagorautomation.com/downloads/catalogos/pt-br/cat\\_cnc\\_8055.pdf](http://www.fagorautomation.com/downloads/catalogos/pt-br/cat_cnc_8055.pdf). [Accessed: 06-Apr-2017].
- [35] FANUC, “CNC controls brochure,” 2016. [Online]. Available: <https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiksruEmZbWAhWIWhoKHaiHBOsQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2F~%2Fmedia%2Ffiles%2Fpdf%2Fproducts%2Fncnc%2Fncnc%2520control%2Fbrochures>

- [%2Fenc%2520controls%2520brochure.pdf%3Fla%3Dpl&usg=AFQjCNHCFDjL-45IL2Cq3SjJSgM-ARyEA](#). [Accessed: 06-Apr-2017].
- [36] SIEMENS, “Simotion - Motion Control System Catalog,” 2017. [Online]. Available: [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi2282amZbWAhUMfRoKHSanCqcQFggsMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.industry.usa.siemens.com%2Fdrives%2Fus%2Fen%2Fmotion-control-systems-and-solutions%2FDocuments%2FCatalog\\_PM21-SIMOTION.pdf&usg=AFQjCNG17Q4SnaKNo-TTjRW3sxt7-2c2aQ](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi2282amZbWAhUMfRoKHSanCqcQFggsMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.industry.usa.siemens.com%2Fdrives%2Fus%2Fen%2Fmotion-control-systems-and-solutions%2FDocuments%2FCatalog_PM21-SIMOTION.pdf&usg=AFQjCNG17Q4SnaKNo-TTjRW3sxt7-2c2aQ). [Accessed: 06-Apr-2017].
- [37] Beckhoff, “Beckhoff short profile.” [Online]. Available: <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/default.htm>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [38] 3S-Smart Software Solutions GmbH, “CODESYS,” 2017. [Online]. Available: [https://www.codesys.com/#\\_](https://www.codesys.com/#_). [Accessed: 10-Apr-2017].
- [39] Newfangled Solutions, “Mach3,” 2017. [Online]. Available: <http://www.machsupport.com/software/mach3/>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [40] linuxcnc.org, “LinuxCNC,” 2017. [Online]. Available: <http://linuxcnc.org/>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [41] Y. Chen, Z. Chi, and L. Jingyuan, “A Layerless Additive Manufacturing Process based on CNC Accumulation,” *Emerald Group Publishing Limited*, vol. 17, no. 3, pp. 218–227, 2011.
- [42] XYcom Automation, Inc., “WHITE PAPER - Why Buy Industrial Computers?” 2001.
- [43] Beckhoff, “Beckhoff Main Catalog 2017.”
- [44] International Electrotechnical Commission, “IEC Standard for Programmable Controllers,” IEC 61131-3, Feb-2013.
- [45] 3S-Smart Software Solutions GmbH, “CODESYS-Motion + CNC.” Oct-2016.
- [46] Newfangled Solutions, “Newfangled Solutions,” 2017. [Online]. Available: <http://www.machsupport.com/>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [47] Arduino, “What is Arduino?,” 2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [48] RUMBA, “Rep Rap,” 2017. [Online]. Available: <http://www.reprap.org/wiki/RUMBA>. [Accessed: 27-Apr-2017].
- [49] Azteeg X3, “Rep Rap,” 2015. [Online]. Available: [http://www.reprap.org/wiki/Azteeg\\_X3](http://www.reprap.org/wiki/Azteeg_X3). [Accessed: 24-Apr-2017].
- [50] Think3DPrint3D and Escher3D, “Duet 3D - Advanced 3D Printing Electronics.” [Online]. Available: <https://www.duet3d.com/index.php?route=common/home#features>. [Accessed: 04-Apr-2017].
- [51] Think3DPrint3D and Escher3D, “Duex2 and Duex5 expansion boards.” [Online]. Available: [https://duet3d.com/wiki/Duex2\\_and\\_Duex5\\_expansion\\_boards](https://duet3d.com/wiki/Duex2_and_Duex5_expansion_boards). [Accessed: 04-Apr-2017].
- [52] All3DP, “25 Best 3D Design/3D Modeling Software Tools,” 2017. [Online]. Available: [25 Best 3D Design/3D Modeling Software Tools](#). [Accessed: 23-Apr-2017].
- [53] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin, and S. van Duin, “Multi-Direction Slicing Of STL Models For Robotic Wire-Feed Additive Manufacturing,” 28th Annual

- International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference will be held in Austin TX, August 7-9, 201.
- [54] R. Sundaram and J. Choi, “A Slicing Procedure for 5-Axis LaserAided DMD Process,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 3, p. 632, 2004.
- [55] P. Singh and D. Dutta, “Multi-Direction Slicing for Layered Manufacturing,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 129, 2001.
- [56] R. Sundaram and J. Choi, “A Slicing Procedure For 5-Axis Layered Manufacturing,” University of Missouri, Rolla, Rolla, MO 65409, 2003.
- [57] Divya Kanakanala, “Multi axis slicing for rapid prototyping”, M.S. thesis, Computer Sciences Department, Missouri University of Science and Technology, 2010.
- [58] All3DP, “20 Best 3D Printing Software Tools,” 2017. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/>. [Accessed: 23-Apr-2017].
- [59] Rep Rap, “PCB Heatbed.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed](http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [60] I. I. Izhnin, K. D. Mynbaev, A. V. Voitsekhovskii, A. G. Korotaev, O. I. Fitsych, and M. Pociask-Bialy, “Ion etching of HgCdTe: Properties, patterns and use as a method for defect studies,” *Opto-Electronics Review*, vol. 25, no. 2, pp. 148–170, Jun. 2017.
- [61] RepRap, “MK2B.” [Online]. Available: <https://www.amazon.com/SainSmart-printers-HeatBed-Updated-Version/dp/B00EZKEGG0>. [Accessed: 05-Jul-2017].
- [62] “Huxley PCB Heatbed.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/Huxley\\_PCB\\_Heatbed](http://reprap.org/wiki/Huxley_PCB_Heatbed). [Accessed: 02-Jun-2017].
- [63] amazon, “KEENOVO - Universal Flexible Silicone Heater.” [Online]. Available: <https://www.amazon.com/approx-KEENOVO-Universal-Flexible-Silicone/dp/B00V81ZI70>. [Accessed: 03-Jul-2017].
- [64] DUPONT™, “Kapton-general-specs.” [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2017].
- [65] Rep Rap, “Heated Bed.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/Heated\\_Bed](http://reprap.org/wiki/Heated_Bed). [Accessed: 02-Jun-2017].
- [66] Bootsindustries, “Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment.” [Online]. Available: <https://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [67] RepRap, “PCB Heatbed.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed](http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed). [Accessed: 15-Aug-2017].
- [68] Tempco, “Tempco Flexible Heaters: Silicone & Kapton.” [Online]. Available: <http://www.tempco.com/Catalog/Section%209-pdf/Silicone%20Rubber.pdf>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [69] Minco, “Flexible Heaters Design Guide,” 2016. [Online]. Available: [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwio5sn1lpbWAhWGWB0KHY6PBc4QFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.minco.com%2F~%2Fmedia%2Ffiles%2Fminco%2Fproductguides%2Fheat%2Fheater%2520design%2520guide.ashx&usg=AFQjCNH\\_WwMobic\\_Yl5plumw9segC1TLYg](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwio5sn1lpbWAhWGWB0KHY6PBc4QFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.minco.com%2F~%2Fmedia%2Ffiles%2Fminco%2Fproductguides%2Fheat%2Fheater%2520design%2520guide.ashx&usg=AFQjCNH_WwMobic_Yl5plumw9segC1TLYg). [Accessed: 15-Aug-2017].

- [70] HydraRaptor, “Hot bed.” [Online]. Available: <http://hydraraptor.blogspot.pt/2010/01/hot-bed.html>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [71] airwolf3d, “Wolfbite - Accesories.” [Online]. Available: <https://airwolf3d.com/product-category/accessories/>. [Accessed: 06-Jul-2017].
- [72] 3DPrinterChat, “DIY 3D Printer from scratch – Bowden vs Direct Drive.” [Online]. Available: <https://3dprinterchat.com/2017/05/bowden-vs-direct-drive/>. [Accessed: 11-Jul-2017].
- [73] Fabbaloo, “Bowden or Direct? A Primer on Extruder Styles.” [Online]. Available: <http://www.fabbaloo.com/blog/2015/11/11/bowden-or-direct-a-primer-on-extruder-styles>. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [74] 3D Insider, “3D Printing Extruders Explained.” [Online]. Available: <http://3dinsider.com/3d-printing-extruders-explained/>. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [75] DyzeDesign, “Comparison between temperature sensors used in 3D printers,” 2015. [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/2016/06/comparison-temperature-sensors-used-3d-printers-part-1/>. [Accessed: 25-Jul-2017].
- [76] Minco, “Sensors DesignGuide,” 2016. [Online]. Available: [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiqwpyGxonWAhXG1hQKHZD7A-cQFghlMA0&url=http%3A%2F%2Fwww.minco.com%2Fcomponents%2F~%2Fmedia%2FWWW%2FSensors%2FFAQs%2FMinco\\_SensorsDesignGuide%252010.ashx%3Fla%3Den&usg=AFQjCNHelGweGefOTxHi\\_UTP6MkhosXeUA](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiqwpyGxonWAhXG1hQKHZD7A-cQFghlMA0&url=http%3A%2F%2Fwww.minco.com%2Fcomponents%2F~%2Fmedia%2FWWW%2FSensors%2FFAQs%2FMinco_SensorsDesignGuide%252010.ashx%3Fla%3Den&usg=AFQjCNHelGweGefOTxHi_UTP6MkhosXeUA). [Accessed: 25-Jul-2017].
- [77] Parker, “Select the Right Drive Train Technology for 3D Printing Precision Linear Motion Systems.” 2015. [Online]. Available: <http://blog.parker.com/select-the-right-drive-train-technology-for-3d-printing-precision-linear-motion-systems>. [Accessed: 25-Jul-2017].
- [78] Dabbletron Labs, “3D Printer Linear Motion Systems.” [Online]. Available: <http://dabbletron.com/3d-printer-linear-motion-systems/>. [Accessed: 01-Aug-2017].
- [79] Lifewire, “Choosting Between Stepper Motors or Servo Motors.” [Online]. Available: <https://www.lifewire.com/stepper-motor-vs-servo-motors-selecting-a-motor-818841>. [Accessed: 13-Jul-2017].
- [80] Parker Motion and Control, “Step Motor & Servo Motor Systems and Controls.” 1997-1996.
- [81] MAKKUSU, “Cartesian Printer – Motion Platform,” 22-May-2016. [Online]. Available: <https://maxdesign1990.wordpress.com/2016/05/22/gmtech-printer-motion-platform-research/>. [Accessed: 03-Jun-2017].
- [82] Hbot 3D Printers, “HBOT 3D,” 2017. [Online]. Available: <http://hbot3d.com/?lang=en>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [83] RepRap, “CoreXY,” 2016. [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/CoreXY>. [Accessed: 03-Jun-2017].
- [84] Hackaday, “H-bot style 3D printer moves bed for Z-axis.” [Online]. Available: <https://hackaday.com/2013/04/05/h-bot-style-3d-printer-moves-bed-for-z-axis/>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [85] Pfeifer Industries, “Timing Belt Pulley Diameter Charts.” [Online]. Available: <http://www.pfeiferindustries.com/timing-belt-pulley-pitch-diameter-outside-diameter-charts-i-12-l-en.html>. [Accessed: 10-Aug-2017].

- [86] Hictop 2D Printer, “HICTOP 2 X Aluminum Gt2 20t Pulley Set and 2 Meters Belt for Reprap 3d.” [Online]. Available: <https://www.hic3dprinter.com/products/hictop-2-x-aluminum-gt2-20t-pulley-set-and-2-meters-belt-for-reprap-3d-printer-prusa-i3>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [87] Schneider, “Schneider Step Motors Catalog.” 2012.
- [88] R. Lumley, Ed., *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*. Oxford: Woodhead Publ, 2011.
- [89] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley’s mechanical engineering design*, 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [90] V. Bhandari, *Design of Machine Elements*, Third Edition. Tata McGraw-Hill, 2010.
- [91] Alfa Tech 3D, “M8 x 250mm Threaded rod DIN 975 BZP 8.8.” [Online]. Available: <https://alfa-tech3d.com/en/8-mm-rod/m8-x-250mm-threaded-rod-din-975-bzp-88.html>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [92] Rep Rap, “Threaded rod.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/Threaded\\_rod](http://reprap.org/wiki/Threaded_rod). [Accessed: 09-Aug-2017].
- [93] R. J. A. Allen and R. S. Trask, “An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot,” *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 78–87, Oct. 2015.
- [94] Fanuc, “FANUC M-1 iA 0,5AL delta robot.” [Online]. Available: <http://www.fanuc.eu/pt/en/robots/robot-filter-page/m1-series/m-1ia-05al?returnurl=http%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fpt%2Fen%2Frobots%2Frobot-filter-page%23%3Ft%3Dced8e7c08dc14f4b8bface83fc85337d%2C1fc42cb423f2445bb0da1ea4a885389a>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [95] AutomationDirect Technical Support, “Control Systems Overview,” 2017. [Online]. Available: [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi-oqEXnJHWAhWGlxoKHZJ5CKgQFghEMAU&url=http%3A%2F%2Fsupport.automationdirect.com%2Fdocs%2Fplc\\_selector.pdf&usg=AFQjCNFpf6GEey1VG53pB\\_MmbzO7ZMQW7Q](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi-oqEXnJHWAhWGlxoKHZJ5CKgQFghEMAU&url=http%3A%2F%2Fsupport.automationdirect.com%2Fdocs%2Fplc_selector.pdf&usg=AFQjCNFpf6GEey1VG53pB_MmbzO7ZMQW7Q). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [96] J. O. Milewski, G. K. Lewis, D. J. Thoma, G. I. Keel, R. B. Nemeck, and R. A. Reinert, “Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 75, no. 1, pp. 165–172, 1998.
- [97] RepRap, “PEI build surface.” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/PEI\\_build\\_surface](http://reprap.org/wiki/PEI_build_surface). [Accessed: 15-Aug-2017].
- [98] e3d, “V6 All-Metal HotEnd.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/v6>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [99] Kollmorgen, “Kollmorgen Stepper Solutions Catalog.” 2014.
- [100] Parker, “Welcome to Parker.” [Online]. Available: <http://www.parkerpen.com/>. [Accessed: 06-Aug-2017].