

CONTENTS

1	Introdução	4
1.1	Contexto Histórico	4
1.2	Motivação Econômica	5
1.3	Motivação Técnica	5
1.4	Objetivos	6
1.5	Estrutura da Monografia	7
2	Revisão Bibliográfica	8
2.1	Stereolithography (SLA)	9
2.2	Selective Laser Sintering (SLS)	10
2.3	Fused Deposition Modeling (FDM)	12
2.3.1	Mecânica: Movimentação do Efetuador	13
2.3.2	Mecânica: Extrusor de Filamento	21
2.3.3	Termodinâmica: Bico Aquecido (Hot End)	23
2.3.4	Termodinâmica: Mesa Aquecida (Heated Bed)	25
2.3.5	Elétrica: Motores e Drivers	25
2.3.6	Elétrica: Aquecedores	26
2.3.7	Elétrica: Fonte	26
2.3.8	Eletrônica: Sensores	27
2.3.9	Eletrônica: Microcontrolador	27
2.3.10	Firmware	28
3	Metodologias	29
3.1	Projeto Mecânico	30
3.1.1	Estrutura	30
3.1.2	Movimento do efetuador	30
3.1.3	Movimento da mesa	30
3.2	Projeto Elétrico	31
3.2.1	Dimensionamento	31
3.2.2	Diagrama Elétrico	32
3.3	Projeto Eletrônico	32
3.3.1	Esquemático	33
3.3.2	Placa de Circuito Impresso	34
3.4	Projeto de Firmware	34
3.4.1	Arquitetura	34
3.4.2	Controle do Motor de Passo	34
3.4.3	Aferição dos sensores	34
3.4.4	Pulse Width Modulation	34

3.4.5	Controlador PID	34
3.5	Montagem	34
4	Resultados e Discussão	35
5	Conclusões	36

LIST OF FIGURES

1	Estereolitografia por Escaneamento	9
2	Estereolitografia por Escaneamento com plataforma móvel	10
3	Sinterização Seletiva a Laser	11
4	Sinterização Seletiva a Laser - "Pescoço"	11
5	Ender 3 (<i>Ender-3 3D Printer</i> n.d.)	13
6	Prusa i3 (RepRap n.d.)	13
7	FDM do tipo Cartesian XY-Head	14
8	Ender 5 Pro (<i>Ender-5 Pro 3D Printer</i> n.d.)	14
9	FDM H-Bot	15
10	FDM Core-XY	16
11	GTmax3d Core A3	16
12	Cubex Duo 1	16
13	Ender 5 Plus <i>Ender-5 Plus 3D Printer</i> n.d.	17
14	BambuLab X1 <i>Bambu Lab X1 Series Desktop 3D Printer X1-Carbon</i> n.d.	17
15	CR-30 (<i>CR-30 3D Printer - Creality Official Store</i> n.d.)	18
16	Blackbelt (<i>Blackbelt 3D - The benchmark in 3D belt printing, why limit yourself</i> n.d.)	18
17	ABB IRB 360 (<i>IRB 360 Data sheet</i> n.d.)	18
18	FDM Delta	19
19	Robô SCARA	20
20	FDM SCARA	20
21	FDM SCARA Cerâmica	20
22	FDM SCARA com base móvel	21
23	Extrusora Bowden	22
24	Comparação dos mecanismos extrusores	23
25	Partes do bico aquecido (Hot End)	23
26	Hot-end V6	25
27	Hot-end Hemera	25
28	Defeitos causados por não aquecer a mesa de impressão	25
29	Partes do bico aquecido (Hot End)	32

LIST OF TABLES

1	Processos e materiais para manufatura aditiva	8
2	Requisitos para o projeto da impressora 3D	29
3	Dimensionamento componentes	32

1 INTRODUÇÃO

"A manufatura aditiva é uma das tecnologias mais promissoras e que crescem mais rápido, oferecendo vantagens significativas sobre processos de manufatura convencionais." (Bikas, Lianos, and Stavropoulos 2019)

Em oposição a manufatura subtrativa, o universo da manufatura aditiva engloba as tecnologias de fabricação digital que produzem um objeto final por meio da adição de matéria prima. Por isso, está fortemente associada à capacidade de criar peças complexas, com pouco (ou nenhum) desperdício de material e com maquinário relativamente simples.

Geralmente, nos processos subtrativos são necessárias várias máquinas como tornos, fresas e furadeiras, que são equipamentos complexos, na maioria das vezes com muitos graus de liberdade. Enquanto isso, nos processos aditivos é usual que se utilize uma única ferramenta com até três graus de liberdade, existindo algumas com apenas um.

Este trabalho objetiva abordar de forma prática e direta as etapas de projeto e construção de uma Impressora 3D de uso doméstico, uma das ferramentas mais usadas da manufatura aditiva.

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Apesar de ser um assunto que remete a atualidade e inovação, a impressão 3D foi concebida há muito tempo: *"as primeiras iterações documentadas de impressão 3D remontam ao início dos anos 80 no Japão".* ([When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing - n.d.](#)). Nascida da necessidade de rápida prototipagem, a ideia inicial de Hideo Kodama era polimerizar uma resina fotossensível, camada por camada, até formar um objeto. Kodama não conseguiu patentear o conceito, no entanto anos depois, em 1986, o engenheiro Chuck Hull a patenteou ([Hull and Arcadia 1984](#)) com o nome de Estereolitografia (Stereolithography, ou SLA). A ideia foi tão revolucionária que o processo é até hoje o mais utilizado pela indústria, compreendendo cerca de 8,0% do mercado global de impressão 3D. ([GVR n.d.](#)).

Pouco tempo depois, em 1986, o pesquisador Carl Deckard idealizou e patenteou ([Deckard 1986](#)) um processo que utiliza um laser para fundir camadas de pó de algum material (usualmente nylon ou poliamida), formando a estrutura de um objeto. A tecnologia ganhou o nome de Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering, ou SLS) e é também uma das mais usadas na indústria atualmente.

Por volta da mesma época, o inventor S. Scott Crump patenteou uma tecnologia chamada Modelagem por Deposição de material Fundido (Fused Deposition Model-

ing, FDM) (Crump 1989), que consiste em fundir um material (usualmente um filamento de polímero) através de um bico aquecido e o depositar formando um objeto. Nos dias atuais, além de ser muito utilizada na indústria, a FDM é a tecnologia que lidera nas impressoras 3D de uso doméstico.

1.2 MOTIVAÇÃO ECONÔMICA

No cenário atual, o mercado global de impressão 3D tem crescido a uma taxa média anual aproximada de 20%, sendo avaliado, no ano de 2021, em \$15,1 bilhões de dólares. Além disso, o CAGR (Compound Annual Growth Rate) médio esperado para o mercado é próximo de 24% de 2022 a 2030, estimando-se que sejam movimentados cerca de \$84 bilhões de dólares com a tecnologia em 2030. (*3D Printing Market Size, Growth | Global Research Report [2029] 2022*).

Segundo uma pesquisa do instituto Grand View Research pelo menos 2,2 milhões de impressoras 3D foram vendidas em 2021 e a expectativa é que este número seja de 21,5 milhões de unidades no final da década. Deste valor, calcula-se que 70% das unidades são direcionadas para a indústria, o que indica um grande interesse do mercado pela tecnologia. O restante das unidades é composto pelas chamadas “desktop 3D printers” ou impressoras 3D de mesa (GVR n.d.).

1.3 MOTIVAÇÃO TÉCNICA

Além do bom desempenho de mercado, a manufatura aditiva é berço de inovação constante, sendo motivada pela busca por processos mais rápidos e eficientes, com melhor qualidade e diferentes materiais. Com isso em mente, este trabalho foi desenvolvido, como forma de introduzir conceitos e procedimentos para facilitar a criação e a modificação de impressoras 3D, abrangendo principalmente as “desktop 3d printers”.

A impressora 3D FDM, de forma geral, pode ser considerada um robô cartesiano com três eixos de liberdade. O desenvolvimento da máquina é uma atividade multi-disciplinar que envolve várias áreas, dentre elas estão:

- Mecânica: no projeto estrutural e funcional do dispositivo;
- Térmica: para o desenvolvimento das partes quentes da máquina;
- Elétrica: para fontes de alimentação, motorização, controle de aquecimento cabeamento;
- Eletrônica: no acionamento dos drivers de motores e de aquecimento;

- Software: para a implementação de algoritmos para controle dos motores e de aquecimento;

1.4 OBJETIVOS

Por ser uma tarefa complexa e abrangente, o desenvolvimento será dividido em partes concisas e diretas, a fim de tornar este material um manual para projetos de design e melhorias de impressoras 3D FDM. De forma geral, deve-se realizar o estudo de requisitos, projeto, montagem, e testes de uma impressora 3D doméstica para todas as áreas de conhecimento pertinentes: mecânica, térmica, elétrica, eletrônica e software.

Sobre cada uma destas áreas espera-se concluir os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o estudo de requisitos de projeto em para determinada área da tecnologia, comparando decisões de projeto utilizando os seguintes indicadores:
 - Quantitativos: eficiência, custo, velocidade e tipos de materiais possíveis de serem usados;
 - Qualitativos: tecnologia, complexidade e qualidade de impressão.
- Realizar o projeto para determinada área a partir dos requisitos escolhidos. Deve-se fazer a análise de metodologias, ferramentas e softwares para a execução do projeto.

Posteriormente, espera-se cumprir os seguintes objetivos:

- Realizar a montagem das partes da Impressora 3D, observar possíveis erros de projeto e executar correções;
- Realizar testes a fim de mensurar a capacidade real do equipamento fazendo avaliações qualitativas e quantitativas. Realizar calibrações objetivando melhorar os indicadores de desempenho e qualidade da máquina.

Além disso, objetiva-se explicitar conceitos extras que não tem relação direta com o projeto e construção da impressora 3D, mas que estão incluídos do ecossistema da manufatura aditiva, são estes:

- Explicar o conceito de softwares "fatiadores" (slicers);
- Explicar as diferenças de materiais para a impressão tipo FDM.

1.5 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este trabalho se organiza em cinco seções correlacionadas com objetivo de contar uma história concisa e fluida do desenvolvimento de uma Impressora 3D do tipo Fused Deposition Modeling. A lista abaixo compreende um breve resumo do assunto principal de cada capítulo:

- Introdução: O panorama geral da manufatura aditiva é introduzido, das suas origens a uma fotografia do cenário atual, além de uma breve análise de mercado e apresentação de aspectos tecnológicos envolvidos no desenvolvimento. Por fim, os objetivos do trabalho são explicitados.
- Revisão Bibliográfica: Trata do levantamento de requisitos de projeto para todas as áreas pertinentes, através do estudo do cenário atual da tecnologia de impressão 3D FDM. Finalmente, é obtida uma abstração do que se espera do dispositivo final, construída pelos requisitos levantados.
- Metodologias: Com a abstração da máquina em mãos, é executado o projeto. Nesta seção são explicitadas as escolhas de projeto, metodologias e ferramentas. A posteriori, é feita a montagem das partes projetadas, elicitando problemas de projeto.
- Resultados e Discussão: Com o dispositivo finalizado, resta testá-lo, avaliar soluções para os problemas levantados na seção anterior, verificar a completude dos requisitos de projeto e considerar possíveis alterações e melhorias.
- Conclusões: Nesta seção é realizada uma recapitulação do trabalho, summarizando-o e verificando a realização dos objetivos propostos. Deixando, por fim, um compilado de ideias para pesquisas futuras, coletadas durante a execução do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na indústria da manufatura aditiva, atualmente, existe uma variedade de processos disponíveis para a impressão de diversos tipos de matérias (Kafle et al. 2021), como por exemplo:

Processo de Manufatura Aditiva	polímeros e compósitos	metais	cerâmicos	cimentos
Stereolithography (SLA)	✓		✓	
Selective laser sintering/melting (SLS/SLM)	✓	✓	✓	✓
Fused deposition modeling (FDM)	✓		✓	
Digital light processing (DLP)	✓		✓	
Two-photon polymerisation (TPP)			✓	
Direct ink writing (DIW)			✓	
Three-dimensional printing (3DP)			✓	
Direct metal deposition (DMD)		✓		
Electron beam melting (EBM)			✓	
Electrochemical additive manufacturing (ECAM)			✓	
Direct Energy Deposition (DED)	✓	✓		
Powder Bed Fusion (PBF)	✓	✓		
Laminated object manufacturing (LOM)	✓	✓	✓	
Material Jetting (MJ)	✓			
Binder Jetting (BJ) / Inkjet printing (IJP)	✓		✓	✓
Fused Filament Fabrication (FFF)	✓			
Material Extrusion (ME)				✓

Table 1: Processos e materiais para manufatura aditiva

(Fontes - Polímeros : Alghamdi et al. 2021, Compósitos : Valino et al. 2019, Metais: Buchanan and Gardner 2019, Gadagi and Lekurwale 2021, Cerâmicos: Chen et al. 2019, Cimentos: Shakor et al. 2019)

Tal diversidade de processos traz consigo uma grande quantidade de técnicas e metodologias a serem estudadas. Neste trabalho serão analisadas as três tecnologias de manufatura aditiva mais utilizadas no mercado, que possuem grande versatilidade quanto ao tipo de material impresso: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS) e Stereolithography (SLA).

2.1 STEREOLITHOGRAPHY (SLA)

SLA ou Estereolitografia é o nome que se dá ao processo de curar uma resina fotossensível camada por camada até se formar um objeto tridimensional. Em geral, as máquinas que realizam o procedimento possuem:

- Uma fonte luminosa que replique o objeto desejado, camada por camada;
- Uma plataforma de suporte para o objeto a ser criado;
- Um recipiente com resina fotossensível.

Segundo Coelho, Araujo, and Silva Moreira Thiré [2018](#) existem duas técnicas principais para o processo de cura de camadas de resina:

1. Estereolitografia por Escaneamento:

A tecnologia baseada em escaneamento utiliza um laser ultravioleta apontado para um pequeno espelho (XY galvo-mirror) que se rotaciona e mira o feixe de laser em cada um dos pontos da camada de resina a ser curada (Emami, Barazandeh, and Yaghmaie [2014](#)):

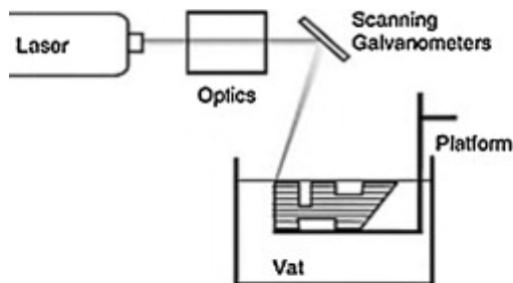


Figure 1: Estereolitografia por Escaneamento

Entretanto, quando se trata de peças grandes, ao se utilizar um espelho galvanométrico, pode haver desfoque do feixe luminoso, dado que a distância entre o espelho e a superfície da resina não é constante (Huang, Qin, and Wang [2020](#)). Por isso, outra forma de realizar o escaneamento é manter o laser focado em um ponto fixo, e movimentar o recipiente de resina juntamente com a plataforma e o objeto impresso no plano XY, mantendo constante a distância entre a resina e o foco luminoso:

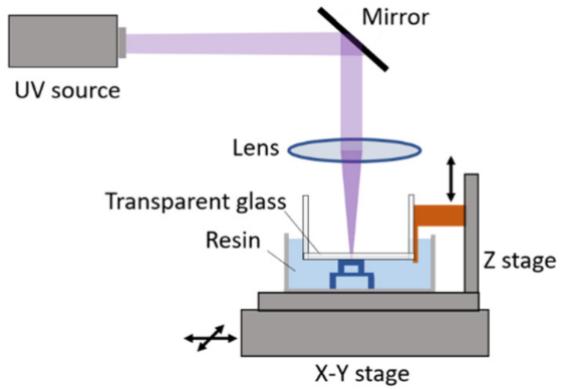


Figure 2: Estereolitografia por Escaneamento com plataforma móvel

Todavia este procedimento traz dificuldades quanto a resolução do movimento da plataforma que deve ser considerado.

De forma geral, a estereolitografia por escaneamento produz peças com resolução impressionante (6 - 140 micrômetros), sendo a opção comercial disponível com a maior capacidade de detalhamento do mercado. (Schmidleithner and Kalaskar 2016)

2. Estereolitografia por Projeção:

O procedimento de Estereolitografia por Projeção se baseia na utilização de um modulador espacial de luz (Spatial Light Modulator, ou SLM), para curar uma camada de resina de forma integral. Na prática, dois modelos de SLM são utilizados:

- (a) Emissivo: neste caso são utilizados painéis LCDs, entretanto a resolução da peça é dependente da resolução do dispositivo, além de que painéis LCD comerciais não emitem luz ultravioleta com alta intensidade atingindo apenas 12,5% de eficiência (Sun et al. 2005);
- (b) Reflexivo: onde são usados Cristal Líquido em Silício (liquid crystal on silicon, LCoS) ou Dispositivos Microespelhos Digitais (DMDs). Tais dispositivos, conseguem refletir luz ultravioleta com alta eficiência (88% Sun et al. 2005).

Além dos dois métodos acima, existem ainda procedimentos emergentes mais complexos como a Estereolitografia Contínua (CLIP) e a Estereolitografia Volumétrica que trazem algumas vantagens sobre os demais. (Huang, Qin, and Wang 2020)

2.2 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) utiliza um laser de alta potência direcionado com o auxílio de espelhos para um reservatório de pó de matéria prima. Tal laser une

as partículas de material formando um objeto, uma camada por vez. Sempre que uma camada é concluída um dispositivo (roller ou sweeper) passa por sobre o reservatório principal, espalhando uma fina camada de pó para ser sinterizado na próxima iteração (Cheepu, Yang, and Che-Hua 2021).

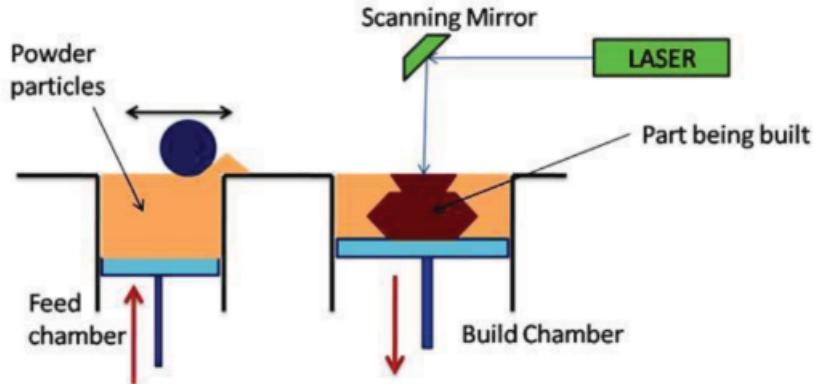


Figure 3: Sinterização Seletiva a Laser

A SLS tem como objetivo principal garantir que o agrupamento entre as partículas formantes do objeto seja forte. Para tal, existem algumas formas de realizar este agrupamento:

1. Sinterização de estado sólido:

É definido pela união que ocorre quando a temperatura atingida no material está entre metade da temperatura de fusão e a temperatura de fusão. Neste processo é formado um “pescoço” de matéria entre as partículas, não garantindo máxima densidade:

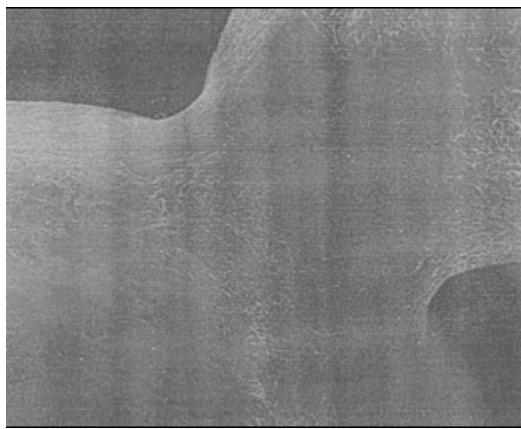


Figure 4: Sinterização Seletiva a Laser - "Pescoço"

2. Agrupamento quimicamente induzido:

Ocorre quando o material submetido a sinterização, quando aquecido, reage quimicamente com o ambiente ou consigo mesmo criando um “agrupador”. Alguns exemplos:

- O material cerâmico SiC, quando aquecido na presença de O₂, produz SiO₂, que age como um aglomerante para moléculas SiC;
- O alumínio, quando aquecido na presença de N₂, produz AlN, que age como um aglomerante para partículas de alumínio;

3. Sinterização de fase líquida ou derretimento parcial:

A maioria dos processos que se enquadram nesta categoria envolvem liquefação completa de um aglomerante, através do aquecimento, misturado com partículas do material próximas do ponto de fusão. (cite)

4. Derretimento total:

Este processo consiste em utilizar alta potência no laser para derreter o material por completo, fazendo com que a densidade do objeto final seja a máxima possível para o material.

Os principais parâmetros a serem considerados para a SLS são a potência e a velocidade do laser, que fazem parte da equação da Densidade de Energia:

$$\text{Densidade de Energia (ED)} = \frac{\text{LP}}{\text{SS} \times \text{BS}} \text{ J/mm}^2$$

Na equação acima LP (*laser power*) é a potência do laser , SS (*scan spacing*) é o espaçamento do escaneamento e BS (*beam speed*) é a velocidade do laser.

Estes parâmetros são importantes pois, para cada tipo de material, é necessário definir (geralmente de forma empírica) qual densidade de energia produz o melhor resultado (Goodridge, Tuck, and Hague 2012).

2.3 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

O processo de Modelagem por Deposição de material Fundido (FDM) consiste em derreter material sólido (geralmente um termoplástico, polímero ou compósito) e o depositar, camada por camada, construindo um objeto. De forma geral, as máquinas FDM são compostas por:

Uma plataforma para impressão, geralmente com aquecimento controlado; Um cabeçote aquecido para fusão e deposição do material; Estruturas mecânicas para movimentação triaxial;

Como este processo é o foco desta monografia, as seções abaixo discutem com mais detalhes cada parte da máquina.

2.3.1 Mecânica: Movimentação do Efetuador

A mecânica de uma impressora FDM deve implementar três eixos de liberdade, sendo eles independentes ou não. Algumas implementações para o dispositivo são:

1. Cabeçote móvel em XZ e mesa móvel em Y (XZ-Head):

Esta mecânica realiza movimentos com a mesa no eixo Y e com o cabeçote de impressão em X e Z. É bastante comum nas impressoras 3D de entrada como as Ender 3, e também nas hobbystas como a RepRap Prusa i3



Figure 5: Ender 3 ([Ender-3 3D Printer n.d.](#))



Figure 6: Prusa i3 ([RepRap n.d.](#))

Este tipo de dispositivo se destaca quanto a simplicidade de construção e funcionamento, mas traz consigo um problema de difícil solução: a massa movimentada em Y compreende a mesa e o objeto, o que aumenta o momento de inércia do eixo, intensificando as vibrações. ([Diagnosing and fixing ringing versus vibration artifacts - desiquintans.com n.d.](#))

O efeito causado pelas vibrações pode ser reduzido, diminuindo a velocidade de impressão, mas nunca eliminado. Em termos gerais, quanto menor a massa móvel de cada eixo, menos vibração e maior a qualidade e velocidade de impressão.

2. Cabeçote móvel em XY e mesa móvel em Z

Caracterizada por impressoras cujo cabeçote se move no plano XY e a mesa se move verticalmente, estas impressoras tendem a reduzir o problema da vibração, dado que a massa móvel do cabeçote é relativamente pequena, em comparação com a massa da mesa.

Existem algumas implementações para o movimento do cabeçote:

- (a) Cartesian XY-Head:

São impressoras que usam os motores para mover eixos X e Y independentemente (Makksu 2016):

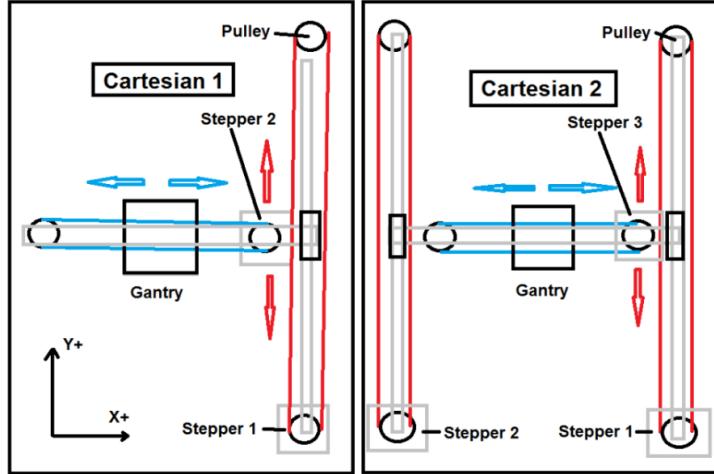


Figure 7: FDM do tipo Cartesian XY-Head

No exemplo acima vemos duas implementações possíveis: uma com um motor para cada eixo e outra com dois motores sincronizados para o eixo X e outro para o eixo Y.

É importante salientar que nesta configuração, pelo menos um dos motores sempre vai estar em movimento junto ao seu eixo. Isso aumenta a massa móvel do conjunto e pode intensificar as vibrações.

A Creality Ender 5 Pro é um exemplo de impressora 3d comercial que utiliza esta implementação:



Figure 8: Ender 5 Pro ([Ender-5 Pro 3D Printer n.d.](#))

(b) H-Bot:

Nesta implementação os dois motores atuam em conjunto com um sistema de correia e polias para mover o cabeçote no plano XY. Este sistema utiliza uma longa correia, presa no cabeçote (Sollmann, Jouaneh, and Lavender 2010).

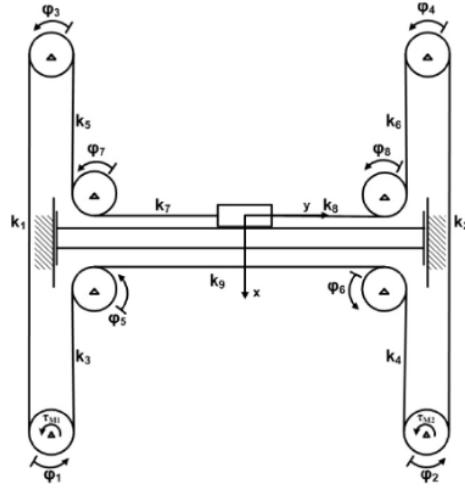


Figure 9: FDM H-Bot

É importante notar que os motores são estacionários e que a rotação de apenas um motor provoca um movimento em 45° no cabeçote. O movimento do efetuador pode ser descrito com a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r & \frac{1}{2}r \\ -\frac{1}{2}r & -\frac{1}{2}r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \end{bmatrix}$$

Na qual Δx e Δy são variações de movimento do cabeçote, $\Delta\varphi_1$ e $\Delta\varphi_2$ são as rotações dos motores e r é o raio das polias dos motores (assumindo iguais) (Sollmann, Jouaneh, and Lavender 2010)

Esta implementação apresenta uma fraqueza: o movimento do efetuador é gerado por uma única correia, provocando torque indesejado na estrutura do cabeçote (Makksu 2016).

(c) Core-XY:

Bastante semelhante com a H-Bot, a implementação Core-XY utiliza dois conjuntos de correia e polias para movimentar o efetuador no plano XY. A equação de movimento do cabeçote é idêntica à anterior.

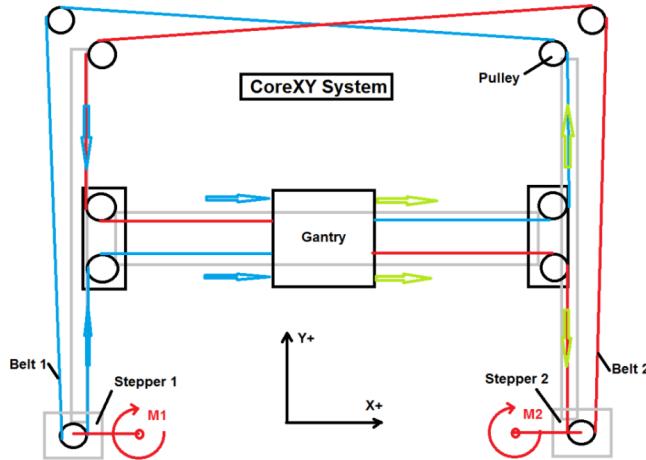


Figure 10: FDM Core-XY

A mudança mais importante que essa implementação proporciona é a eliminação do torque no efetuador, que agora é distribuído pelos dois conjuntos de correias ([CoreXY explained: Comparison + strengths and weaknesses - YouTube n.d.](#)).

Além da movimentação no plano XY, estas impressoras necessitam de permitir movimento no eixo Z, da plataforma de impressão. Algumas implementações sugeridas para esta movimentação são:

(a) Cantilever:

A mesa de impressão é apoiada e movida somente por um de seus lados. Essa implementação, apesar de usada em alguns modelos comerciais como a nacional GTmax3d Core A3 e a Cubex Duo ([Impressora 3D CubeX Duo | Exame n.d.](#)), requer uma estrutura mecânica robusta para sustentar a plataforma e evitar folgas e inclinações indesejadas.

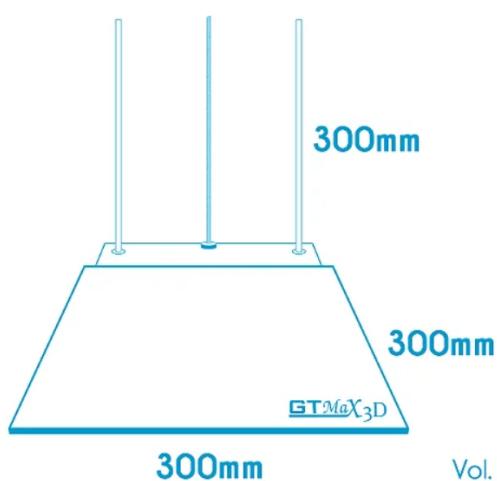


Figure 11: GTmax3d Core A3

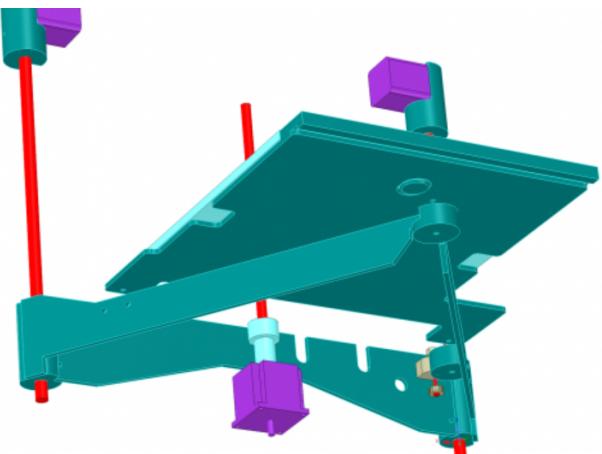


Figure 12: Cubex Duo 1

(b) Bi-apoiada:

Nesta implementação a mesa de impressão é apoiada em dois lados, trazendo mais estabilidade em pelo menos um dos eixos de inclinação. A Creality Ender 5 Plus é um exemplo desta implementação:



Figure 13: Ender 5 Plus [Ender-5 Plus 3D Printer](#) n.d.

(c) Triapoiada:

Nestes dispositivos a plataforma de impressão é apoiada em 3 pontos distintos, aumentando a estabilidade em dois eixos de inclinação. Comercialmente, apenas impressoras de topo de linha como a Bambu Lab X1 implementam este modelo.



Figure 14: BambuLab X1 [Bambu Lab X1 Series | Desktop 3D Printer | X1-Carbon](#) n.d.

3. Impressora de Esteira

A impressora de esteira é uma implementação especial que substitui a mesa fixa do equipamento padrão por uma esteira rolante. Essa modificação possibilita impressão “infinita” no eixo longitudinal, por apresentar os seus eixos de maneira não ortogonal. (Whelan, Mccarthy, and Palanchian [2018](#))

Neste modelo o eixo “infinito” é posicionado a 45° do que seria equivalente ao plano XY de uma impressora convencional. Como exemplo comercial temos a Creality CR-30 e a Blackbelt:



Figure 15: CR-30 (*CR-30 3D Printer - Creality Official Store n.d.*)

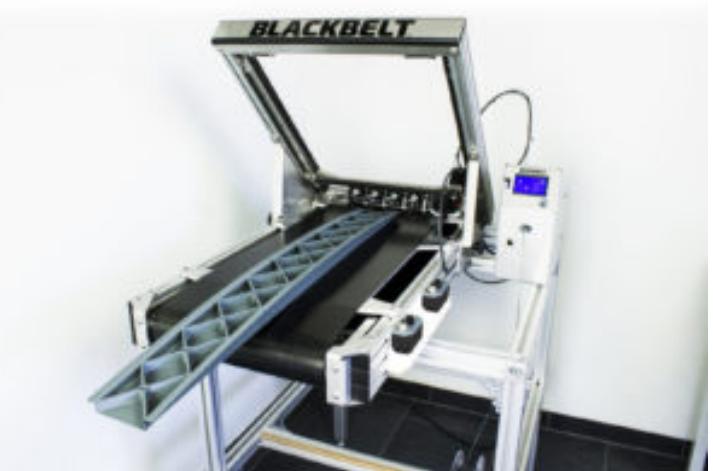


Figure 16: Blackbelt (*Blackbelt 3D - The benchmark in 3D belt printing, why limit yourself n.d.*)

Este modelo apresenta alguns desafios quanto à sua construção, em particular a dificuldade de manter e garantir o aquecimento da esteira de impressão. Tal desafio pode ser resolvido com esteiras especiais que suportam e melhor distribuem o calor por toda a superfície (*Belt 3D Printer: All You Need to Know | All3DP n.d.*).

4. Impressora Delta

Os modelos de impressora Delta se baseiam no funcionamento de um robô Delta (Florin, Claudiu, and Nicușor 2016) tais como o IRB 360 FlexPicker da ABB:



Figure 17: ABB IRB 360 (*IRB 360 Data sheet n.d.*)

A mecânica consiste em suportar o efetuador por três hastas móveis, que por

sua vez se acoplam em três barras fixas que possibilitam o seu movimento através de motores e correias ou fusos (Aasvik 2017).

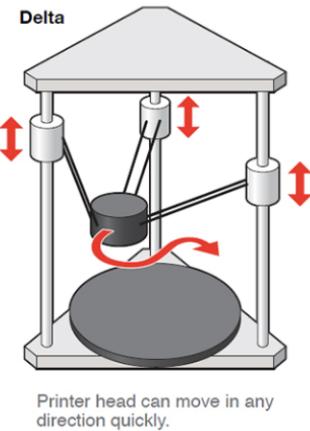


Figure 18: FDM Delta

Apesar de interessante, a implementação apresenta desafios quanto à qualidade de impressão e ao tamanho do volume útil dos equipamentos ([Delta Vs Cartesian 3D Printer – Which Should I Buy? Pros and Cons – 3D Printerly n.d.](#)).

5. Polar

A impressora Polar utiliza uma base rotativa e implementa geometria cilíndrica com três eixos: θ de rotação da base, R de raio do efetuador e Z de altura do efetuador.

A vantagem deste método, ainda pouco utilizado, é o bom espaço útil para impressão em relação ao tamanho da máquina, entretanto, existem alguns desafios quanto a resolução da impressão em plataformas com grande raio. Tal dificuldade advém do fato de que, para um passo angular constante de um motor, quanto maior o raio do disco, maior a distância linear deslocada (Deshpande and Shah 2019).

6. Manipulador Robótico

Esta categoria de implementações busca utilizar modelos de manipuladores robóticos da indústria, como por exemplo os Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA), para realizar a tarefa de manufatura aditiva.

Os robôs SCARA, mais comumente utilizados para a impressão 3d, são manipuladores compostos por duas juntas rotativas e uma prismática (Koo et al. 2019).

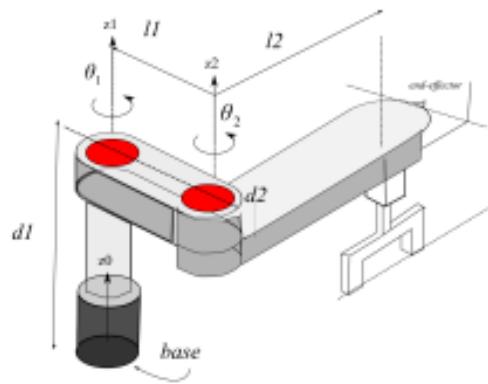


Figure 19: Robô SCARA

Abaixo estão alguns exemplos de implementação (O'Connell 2021 e [Scara Operation: 3D Potter Scara and Scara Mini - YouTube n.d.](#)):

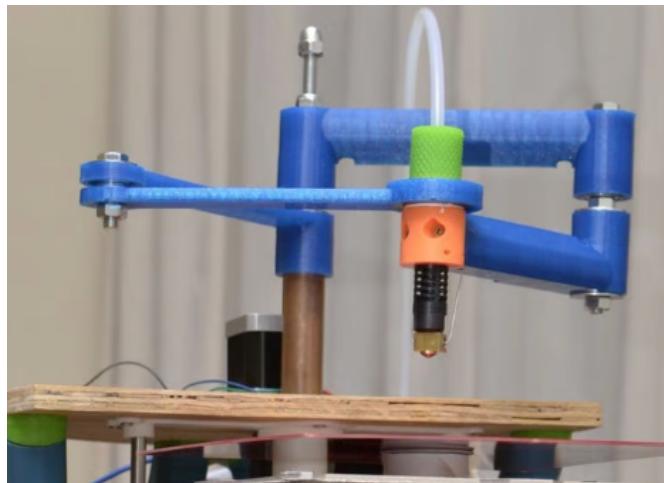


Figure 20: FDM SCARA



Figure 21: FDM SCARA Cerâmica

A implementação com o SCARA bot trás complicações nas operações de controle para a tarefa e requer alta precisão de juntas e baixa massa de efetuador para garantir um nível de qualidade satisfatório. Apesar disso, traz flexibilidade quanto a área de impressão e mobilidade, sendo consideradas inclusive implementações com base móvel:

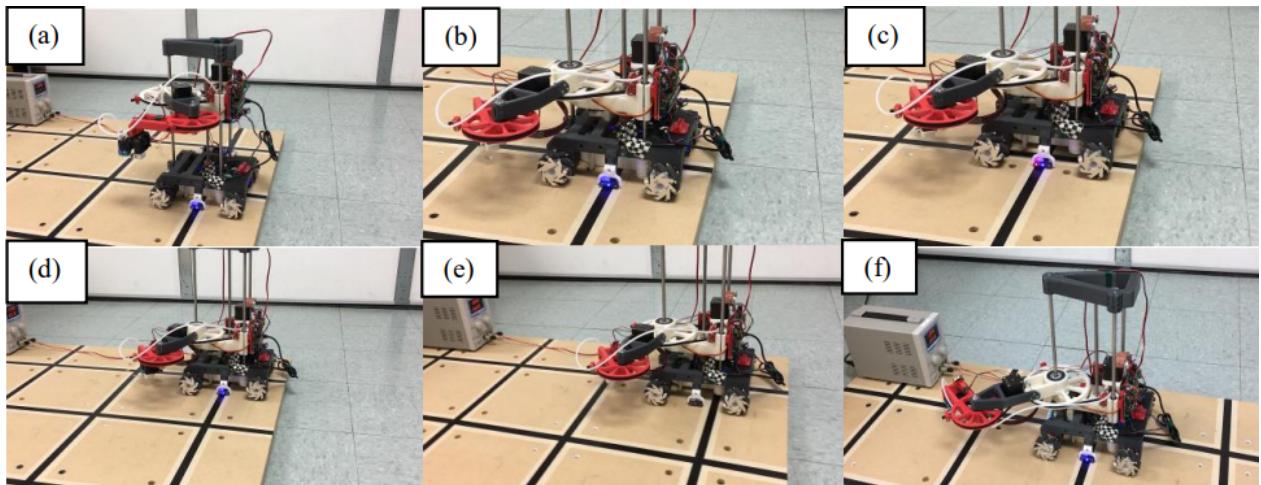


Figure 22: FDM SCARA com base móvel

2.3.2 Mecânica: Extrusor de Filamento

Além do desafio de mover a cabeça de impressão, implementações de impressoras 3D FDM tem que alimentar um filamento de material polímero através do bico, para formar o objeto. O dispositivo que realiza esta tarefa é chamado extrusor. Algumas metodologias sugeridas para o desenvolvimento de extrusores serão discutidas a seguir.

1. Direct Extruder:

O termo Direct Extruder (ou extrusor direto) caracteriza implementações que posicionam o mecanismo extrusor diretamente sobre a cabeça de impressão ([Basic hotend maintenance n.d.](#) e [Direct extrusion vs. bowden type - Recreus n.d.](#)).

Essa categoria de extrusores traz grande versatilidade quanto a quantidade de materiais possíveis de serem impressos, facilitando a impressão de materiais maleáveis e flexíveis. Entretanto, agrava ao efetuador a massa de um motor e mecanismos, intensificando vibrações se for movimentado rapidamente ([3D Printer Extruder – The Ultimate Guide | All3DP n.d.](#)).

2. Bowden Tube Extruder

Os extrusores do tipo Bowden Tube ganham este nome devido ao aparato Bowden Cable (ou cabo de Bowden) no qual um fio de material é passado por dentro de um tubo flexível com o objetivo de transmitir potência mecânica (Letier et al. 2006). Tal mecanismo tem ampla adoção na indústria, desde a atuação de freios de bicicleta até robôs para operações cirúrgicas (Jeong and Cho 2015).

No caso dos extrusores Bowden Tube, o filamento de polímero é empurrado por um tubo (geralmente de PTFE [PTFE \(polytetrafluoroethylene\) | Fluorotherm.com n.d.](#)) até chegar ao bico da impressora 3D.

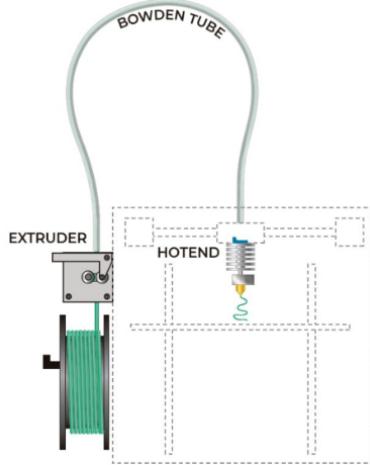


Figure 23: Extrusora Bowden

Este modelo permite maiores velocidades de impressão, devido a redução de massa no efetuador, porém alguns materiais podem apresentar dificuldade para serem impressos, por causa do atrito gerado pelo tubo de Bowden, como é o caso dos materiais flexíveis. Uma outra dificuldade causada pelo atrito é a sobrecarga do motor de extrusão, que pode necessitar de um mecanismo adicional para atingir o torque necessário para mover o filamento ([3D Printer Extruder – The Ultimate Guide | All3DP n.d.](#)).

Quanto ao mecanismo que realiza o movimento do filamento, existem duas implementações mais usadas: movimentação direta e engrenada. Na primeira o motor é acoplado a uma engrenagem dentada que arrasta o filamento diretamente. Na segunda, o acoplamento é feito a uma caixa de engrenagens, que amplifica o torque gerado pelo motor.

Ambas as implementações podem contar com duas engrenagens dentadas, em lados opostos do filamento, rotacionando em sentidos opostos, objetivando aumentar a área de contato entre o filamento e as engrenagens.



Figure 24: Comparação dos mecanismos extrusores

2.3.3 Termodinâmica: Bico Aquecido (Hot End)

Considerada a parte mais desafiadora da construção de uma impressora 3D FDM, o bico aquecido tem a função de derreter o filamento de matéria prima de forma controlada (*Hot End Design Theory - RepRap n.d.*, imagem *Basic hotend maintenance n.d.*).

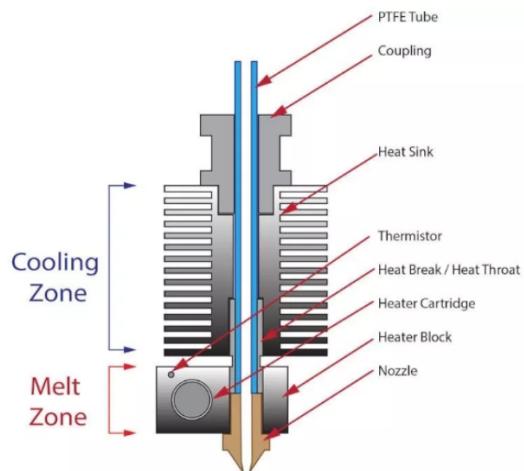


Figure 25: Partes do bico aquecido (Hot End)

A estrutura básica de um bico aquecido tem os seguintes elementos: bloco aquecido, separador térmico, dissipador, elemento aquecedor, sensor de temperatura e bocal.

1. Bloco térmico:

E fabricado de material bom condutor de calor e objetiva conduzir o calor gerado pelo elemento aquecedor o bocal e derreter o filamento;

2. Separador Térmico:

Tem como função desacelerar a condução de calor para o restante do filamento, já que este, denominado “heat creep” pode fazer o filamento se liquefazer antes de chegar ao bocal, podendo causar entupimento do bico aquecido e prejudicar a qualidade de impressão ([How to Fix Heat Creep \(3D Printing\): 4 Simple Solutions | All3DP n.d.](#)).

3. Dissipador:

Objetiva acelerar a dissipação do calor que é conduzido pelo separador térmico. Tal efeito pode ser acelerado com a aplicação de ventilação ativa sobre o dissipador ([3D Printer Heatsink: How to Prevent Heat Creep | All3DP n.d.](#))

4. Elemento aquecedor:

De forma geral, se trata uma resistência pela qual, por Efeito Joule, é convertida potência elétrica em térmica ([Passos 2009](#)).

5. Sensor de Temperatura:

Se trata de um aparelho capaz de aferir a temperatura do bloco aquecido, podendo ser um termopar, termistor ou outro instrumento que realiza tal função. É de grande importância que este elemento esteja presente no bico aquecido, para que a malha de controle de sua temperatura possa ser fechada.

6. Bocal:

É o elemento final da cadeia de aquecimento da matéria prima, responsável por contrair o material derretido até o diâmetro final esperado. A escolha do diâmetro do bocal altera o fluxo de material, assim como a largura mínima das paredes do objeto impresso.

Algumas versões comerciais de bico aquecido são a E3D V6 e a E3D Hemera, a última inclusive incorpora um sistema Direct Drive ([V6 All-Metal HotEnd – E3D Online n.d.](#) e [Hemera Direct Kit \(1.75mm\) – E3D Online n.d.](#)).



Figure 26: Hot-end V6



Figure 27: Hot-end Hemera

2.3.4 Termodinâmica: Mesa Aquecida (Heated Bed)

A plataforma que suporta o objeto impresso deve ser aquecida objetivando desacelerar o seu resfriamento. O resfriamento rápido e mal distribuído do material pode causar defeitos de fabricação como empenamento e rachaduras (Douglas 2021).

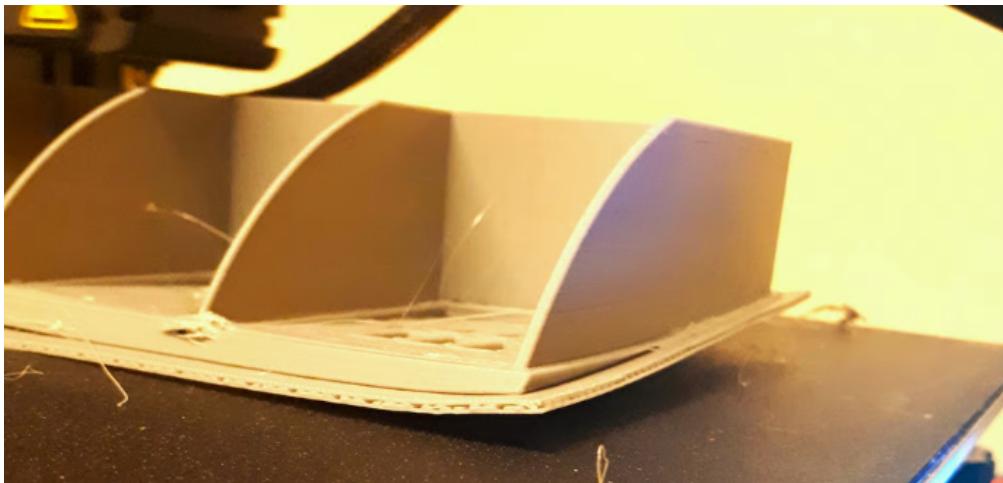


Figure 28: Defeitos causados por não aquecer a mesa de impressão

O dispositivo é construído através de uma placa de material condutor de calor, acoplado a uma resistência elétrica para prover o calor necessário. É importante a utilização de um sensor de temperatura para realizar o controle da temperatura da mesa em malha fechada.

2.3.5 Elétrica: Motores e Drivers

Em sua grande maioria, as impressoras 3D FDM, utilizam motores de passo. Esses motores possuem uma precisão de posicionamento excelente e são bastante confiáveis, o que os torna uma escolha popular para impressoras 3D FDM. Podem ser motores

híbridos ou de imã permanente, usualmente classificados pela topologia de acionamento: unipolar ou bipolar. (citação artigo motor)

A associação NEMA (National Electrical Manufacturers Association) é a responsável pela criação padrões de manufatura que descrevem os motores de passo mais utilizados nas impressoras 3D. Dentre estes estão os categorizados como NEMA 23, NEMA 17, NEMA 14, dentre outros. (citação reprap)

(imagem motores nema)

O controle destes dispositivos é realizado através de pulsos elétricos, também chamados de passos. Para realizar esse controle, são utilizados os drivers de motor de passo. Existem várias opções de drivers disponíveis no mercado, incluindo o popular A4988 e o TMC2208, que fornecem recursos avançados, como detecção de perda de passo e redução de ruído.

(imagem A4988 e TMC2208) (citação datasheets)

Neste projeto, foram utilizados motores NEMA 17 e drivers TMC2208

2.3.6 Elétrica: Aquecedores

Tanto o bico aquecido quanto a mesa aquecida podem ser considerados componentes elétricos também. O bico aquecido possui uma resistência elétrica para derreter o filamento de impressão, enquanto a mesa aquecida é uma placa de metal com um elemento de aquecimento embutido que mantém a temperatura da superfície da plataforma de impressão em um nível constante para ajudar na aderência do material.

(imagem elemento aquecedor) (imagem mesa quente)

Ambos os componentes elétricos são alimentados geralmente por fontes de 12V ou 24V, e são controlados por circuitos eletrônicos, como relés ou MOSFETs. Além disso, é importante garantir que esses componentes estejam isolados eletricamente do resto do sistema para evitar curto-circuitos e choques elétricos, já que sua tensão de operação é mais elevada que dos demais componentes.

2.3.7 Elétrica: Fonte

A fonte de alimentação é responsável por fornecer energia elétrica suficiente para alimentar todos os componentes eletrônicos da máquina, incluindo os motores, a placa controladora, a cama aquecida e o bico aquecido. Uma fonte de alimentação de boa qualidade e com amperagem adequada é essencial para garantir uma operação estável e confiável da impressora.

(tabela consumo componentes)

As impressoras 3D FDM geralmente requerem uma fonte de alimentação de 12V ou 24V, dependendo dos componentes eletrônicos utilizados. A fonte de alimentação 24V e 30A é uma escolha comum para impressoras 3D FDM, pois oferece energia suficiente

para alimentar os componentes eletrônicos utilizados nas impressoras, incluindo motores de passo e aquecedores de alta potência.

(imagem fonte 2430)

2.3.8 Eletrônica: Sensores

Os sensores mais comuns utilizados em impressoras 3D são os sensores de fim de curso e os sensores de temperatura.

Os sensores de fim de curso são usados para detectar se a posição dos eixos da impressora atingiu seu limite ou ponto de referência. Geralmente, há três sensores de fim de curso em uma impressora 3D FDM, um para cada eixo (X, Y e Z).

(imagem fim de curso)

Por sua vez, os sensores de temperatura, usualmente termistores ou termopares, são usados para medir a temperatura dos componentes da impressora 3D, principalmente o bico aquecido e a mesa aquecida, garantindo que eles operem dentro de uma faixa de temperatura segura e consistente para a impressão.

(imagem termistor)

Além dos sensores mais comuns, outros sensores adicionais podem ser utilizados para aprimorar a funcionalidade da impressora 3D, como sensores de detecção de filamento, que são usados para detectar quando o filamento de impressão acaba e informar o sistema de controle para interromper a impressão, ou sensores de vibração, que podem ser utilizados para detectar e corrigir problemas mecânicos na impressora durante a operação. A escolha e a configuração dos sensores utilizados em uma impressora 3D FDM dependem das necessidades e dos requisitos específicos da impressão.

2.3.9 Eletrônica: Microcontrolador

Os microcontroladores são responsáveis por controlar todo o processo de impressão, incluindo o movimento dos motores, aferição dos sensores e aquecimento dos componentes. Existem vários disponíveis no mercado para impressoras 3D, incluindo Arduino, Raspberry Pi, STM32, entre outros. O Arduino Mega 2560 é um dos mais populares para impressoras 3D, devido à sua ampla comunidade de usuários e sua facilidade de uso, enquanto o Raspberry Pi é um computador de placa única bastante poderoso e capaz de realizar o controle da impressora.

(imagem arduino e Raspberry)

No entanto, outro microcontrolador que tem ganhado popularidade recentemente na comunidade de impressoras 3D é o ESP32, produzido pela Espressif Systems. O ESP32 é um microcontrolador de baixo custo que oferece conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada, bem como uma grande quantidade de memória e poder de processamento.

mento. Essas características tornam o ESP32 uma opção atraente para impressoras 3D que requerem conectividade sem fio, como a capacidade de controle remoto e o monitoramento da impressora através de dispositivos móveis ou computadores. Além disso, a grande comunidade de usuários do ESP32 oferece suporte e recursos valiosos para os usuários de impressoras 3D. (cite site esp)

(imagem esp)

2.3.10 Firmware

Existem várias implementação de firmware disponíveis para impressoras 3D, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. As mais comuns incluem Marlin(cite marlin), Klipper(cite klipper), entre outros. Marlin é um firmware popular e de código aberto que oferece recursos como autonivelamento, suporte a vários extrusores e suporte a LCDs. Já Klipper é um firmware de impressora 3D direcionado para computadores de placa única, como os da fabricante Raspberry, citado no capítulo anterior.

No entanto, com intuito de aprender mais sobre o funcionamento do firmware de uma impressora 3d, neste trabalho será desenvolvido um personalizado, adaptado às necessidades específicas do dispositivo. Este firmware deve ter as seguintes funcionalidades:

1. Ler arquivos de impressão de um cartão de memória;
2. Interpretar o código de máquina gerado por um software fatiador (como o Cura ou o Simplify3D);
3. Monitorar sensores, como os sensores de fim de curso, sensor de temperatura (termistor), sensor de nível de filamento, entre outros;
4. Controlar as partes aquecidas da impressora, como o bico aquecido e a mesa aquecida;
5. Controlar os motores da impressora para mover os eixos X, Y e Z, bem como o extrusor;
6. Oferecer informações e opções de configuração para o usuário, como ajustar a velocidade da impressão, temperatura de bico e mesa, entre outros;

3 METODOLOGIAS

Após o panorama introduzido no capítulo anterior é possível traçar um plano de projeto com requisitos mínimos para o dispositivo. De todas as possibilidades dadas, o escopo do projeto se configurará da seguinte maneira:

Característica	Requisito
Tecnologia	Fused Deposition Modelling (FDM)
Mecânica	
Estrutura	Perfil estrutural V-Slot
Conexões	Parafusos, porcas e peças auxiliares manufaturadas via impressão 3D
Movimento do efetuador	Mecânica CORE-XY
Movimento da mesa	Cantilever
Extrusor de filamento	Bowden Tube Extruder
Termodinâmica	
Bico aquecido	E3D-V6
Mesa aquecida	300mm x 300mm, 24V
Elétrica	
Motores	NEMA 17
Drivers	TMC2208
Fonte	24V 30A
Eletrônica	
Sensor de temperatura	Termistor tipo N
Sensor de fim de curso	Chave mecânica
Microcontrolador	Espressif ESP32
Firmware	
Controle dos motores	Controle de passo por velocidade
Controle dos aquecedores	PWM(Pulse Width Modulation) com controlador PID

Table 2: Requisitos para o projeto da impressora 3D

As seguintes seções descrevem o projeto de cada uma das partes da impressora.

3.1 PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico foi desenvolvido no software SolidWorks, considerado um dos melhores softwares para Design Assistido por Computador (CAD - Computer Aided Design) do mercado.

3.1.1 Estrutura

A estrutura da máquina foi desenvolvida, em grande parte, utilizando os perfis de alumínio do tipo V-Slot de 20mm x 20mm. Esse tipo de material foi escolhido pela praticidade de montagem, necessitando apenas de parafusos e porcas.

Demais conexões e suportes foram fabricados por uma impressora 3D FDM, utilizando o material ABS, por ser mais rígido, resistente e aceitar maiores temperaturas que as demais opções acessíveis.

A estrutura externa é aproximadamente cubica com x mm x y mm x z mm. Além disso foram posicionados perfis horizontais em alturas adequadas para o suporte de partes como motores, trilhos, eixos, dentre outras.

(imagens do projeto estrutural de varios angulos)

3.1.2 Movimento do efetuador

Para a movimentação do efetuador, foi escolhida a dinâmica CORE-XY, que apesar de complexa, reduz a massa móvel do efetuador, possibilitando maiores velocidades de impressão e melhor qualidade.

Foi utilizado um sistema de correias, polias e guias lineares com patins do tipo MGN para realizar o movimento. A força motora do sistema vem de dois motores NEMA 17, conectados em duas extremidades das correias.

Os suportes para as polias e para a guia linear central foram projetados para serem impressos em ABS e fixados nas demais partes com parafusos e porcas. As polias que fazem contato com a parte dentada da correia também possuem dentes, ampliando a tração da correia.

3.1.3 Movimento da mesa

O controle vertical da mesa de impressão foi projetado com base no sistema Cantilever, apoiada apenas de um dos lados com dois eixos lineares. Os eixos lineares contam com rolamentos (também chamados de pillow block) para alinhar o movimento.

A força motora deste sistema é provida por um motor NEMA 17 acoplado a um fuso trapezoidal com passo 2mm. Este fuso, por sua vez se acopla na estrutura

de suporte da mesa aquecida por meio de uma castanha, projetada utilizando perfis V-Slot e conexões impressas em ABS.

A mesa é montada na estrutura com um mecanismo de parafusos e molas que possibilita o seu ajuste de altura em suas quatro extremidades, facilitando o processo de calibração do eixo vertical.

3.2 PROJETO ELÉTRICO

Nesta seção serão detalhadas as decisões de projeto elétrico da impressora 3D, baseados no dimensionamento do sistema. Por fim, um diagrama de conexões é criado, a fim de ter uma visão suscinta do dispositivo.

Para este projeto foram selecionados os seguintes componentes:

- Hot End: E3D V6, 24V;
- Mesa aquecida: 300mm x 300mm, 24V;
- Motores: NEMA 17;
- Placa de controle (Mainboard): desenvolvimento próprio;

3.2.1 Dimensionamento

A potência dos componentes aquecidos é obtida por datasheet, sendo 40W o consumo do bico aquecido e 240W o da mesa aquecida.

Já o consumo máximos dos quatro motores depende da tensão de alimentação, já que o datasheet apresenta apenas a corrente máxima do componente, de 1.8A. A potência máxima consumida por um motor seria a seguinte:

$$\text{Potência motor (W)} = 24(\text{V}) \times 1.8(\text{A}) = 43.2(\text{W})$$

A potência requerida por um conjunto de quatro motores seria:

$$\text{Potência total (W)} = 4 \times 43.2(\text{W}) = 172.8(\text{W})$$

O consumo da Mainboard foi estimado a cerca de 1A, totalizando 24W de potência.

Para o cálculo de dimensionamento dos cabos foi utilizada a convenção AWG (American Wire Gauge) seguindo a tabela presente em (fonte). A corrente do bico e da mesa foram calculados da seguinte forma:

$$\text{Corrente bico aquecido (A)} = \frac{40(\text{W})}{24(\text{V})} = 1.6(\text{A})$$

$$\text{Corrente mesa aquecida (A)} = \frac{240(\text{W})}{24(\text{V})} = 10(\text{A})$$

Sendo assim, seguindo o padrão da tabela, podemos escolher o cabo do bico aquecido e da Mainboard com até 24AWG, da mesa aquecida com até 16AWG e dos motores com 4 núcleos de até 22AWG.

A tabela abaixo discrimina potência máxima requerida pelos componentes do projeto, além do dimensionamento dos cabos para conexão elétrica:

Componente	Tensão	Potência	Cabo
E3D V6	24V	40W	24AWG
300mm x 300mm	24V	240W	16AWG
4 x NEMA 17	24V	172.8W	4 núcleos de 22AWG
Mainboard	24V	24W	24AWG
Total	-	476.8W	-

Table 3: Dimensionamento componentes

3.2.2 Diagrama Elétrico

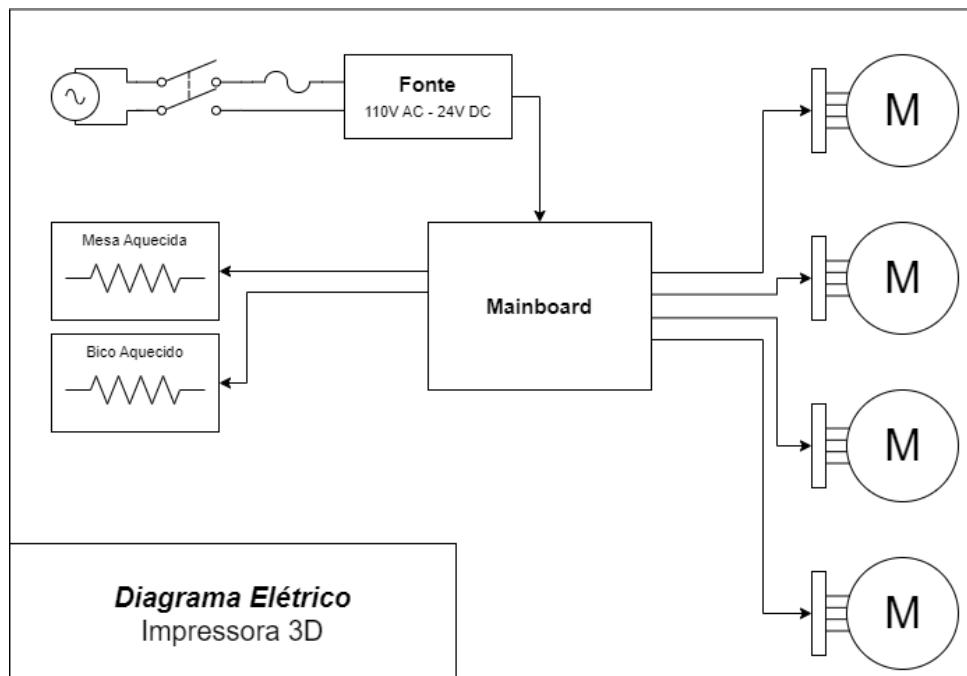


Figure 29: Partes do bico aquecido (Hot End)

3.3 PROJETO ELETRÔNICO

Neste capítulo, apresentamos o projeto esquemático de uma Mainboard de impressora 3D baseada no microcontrolador ESP32. O hardware da Mainboard foi projetado para possibilitar uma futura expansão, ou a integração de funcionalidades não previstas, e é composto por:

- 4 x drivers TMC2208 para controle de motor de passo, acionamento via UART (serial) ou via STEP/DIR;
- 4 x MOSFETs de potência para acionamento das partes aquecidas (apenas dois são necessários);
- 4 x BJTs de baixa potência para acionamento de cargas menores (ventiladores, luzes, atuadores, dentre outros);
- 8 x entradas digitais de até 3.3V com pull up;
- 4 x entradas analógicas de 0V a 3.3V;
- Conversor DC-DC de 24V para 5V.

3.3.1 Esquemático

O esquemático da Mainboard foi desenvolvido utilizando o software EasyEDA, uma ferramenta gratuita na qual se pode projetar esquemáticos e placas de circuito impresso.

Para a implementação da placa, foi necessário considerar alguns pontos de atenção sobre os componentes escolhidos. A princípio, se estudou o datasheet do driver TMC2208, a fim de identificar um circuito sugerido para a montagem:

(imagem circuito exemplo TMC)

Dado este circuito de exemplo uma dificuldade foi levantada: a quantidade de pinos utilizados para o controle dos quatro drivers era muito maior que a quantidade de pinos disponíveis no microcontrolador.

A solução considerada para este problema foi a utilização de circuitos expansores de porta. O componente escolhido foi o PCF8574, da fabricante Texas Instruments. Estes circuitos integrados são comandados via I₂C e possibilitam a utilização de 8 terminais como entrada ou saída genérica.

Outro detalhe sobre o circuito do TMC2208 é a presença de um acesso via UART, de apenas uma via. Entretanto, para utilizá-lo com múltiplos drivers, o datasheet sugere o uso de uma chave analógica quadrupla bilateral (quadruple bilateral analog switch). O dispositivo sugerido é o SN74HC4066, também fabricado pela Texas Instruments.

(detalhe porta uart para multiplos drivers)

Os circuitos de acionamento com MOSFET e BJT foram desenvolvidos respectivamente com os componentes IRFZ44N (MOSFET canal N) e BC548B (BJT do tipo NPN). Ambos circuitos são configurações chave simples.

Foram implementados alguns indicadores luminosos para indicar a presença de tensão em algumas partes do circuito. Por fim foram selecionados os conectores para a

aplicação. A lista completa de componentes (BOM) pode ser encontrada nos apêndices (apêndice x).

Alguns componentes como o ESP32, TMC2208 e o conversor DC-DC 24V para 5V foram utilizados em implementações modulares, com o intuito de facilitar os testes e a prototipagem. Implementações futuras devem utilizar os componentes diretamente, elevando o nível de profissionalidade e confiabilidade da placa.

3.3.2 Placa de Circuito Impresso

3.4 PROJETO DE FIRMWARE

3.4.1 Arquitetura

3.4.2 Controle do Motor de Passo

3.4.3 Aferição dos sensores

3.4.4 Pulse Width Modulation

3.4.5 Controlador PID

3.5 MONTAGEM

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5 CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

- 3D Printer Extruder – The Ultimate Guide* | All3DP (n.d.). URL: <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/>.
- 3D Printer Heatsink: How to Prevent Heat Creep* | All3DP (n.d.). URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-heat-sink-creep/>.
- 3D Printing Market Size, Growth | Global Research Report [2029]* (2022). URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/3d-printing-market-101902>.
- Aasvik, Mads (2017). *Building a Large Kossel Delta Printer – pt. 1: Parts and Planning – Norwegian Creations*. URL: <https://www.norwegiancreations.com/2017/01/building-a-large-kossel-delta-printer-pt-1-parts-and-planning/>.
- Alghamdi, Saad Saleh et al. (Feb. 2021). “Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges”. In: *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 753 13 (5), p. 753. ISSN: 2073-4360. DOI: <10.3390/POLYM13050753>. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/753>.
- Bambu Lab X1 Series | Desktop 3D Printer | X1-Carbon* (n.d.). URL: <https://bambulab.com/en/x1>.
- Basic hotend maintenance* (n.d.). URL: https://filament2print.com/gb/blog/135_basic-hotend-maintenance.html.
- Belt 3D Printer: All You Need to Know* | All3DP (n.d.). URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-belt-all-you-need-to-know/>.
- Bikas, H., A. K. Lianos, and P. Stavropoulos (May 2019). “A design framework for additive manufacturing”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019 103:9 103 (9), pp. 3769–3783. ISSN: 1433-3015. DOI: <10.1007/S00170-019-03627-Z>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03627-z>.
- Blackbelt 3D - The benchmark in 3D belt printing, why limit yourself* (n.d.). URL: <https://blackbelt-3d.com/>.
- Buchanan, C. and L. Gardner (Feb. 2019). “Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges”. In: *Engineering Structures* 180, pp. 332–348. ISSN: 0141-0296. DOI: <10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.11.045>.
- Cheepu, Jeyaprakash Natarajan, Muralimohan Yang, and Che-Hua (2021). *Advances in additive manufacturing processes*, p. 30. ISBN: 9815036343. URL: https://books.google.com/books/about/Advances_in_Additive_Manufacturing_Proce.html?id=QZRUAAAQBAJ.

- Chen, Zhangwei et al. (Apr. 2019). "3D printing of ceramics: A review". In: *Journal of the European Ceramic Society* 39 (4), pp. 661–687. ISSN: 0955-2219. DOI: [10.1016/J.JEURCERAMSOC.2018.11.013](https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2018.11.013).
- Coelho, Arthur Wilson Fonseca, Anna Carla Araujo, and Rossana Mara da Silva Moreira Thiré (Dec. 2018). "Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação". In: *Matéria (Rio de Janeiro)* 23 (4). ISSN: 1517-7076. DOI: [10.1590/S1517-707620180004.0600](https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0600). URL: <http://www.scielo.br/j/rmat/a/sqSrvrKyZztCfLhN67LQHMq/?format=html&lang=pt>.
- CoreXY explained: Comparison + strengths and weaknesses - YouTube* (n.d.). URL: https://www.youtube.com/watch?v=_ramiM3KHYE.
- CR-30 3D Printer - Creality Official Store* (n.d.). URL: https://store.creality.com/products/cr-30-3d-printer?sscid=b1k6_8bh8o&.
- Crump, S. Scott (Oct. 1989). "Apparatus and method for creating three-dimensional objects". Pat.
- Deckard, R. Carl (Oct. 1986). "Method and apparatus for producing parts by selective sintering". Pat.
- Delta Vs Cartesian 3D Printer – Which Should I Buy? Pros and Cons – 3D Printerly* (n.d.). URL: <https://3dprinterly.com/delta-vs-cartesian-3d-printer/>.
- Deshpande, Sourabh Prashant and Sid Shah (2019). "DEVELOPING AN OPEN SOURCE, INEXPENSIVE, LARGE-SCALE POLAR CONFIGURATION 3D PRINTER". In: *International Journal of Engineering Research and Innovation* 11 (1), pp. 15–22. ISSN: 2152-4165.
- Diagnosing and fixing ringing versus vibration artefacts - desiquintans.com* (n.d.). URL: <http://www.desiquintans.com/ringing>.
- Direct extrusion vs. bowden type - Recreus* (n.d.). URL: <https://recreus.com/gb/noticias/learn-with-recreus/direct-extrusion-vs-bowden-type>.
- Douglas, Ken (2021). *3D Printer Heated Bed – The Advantages* | All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-heated-bed-advantages/>.
- Emami, Mohammad Mahdi, Farshad Barazandeh, and Farrokh Yaghmaie (Oct. 2014). "Scanning-projection based stereolithography: Method and structure". In: *Sensors and Actuators A: Physical* 218, pp. 116–124. ISSN: 0924-4247. DOI: [10.1016/J.SNA.2014.08.002](https://doi.org/10.1016/J.SNA.2014.08.002).
- Ender-3 3D Printer* (n.d.). URL: <https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer>.
- Ender-5 Plus 3D Printer* (n.d.). URL: <https://www.creality.com/products/ender-5-plus-3d-printer>.
- Ender-5 Pro 3D Printer* (n.d.). URL: <https://www.creality.com/products/ender-5-pro-3d-printer>.

- Florin, ȘOVĂILĂ, ȘOVĂILĂ Claudiu, and BAROIU Nicușor (2016). "Delta 3D Printer". In: URL: <https://www.researchgate.net/publication/308787130>.
- Gadagi, Basavraj and Ramesh Lekurwale (Jan. 2021). "A review on advances in 3D metal printing". In: *Materials Today: Proceedings* 45, pp. 277–283. ISSN: 2214-7853. DOI: [10.1016/J.MATPR.2020.10.436](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.10.436).
- Goodridge, R. D., C. J. Tuck, and R. J.M. Hague (Feb. 2012). "Laser sintering of polyamides and other polymers". In: *Progress in Materials Science* 57 (2), pp. 229–267. ISSN: 0079-6425. DOI: [10.1016/J.PMATSCL.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/J.PMATSCL.2011.04.001).
- GVR (n.d.). *3D Printing Market Size and Share Report, 2022-2030*. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>.
- Hemera Direct Kit (1.75mm) – E3D Online (n.d.). URL: <https://e3d-online.com/products/e3d-hemera-direct-kit-1-75mm>.
- Hot End Design Theory - RepRap* (n.d.). URL: https://reprap.org/wiki/Hot_End_Design_Theory.
- How to Fix Heat Creep (3D Printing): 4 Simple Solutions* | All3DP (n.d.). URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-heat-creep/>.
- Huang, Jigang, Qin Qin, and Jie Wang (Sept. 2020). "A Review of Stereolithography: Processes and Systems". In: *Processes 2020, Vol. 8, Page 1138* 8 (9), p. 1138. ISSN: 2227-9717. DOI: [10.3390/PR8091138](https://doi.org/10.3390/PR8091138). URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/9/1138>.
- Hull, Charles W and Calif Arcadia (Aug. 1984). "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography". Pat.
- Impressora 3D CubeX Duo* | Exame (n.d.). URL: <https://exame.com/tecnologia/impressora-3d-cubex-duo-1/>.
- IRB 360 Data sheet (n.d.). URL: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0082EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch.
- Jeong, Useok and Kyu Jin Cho (Dec. 2015). "Feedforward friction compensation of Bowden-cable transmission via loop routing". In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2015-December, pp. 5948–5953. ISSN: 21530866. DOI: [10.1109/IROS.2015.7354223](https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354223).
- Kafle, Abishek et al. (Sept. 2021). "3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA)". In: *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3101* 13 (18), p. 3101. ISSN: 2073-4360. DOI: [10.3390/POLYM13183101](https://doi.org/10.3390/POLYM13183101). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/18/3101>.
- Koo, Yeong Chin et al. (2019). "Control and Development of a 3D Printed SCARA robot as an Underactuated System". In.
- Letier, Pierre et al. (2006). "Bowden Cable Actuator for Torque-Feedback in Haptic Applications". In.

- Makksu (May 2016). *Cartesian Printer – Motion Platform – Research 1 – makkusu*. URL: <https://maxdesign1990.wordpress.com/2016/05/22/gmtech-printer-motion-platform-research/>.
- O'Connell, Jackson (2021). *SCARA 3D Printer: All You Need to Know | All3DP*. URL: <https://all3dp.com/2/scara-3d-printer-guide/>.
- Passos, Júlio César (2009). “Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica”. In: URL: www.sbfisica.org.br.
- PTFE (polytetrafluoroethylene) | Fluorotherm.com* (n.d.). URL: <https://web.archive.org/web/20100305090149/http://fluorotherm.com/Properties-PTFE.asp>.
- RepRap (n.d.). *Prusa i3 - RepRap*. URL: https://reprap.org/wiki/Prusa_i3.
- Scara Operation: 3D Potter Scara and Scara Mini - YouTube* (n.d.). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=C9t-qfygyX4>.
- Schmidleithner, Christina and Deepak M Kalaskar (2016). “Stereolithography”. In: DOI: [10.5772/intechopen.78147](https://doi.org/10.5772/intechopen.78147). URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78147>.
- Shakor, Pshtiwan et al. (Jan. 2019). “Review of emerging additive manufacturing technologies in 3d printing of cementitious materials in the construction industry”. In: *Frontiers in Built Environment* 4, p. 85. ISSN: 22973362. DOI: [10.3389/FBUIL.2018.00085/BIBTEX](https://doi.org/10.3389/FBUIL.2018.00085).
- Sollmann, Klaus S., Musa K. Jouaneh, and David Lavender (Apr. 2010). “Dynamic modeling of a two-axis, parallel, H-frame-type XY positioning system”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 15 (2), pp. 280–290. ISSN: 10834435. DOI: [10.1109/TMECH.2009.2020823](https://doi.org/10.1109/TMECH.2009.2020823). URL: https://www.researchgate.net/publication/224446035_Dynamic_Modeling_of_a_Two-Axis_Parallel_H-Frame-Type_XY_Positioning_System.
- Sun, C. et al. (May 2005). “Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 121 (1), pp. 113–120. ISSN: 0924-4247. DOI: [10.1016/J.SNA.2004.12.011](https://doi.org/10.1016/J.SNA.2004.12.011).
- V6 All-Metal HotEnd – E3D Online* (n.d.). URL: <https://e3d-online.com/products/v6-all-metal-hotend>.
- Valino, Arnaldo D. et al. (Nov. 2019). “Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites”. In: *Progress in Polymer Science* 98, p. 101162. ISSN: 0079-6700. DOI: [10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2019.101162](https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2019.101162).
- Whelan, J, S P McCarthy, and Z J Palanchian (2018). “Digital WPI Major Qualifying Projects (All Years) Major Qualifying Projects Conveyor Belt 3D Printer MQP Repository Citation”. In: URL: <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/1492>.
- When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing -* (n.d.). URL: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>.