



**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D  
UTILIZANDO O PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA  
OTIMIZAR A VELOCIDADE E QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

**LAVRAS - MG**

**2023**

**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO O  
PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E  
QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

Monografia apresentada à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das exigências Curso de  
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título  
de Bacharel.

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos  
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Cisalpino, Joao Vivas Cisalpino

CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS  
3D UTILIZANDO O PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD  
PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E QUALIDADE DE  
IMPRESSÃO. / Joao Vivas Cisalpino. 1<sup>a</sup> ed. rev., atual. e  
ampl. – Lavras : UFLA, 2023.

24 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso(Graduação)–Universidade  
Federal de Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira.  
Bibliografia.

1. TCC

CDD-808.066

**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO O  
PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E  
QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em Data da defesa 2023.

Ainda não definido UFLA  
Ainda não definido UFLA?  
Ainda não definido 3 BELMIS

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

*Dedicatoria ....*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos



## RESUMO

**Palavras-chave:** Palavras chave



## ABSTRACT

**Keywords:** Keywords

## **LISTA DE FIGURAS**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – tabela de teste . . . . .	21
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Aditiva . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Fused Deposition Modeling . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1</b>	<b>5 Section S curve . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Feedforward . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b>Input Shaper . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b>B-spline . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.3</b>	<b>Robust Filter . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Geração de comando . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Look ahead . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Curvas de velocidade trapezoidal . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem e Controle . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Espaço de Estados . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Modelagem dinâmica impressora 3D . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Integradores numéricos . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.4.3.1</b>	<b>Runge Kutta . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Objective Function Optimization . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>Matlab . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1</b>	<b>fmincon . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados base e configurações . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem dinâmica de uma impressora 3D . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Espaço de estados . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Geração de Comando . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Leitura Gcode . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Curva rapezoidal de velocidade . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Interpolação . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>3.5</b>	<b>Runge Kutta . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>3.6</b>	<b>Função fmincon . . . . .</b>	<b>20</b>

3.6.1	Restrições lineares . . . . .	20
3.6.2	Restrições não lineares . . . . .	20
3.6.3	Cofiguração da Fmincon . . . . .	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	22
4.1	Geração de Comando . . . . .	22
4.2	Simulação Base . . . . .	22
4.3	Otimização Fmincon . . . . .	22
4.4	Performance Computacional . . . . .	22
5	CONCLUSÃO . . . . .	23
	REFERÊNCIAS . . . . .	24

## 1 INTRODUÇÃO

texto

Entretanto, uma das grandes limitações da impressão 3D, principalmente do tipo Fused Deposition Modeling, é o tempo de impressão, que ainda limita muito o tamanho de peças impressas em um tempo razoável, geralmente sendo necessário reduzir muito a resolução da impressão.

Existe hoje, dentro da academia e das comunidades maker, uma busca por impressoras capazes de imprimir cada vez mais rápido mantendo a qualidade de impressão. Além da possível diminuição do tempo de impressão, além disso a capacidade de imprimir rapidamente acaba proporcionando uma capacidade de aumentar a qualidade de impressão proporcional à diferença entre a velocidade máxima e a velocidade de impressão.

Portanto, vê-se relevante à procura por técnicas que permitam capacidades superiores de qualidade e velocidade de impressão, que flexibilizam a tecnologia e aumentam a capacidade da utilização comercial viável da tecnologia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Manufatura Aditiva

O princípio básico por trás da manufatura aditiva (MA) é a capacidade de fabricar um modelo tridimensional diretamente, sem a necessidade de um planejamento do processo, a partir de um modelo tridimensional digital normalmente criado a partir de Computer Aided Design (CAD). Uma das características principais da MA é a rapidez na qual é possível criar protótipo diretamente de modelos digitais, por conta disso, em um contexto de desenvolvimento de produto, o termo prototipagem rápida era utilizado. Entretanto, conforme a MA foi se aperfeiçoando era perceptível a capacidade dessas tecnologias não só se aterem à produção de protótipos, mas também de peças utilizadas em produtos finais. Além disso, o termo não considerava o princípio básico que unia essas tecnologias e assim o termo manufatura aditiva foi apresentado e adotado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) GIBSON *et al.* (2015).

Apesar da manufatura aditiva ter sido criada a mais de 30 anos, apenas a partir de 2009, quando a última patente mais relevante de \*Fused Deposition Modeling\* (FDM) expirou. Com isso, vários entusiastas começaram a desenvolver essa tecnologia de uma maneira "caseira", com o forte movimento RepRap. Por conta dessa característica "caseira" e um senso de comunidade, os desenvolvimentos em sua maioria eram de caráter \*Open Source\* e com uma mentalidade de acessibilizar essa tecnologia para as pessoas. Com os avanços tecnológicos feitos pela comunidade, empresas, pessoas e a mídia começaram a se interessar cada vez mais, aumentando a popularidade das impressoras 3D e por consequência trazendo muita atenção para a manufatura aditiva, que a partir daí, mais pesquisas, mais empresas se interessavam em desenvolver esse tipo de tecnologia, não somente FDM (ATTARAN, 2017).

Atualmente, existe uma grande variedade de tecnologias e processos de manufatura aditiva. Estes variam na maneira com que depositam o material, nos princípios físicos que utilizam e nos materiais que podem ser utilizados. Como mencionado anteriormente, um dos métodos de manufatura aditiva mais populares é a tecnologia FDM, entretanto existem diversas outras tecnologias que tem crescido muito em popularidade como as tecnologias baseadas na cura seletiva de resinas, \*stereolithography\* (SLA) e \*Masked stereolithography Apparatus\* (MSLA), além de outras tecnologias menos acessíveis, mas com aplicações em diversas indústrias, como por exemplo \*selective laser melting\* (SLM) e \*selective laser sintering\* (SLS) (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016).

## 2.2 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling (FDM) ou Fused Filament Fabrication (FFF) é uma das tecnologias MA mais populares como mencionado anteriormente. Ela se consiste por depositar material através de um processo onde um filamento de material é forçado dentro de uma câmara através, geralmente, de rolos dentados onde em uma região específica esse material é liquefeito. Por conta da pressão criada pelo filamento adentrando a câmara, ainda no estado sólido como um pistão, o material liquefeito é extrudado através de um bocal, comumente fabricado de bronze. Então, o filamento liquefeito é depositado em uma plataforma de forma a percorrer a trajetória desejada utilizando mecanismos movidos de forma controlada, geralmente por motores de passos. O processo é repetido camada por camada, de forma que elas estejam apoiadas por camadas anteriores e a primeira camada continue fixa na plataforma ou cama, até que o processo finalize (TURNER et al., 2014) (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

O trabalho de (VYAVAHARE *et al.*, 2020) apresenta algumas características sobre o desenvolvimento científico sobre FDM ao longo dos anos, tendo como base 211 artigos diferentes de 1994 a 2020. É apresentado um grande salto no número de artigos publicados no tema em anos recentes (2015 a 2018) (Figura 1), com 56% dos temas trabalhados em torno da otimização de parâmetros de impressão, acompanhado de 17% de trabalhos relacionados a aplicações utilizando o processo FDM, enquanto apenas x% são relacionados a outros temas, incluindo avanços tecnológicos relacionados a melhorias de hardware e software desses dispositivos. (Figura 2).

Podemos separar, de maneira simplificada, a porção de software de impressoras 3D FDM em três principais etapas: fatiamento (slicing), geração de comando e controle. A etapa de fatiamento envolve a topologia e a criação de instruções a partir do modelo, é nessa fase onde se decide a sequência de movimentos e outros eventos. Já na etapa de geração de comando, as instruções criadas pelo fatiador (slicer) na etapa anterior são interpretadas e os comandos detalhados são gerados, por exemplo as curvas de velocidade. Esses comandos são utilizados para movimentar os motores e outros equipamentos da impressora. Na etapa de controle, uma etapa relativamente nova nas impressoras 3D mais acessíveis, técnicas de controle são utilizadas para se diminuir vibrações e variações indesejadas em quaisquer parâmetros controlados, como a temperatura do bico. Um dos grandes avanços nessa etapa foi a implementação da técnica de Input Shaping por um firmware Open Source de impressora 3D chamado Klipper. Após a inclusão dessa etapa, principalmente no controle dinâmico da impressora, as capacidades



de velocidades e qualidade chegaram a outro patamar se comparados a impressoras que não implementam essa etapa (KLIPPER, 2017a).

### **2.2.1 5 Section S curve**

### **2.2.2 Feedforward**

Dentre os métodos de controle em aplicações FDM o Feedforward é o mais eficiente dada as limitações de custo em impressoras 3D comuns e é capaz de ter um impacto maior em sistemas conhecidos e sensíveis ao erro, onde buscam corrigir o erro antes que ele aconteça (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020; DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018).

texto

#### **2.2.2.1 Input Shaper**

Conhecendo a trajetória desejada e conhecendo características do sistema é possível computar os comandos fornecidos para calcular uma série de comandos, levando em consideração as características do sistema para que o comando de referência seja modificado de forma à trajetória final ser o mais próximo possível do comando de referência. Entretanto, ao invés de computar todo o comando de referência, é possível obter um comando modificado em tempo real através de um filtro. Uma das abordagens desse tipo de filtro de comando é o Input Shaper, onde variados Shapers são construídos levando em consideração diferentes objetivos e restrições (SINGHOSE, 1997). Essa abordagem vem sendo utilizada na comunidade Maker depois da patente ter perdido o vigor, e tem aprimorado a área como um todo, empurrando os limites anteriores de velocidade e precisão.

#### **2.2.2.2 B-spline**

texto

#### **2.2.2.3 Robust Filter**

texto

## 2.3 Geração de comando

A geração de comando é o processo que coordena a ativação dos atuadores, motores, dentre outros componentes de uma impressora. Ele recebe como base uma série de comandos que precisam ser interpretados e interpolados. Esse processo é responsável pelo controle de velocidade, aceleração dentre outras atividades que variam no tempo. O desenvolvimento científico nesta área aplicado a impressoras 3D FDM se deu em tempos recentes, sendo sua aplicação majoritária relacionada às máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC).

### 2.3.1 Look ahead

No processo de impressão 3D são fornecidos para a impressora uma sequência de pontos no espaço e limitações de velocidade entre os mesmos. A velocidade nos pontos é compartilhada entre trajetos em sequência, o que torna considerá-los independentemente ineficiente, introduzindo aceleração e desaceleração desnecessária impactando negativamente no tempo de impressão e na qualidade da peça impressa. O algoritmo Look Ahead procura manter o máximo de velocidade possível entre movimentos distintos, evitando acelerações e desacelerações desnecessárias, apesar de ser necessário um pré-processamento desses pontos que introduzem um custo computacional maior (YU et al. 2020) (YU *et al.*, 2020; KLIPPER, 2017b).

Para a construção da curva de velocidade trapezoidal a partir da matriz de posições e *\*feedrate\** é necessário o cálculo das direções dos movimentos a serem realizados.

As direções são representadas por vetores unitários calculados a partir do vetor deslocamento dividido pelo mesmo vetor normalizado. Sendo o vetor deslocamento obtido pela diferença entre dois vetores de posição sequenciais.

Essas direções são utilizadas para o cálculo das velocidades pelo *\*look ahead\**, considerando os valores de desvio de junta como 0.1 e aceleração máxima de  $5000\text{mm/s}^2$

Calculamos então a velocidade de junção baseada no ângulo das direções do movimento e nos parâmetros da aceleração máxima e desvio máximo de junção.

Velocidade de cruzamento

equações

### 2.3.2 Curvas de velocidade trapezoidal

Trapezoidal, S shape, etc

equações

A partir dessa matriz de posições e, agora também velocidades, utilizamos a função responsável por gerar a curva trapezoidal de velocidades.

Essa função separa o deslocamento total do movimento em 3 ou 2 fases de aceleração constante. É utilizado a equação  $x$  para o cálculo da velocidade pico

A partir da comparação da velocidade pico com a velocidade desejada pelo *\*feedrate\**. Caso a velocidade de pico for maior do que a velocidade desejada, temos 3 fases de deslocamento que são calculadas pelas equações  $x$ ,  $x$  e  $x$  Caso a velocidade de pico seja igual ou menor do que a velocidade desejada, teremos 2 fases de deslocamento que são calculadas a partir das equações  $x$  e  $x$ .

Como resultado da função, obtemos uma nova matriz esta contendo informações sobre o a variação da posição, do tempo, da velocidade e sobre a aceleração e direção de deslocamento no ponto.

A partir dessa matriz, utilizamos a função de interpolação para dividir cada intervalo dessa matriz em intervalos menores baseados em uma configuração de passo de interpolação, no caso baseado em passos de tempo. Assim criando-se uma nova matriz dos dados interpolados.

A partir dos vetores de direção e da função acumuladora que se consite em acumular os valores de um vetor. Obtemos uma matriz de posições, velocidades e tempo.

## 2.4 Modelagem e Controle

texto

### 2.4.1 Espaço de Estados

texto

equações

### 2.4.2 Modelagem dinâmica impressora 3D

Para a modelagem dinâmica dos eixos X e Y da impressora 3D, é considerado que os eixos são completamente independentes, a flexibilidade da correia é aproximada utilizando um conjunto mola amortecedor e a transmissão de movimento e torque dos motores é considerada como ideal e não será abordada. Assim duas posições de estudo surgem para cada eixo, uma delas representa a posição ideal e desejada pelo usuário ( $X1$ ) e a segunda é a posição real

considerando as forças inerciais e a flexibilidade introduzida pela correia (X2) como na Figura 4.

### **2.4.3 Integradores numéricos**

texto

#### **2.4.3.1 Runge Kutta**

texto equações

### **2.4.4 Objective Function Optimization**

texto

## **2.5 Matlab**

### **2.5.1 fmincon**

Como o modelo matemático a ser otimizado é multivariável e possuindo restrições não-lineares, a função FMINCON do ambiente do MATLAB é utilizada para otimizar as variações de velocidade de forma a diminuir o erro de trajetória associado às flexibilidades do sistema que causam perturbações e vibrações indesejadas. É uma função baseada em gradientes que busca por todos os mínimos locais de uma região que satisfaz outras restrições estipuladas (AL-BAGHDADI; BAHAROM; SULAIMAN, 2021). Ela utiliza um conjunto de restrições superiores e inferiores para cada ponto e otimiza a função considerando as restrições estabelecidas pela função não linear, utilizando as equações de movimento para encontrar a resolução da EDO de maneira e otimizar os parâmetros utilizando o algoritmo sqp, com o objetivo de minimizar a seguinte função:

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais

#### 3.2 Dados base e configurações

aceleração máxima desvio de junção delta tempo kx ky bx by mx my

#### 3.3 Modelagem dinâmica de uma impressora 3D

##### 3.3.1 Espaço de estados

Organizando as equações de movimento dos eixos x e y da impressora em espaço de estados em forma matricial, sendo Dx, Vx, Ax, Dy, Vy, Ay as variáveis referentes à posição, velocidade e aceleração das massas x e y e as variáveis Dxb, Vxb, Axb, Dyb, Vyb, Ayb referentes a base, relacionadas relacionadas pela equação:

equação

Na função não linear as igualdades são calculadas em cada ponto, sendo os de índice "i" o ponto atual e "n" o próximo ponto.

#### 3.4 Geração de Comando

##### 3.4.1 Leitura Gcode

Foi considerado no mapeamento do Gcode apenas comandos G1, extraindo as informações dos eixos X, Y e do \*feedrate\* (F). Com base nesses valores uma matriz 3 por n é criada, n sendo o número de comandos lidos.

##### 3.4.2 Curvarapezoidal de velocidade

$$dir_{vector} = \frac{v}{norm(v)} \quad (3.1)$$

$$\alpha = 2 * asin \left( \frac{norm(dir_1 + dir_2)}{2} \right) \quad (3.2)$$

$$div = \frac{1 - sin \left( \frac{\alpha}{2} \right)}{sin \left( \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{jun_{div}}{div} \quad (3.4)$$

$$v_{jun} = \sqrt{acc_{max} * R} \quad (3.5)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{(v_i^2 + v_f^2)}{2} + acc * des_{tot}} \quad (3.6)$$

$$des_{segment} = \frac{(v_f^2 - v_i^2)}{(2 * acc_{segment})} \quad (3.7)$$

$$des_{middle} = des_{total} - (des_{up} + des_{down}) \quad (3.8)$$

$$dt_{segment} = \frac{(v_f - v_i)}{acc_{segment}} \quad (3.9)$$

$$dt_d = \frac{des_d}{v_d} \quad (3.10)$$

$$\Delta vel = v_f - v_i \quad (3.11)$$

$$v_0 = init_{value} + v_0 \quad (3.12)$$

$$v_k = v_k + v_{k-1}$$

$$N_{steps} = \lceil \frac{\Delta t_i}{\Delta t_{step_{size}}} - 1 \rceil \quad (3.13)$$

$$\Delta t_{last_{step}} = \Delta t_i - \Delta t_{step_{size}} * N_{steps} \quad (3.14)$$

$$\Delta des_i = \Delta v_i * \Delta t_i + \frac{acc_{segment} * \Delta t_i^2}{2} \quad (3.15)$$

**\*\*Matrizes de exemplo\*\***

### 3.4.3 Interpolação

## 3.5 Runge Kutta

Para o calculo da estimativa da respota do sistema, utilizamos a função Runge Kutta Primeiramente calculamos os valores de  $k_1, k_2, k_3$  e  $k_4$ , calculamos a média da derivada do vetor de variaveis e por fim o calculo do vetor  $x$ .

## 3.6 Função fmincon

eq

Sendo  $D_{mx}$  e  $D_{my}$  os vetores com os pontos de deslocamento calculados e  $D_{mex}$  e  $D_{mey}$  os vetores de deslocamento desejados, ou seja, a trajetória requerida para a impressão.

### 3.6.1 Restrições lineares

As matrizes de upper bound e lowerbound foram construidas com as seguites considerações:

**\*\*considerações\*\***

### 3.6.2 Restrições não lineares

Como restrições não lineares foi implementada uma função que compara o resultado do Runge Kutta com o vetor posição da fmincon.

### 3.6.3 Configuração da Fmincon

Foi utilizado as seguintes configurações da função fmincon:

**\*\*configurações\*\***

```
optimoptions(@fmincon, 'TolFun', 0.000000001, 'MaxIter', 100000, ... 'MaxFunEvals', 700000, 'Display', 'iter', ... 'DiffMinChange', 0.0001, 'Algorithm', 'interior-point', 'StepTolerance', 1e-12);
```

adas

Equações

In line equations  $x = 3$

Full line equations

$$y = x + 3$$

Referenceble equation

$$x + 1 = 6 + 7 \tag{3.16}$$

Tabela 3.1 – tabela de teste

teste	teste2	teste3
1	2	3
4	5	x+1



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Geração de Comando**

### **4.2 Simulação Base**

### **4.3 Otimização Fmincon**

### **4.4 Performance Computacional**

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho não conseguiu alcançar seus objetivos de maneira completa dada a limitação da implementação nos limites de aceleração. Entretanto, os resultados obtidos mostram o potencial da técnica iterativa de otimização, necessitando de uma execução melhor para ser capaz de atuar de forma completa. Outra dificuldade da técnica é o tempo de processamento, onde não é possível realizar o processamento em real-time sendo necessário utilizá-lo em conjunto com um pré processamento do Gcode.

## REFERÊNCIAS

ALBAGHDADI, A. M.; BAHAROM, M. B.; SULAIMAN, S. A. bin. Parameter design optimization of the crank-rocker engine using the fmincon function in matlab. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2021. v. 1088, n. 1, p. 012072.

ATTARAN, M. The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business horizons**, Elsevier, v. 60, n. 5, p. 677–688, 2017.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 83, p. 389–405, 2016.

DUAN, M.; YOON, D.; OKWUDIRE, C. E. A limited-preview filtered b-spline approach to tracking control—with application to vibration-induced error compensation of a 3d printer. **Mechatronics**, Elsevier, v. 56, p. 287–296, 2018.

GIBSON, I. *et al.* Applications for additive manufacture. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**, Springer, p. 451–474, 2015.

KLIPPER. **Klipper Documentation**. 2017. Disponível em: <<https://www.klipper3d.org/>>.

KLIPPER. **Klipper Kinematics Documentation**. 2017. Disponível em: <<https://www.klipper3d.org/Kinematics.html>>.

RAMANI, K. S.; EDOIMIOYA, N.; OKWUDIRE, C. E. A robust filtered basis functions approach for feedforward tracking control—with application to a vibration-prone 3-d printer. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 25, n. 5, p. 2556–2564, 2020.

SINGHOSE, W. E. **Command generation for flexible systems**. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 1997.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. **Rapid prototyping journal**, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

VYAVAHARE, S. *et al.* Fused deposition modelling: a review. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 26, n. 1, p. 176–201, 2020.

YU, K. *et al.* Application of the five-phase s-curve velocity model on fdm three-dimensional printer. In: IEEE. **2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)**. [S.l.], 2020. p. 1365–1371.