



**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.

30 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

Figura 2.1 – teste . . . . .	13
Figura 2.2 – teste . . . . .	14
Figura 2.3 – teste . . . . .	14
Figura 2.4 – teste . . . . .	15
Figura 2.5 – teste . . . . .	16
Figura 2.6 – teste . . . . .	16
Figura 2.7 – teste . . . . .	17
Figura 2.8 – teste . . . . .	18
Figura 2.9 – teste . . . . .	19
Figura 2.10 – teste . . . . .	20
Figura 2.11 – teste . . . . .	20
Figura 2.12 – teste . . . . .	20

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – tabela de teste . . . . .	26
--	----

## 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>Feedforward . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1.1</b>	<b>Input Shaper . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1.2</b>	<b>filtered basis function (FBF) . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1.3</b>	<b>limited-preview filtered B-splines . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1.4</b>	<b>Robust Filtered Basis Functions . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Geração de comando . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Look ahead . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Curvas de velocidade trapezoidal . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Espaço de Estados . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3.1</b>	<b>Runge-Kutta . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Objective Function Optimization . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Matlab . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Dados base e configurações . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelagem dinâmica de uma impressora 3D . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Modelagem dinâmica impressora 3D . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.5</b>	<b>Geração de Comando . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Leitura Gcode . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.6</b>	<b>lookahead . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Curva rapezoidal de velocidade . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Interpolação . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.7</b>	<b>Runge Kutta . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.7.1</b>	<b>fmincon . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Restrições lineares . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.7.3</b>	<b>Restrições não lineares . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.7.4</b>	<b>Cofiguração da Fmincon . . . . .</b>	<b>26</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Geração de Comando . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação Base . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Otimização Fmincon . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Performance Computacional . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>29</b>

## 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

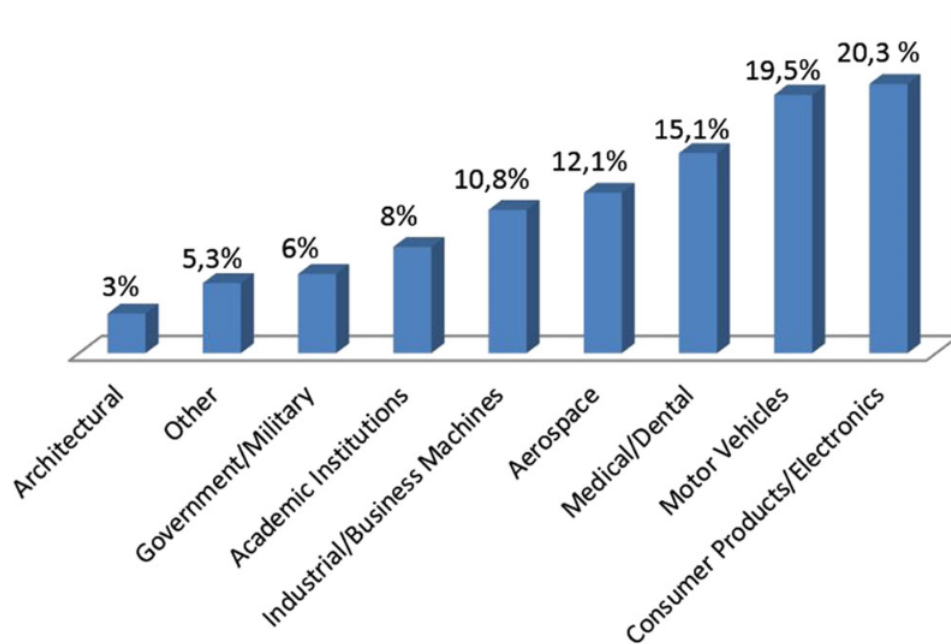
### 2.1 Manufatura Aditiva

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).

Figura 2.1 – teste



Fonte: BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016

2.1 figura

## 2.2 Fused Deposition Modeling

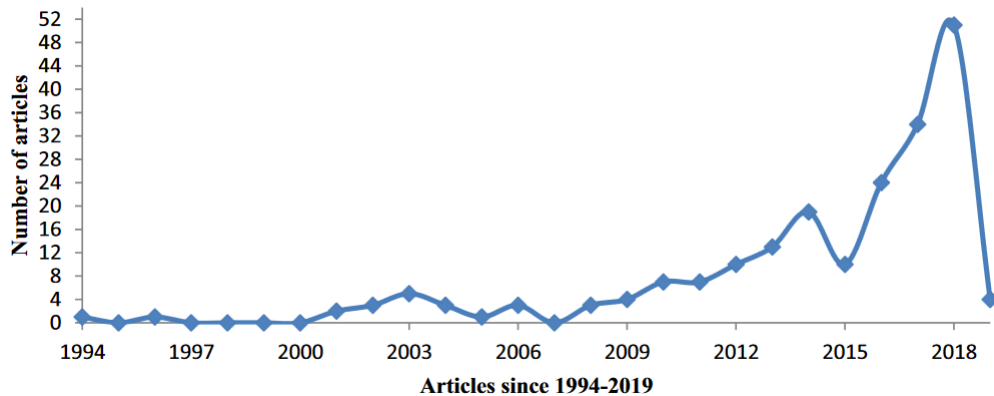
Fused Deposition Modeling (FDM) ou Fused Filament Fabrication (FFF) é uma das tecnologias MA mais populares como mencionado anteriormente. Ela se consiste por depositar material através de um processo onde um filamento de material é forçado dentro de uma câmara através, geralmente, de rolos dentados 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).

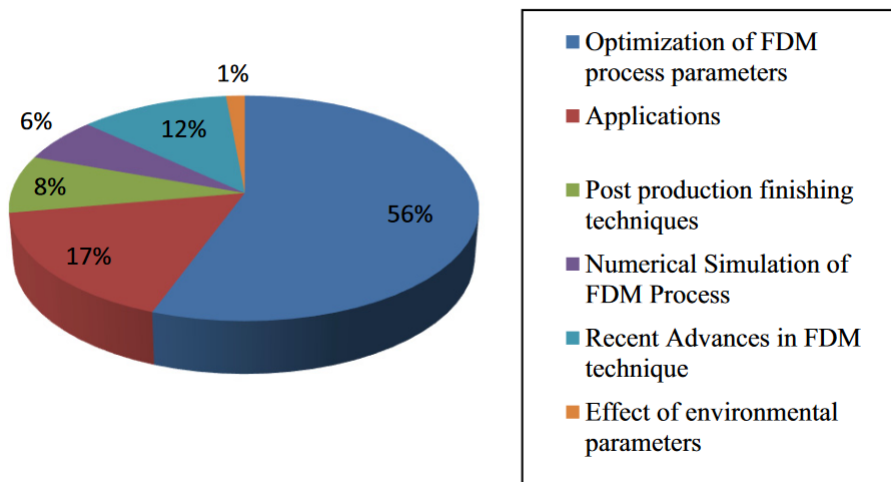
Figura 2.2 – teste



Fonte: VYAVAHARE *et al.*, 2020

Figura 2.3 – teste

#### Percentage contribution of domain specific literature



Fonte: VYAVAHARE *et al.*, 2020

#### 2.1 figura

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).

Figura 2.4 – teste



Fonte: KLIPPER, 2017a

### 2.2.1 Feedforward

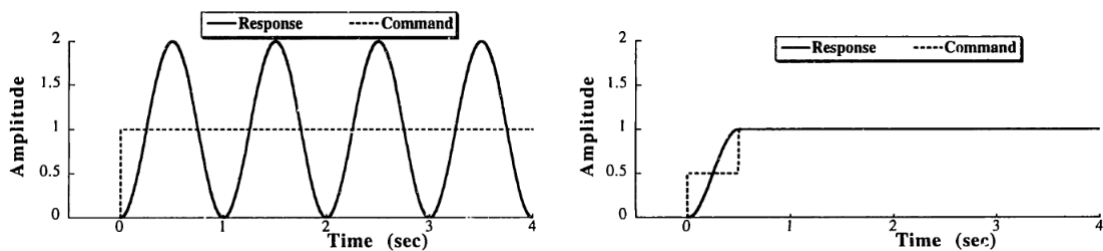
Dentre os métodos de controle em aplicações FDM o Feedforward é o mais eficiente dada as limitações de custo em impressoras 3D comuns e é capaz de ter um impacto maior em sistemas conhecidos e sensíveis ao erro, onde buscam corrigir o erro antes que ele aconteça. O método de feedback é mais eficiente em diminuir o impacto de excitações externas ou desconhecidas, entretanto não consegue prever os efeitos do sistema, se encaixando melhor em aplicações de usinagem utilizando CNCs (Computer Numerical Control), onde o valor dos equipamentos é maior e as forças envolvidas no corte influenciam mais do que as vibrações do próprio sistema. Já no caso das impressoras, quase 100% dos efeitos é causado pelo próprio sistema. As principais limitações da aplicação de técnicas Feedforward em impressoras 3D são a dificuldade de montar um modelo representativo, a exigência computacional elevada e por fim a necessidade da simulação se estender do início ao fim, pela dependência de se basear

no estado inicial da impressão (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020; DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018).

### 2.2.1.1 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).

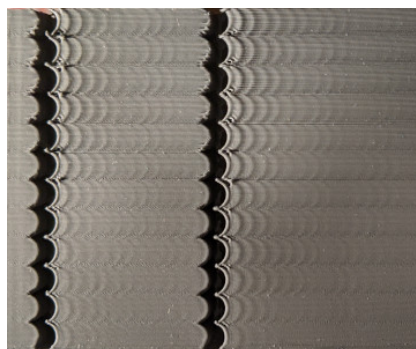
Figura 2.5 – teste



Fonte: SINGHOSE, 1997

Essa abordagem vem sendo explorada na comunidade Maker a partir de 2017 quando a última patente desse método expirou, e tem aprimorado a área como um todo, empurrando os limites anteriores de velocidade e precisão, sendo popularizada pelo Klipper (KLIPPER, 2017b).

Figura 2.6 – teste

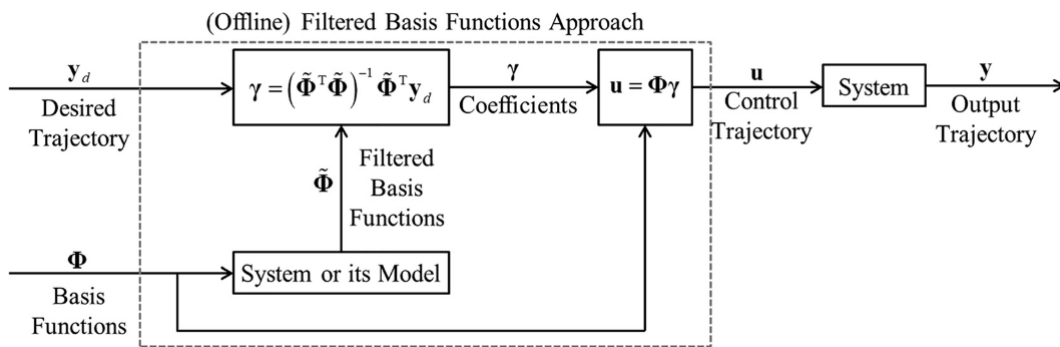


Fonte: KLIPPER, 2017b

### 2.2.1.2 filtered basis function (FBF)

O método FBF necessita que a trajetória a ser rastreada seja totalmente conhecida e que a trajetória controlada possa ser expressa como uma combinação linear de funções base possuindo coeficientes desconhecidos. As funções base são utilizadas em um controle feedforward utilizando o modelo dinâmico do sistema e selecionando os coeficientes de maneira a minimizar os erros dada uma trajetória desejada. (RAMANI *et al.*, 2017)

Figura 2.7 – teste



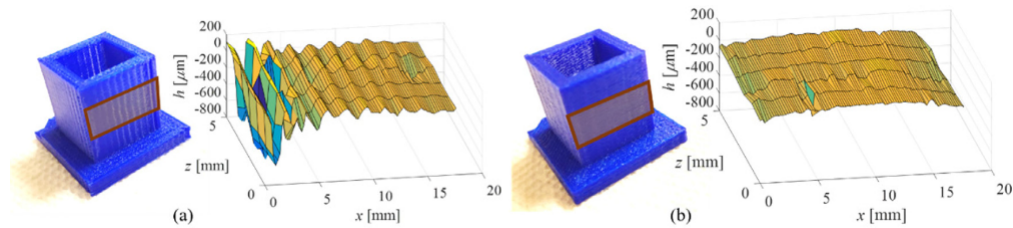
Fonte: RAMANI *et al.*, 2017

### 2.2.1.3 limited-preview filtered B-splines

Uma das maiores dificuldades que os métodos avançados para o controle feedforward de trajetórias é a necessidade de se conhecer completamente a trajetória desejada, o que implica em um grande custo computacional, principalmente em situações onde são necessárias uma grande quantidade de amostras da trajetória, por exemplo em casos de alta resolução e casos de longa duração. O limited-preview filtered B-splines divide a trajetória desejada em subgrupos com um número menor de amostras e utiliza um algoritmo de \*receding horizon\* para calcular recursivamente os coeficientes da função B-spline que minimizam os erros de trajetória (DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018).

A partir dessa otimização da divisão da trajetória em subgrupos, esse método conseguiu ser testado utilizando uma impressora 3D de verdade com modelos simples. Apresentando resultados promissores apresentados na figura 2.8.

Figura 2.8 – teste



Fonte: DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018

### 2.2.1.4 Robust Filtered Basis Functions

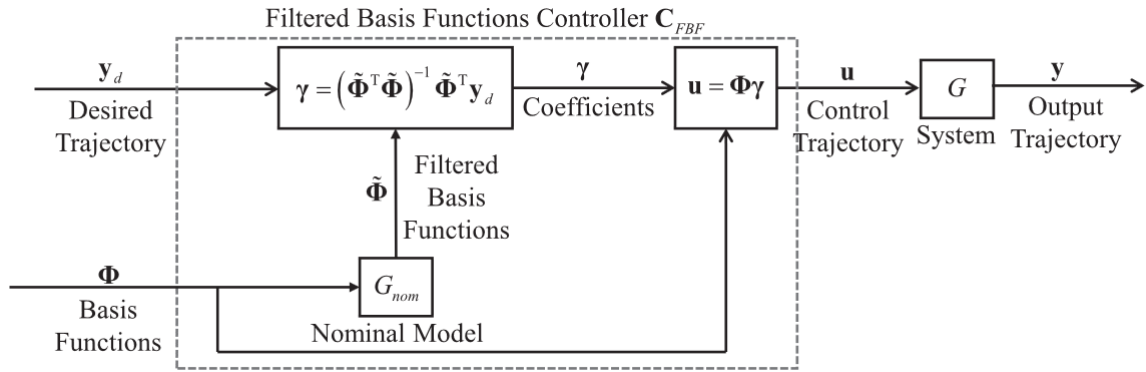
However, the FBF approach faces at least two practical challenges. The first is that its computational cost becomes very high as the length (number of samples) in the motion trajectory increases. To overcome this challenge, a limited preview version of FBF, viz., limited preview filtered B-splines (LPFBS), was proposed by Duan et al. [11]. LPFBS was shown to significantly reduce the computational cost of the FBF approach without significantly sacrificing its tracking performance, allowing it to be implemented successfully on a desktop 3-D printer [11]. A second challenge is that, being a purely feedforward technique, the tracking accuracy of the FBF approach degrades in the presence of inaccuracies in the plant model or uncertainty in the plant dynamics [11]. In the presence of uncertainty in the plant dynamics, the tracking accuracy of feedforward controllers such as FBF can be

solution, which facilitates LPFBS, is needed. Hence, this article (and its preliminary version [28]) makes the following contributions to the literature. 1) It proposes a robust FBF approach that retains the elegance of the least-squares solution of the standard FBF approach by using a robust filter instead of nominal plant dynamics to filter basis functions. 2) It proposes the inverse of an optimal feedforward controller that minimizes an error cost function for known plant uncertainty as a robust filter for use in robust FBF. 3) It demonstrates the effectiveness of the proposed robust FBF approach using simulation examples and experiments on a desktop 3-D printer with dynamic uncertainty. (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020)

## 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

Figura 2.9 – teste



Fonte: RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020

que precisam ser interpretados e interpolados. Esse processo é responsável pelo controle de velocidade, aceleração dentre outras atividades que variam no tempo (YU *et al.*, 2020).

### 2.3.1 Look ahead

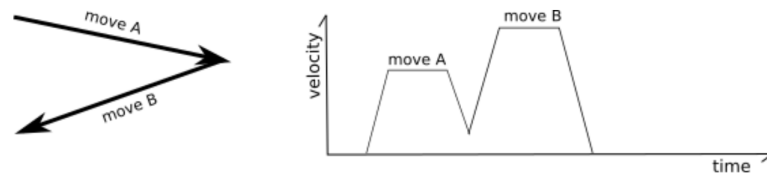
No processo de impressão 3D são fornecidos para a impressora uma sequência de pontos no espaço e limitações de velocidade entre os mesmos. A velocidade nos pontos é compartilhada entre trajetos em sequência, o que torna considerá-los independentemente ineficiente, introduzindo aceleração e desaceleração 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).

### 2.3.2 Curvas de velocidade trapezoidal

As impressoras 3D entre outros equipamentos, como máquinas CNC, necessitam de um planejamento de velocidade, pois o Gcode fornece apenas as velocidades desejadas de cada movimento, enquanto o algoritmo de lookahead calcula as velocidades de junção entre os movimentos, portanto ainda se faz necessário planejar o comportamento da velocidade ao longo do tempo do trajeto entre a velocidade inicial e final do movimento. Uma das maneiras mais simples para a criação dessa curva de velocidade é a criação de uma curva trapezoidal, onde podemos separar o setor em 3 segmentos de aceleração constante. Em um primeiro momento uma crescente de velocidade até a velocidade desejada, seguido de um segmento de velocidade cons-

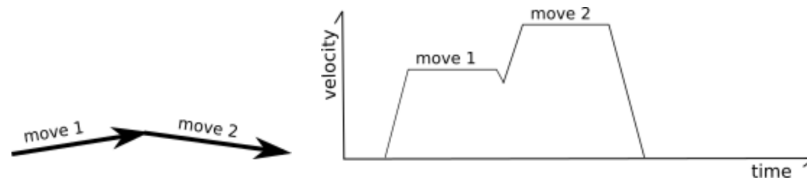
tante e por fim um segmento de desaceleração constante até a velocidade final. Alguns ajustes são feitos para as diferentes condições de velocidade inicial, final e velocidade máxima atingida com uma determinada aceleração máxima, que pode fazer com que se diminua a quantidade de segmentos (YU *et al.*, 2020; KLIPPER, 2017b).

Figura 2.10 – teste



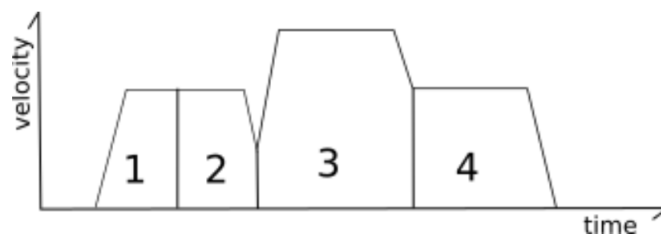
Fonte: KLIPPER, 2017b

Figura 2.11 – teste



Fonte: KLIPPER, 2017b

Figura 2.12 – teste



Fonte: KLIPPER, 2017b

### 2.3.3 Espaço de Estados

A maioria dos sistemas dinâmicos pode ser escritos através de uma formulação chamada de espaço de estados, que tem como objetivo expressar modelos de equações diferenciais parciais (EDP) ou ordinárias (EDO) de ordem superior como um conjunto de EDPs ou EDOs de primeira ordem. Essa formulação é construída a partir de um princípio de autoregressão das equações. Na equação 2.1 podemos observar uma EDO de segunda ordem representando um sistema massa mola simples, logo abaixo (2.2) a mesma equação representada na formulação de espaço de estados (HAMILTON, 1994).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k/m & c/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \quad (2.2)$$

### 2.3.3.1 Runge-Kutta

Runge Kutta é um algoritmo de integração numérica baseada na série de Taylor onde, nas formulações explícitas são calculados 4 coeficientes que são utilizados para estimar o próximo ponto, assim caracterizando um algoritmo iterativo de valor inicial (BETTIS, 1979; DORMAND; PRINCE, 1980).

### 2.3.4 Objective Function Optimization

Funções objetivo de otimização são elementos importantes na execução de algoritmos de otimização. Alguns estudos apontam que a qualidade e o número de variáveis de projeto cruciais para o resultado da otimização, além disso outros sub-parâmetros também são relevantes como restrições, limites e valores iniciais. A coerência entre estes fatores depende habilidade e de uma visão abrangente de seu criador (ALBAGHDADI; BAHAROM; SULAIMAN, 2021).



### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Materiais**

#### **3.2 Matlab**

#### **3.3 Dados base e configurações**

aceleração máxima desvio de junção delta tempo  $k_x$   $k_y$   $b_x$   $b_y$   $m_x$   $m_y$

#### **3.4 Modelagem dinâmica de uma impressora 3D**

##### **3.4.1 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 ( $X_1$ ) e a segunda é a posição real considerando as forças inerciais e a flexibilidade introduzida pela correia ( $X_2$ ) como na Figura 4.

#### **3.5 Geração de Comando**

##### **3.5.1 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.

#### **3.6 lookahead**

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  $5000mm/s^2$

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

### 3.6.1 Curva rapezoidal de velocidade

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.6.2 Interpolação

## 3.7 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  $x$ .

### 3.7.1 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 permitindo a utilização de alguns algoritmos diferentes e outras configurações da função.

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.

### 3.7.2 Restrições lineares

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

**\*\*considerações\*\***

### 3.7.3 Restrições não lineares

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

### 3.7.4 Configuração da Fmincon

Foi utilizado as seguintes configurações da função fmincon:

**\*\*configurações\*\***

```
optimoptions(@fmincon, 'TolFun', 0.0000000001, 'MaxIter', 100000, ... 'MaxFunE-
vals', 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.
- BETTIS, D. Runge-kutta algorithms for oscillatory problems. **Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP**, Springer, v. 30, n. 4, p. 699–704, 1979.
- 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.
- DORMAND, J. R.; PRINCE, P. J. A family of embedded runge-kutta formulae. **Journal of computational and applied mathematics**, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 19–26, 1980.
- 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.
- HAMILTON, J. D. State-space models. **Handbook of econometrics**, Elsevier, v. 4, p. 3039–3080, 1994.
- 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. *et al.* Tracking control of linear time-invariant nonminimum phase systems using filtered basis functions. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 139, n. 1, 2017.
- 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.