

CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO ALGORITMO ITERATIVO E PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

João Vivas Cicalpino

Orientador: Wander Gustavo Rocha Vieira
Universidade Federal de Lavras

08/12/2023

Sumário

1. Introdução
2. Referencial Teórico
3. Metodologia
4. Resultados
5. Conclusão

1. Introdução

1. Introdução

Manufatura aditiva

- ▶ Alta iterabilidade
- ▶ Produção em pequena escala
- ▶ Reprodutibilidade
- ▶ Facilidade de lidar com geometrias complexas

Fused Deposition Modeling (FDM):

- ▶ Acessibilidade crescente.
- ▶ Aplicabilidade em diversas áreas como no setor automobilístico.

Tempo de impressão como principal limitação:

- ▶ Restringe a aplicabilidade para peças maiores.
- ▶ Limita a aplicabilidade como planta produtiva.

1.1. Objetivos

Objetivo geral:

- ▶ Investigar e desenvolver uma metodologia para atuação de controle de trajetória em impressoras 3D FDM de forma a possibilitar maiores velocidades e garantindo a precisão dimensional das peças produzidas.

Objetivos específicos:

- ▶ Desenvolver um algoritmo iterativo que possa ser integrado ao sistema de controle de impressoras 3D para minimizar os desvios entre o percurso desejado e o efetivamente percorrido, levando em consideração a dinâmica da impressora.
- ▶ Simular o comportamento da impressora 3D com o novo algoritmo para avaliar o comportamento do método em relação aos parâmetros controlados.

2. Referencial Teórico

2.1. Manufatura Aditiva

Definido por:

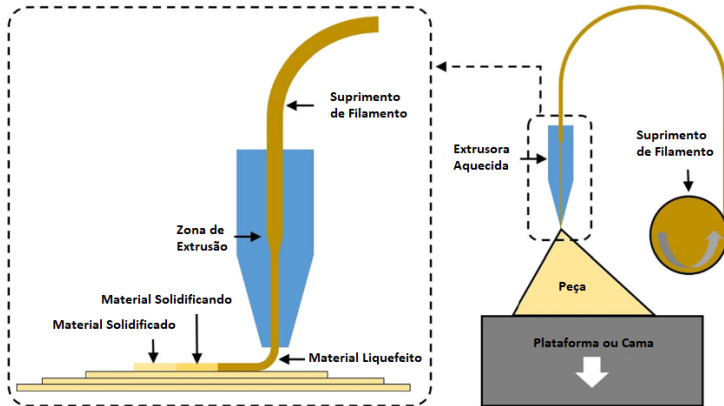
- ▶ Construir o modelo de forma aditiva, como implica o nome.
- ▶ Dispensar a necessidade de planejar as operações de maneira individual para fabricar um modelo tridimensional.

Pode utilizar diversos processos como:

- ▶ Extrusão (fusão e solidificação)
- ▶ Sinterização a laser (aglutinação)
- ▶ Estereolitografia (cura por luz)

2.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

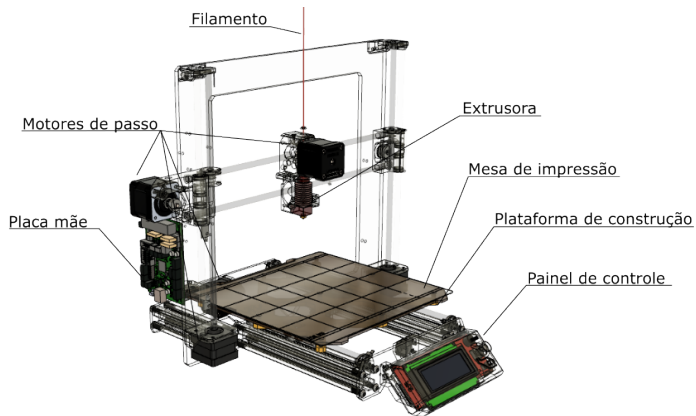
Princípio e processo de impressão para FDM



Fonte: Adaptado de BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016

2.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

Indicação dos componentes de uma impressora 3D



2.3. Geração do Modelo 3D digital

- ▶ *Computer Aided Design* (CAD)
- ▶ Escultura digital
- ▶ Escaneamento 3D

2.4. Geração de Comando

Interface do fatiador PrusaSlicer

*Sem título - PrusaSlicer-2.5.0 baseado no Slic3r

Arquivo Editar Janela Vista Configuração Ajuda

Bandeja Config. de impressão Config. de filamento Config. da impressora

Simple Avança Especialista

Config. de impressão :

Filamento : - default -

Filamento : - default -

Impressora : - default FFF -

Suportes : Nenhum

Preenchimento : 20% Aba: ☐

Informações fatiadas

Filamento utilizado (m) 1,49

Filamento utilizado (mm³) 3586,67

Tempo estimado de impressão : 14m

- modo normal

Exportar G-code

Tipo de recurso	Tempo	Porcentagem	Filamento utilizado
Perímetro	3m	22,2%	0,47 m 0,00 g
Perímetro externo	3m	23,1%	0,25 m 0,00 g
Preenchimento interno	4m	27,3%	0,52 m 0,00 g
Preenchimento sólido	2m	17,0%	0,16 m 0,00 g
Preenchimento do sólido do topo	1m	7,6%	0,04 m 0,00 g
Preenchimento de pontes	14s	1,7%	0,04 m 0,00 g
Sala/aba	4s	0,5%	0,01 m 0,00 g

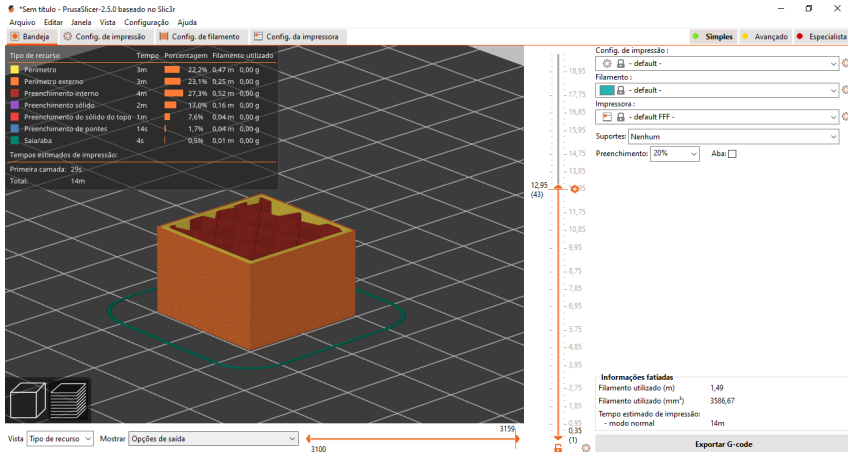
Tempos estimados de impressão:

Primeira camada: 29s

Total: 14m

Vista Tipo de recurso Mostrar Opções de saída

3100 3159



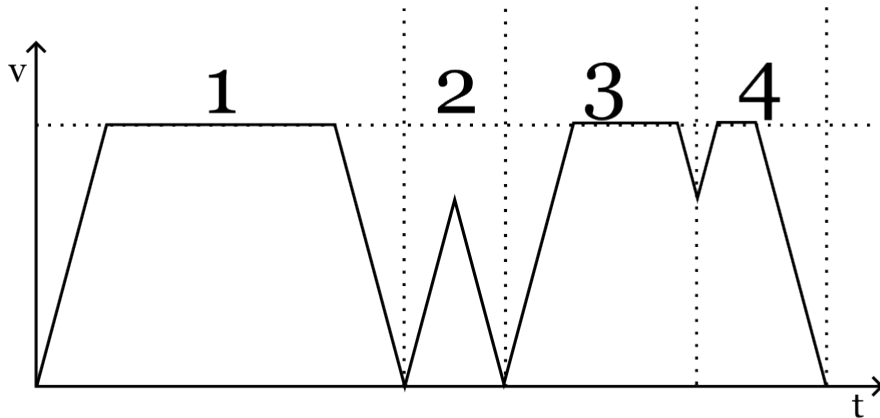
2.4. Geração de Comando

Exemplos de comandos Gcode

- ▶ M104 S200 | Define a temperatura da extrusora
- ▶ G21 | Define a unidade como milímetro
- ▶ G1 X10 Y10 F5000 | Realiza um movimento nos eixos do comando
- ▶ G1 F1000 | Define a velocidade desejada para os movimentos subsequentes
- ▶ G1 X10.5 Y9.5 E1.5 | Realiza um movimento nos eixos do comando
- ▶ G1 X0 Y0 Z0.2 E0 | Realiza um movimento nos eixos do comando

2.5. Geração de Trajetória

Perfil de velocidade - Curva trapezoidal de velocidade



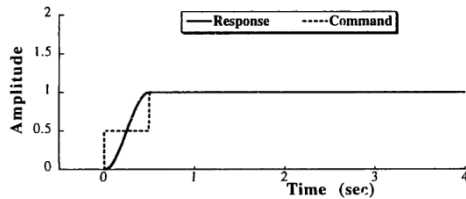
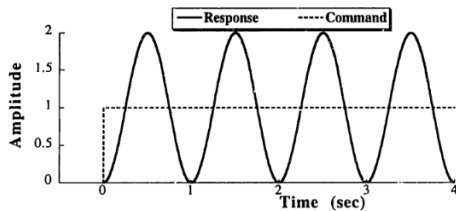
2.6. Controle Feedforward

O controle *Feedforward* é uma abordagem utilizada em sistemas automáticos, destinada a antecipar e corrigir possíveis perturbações que possam interferir em um sistema a partir de um modelo da planta.

- ▶ Possui característica preditiva ao invés de corretiva.
- ▶ Não necessita de sensores e outros componentes adicionais.
- ▶ Impressão 3D possui poucas interferências externas à própria impressora.

2.7. Input Shaping

Comparação da resposta ao degrau e da resposta a escada



Fonte: Adaptado de SINGHOSE, 1997

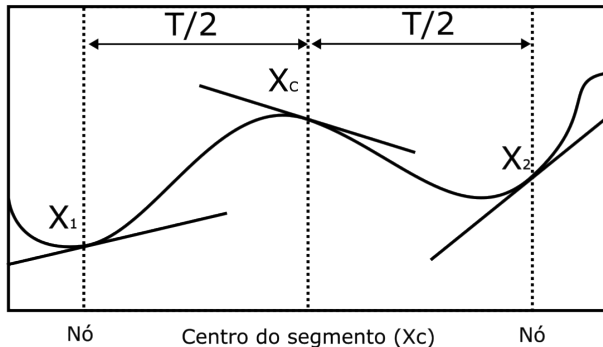
2.8. Espaço de Estados

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k/m & c/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \quad (2)$$

2.9. Programação não linear

Ilustração Segmentação Cúbica



Fonte: Adaptado de HARGRAVES; PARIS, 1987

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2} + T \frac{f_1 - f_2}{8} \quad (3)$$

$$\dot{x}_c = -3 \frac{x_1 + x_2}{2T} + \frac{f_1 + f_2}{4} \quad (4)$$

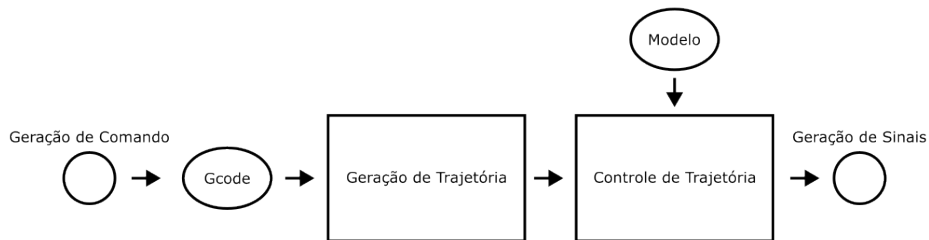
$$\Delta = f_c - \dot{x}_c \quad (5)$$

$$u_c = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (6)$$

3. Metodologia

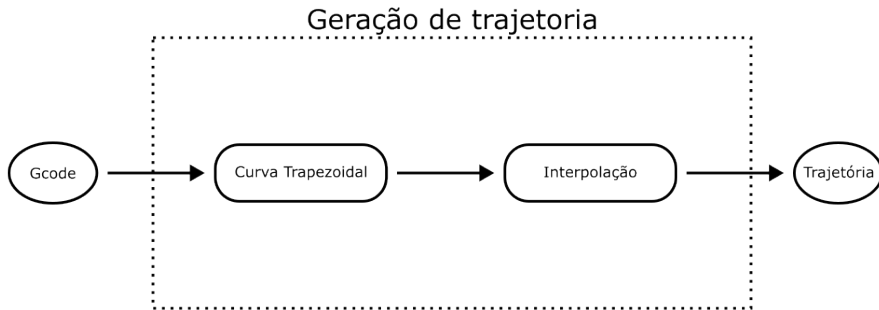
3. Metodologia

Fluxograma geral das etapas para o controle de trajetória



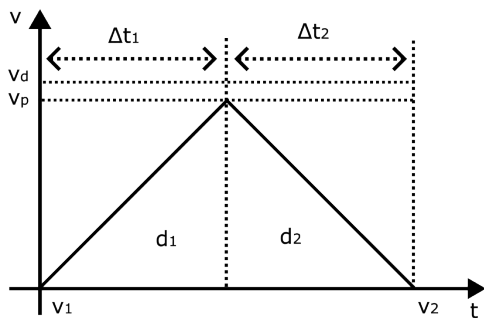
3.1. Geração de Trajetória

Curva de velocidade trapezoidal



3.1. Geração de Trajetória

Curva de velocidade triangular



$$v_p = \sqrt{\frac{(v_1^2 + v_2^2)}{2} + ad} \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{(v_p^2 - v_1^2)}{(2a)} \quad (8)$$

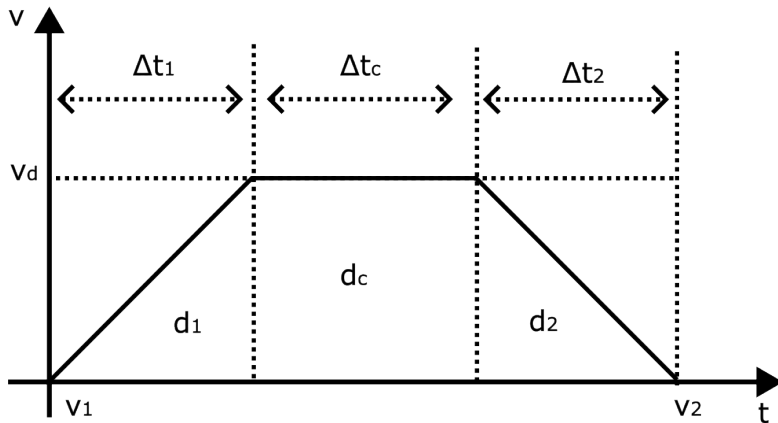
$$d_2 = \frac{(v_2^2 - v_p^2)}{(2a)} \quad (9)$$

$$t_1 = \frac{(v_p - v_1)}{a} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{(v_2 - v_p)}{a} \quad (11)$$

3.1. Geração de Trajetória

Curva de velocidade trapezoidal



3.1. Geração de Trajetória

$$d_1 = \frac{(v_d^2 - v_1^2)}{(2a)} \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{(v_2^2 - v_d^2)}{(2a)} \quad (13)$$

$$d_c = d - (d_1 + d_2) \quad (14)$$

$$\Delta t_1 = \frac{(v_d - v_1)}{a} \quad (15)$$

$$\Delta t_2 = \frac{(v_2 - v_d)}{a} \quad (16)$$

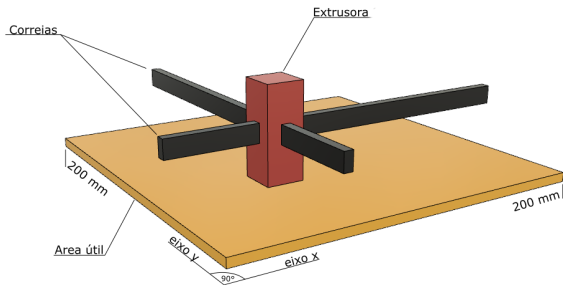
$$\Delta t_c = \frac{d_c}{v_d} \quad (17)$$

3.2. Modelagem Dinâmica de uma Impressora 3D

- ▶ Correias definidas como uma combinação de mola e amortecedor.
- ▶ Simplificação da extrusora como corpo rígido e uniforme.
- ▶ Limites de movimento de 0 a 200 mm para os eixos X e Y.
- ▶ Impressora cartesiana, eixos ortogonais e independentes.
- ▶ O estado inicial dos pontos relevantes parte do repouso.

3.2. Modelagem Dinâmica de uma Impressora 3D

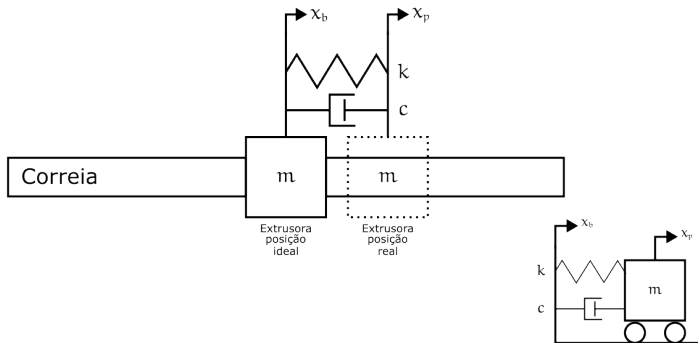
Modelo simplificado impressora 3D



3.2. Modelagem Dinâmica de uma Impressora 3D

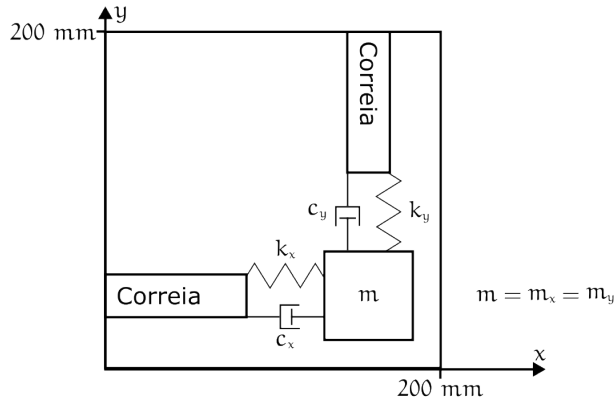
$$\ddot{x}_p = \frac{c}{m}(\dot{x}_b - \dot{x}_p) + \frac{k}{m}(x_b - x_p) \quad (18)$$

Modelagem de 1 eixo



3.2. Modelagem Dinâmica de uma Impressora 3D

Modelagem dos eixos x e y



3.2. Modelagem Dinâmica de uma Impressora 3D

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (19)$$

$$\zeta = \frac{c}{2mk} \quad (20)$$

$$\ddot{x}_p = 2\zeta\omega(\dot{x}_b - \dot{x}_p) + \omega^2(x_b - x_p) \quad (21)$$

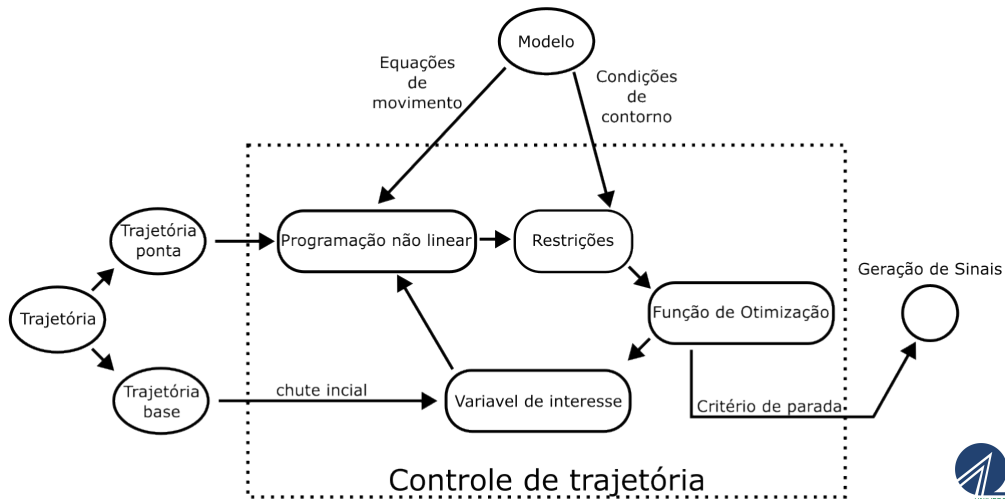
3.3. Representação em Espaço de Estados

$$\dot{x} = A * x + B * u \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_x^2 & 0 & -2\zeta_x\omega_x & 0 \\ 0 & -\omega_y^2 & 0 & -2\zeta_y\omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_x^2 & 0 & 2\zeta_x\omega_x & 0 \\ 0 & \omega_y^2 & 0 & 2\zeta_y\omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} \quad (23)$$

3.4. Controle de Trajetória

Fluxograma Controle de Trajetória



3.5. Restrições

- ▶ Aplica o modelo dinâmico através da programação não linear, minimizando o desvio calculado pela mesma.
- ▶ Define o estado inicial e final.
- ▶ Aplica os limites de movimento.
- ▶ Define o caminho desejado.

3.6. Função de otimização

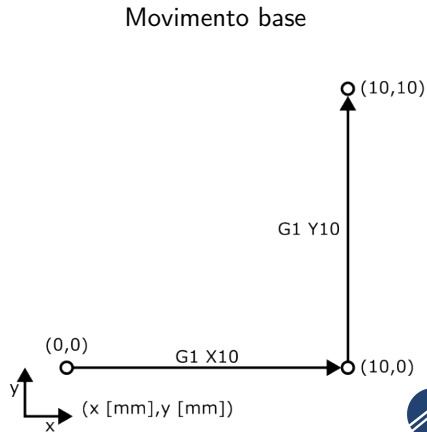
- ▶ Utiliza o algoritmo de interior-point (encontrando o gradiente da função no ponto) para minimizar o descumprimento das restrições através da modificação da variável de interesse.
- ▶ Avança iterativamente na direção do gradiente.
- ▶ Define os critérios de parada.

4. Resultados

4. Resultados

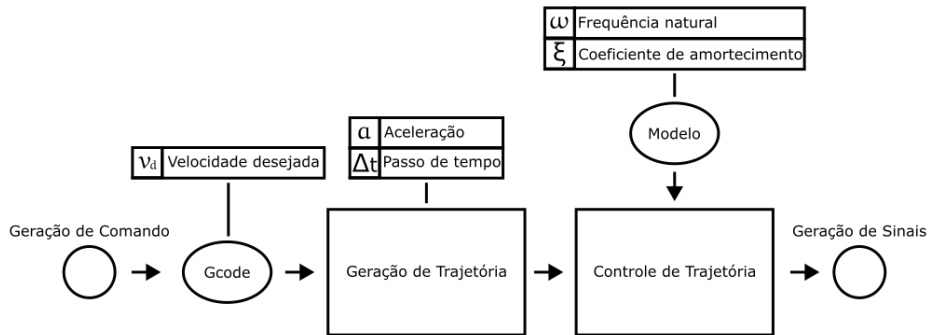
Utilização do método de Runge-Kutta para comparação dos efeitos das trajetória da base (com controle e sem controle) na trajetória da ponta (bico da impressora).

- Sequência de movimentos para as simulações.



4. Resultados

Fluxograma geral com os parâmetros.



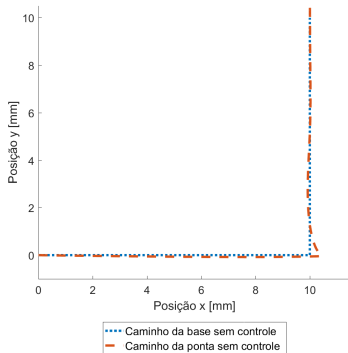
4.1. Simulação Referência

Tabela: Valores dos parâmetros utilizados na simulação referência.

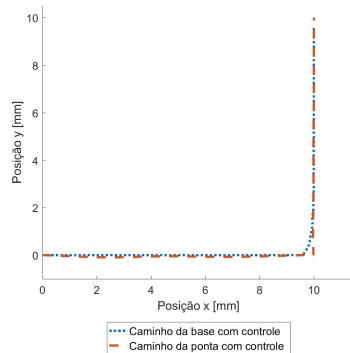
Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência	100	rad/s
Coefficiente de amortecimento	0,5	-
Aceleração base	5000	mm/s^2
Velocidade desejada	100	mm/s
Passo de tempo	0,005	s

4.2. Resultados da Simulação Referência

Caminhos da ponta e da base.



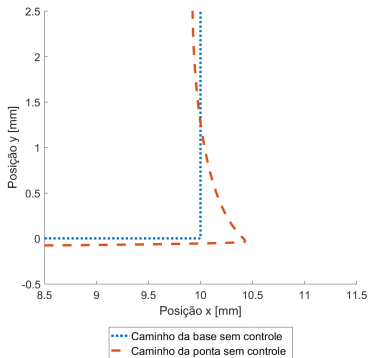
(a) Sem controle.



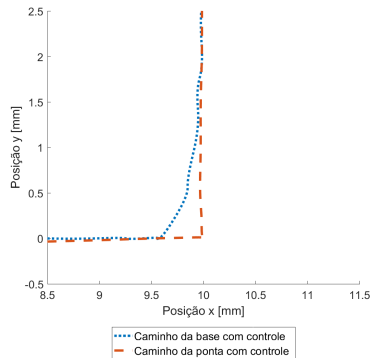
(b) Com controle.

4.2. Resultados da Simulação Referência

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento



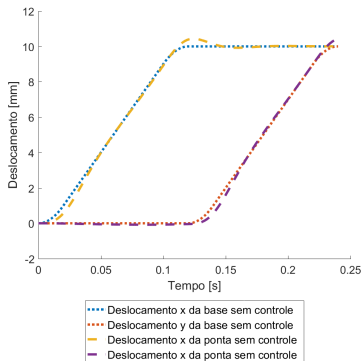
(a) Sem controle.



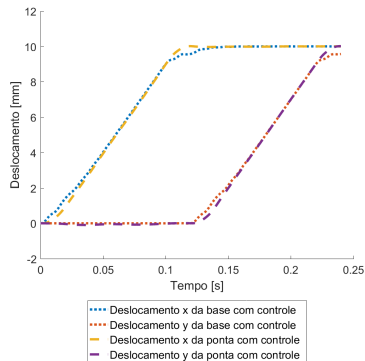
(b) Com controle.

4.2. Resultados da Simulação Referência

Deslocamentos da ponta e da base.



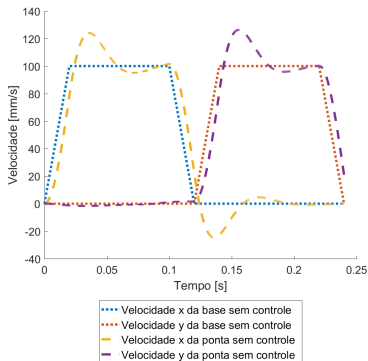
(a) Sem controle.



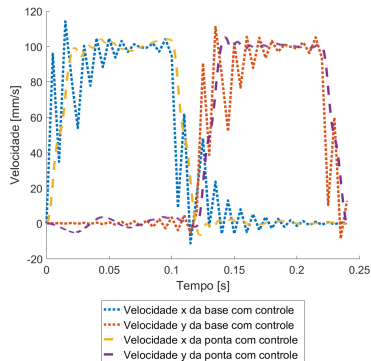
(b) Com controle.

4.2. Resultados da Simulação Referência

Velocidades da ponta e da base.



(a) Sem controle.



(b) Com controle.

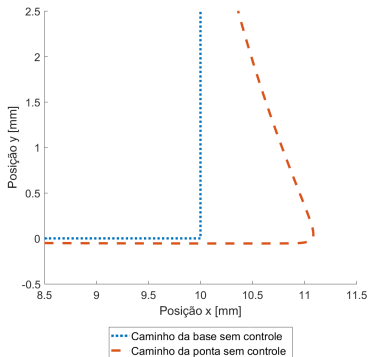
4.3. Simulação com Parâmetros Variados

Tabela: Parâmetros utilizados nas simulações.

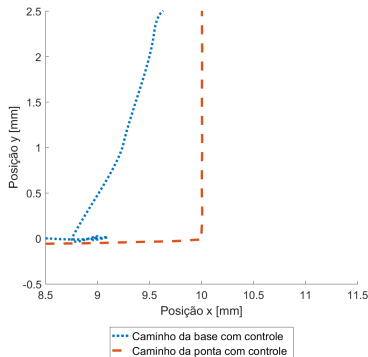
Caso	Parâmetro	Valor A	Valor B	Unidade
1	Frequência	50	200	rad/s
2	Coeficiente de amortecimento	0	1	-
3	Aceleração base	1000	10000	mm/s^2
4	Velocidade desejada	50	200	mm/s
5	Passo de tempo	0,1	0,001	s

4.4. Simulação - Variação da Frequência Natural (50rad/s - 200rad/s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (A).



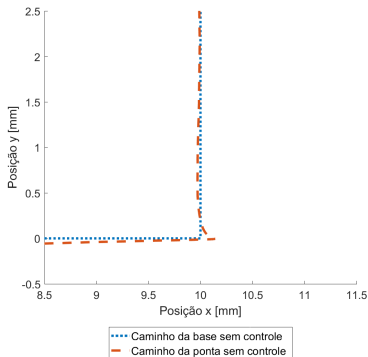
(a) Sem controle.



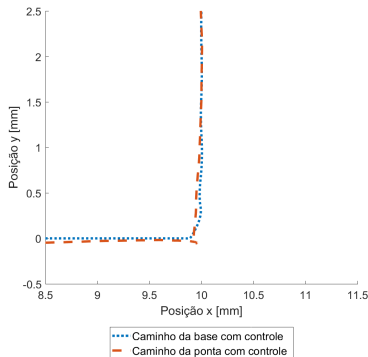
(b) Com controle.

4.4. Simulação - Variação da Frequência Natural (50rad/s - 200rad/s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (B)



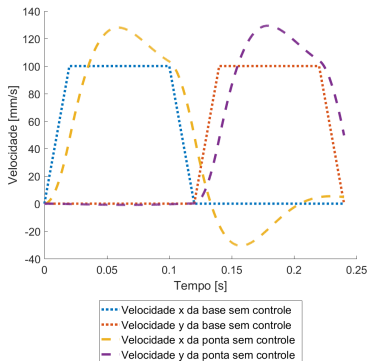
(a) Sem controle.



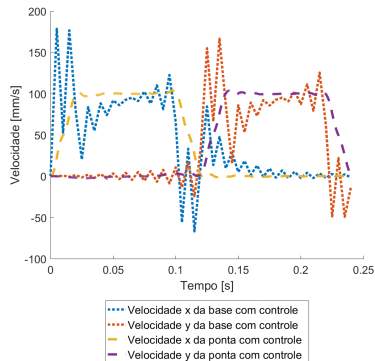
(b) Com controle.

4.4. Simulação - Variação da Frequência Natural (50rad/s - 200rad/s)

Velocidades da ponta e da base (A).



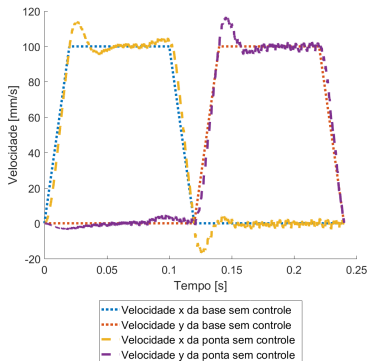
(a) Sem controle.



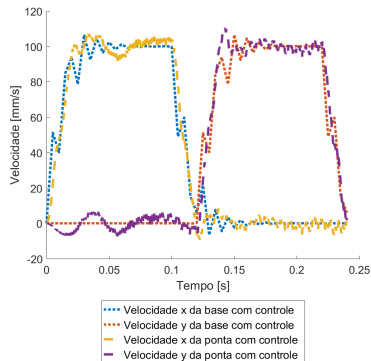
(b) Com controle.

4.4. Simulação - Variação da Frequência Natural (50rad/s - 200rad/s)

Velocidades da ponta e da base (B).



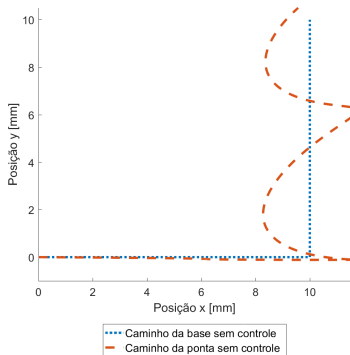
(a) Sem controle.



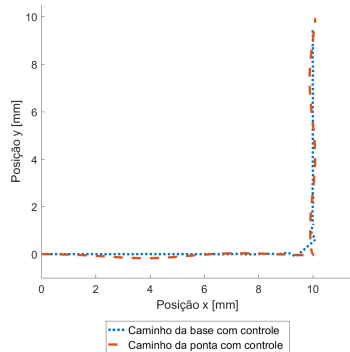
(b) Com controle.

4.5. Simulação - Variação do Coeficiente de Amortecimento (0 - 1)

Caminhos da ponta e da base (A).



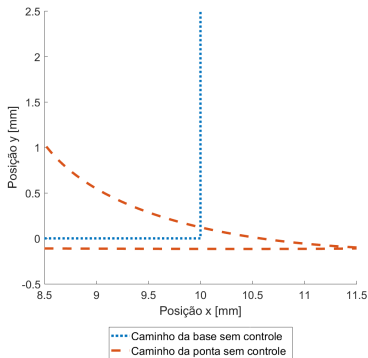
(a) Sem controle.



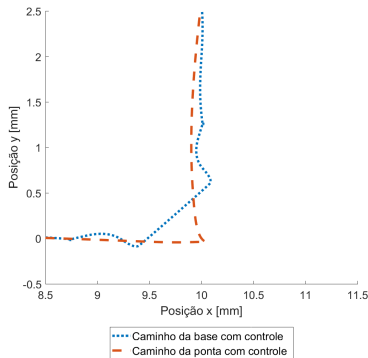
(b) Com controle.

4.5. Simulação - Variação do Coeficiente de Amortecimento (0 - 1)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (A)



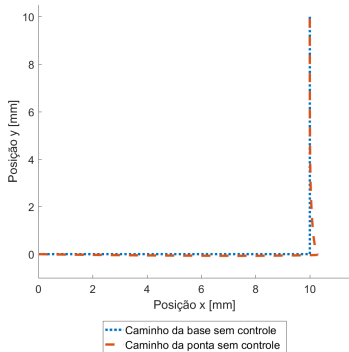
(a) Sem controle.



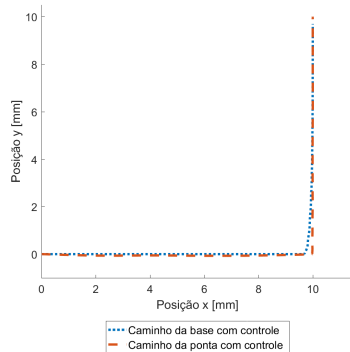
(b) Com controle.

4.5. Simulação - Variação do Coeficiente de Amortecimento (0 - 1)

Caminhos da ponta e da base (B).



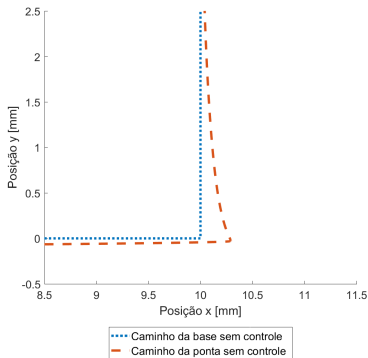
(a) Sem controle.



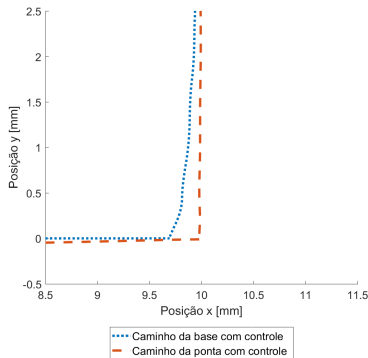
(b) Com controle.

4.5. Simulação - Variação do Coeficiente de Amortecimento (0 - 1)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (B)



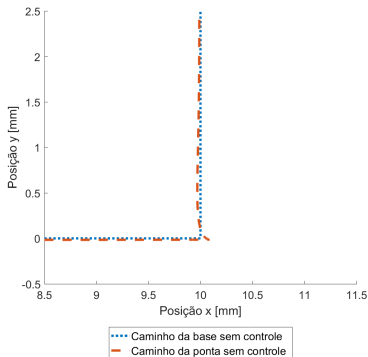
(a) Sem controle.



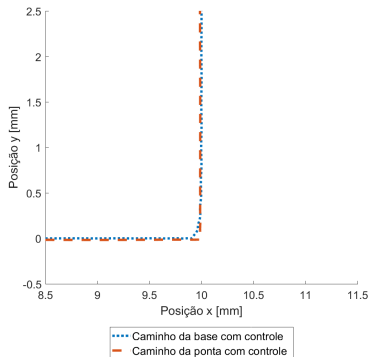
(b) Com controle.

4.6. Simulação - Variação na Aceleração (1000mm/s^2 - 10000mm/s^2)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (A)



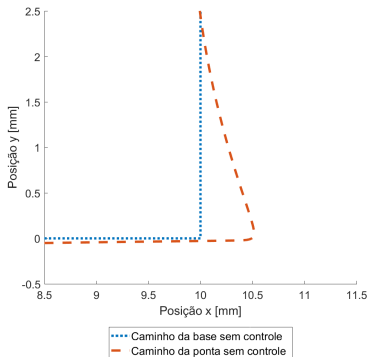
(a) Sem controle.



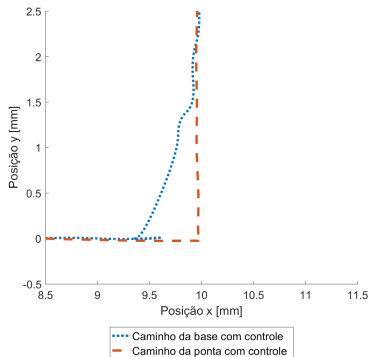
(b) Com controle.

4.6. Simulação - Variação na Aceleração (1000mm/s^2 - 10000mm/s^2)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (B)



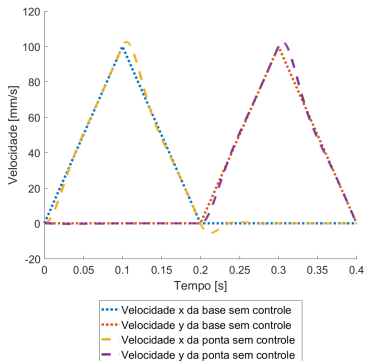
(a) Sem controle.



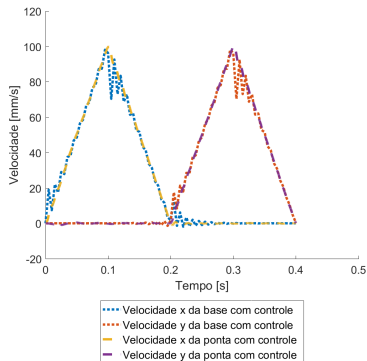
(b) Com controle.

4.6. Simulação - Variação na Aceleração (1000mm/s^2 - 10000mm/s^2)

Velocidades da ponta e da base (A).



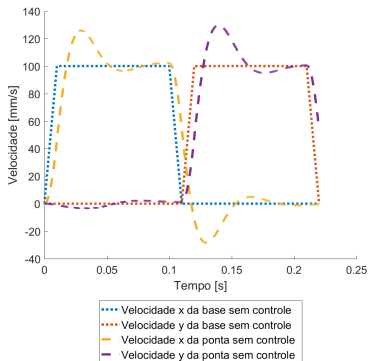
(a) Sem controle.



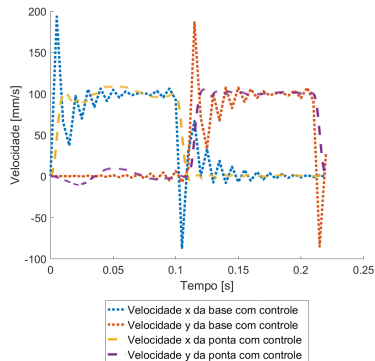
(b) Com controle.

4.6. Simulação - Variação na Aceleração (1000mm/s^2 - 10000mm/s^2)

Velocidades da ponta e da base (B).



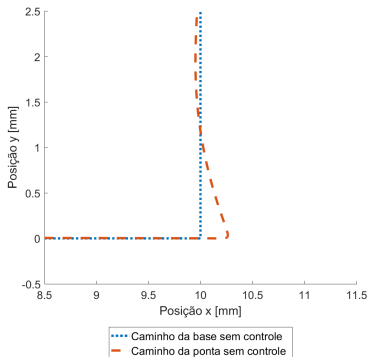
(a) Sem controle.



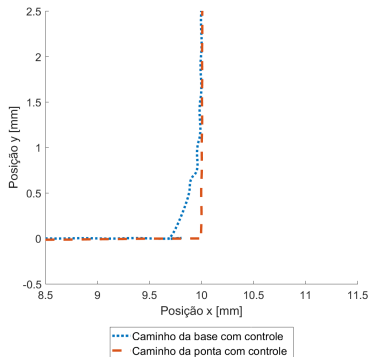
(b) Com controle.

4.7. Simulação - Variação da Velocidade desejada (50mm/s - 200mm/s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (A)



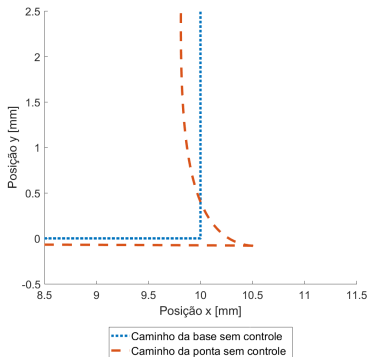
(a) Sem controle.



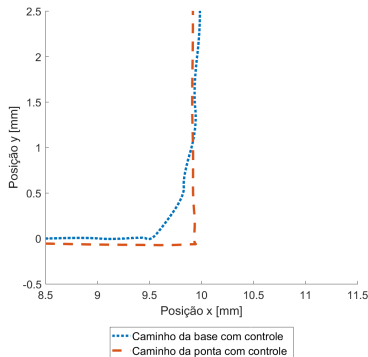
(b) Com controle.

4.7. Simulação - Variação da Velocidade desejada (50mm/s - 200mm/s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (B)



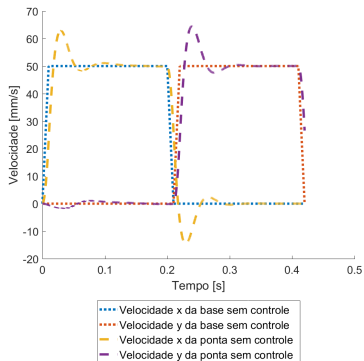
(a) Sem controle.



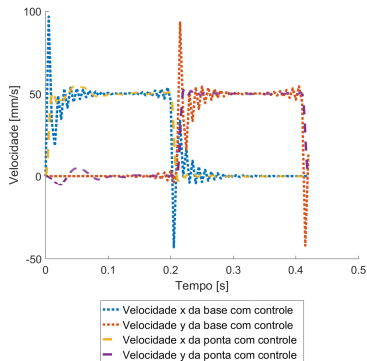
(b) Com controle.

4.7. Simulação - Variação da Velocidade desejada (50mm/s - 200mm/s)

Velocidades da ponta e da base (A).



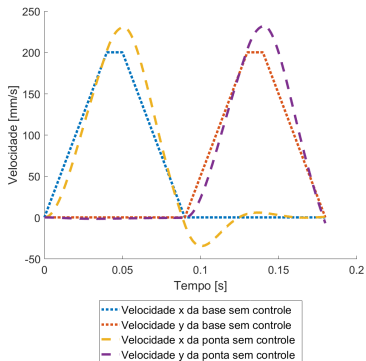
(a) Sem controle.



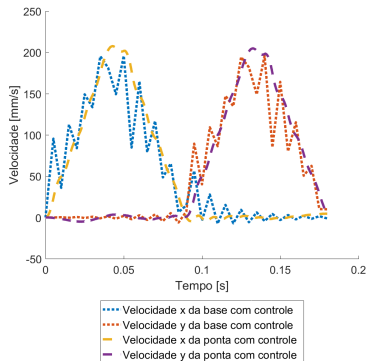
(b) Com controle.

4.7. Simulação - Variação da Velocidade desejada (50mm/s - 200mm/s)

Velocidades da ponta e da base (B).



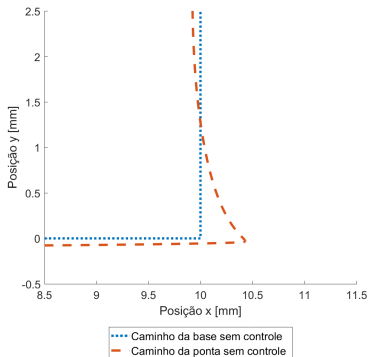
(a) Sem controle.



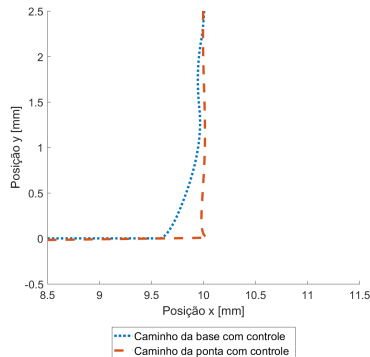
(b) Com controle.

4.8. Simulação - Variação do Passo de tempo (0,1s - 0,001s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (A)



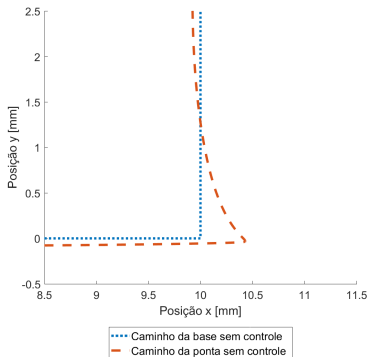
(a) Sem controle.



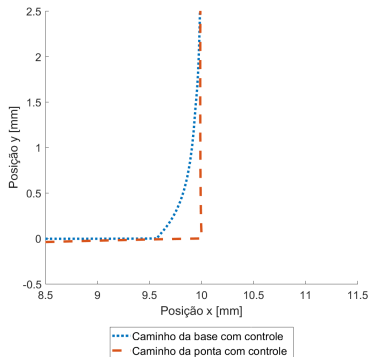
(b) Com controle.

4.8. Simulação - Variação do Passo de tempo (0,1s - 0,001s)

Caminhos da ponta e da base - Detalhamento (B)



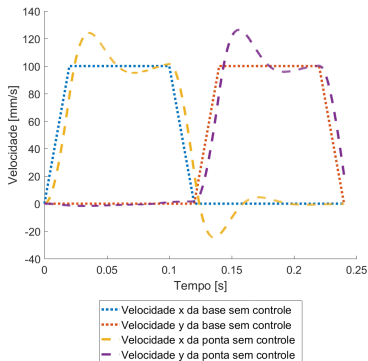
(a) Sem controle.



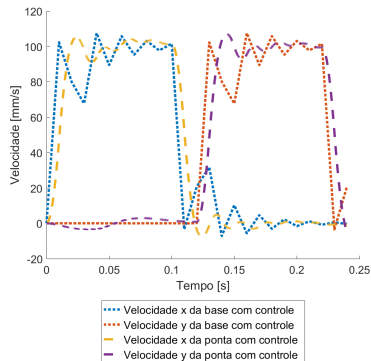
(b) Com controle.

4.8. Simulação - Variação do Passo de tempo (0,1s - 0,001s)

Velocidades da ponta e da base (A).



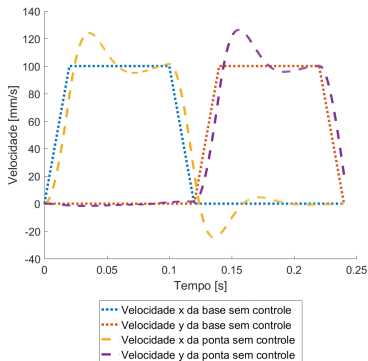
(a) Sem controle.



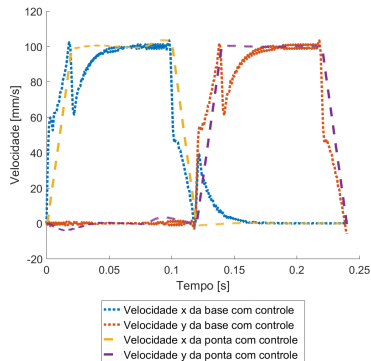
(b) Com controle.

4.8. Simulação - Variação do Passo de tempo (0,1s - 0,001s)

Velocidades da ponta e da base (B).



(a) Sem controle.




(b) Com controle.


5. Conclusão


5. Conclusão

- ▶ A implementação do método demonstrou uma diminuição notável no desvio do caminho da ponta quando comparado ao caminho simulado sem controle de trajetória.
- ▶ Os resultados obtidos por meio de simulações confirmaram a capacidade do controle em atenuar as complexidades dinâmicas do sistema.
- ▶ Uma possível melhoria é a utilização de diferentes passos de tempo para reduzir a carga computacional, através de chutes iniciais melhores.



 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.

 HARGRAVES, C. R.; PARIS, S. W. Direct trajectory optimization using nonlinear programming and collocation. **Journal of guidance, control, and dynamics**, v. 10, n. 4, p. 338–342, 1987.

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