



**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.

17 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

Com a crise global logística causada pela pandemia, uma das tecnologias que mais se destacou foi a participação da manufatura aditiva para uma produção flexível e descentralizada. A impressão 3D tem ganhado cada vez mais espaço em aplicações variadas, como no setor aeroespacial, automobilístico e principalmente aplicações em prototipagem rápida, cada vez mais acessível. O presente trabalho estabelece um modelo dinâmico base para uma impressora 3D e utiliza uma função disponível no Matlab, FMINCON, para realizar uma otimização dos comandos dinâmicos de forma a reduzir o desvio da trajetória desejada, de forma iterativa. Os resultados obtidos mostram o potencial da técnica, entretanto necessidade de uma execução melhor para poder ser testado de forma mais prática e atrelado a outras técnicas como a de pré processamento do arquivo Gcode.

**Palavras-chave:** Palavras chave



## ABSTRACT

With the global logistical crisis caused by the pandemic, one of the technologies that stood out the most was the participation of additive manufacturing for flexible and decentralized production. 3D printing has gained more and more space in various applications, such as in the aerospace, automotive and especially rapid prototyping applications, which are increasingly accessible. The present work establishes a base dynamic model for a 3D printer and uses a function available in Matlab, FMINCON, to perform an optimization of dynamic commands in order to iteratively reduce the deviation from the desired trajectory. The results obtained show the potential of the technique, however, the need for a better execution to be able to be tested in a more practical way and linked to other techniques such as the pre-processing of the Gcode file.

**Keywords:** Keywords

## **LISTA DE FIGURAS**

## **LISTA DE TABELAS**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>revisao bibliográfica</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Aditiva</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Fused Deposition Modeling</b>	<b>11</b>
<b>2.3</b>	<b>Desenvolvimento acadêmico em FDM</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Geração de comando</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>Look ahead</b>	<b>12</b>
<b>2.6</b>	<b>Feedforward</b>	<b>12</b>
<b>2.7</b>	<b>Input Shaper</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>metodologia</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelagem dinâmica de uma impressora 3D</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Espaço de estados</b>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Função fmincon</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>resultados e discussão</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados comparando os limites de aceleração</b>	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Discussão</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>17</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crise global logística causada pela pandemia, uma das tecnologias que mais se destacou foi a participação da manufatura aditiva para uma produção flexível e descentralizada. A impressão 3D tem ganhado cada vez mais espaço em aplicações variadas, como no setor aeroespacial, automobilístico e principalmente aplicações em prototipagem rápida, cada vez mais acessível.

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 permitem capacidades superiores de qualidade e velocidade de impressão, que flexibilizam a tecnologia e aumentam a capacidade da utilização comercial viável da tecnologia.

## **2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA**

### **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., 2020).

### **2.2 Fused Deposition Modeling**

Fused Deposition Modeling (FDM) ou Fused Filament Fabrication (FFF) é uma tecnologia categorizada como MA 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).

### **2.3 Desenvolvimento acadêmico em FDM**

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 otimiz-

ção de parâmetros de impressão, acompanhado de 17% de trabalhos relacionados a aplicações utilizando o processo FDM (Figura 2).

## **2.4 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).

## **2.5 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).

## **2.6 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 et al. 2020; DUAN et al. 2018).

## **2.7 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.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Modelagem dinâmica de uma 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.

#### 3.2 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.

#### 3.3 Função 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 (ALBAGHDADI et al. 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:

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.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Resultados comparando os limites de aceleração**

Utilizando valores suficientemente altos para os limites de aceleração da base, o algoritmo é capaz manter a trajetória de forma excelente com um desvio inferior a menos de 0,001%, como apresentado nas figuras abaixo:

Entretanto, quando é utilizado valores mais baixos de aceleração máxima para as mesmas condições, o algoritmo não é capaz de encontrar as soluções de alguns pontos e o resultado acaba sendo não utilizável, como apresentado na figura abaixo:

### **4.2 Discussão**

A provável causa para os artefatos com baixos limites de aceleração é o tempo objetivo estimado, que pode acabar não sendo atingido com os limites impostos. Para remediar este problema é necessário um método mais eficaz em estimar um tempo total de impressão que possa ser atingido com as limitações impostas.

## 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.