



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Colegiado do curso de Engenharia de Controle e
Automação - CECAU



Ênio Lopes Júnior

Implementação de estratégias de controle em uma impressora 3D

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2017

Ênio Lopes Júnior

Implementação de estratégias de controle em uma impressora 3D

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Medeiros Freitas, Dr.

Coorientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio, Dr.

Ouro Preto, 2017

L864i Lopes Júnior, Ênio .
Implementação de estratégias de controle em uma impressora 3D
[manuscrito] / Ênio Lopes Júnior. - 2017.

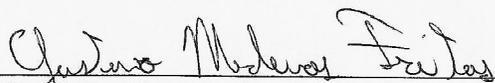
63f.: il.: color; tabs.

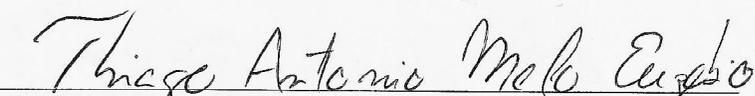
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

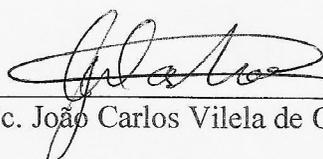
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

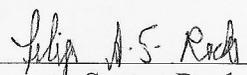
1. Impressoras (Processamento de dados) - Impressão 3D. 2. Sistemas de controle ajustavel - Controle PID. 3. Impressoras - Seguimento de trajetórias. I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Euzébio, Thiago Antonio Melo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

Monografia defendida e aprovada, em 23 de fevereiro de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:


Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas - Orientador


Prof. Dr. Thiago Antônio Melo Euzébio - Co-orientador


Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro – Professor Convidado


Filipe Augusto Santos Rocha ; Eng. Convidado

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Enio e Suely, por todo apoio, compreensão, incentivo e educação.

À minha namorada, Jessica, por todo amor, companheirismo e torcida, sua presença foi imprescindível em diversos momentos.

Aos meus irmãos, Leonardo e Priscila, por estarem sempre presentes e torcendo por mim.

A todos os meus amigos e familiares por toda torcida e apoio.

Aos meus orientadores: Gustavo, Thiago e Cocota por todo conhecimento transferido.

A todos os amigos do ITV, por toda ajuda e pelas trocas de experiências e conhecimentos.

À UFOP e a todos os professores pelo ensino gratuito e de qualidade proporcionado durante toda a minha graduação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

Resumo

A manufatura aditiva ou impressão 3D surgiu na década de 80 e tem sido cada vez mais utilizada em diversas áreas. Devido aos avanços tecnológicos dos últimos anos e ao projeto *Rep Rap*, a impressão 3D pessoal ou doméstica tornou-se uma realidade. A grande maioria das impressoras 3D de uso doméstico funciona em malha aberta, isto é, não há uma realimentação da posição do extrusor. Os erros de posição criam um *offset* nas camadas, causando a rejeição da impressão, perda de material e de tempo de produção. Neste trabalho foi feita a realimentação da posição planar da extrusora presente em uma impressora 3D doméstica, modelo Prusa i3; foram implementadas estratégias de controle em malha fechada para reduzir o erro de trajetória. Testes em malha aberta foram feitos e comparados as estratégias em malha fechada. O erro médio quadrático serviu como parâmetro para análise das estratégias utilizadas. A estratégia de controle PID, apresentou os melhores resultados, com um erro médio quadrático total equivalente a $0,0047 \text{ mm}^2$, que significa uma redução de mais de 93% se comparado a estratégia de controle em malha aberta.

Palavras-chaves: impressora 3D, seguimento de trajetórias, estratégias de controle, PID.

Abstract

Additive manufacturing or 3D printing was established in the 80's and it's becoming increasingly utilized in many different areas. In the last few years, personal 3D printing (or domestic 3D printing) has become a reality due to the technological advances and the great boost made by the Rep Rap project. The majority of the domestical 3D printers works in a open loop system, in other words, the 3D printer system does not receive position feedback from the extruder. The position errors induce an offset on the layers, causing print rejection and losses of material and producing time. This work proposes a planar position feedback control of a Prusa i3 3D printer extruder; closed loop control strategies were used to reduce the trajectory tracking error. Open loop tests were made and compared with closed loop strategies. The mean squared error was the parameter used to evaluate the results obtained. The PID controller showed the best results. This control strategy presented a total mean squared error of 0.0047 mm^2 , wich means a reduction greater than 93% with respect to the open loop strategy.

Keywords: 3D printer, trajectory tracking, control strategies, PID.

Lista de ilustrações

Figura 1	<i>Offset</i> de camadas causadas por distúrbios durante impressão.	13
Figura 2	Utilização do controle em malha fechada para correção do <i>Offset</i> de camadas.	13
Figura 3	Robô da Unimation. a) Uma vista do desenho da máquina contido na documentação da patente de Devol. b) O primeiro robô da Unimation trabalhando em uma fábrica da General Motors.	15
Figura 4	Manipulador robótico de 6 graus de liberdade da fabricante ABB, modelo IRB 2400.	16
Figura 5	Robôs não terrestres. a) Robô autônomo subaquático operado pelo Centro Australiano para Robôs de Campo. b) Veículo aereo não tripulado do tipo Global Hawk pertencente a NASA.	16
Figura 6	Dois tipos diferentes de robôs móveis. a) Rover de marte. b) Robô humanóide Asimo, criado pela Honda.	17
Figura 7	Representação convencional das juntas de robôs.	18
Figura 8	Manipulador cartesiano e seu espaço de trabalho.	19
Figura 9	Diagrama de controle de velocidade de uma junta.	23
Figura 10	Esquema de controle cinemático de trajetória no espaço das juntas.	24
Figura 11	Esquema de controle cinemático de trajetória.	26
Figura 12	Linhas de campo e força entre dois dentes permeáveis magnéticamente.	28
Figura 13	Seção transversal de um motor de passo de relutância variável.	29
Figura 14	Seção transversal de um motor de passo de ímã permanente.	29
Figura 15	Seção transversal paralela ao eixo de um motor de passo híbrido com três estágios.	30
Figura 16	Relação entre as correntes nas bobinas e a direção dos campos magnéticos.	31
Figura 17	Degradação do torque ao se usar micropassos	33
Figura 18	Impressora 3D utilizada.	34
Figura 19	Driver de micropasso Pololu a4988	35
Figura 20	Estrutura do conjunto de transmissão: polia e correia	36
Figura 21	Conversão das intensidades de campo em posições.	37
Figura 22	Funcionamento do <i>encoder</i> NSE-5310	37
Figura 23	Suportes projetados para os <i>encoders</i>	38
Figura 24	Suporte projetado para as tiras de ímãs.	38
Figura 25	Suportes projetados para os eixos X (esq.) e Y (dir.).	39

Figura 26	Placa Arduino MEGA 2560.	40
Figura 27	Ganho em malha aberta para um processo com comportamento integrador com atraso. Modificado de (SKOGESTAD; GRIMHOLT, 2012).	41
Figura 28	Dinâmica modelada e dinâmica real do Eixo X.	42
Figura 29	Dinâmica modelada e dinâmica real do Eixo Y.	42
Figura 30	Malha de controle Feedforward	43
Figura 31	Malha de controle PID com ganho de realimentação K_0	44
Figura 32	Resultado controle em malha aberta para trajetória circular.	47
Figura 33	Trajetoária no eixo X para controle em malha aberta.	48
Figura 34	Erros no eixo X para controle em malha aberta.	48
Figura 35	Trajetoária no eixo Y para controle em malha aberta.	49
Figura 36	Erros no eixo Y para controle em malha aberta.	49
Figura 37	Resultado controle proporcional com malha <i>feedforward</i> para trajetória circular.	50
Figura 38	Trajetoária no eixo X para controle proporcional com malha <i>feedforward</i>	50
Figura 39	Erros no eixo X para controle proporcional com malha <i>feedforward</i>	51
Figura 40	Trajetoária no eixo Y para controle proporcional com malha <i>feedforward</i>	51
Figura 41	Erros no eixo Y para controle proporcional com malha <i>feedforward</i>	52
Figura 42	Resultado do controle PID para trajetória circular.	53
Figura 43	Trajetoária no eixo X para controle PID.	53
Figura 44	Erros no eixo X para controle PID.	54
Figura 45	Trajetoária no eixo Y para controle PID	54
Figura 46	Erros no eixo Y para controle PID.	55
Figura 47	Caixa projetada para controle de umidade do filamento	62
Figura 48	Caixa projetada para isolamento térmico	63

Lista de tabelas

Tabela 1	Parâmetros dos controladores PID	45
Tabela 2	Erros médios quadráticos para todos os ganhos testados no controlador P com malha <i>feedforward</i>	52
Tabela 3	Erros médios quadráticos para todas as configurações testadas no controlador PID.	55
Tabela 4	Erros médios quadráticos dos melhores resultados apresentados em cada estratégia de controle	55

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivos	14
1.3	Organização do trabalho	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Definição de robô	15
2.2	Modelagem de manipuladores robóticos	18
2.2.1	Cinemática	19
2.2.1.1	Cinemática Direta	20
2.2.1.2	Cinemática Inversa	20
2.2.1.3	Cinemática Diferencial e o Jacobiano	21
2.3	Controle cinemático	22
2.3.1	Controle cinemático no espaço das juntas	24
2.3.2	Controle cinemático de seguimento de trajetória no espaço de trabalho	24
2.4	Controladores PID	26
2.5	Desempenho de sistemas no domínio da frequência	27
2.6	Motores de passo	28
2.6.1	Motores de relutância variável	28
2.6.2	Motores de ímã permanente	29
2.6.3	Motores Híbridos	30
2.6.4	Erro de posição devido ao torque de carga	31
2.6.5	Micropasso em motores de passo	31
2.6.6	Controle de motores de passo em malha fechada	32
3	Método proposto	34
3.1	<i>Hardware</i> s utilizados: Prusa i3	34
3.1.1	<i>Drivers</i> de acionamento	35
3.1.2	Motores de passo e transmissão dos movimentos	35
3.1.3	Encoders	36
3.1.4	Arduino MEGA 2560	39
3.2	Softwares utilizados	40
3.2.1	MATLAB	40
3.3	Controle cinemático de trajetória aplicado a Impressora 3D	40
3.3.1	Modelagem da impressora 3D	41
3.3.2	Controle em malha aberta	43

3.3.3	Controlador proporcional (P) com malha <i>feedforward</i>	43
3.4	Controlador PID com método robusto de sintonia	44
3.4.1	Algoritmo de geração de trajetórias circulares	45
4	Experimentos e Discussão dos resultados	47
4.1	Controle em malha aberta	47
4.2	Controle P com malha <i>feedforward</i>	50
4.3	Controle PID com método robusto de sintonia	52
4.4	Análise Comparativa	55
5	Considerações finais	57
	Referências	58
	Anexos	60
	ANEXO A Descrição dos problemas encontrados ao longo da montagem da impressora 3D.	61
A.1	Problemas de entupimento do bico de extrusão	61
A.2	Erros dimensionais nas peças impressas	62
A.3	Isolamento térmico da impressora 3D	63
A.4	Adesão da peça à mesa de impressão	63

1 Introdução

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, surgiu no final da década de 80 devido as demandas de redução de custos na indústria. Percebeu-se que alterações feitas em um produto que já se encontrava na cadeia de produção e comercialização incorriam geralmente em altos custos, assim, um maior esforço e atenção foram direcionados à etapa desenvolvimento do produto. Desta forma, introduziu-se o conceito de prototipagem rápida, pois os processos de manufatura aditiva permitiam a criação de protótipos em questão de horas, o que facilitava muito na realização de testes, análise de possíveis falhas, dentre outras vantagens.

Em um processo de manufatura aditiva, sólidos tridimensionais são concebidos a partir de modelos digitais. Um software de modelagem 3D “fatia” o modelo de sólido em centenas ou até milhares de camadas horizontais. Cada uma dessas camadas pode ser vista como uma seção transversal horizontal do objeto em questão. Após a geração das camadas, um arquivo é enviado para uma impressora 3D, que realiza fisicamente a deposição das diversas camadas, uma sobre a outra, até que a concepção do sólido projetado chegue ao fim.

Nos últimos anos, a impressão 3D pessoal ou doméstica tornou-se uma realidade graças aos avanços tecnológicos que tornaram a tecnologia mais acessível. A impressão 3D pessoal é utilizada principalmente por hobistas e entusiastas, tendo iniciado um processo de crescimento considerável desde 2011. O projeto de código aberto *Rep Rap*¹ foi o grande responsável por impulsionar este mercado. Com baixos investimentos tornou-se possível montar impressoras 3D de uso pessoal. Diversos usuários que trabalham neste projeto compartilham seus conhecimentos de forma que outras pessoas possam utilizá-los para aprimorar suas impressoras.

Dentro da manufatura aditiva, existem diferentes métodos de fabricação de sólidos. A principal diferença entre eles é a forma na qual as camadas são construídas para criar o objeto final. Desde 2010 a ASTM (2010), ou Sociedade Americana de Testes e Materiais, desenvolveu uma série de padrões para classificar a manufatura aditiva, tendo assim criado 7 classificações diferentes com algumas subclassificações:

1. Fotopolimerização (*Vat Photopolymerisation*):

- a) Estereolitografia (*Stereolithography (SLA)*);

¹ *RepRap* é o nome dado ao projeto de código aberto fundado por Adrian Bowyer. Este projeto atua no desenvolvimento de impressoras 3D auto-replicáveis, cujos projetos são de uso e alteração livres

- b) Produção Contínua em Interface Líquida (*Continuous Liquid Interface Production* (CLIP)).
2. Jateamento de material (*Material Jetting*);
3. Jateamento de aglutinante (*Binder Jetting*);
4. Extrusão de material (*Material Extrusion*):
 - a) Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modelling* (FDM));
 - b) Fabricação por filamento fundido (*Fused Filament Fabrication* (FFF)).
5. Fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion*):
 - a) Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* (SLS)).
6. Laminação de folhas (*Sheet Lamination*);
7. Deposição de energia dirigida (*Directed Energy Deposition*).

A impressora 3D, objeto das aplicações de estratégias de controle neste trabalho, funciona através do processo de extrusão de material, utilizando a tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição [*Fused Deposition Modelling* (FDM)]². Nesta tecnologia, um filamento de plástico acondicionado em uma bobina alimenta um bocal de extrusão capaz de controlar o fluxo de material. O bocal é aquecido, derretendo o material, e é movimentado em um espaço tridimensional por meio do controle numérico computadorizado (CNC), que se comunica com um software de manufatura assistida por computador (CAM). O objeto é produzido pela extrusão do material fundido, que forma camadas à medida que o material se torna rígido após ter sido extrudado pelo bocal. Esta tecnologia usa normalmente dois tipos de plástico: Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o Poliacido Láctico (PLA), mas existem muitos outros materiais disponíveis com diversas propriedades diferentes.

1.1 Motivação

A grande maioria das impressoras 3D de uso doméstico funciona em malha aberta, isto quer dizer que o sistema que controla os movimentos da impressora não recebe sinais de realimentação que indicam onde o efetuador, neste caso o extrusor, está a cada instante. Logo, a impressora é apenas capaz de estimar esta posição, o que em um funcionamento convencional não acarreta em grandes erros. Porém, alguns eventos inesperados como atrito excessivo das partes móveis, perda de passo dos motores, folgas na correia, etc.,

² A expressão *Fused Deposition Modelling* e sua abreviação para FDM são marcas registradas pela Stratasy Inc. O termo exatamente equivalente, fabricação de filamentos fundidos (FFF), foi cunhado pelos membros do projeto *RepRap* para dar uma frase que seria legalmente irrestrita em seu uso.

podem fazer com que uma grande quantidade de erro seja introduzida no sistema. Os erros de posição introduzidos no sistema causam um *offset* nas camadas, isto é, elas são depositadas em uma posição diferente da posição alvo. Deste modo, a impressão é rejeitada, causando perda de material e de tempo de produção. Na Figura 1 é ilustrado este tipo de erro e na Figura 2 mostra-se como este erro pode ser corrigido por meio do controle de trajetórias em malha fechada.



Figura 1: *Offset* de camadas causadas por distúrbios durante impressão.

Fonte: (EXCHANGE, 2016).

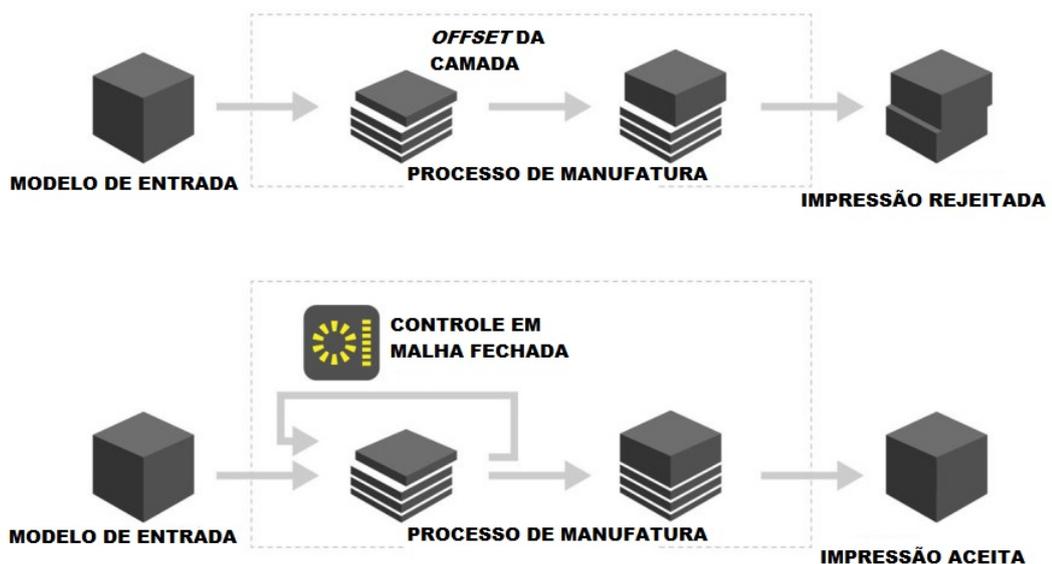


Figura 2: Utilização do controle em malha fechada para correção do *Offset* de camadas.

Modificado de: (ZMORPH, 2016)

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste na aplicação e análise de estratégias de controle de trajetória em uma impressora 3D. Deste modo, procura-se que a impressora realize o seguimento de trajetórias com um erro mínimo.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1, foi feita uma breve introdução ao tema que será abordado durante todo o trabalho.

No Capítulo 2, é feita uma revisão de literatura dos pontos principais utilizados como embasamento teórico para realização do presente trabalho. São abordados os conceitos da robótica, teoria de controle e motores de passo.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada, sendo detalhados os *hardwares* e *softwares utilizados*, bem como as modificações necessárias na estrutura da impressora para que as posições da extrusora fossem medidas. Além disso, é apresentada uma modelagem dos eixos X e Y da impressora, utilizada para sintonizar os controladores utilizados, também descritos neste capítulo.

No Capítulo 4, os resultados obtidos através da utilização dos controladores são apresentados.

No Capítulo 5, são feitas as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção serão abordados os principais temas e conceitos utilizados como embasamento teórico para a realização do presente trabalho.

2.1 Definição de robô

O termo "robô" foi criado durante a concepção de uma peça teatral de ficção científica em 1921, chamada de *Rossum's Universal Robots* e criada por Karel Apek. Os robôs eram andróides e a palavra "robô" se origina da palavra checa "robota" que significa escravidão.

A primeira patente para o que pode ser chamado de robô foi requerida em 1954 por George C. Devol e apresentada em 1961. O dispositivo era composto por um braço mecânico e uma garra, que se moviam em trilhos. A sequência de movimentos foi codificada na forma de padrões magnéticos armazenados em um tambor rotativo. A primeira companhia robótica, chamada de *Unimation* foi fundada por Devol e Joseph Engelberger em 1956, sendo seu primeiro robô industrial mostrado na Figura 3, (CORKE, 2011).

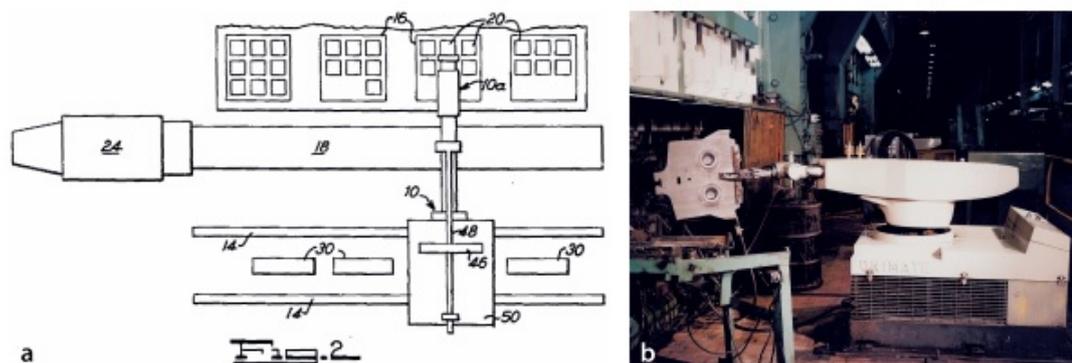


Figura 3: Robô da Unimation. a) Uma vista do desenho da máquina contido na documentação da patente de Devol. b) O primeiro robô da Unimation trabalhando em uma fábrica da General Motors.

Fonte: (CORKE, 2011, p. 2)

A visão original de Devol e Engelberger para manipuladores robóticos se tornou realidade e vários tipos diferentes de manipuladores robóticos, como por exemplo o manipulador mostrado na Figura 4, foram construídos e colocados trabalhando em tarefas tais como soldagem, pinturas, carga e descarga de máquinas, montagens eletrônicas,

empacotamento e paletização. O uso de robôs tem levado ao aumento da produtividade e melhorado a qualidade do produto. Ao invés de tirar empregos, eles têm ajudado a manter indústrias de manufatura em países cuja mão de obra é cara. Atualmente muitos dos produtos que compramos foram montados ou manipulados por um robô.



Figura 4: Manipulador robótico de 6 graus de liberdade da fabricante ABB, modelo IRB 2400.

Fonte: (CORKE, 2011, p. 2)

A primeira geração de robôs é agora uma subclasse da robótica conhecida como robôs de manufatura. Outras subclasses incluem robôs que fornecem serviços de limpeza, assistência pessoal ou reabilitação médica; robôs de campo que trabalham em contato com ambientes externos como os mostrados na Figura 5, robôs móveis (Figura 6) e robôs humanoides (Figura 6-b).



Figura 5: Robôs não terrestres. **a)** Robô autônomo subaquático operado pelo Centro Australiano para Robôs de Campo. **b)** Veículo aéreo não tripulado do tipo Global Hawk pertencente a NASA.

Fonte: (CORKE, 2011, p. 3)

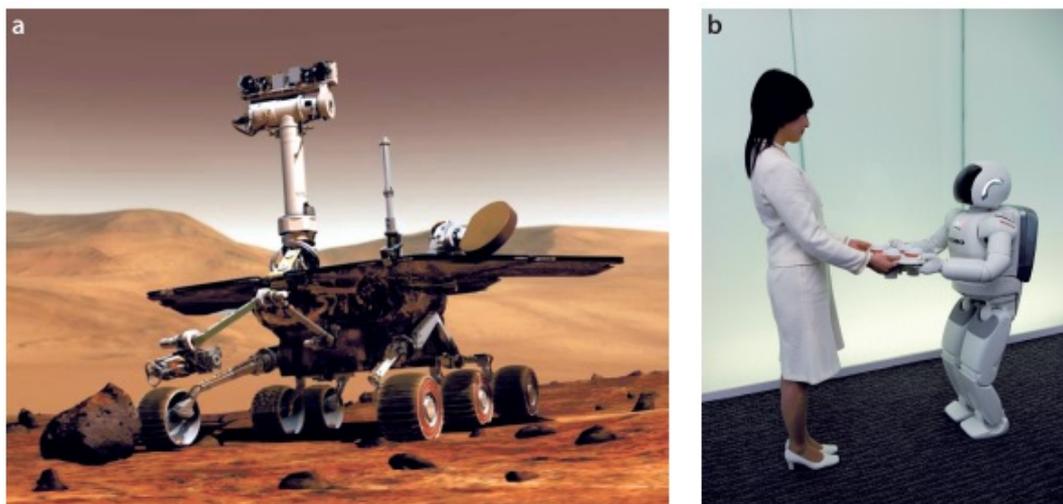


Figura 6: Dois tipos diferentes de robôs móveis. a) Rover de marte. b) Robô humanóide Asimo, criado pela Honda.

Fonte: (CORKE, 2011, p. 5)

Um robô de manufatura é tipicamente um manipulador na forma de braço em uma base fixa que executa tarefas repetitivas dentro de uma célula de trabalho local. Peças são apresentadas ao robô de forma ordenada, o que maximiza as características de alta precisão e velocidade inerentes aos robôs. Robôs de alta velocidade são perigosos e a segurança é garantida ao excluir-se pessoas do seu local de trabalho.

Segundo Corke (2011), o robô pode ser definido como uma máquina orientada a objetivos, capaz de sensoriar, planejar e agir. O robô sensoria o ambiente em seu entorno e relaciona estas informações a um objetivo para planejar alguma ação. Como exemplo, a ação pode ser mover a ferramenta de um braço robótico para pegar um objeto ou pode ser o movimento de um robô móvel até um determinado local.

O sensoriamento é algo crítico para robôs. Sensores proprioceptivos medem o estado do robô em si: o ângulo de suas juntas em um braço robótico, o número de revoluções da roda de um robô móvel ou a corrente consumida por um motor elétrico. Sensores exteroceptivos medem o estado do mundo com respeito ao robô. O sensor pode ser um simples interruptor em um robô de limpeza a vácuo para detectar colisões, pode ser um receptor de GPS que mede distâncias com relação a uma constelação satélite em órbita ou uma bússola que mede a direção do campo magnético da terra em relação a orientação do robô (CORKE, 2011).

2.2 Modelagem de manipuladores robóticos

Manipuladores robóticos são compostos de *links*, também chamados de elos, conectados por juntas formando assim uma cadeia cinemática. As juntas são tipicamente de rotação (revolução) ou lineares (prismáticas). Uma junta de revolução é como uma articulação e permite rotações entre dois elos. Uma junta prismática permite movimentos lineares entre dois elos. Denotamos juntas de revolução por R e juntas prismáticas por P, e podemos representá-las graficamente conforme mostrado na Figura 7.

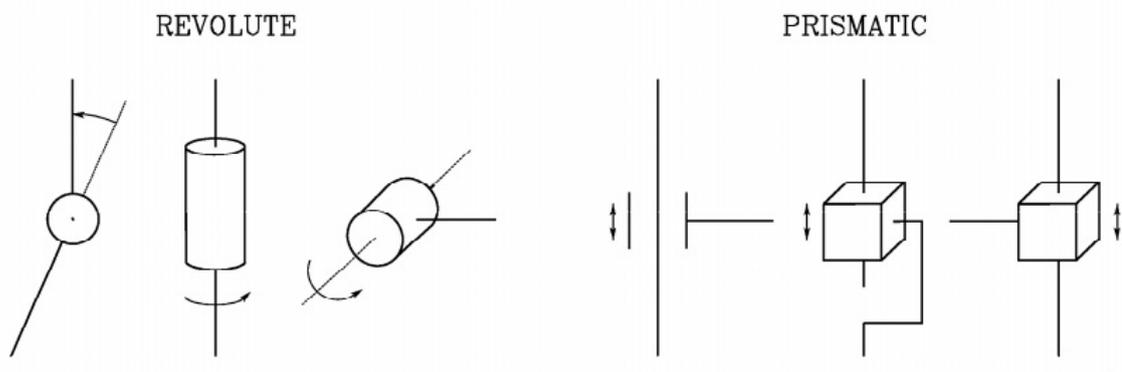


Figura 7: Representação convencional das juntas de robôs.

Fonte: (SICILIANO et al., 2009, p. 58)

A cadeia cinemática de um manipulador pode ser aberta ou fechada. Do ponto de vista topológico, uma cadeia cinemática é considerada aberta quando existe apenas uma sequência de elos que conecta os dois extremos da cadeia cinemática. Quando existem dois ou mais caminhos que conectam os dois extremos, denominamos o manipulador como sendo de cadeia cinemática fechada (SICILIANO et al., 2009).

Em manipuladores de cadeia cinemática aberta, cada junta (R ou P) adiciona um grau de liberdade ao manipulador. Por outro lado, em um manipulador de cadeia cinemática fechada, o número de graus de liberdade é inferior ao número de juntas.

Os manipuladores podem ser classificados de diversas formas. Uma das formas de classificação diz respeito geometria descrita pelo seu espaço de trabalho. O espaço de trabalho consiste no conjunto de todas as posições no espaço tridimensional que o efetuidor final de um manipulador consegue alcançar. Quando classificamos um manipulador quanto a geometria do seu espaço de trabalho, ele pode ser classificado como cartesiano, cilíndrico, esférico, *SCARA* ou antropomórfico.

A geometria cartesiana é formada por três juntas prismáticas cujos eixos são ortogonais entre si. Em vista da geometria simples, cada grau de liberdade corresponde a uma variável do espaço cartesiano. A estrutura cartesiana oferece uma boa rigidez

mecânica, além da precisão de posicionamento do pulso ser constante em todo o espaço de trabalho. O espaço de trabalho é um paralelepípedo retangular, conforme mostrado na Figura 8. A direção de aproximação deste tipo de manipulador é lateral ou superior (SICILIANO et al., 2009).

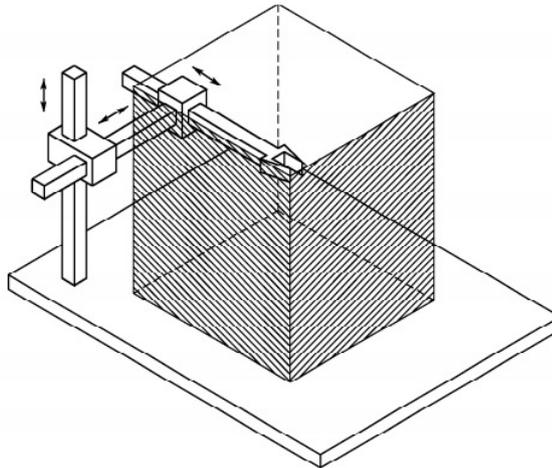


Figura 8: Manipulador cartesiano e seu espaço de trabalho.

Fonte: (SICILIANO et al., 2009, p. 5)

2.2.1 Cinemática

Cinemática é o ramo da mecânica que estuda o movimento de um corpo ou sistema de corpos desconsiderando-se a sua massa e as forças atuando sobre ele. Um manipulador de elos em série compreende uma cadeia de elos mecânicos e juntas. Cada junta pode mover seu elo externo em relação ao seu vizinho interno. Uma das extremidades da cadeia, chamada de base, é geralmente fixa e a outra é livre para mover-se no espaço, segurando a ferramenta ou efetuador final.

A formulação das relações de cinemática permite o estudo de três problemas chave da robótica, chamados de cinemática direta, cinemática inversa e cinemática diferencial. O problema da cinemática direta consiste em determinar uma forma sistemática e geral de descrever a posição do efetuador final como função da posição das juntas por meio de ferramentas da álgebra linear. Já a cinemática inversa consiste no problema inverso e sua solução é de fundamental importância para transformar uma pose desejada no efetuador em posições correspondentes no espaço das juntas. Diferentemente das cinemáticas direta e inversa que tratam de problemas relacionados a posições, a cinemática diferencial estabelece relações entre as velocidades das juntas e as velocidades do efetuador final.

2.2.1.1 Cinemática Direta

O objetivo da cinemática direta consiste em calcular a posição e orientação (pose) do efetuador em relação a um sistema de coordenadas fixo da base, em função das posições das juntas.

De forma clássica, as equações da cinemática direta para um manipulador de cadeia cinemática aberta são obtidas por meio da composição de movimentos de corpos rígidos, que consistem em rotações e translações. Cada junta é tratada como um corpo rígido individual.

Do ponto de vista da robótica, a impressora 3D utilizada possui uma geometria cartesiana. Pode-se obter a matriz de cinemática direta $F(\vec{q})$ a partir do produto entre as matrizes de transformação homogênea. Estas matrizes representam as poses de um corpo rígido de um sistema de coordenadas \mathbf{b} em relação a um sistemas de coordenadas \mathbf{a} e são do tipo:

$$T_b^a = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \vec{\mathbf{d}} \\ \vec{\mathbf{0}} & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad \mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \quad \vec{\mathbf{d}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}, \quad \vec{\mathbf{0}} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$$

Onde \mathbf{R} é a matriz de rotação, $\vec{\mathbf{d}}$ é o vetor de translação, $\vec{\mathbf{0}}$ é um vetor chamado de perspectiva e 1 é o fator de escala chamado de *bias*. Quando esta matriz descreve um movimento translacional, a matriz de rotação equivale à matriz identidade.

Desta forma através das matrizes T_1^0 , T_2^1 e T_3^2 , obtemos a matriz transformada homogênea da cinemática direta da impressora 3D, chamada de T_3^0 :

$$T_1^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_2^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_3^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_3^0 = F(\vec{q}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.2.1.2 Cinemática Inversa

De acordo com Siciliano et al. (2009), o problema da cinemática inversa consiste em determinar os valores das posições das juntas de um manipulador robótico em função da posição e orientação de um efetuador correspondente. A solução deste problema é de

fundamental importância para que se consiga transformar as especificações de trajetória, relacionadas ao efetuador em um espaço de trabalho, em posições das juntas que permitam a execução de um determinado movimento desejado. Porém, o problema de cinemática inversa é muito mais complexo, pelos seguintes motivos:

- As equações que devem ser resolvidas são em geral não-lineares, portanto nem sempre será possível encontrar uma solução expressa em uma forma fechada;
- Podem existir múltiplas soluções;
- Para um manipulador com cadeia cinemática fechada podem existir infinitas soluções;
- Pode-se não existir soluções admissíveis, em vista da estrutura cinemática do manipulador.

2.2.1.3 Cinemática Diferencial e o Jacobiano

A cinemática diferencial estabelece a relação entre as velocidades das juntas e as velocidades do efetuador de um manipulador robótico. Este mapeamento é descrito por uma matriz, chamada de matriz Jacobiana.

A matriz Jacobiana pode ser obtida de duas formas:

- Através da derivação da matriz que descreve a cinemática direta em função das posições da junta de um dado manipulador. O Jacobiano obtido é chamado de Jacobiano Analítico;
- Através de uma matriz de transformação que representa a pose do efetuador em relação à base do manipulador. O Jacobiano obtido é chamado de Jacobiano Geométrico.

Após o cálculo do Jacobiano através de alguma das formas citadas, as velocidades angular (\vec{w}) e linear (\vec{p}) do efetuador são relacionadas às velocidades das juntas (\vec{q}) através da Equação 2.1.

$$\begin{pmatrix} \dot{\vec{p}} \\ \dot{\vec{w}} \end{pmatrix} = J(\vec{q})\dot{\vec{q}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}, \quad J(\vec{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times n}, \quad \dot{\vec{q}} \in \mathbb{R}^{n \times 1} \quad (2.1)$$

onde n refere-se ao número mínimo de graus de liberdade do manipulador.

O Jacobiano está presente em diversos aspectos da manipulação robótica, tais como: planejamento e execução de trajetórias suaves, determinação de configurações singulares, determinação de algoritmos de controle cinemático e na análise de redundâncias.

A cinemática diferencial também é útil para determinar o relacionamento entre as forças e torques aplicados nas juntas e as forças e momentos aplicados no efetuador final em configurações de equilíbrio estático. Tal relação é muito útil para o design mecânico da estrutura, escolha de atuadores, determinação das estratégias de controle e simulação computacional do movimento do manipulador (SICILIANO et al., 2009).

A estrutura mecânica do manipulador tem uma influência no estilo de controle utilizado. O problema de controle em um robô cartesiano difere-se substancialmente do problema de controle para um robô antropomórfico. No caso da impressora 3D, seu Jacobiano pode ser representado por:

$$J(\vec{q}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pode-se observar que, se comparada a um manipulador de 6 graus de liberdade, a matriz Jacobiana reduziu sua dimensão para 3×3 . Isto ocorre devido a ausência de juntas de rotação na cadeia cinemática da impressora. Assim, cada junta da impressora é responsável pela velocidade de apenas um eixo de movimentação do efetuador.

2.3 Controle cinemático

O controle cinemático de um manipulador robótico pode ser dividido em dois sub-problemas:

- Problema de regulação: No problema de regulação o controle cinemático busca mapear uma referência de posição x_d e utilizar uma estratégia de controle adequada com o intuito de minimizar o erro de posição. É importante ressaltar que em problemas de regulação não existem restrições temporais para que a posição alvo seja alcançada, logo um controlador com ganho proporcional K é suficiente para quando $t \rightarrow \infty$ o erro de posição tenda a zero $e \rightarrow 0$;
- Problema de seguimento de trajetória: Este tipo de problema associa restrições temporais a um conjunto de posições $x_d(\vec{t}) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ que devem ser mapeadas pelo controlador, de forma que cada posição possui uma restrição temporal própria. A este conjunto de posições associados à restrições temporais dá-se o nome de trajetória. Neste problema, a minimização do erro é desejada, porém devem ser respeitadas as restrições de tempo.

A escolha do subproblema a ser abordado varia de acordo com o que é considerado mais crítico para uma determinada aplicação: caso erros dimensionais forem mais críticos

do que erros temporais, o problema de regulação pode ser a escolha mais adequada, caso contrário, o seguimento de trajetórias deve ser abordado.

Para um problema geral de controle cinemático, partindo-se da Equação 2.1, define-se $\dot{\vec{q}}$ como sinal de controle. Isto é possível pois a maioria dos manipuladores possuem uma malha de controle de velocidade a nível de juntas. A Figura 9 ilustra uma possível malha a nível de juntas.

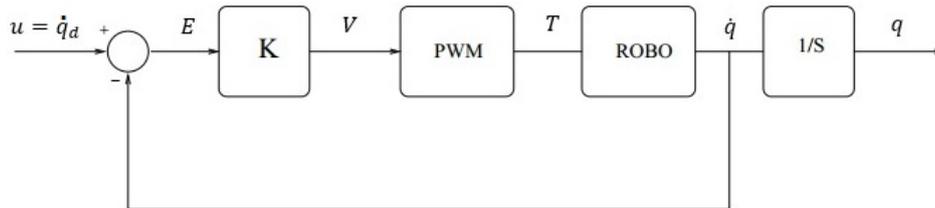


Figura 9: Diagrama de controle de velocidade de uma junta.

Fonte: (SICILIANO et al., 2009, p. 5)

Caso o controlador possua um alto ganho K , de forma que $K \rightarrow \infty$, tem-se que $e \rightarrow 0$ e consequentemente $u = \dot{\vec{q}}$. Assim, define-se a Equação 2.2.

$$\begin{pmatrix} \dot{\vec{p}} \\ \vec{w} \end{pmatrix} = J(\vec{q})u \quad (2.2)$$

Diversas estratégias podem ser empregadas para controlar um manipulador. A estratégia utilizada, assim como a forma em que foi implementada, tem uma influência significativa na performance do manipulador e assim na gama de possíveis aplicações.

O sistema de condução das juntas tem um efeito no tipo das estratégias de controle. Se um manipulador é atuado por motores elétricos com caixas de redução de relações muito altas, a presença destas tende a linearizar a dinâmica dos sistemas e assim ocorrer o desacoplamento das juntas em vista das reduções dos efeitos das não linearidades (SICILIANO et al., 2009).

As posições/trajetórias a serem alcançadas/seguidas pelo efetuador são tratadas em função de variáveis do efetuador em seu espaço operacional, enquanto as ações de controle são realizadas no espaço das juntas. Esse fato naturalmente nos leva a considerar dois tipos gerais de esquemas de controle, chamados de esquema de controle no espaço das juntas e esquema de controle no espaço operacional. Em ambos os esquemas, a estrutura de controle possui malhas fechadas que exploram os benefícios da realimentação, como diminuição dos erros e redução dos efeitos de distúrbios.

2.3.1 Controle cinemático no espaço das juntas

O problema de controle cinemático no espaço das juntas é feito de forma a controlar a trajetória de cada junta para que a trajetória do efetuador seja seguida adequadamente. No entanto, esta solução possui a desvantagem de o controlador ter que realizar a cinemática inversa para obter as posições alvo das variáveis das juntas que compõem a sua trajetória. As operações de cinemática inversa são custosas e conforme discutido anteriormente, pode-se não existir uma solução ou podem existir diversas soluções.

O controle cinemático no espaço das juntas é feito através de malhas de controle separadas, presentes em cada uma das juntas do robô. A Figura 10 mostra um diagrama de blocos que representa este esquema de controle em uma junta.

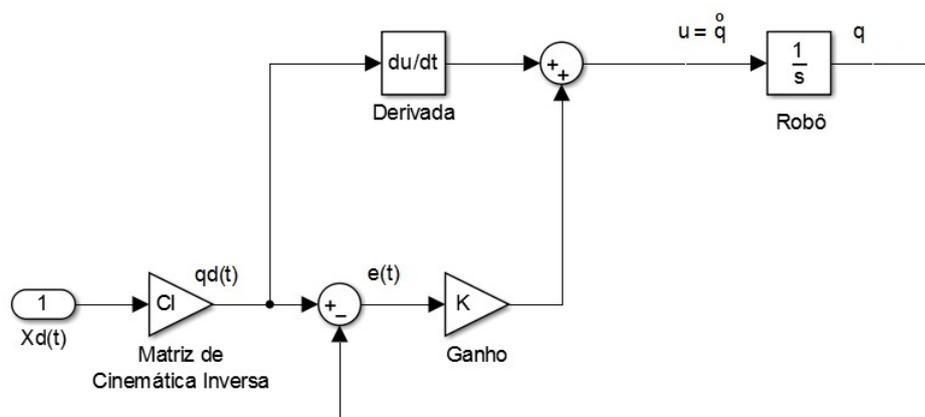


Figura 10: Esquema de controle cinemático de trajetória no espaço das juntas.

Na Figura 10, $X_d(t)$ representa a trajetória desejada do efetuador. Esta trajetória passa pela matriz de cinemática inversa e se transforma em uma trajetória de referência à nível de junta $q_d(t)$. Em seguida, $q_d(t)$ passa em uma malha *feedforward* que calcula a derivada do sinal ($\dot{q}_d(t)$) e também entra em um ponto de soma, de modo a calcular-se o erro de trajetória ($e(t)$). Neste erro é aplicado um ganho (K). Em seguida somam-se a parcela do erro e a parcela *feedforward*, resultando em um sinal de controle que corresponde a um sinal de velocidade da junta ($\dot{q}(t)$). Este sinal é aplicado na junta do robô, resultando em uma trajetória da junta ($q(t)$).

2.3.2 Controle cinemático de seguimento de trajetória no espaço de trabalho

No problema de controle no espaço operacional ou espaço de trabalho, a trajetória desejada do efetuador é dada como entrada do controlador. A saída do controlador é dada como velocidades das juntas, que ao serem aplicadas no robô resultam em posições de

junta, estas posições são lidas por *encoders* e, através da cinemática direta, obtém-se a posição atual do efetuador.

No presente trabalho, o controle cinemático de seguimento de trajetórias no espaço de trabalho foi escolhido como o mais adequado, visto que procura-se controlar a posição planar da extrusora de uma impressora 3D. Neste caso, é importante garantir que a extrusora não demore um tempo maior que o necessário em uma determinada posição, pois isto acarretará em uma deposição excessiva de plástico, criando falhas no sólido que está sendo impresso.

O problema de controle cinemático de um manipulador robótico pode ser abordado do ponto de vista da cinemática diferencial conforme mostra a Equação 2.3.

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, \dot{x} corresponde as velocidades do efetuador e, conforme visto anteriormente, o sinal de controle u é igual a velocidade das juntas \dot{q} , logo obtém-se a Equação 2.4.

$$\dot{x} = J(q)u \quad (2.4)$$

Considerando ainda que o sistema possua as especificações a seguir:

$$x(t) \rightarrow x_d(t) \quad (2.5)$$

$$e(t) = x_d(t) - x(t) \rightarrow 0 \quad (2.6)$$

Ou seja, a trajetória do efetuador durante o controle deve tender a uma trajetória alvo, conforme a Equação 2.5, e o erro de trajetória deve ser minimizado, conforme a Equação 2.6.

Pode-se perceber que a Equação 2.4 representa um sistema não-linear, assim é necessário definir uma lei de controle de linearize o sistema, isto é, que faça com que $\dot{x} = v$, a lei de controle escolhida para isto foi:

$$u = J(q)^{-1}v \quad (2.7)$$

Em que v é a nova variável manipulada intermediária. Para evitar erros de regime permanente não-nulos, a lei de controle escolhida para esta variável consiste de um termo proporcional, de ganho K_p adicionado a um termo de antecipação \dot{x}_d , chamado de *feedforward*, conforme a Equação 2.8.

$$v = \dot{x}_d + K_p(x_d - x) \quad (2.8)$$

Dessa forma o sistema em malha fechada possui a seguinte equação de erro:

$$\dot{e} + K_p e = 0 \quad (2.9)$$

Para $K_p > 0$, a solução da Equação 2.9 tende para zero quanto $t \rightarrow \infty$, ou seja, a equação de erro é exponencialmente estável. Quando a referência $x_d(t)$ mudar, o novo erro tende exponencialmente para zero, o que significa que a posição do efetuador segue sempre a posição referência num dado instante.

Considerando que a pose de um efetuador (p_{oe}, R_{oe}) seja obtida pelas transformações de cinemática direta da matriz $K(\vec{q})$, pode-se agora definir a malha de controle completa para o problema em questão. A Figura 11 mostra o diagrama do sistema de controle completo.

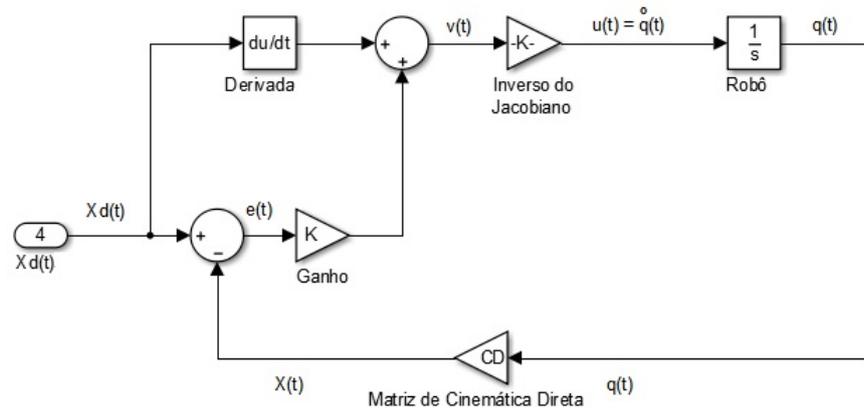


Figura 11: Esquema de controle cinemático de trajetória.

2.4 Controladores PID

Um controlador PID combina as ações de controle proporcional (P), integral (I) e derivativa (D) e é dado pela seguinte equação no domínio do tempo:

$$u(t) = Kp(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.10)$$

Ou pela seguinte função de transferência no domínio de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (2.11)$$

onde K_p representa o ganho proporcional, T_d representa o tempo derivativo, T_i representa o tempo integral e $e(t)$ é o sinal de erro.

A ação de controle proporcional atua de forma proporcional ao erro. Geralmente, a ação de controle proporcional usada de forma isolada leva o sistema controlado a possuir um erro em regime permanente. A medida que o ganho proporcional K_p aumenta, o erro em regime permanente tende a diminuir, porém, quanto maior o valor deste ganho, mais oscilatória será a resposta do sistema; de forma prática o valor máximo de ganho é determinado pela dinâmica do processo em questão (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

A ação de controle integral é capaz de garantir um erro nulo em regime permanente em qualquer situação. Mesmo que existam erros residuais muito pequenos, um sinal de controle de amplitude crescente será aplicado no sistema, até que este erro se torne nulo (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

A ação de controle derivativo responde à taxa de variação do erro num dado instante, produzindo uma correção significativa antes que o valor do erro se torne muito grande. Desta forma, o sistema tende a se tornar mais estável, além disso, a ação de controle derivativo introduz amortecimento no sistema, permitindo o uso de um valor maior de ganho proporcional (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

O controle derivativo nunca é utilizado sozinho, devido ao fato de atuar sobre a taxa de variação do erro e não sobre o próprio erro (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

2.5 Desempenho de sistemas no domínio da frequência

O desempenho de um sistema em malha fechada pode ser descrito através da análise de sua resposta no domínio da frequência. Algumas das grandezas utilizadas nesta análise são a margem de ganho e a margem de fase.

A margem de ganho indica o quanto se pode aumentar o ganho em malha aberta do sistema antes que o sistema em malha fechada se torne instável (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007).

A margem de fase indica o máximo de atraso de tempo (ou de fase), que pode ser inserido no sistema, a uma determinada frequência ω_c , antes que ele se torne instável (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007).

A Equação 2.12 mostra a relação entre o máximo atraso de tempo (θ_{max})[s], a margem de fase (MF)[rad] e a frequência (ω_c)[rad/s]:

$$\theta_{max} = \frac{MF}{\omega_c} \quad (2.12)$$

2.6 Motores de passo

Os motores de passo são motores cuja principal característica é a capacidade de transformar variações de fluxo comutadas em posições incrementais discretas no eixo do motor de forma muito precisa, a estas mudanças de posição se dá o nome de passo do motor (ACARNLEY, 2002).

O estator e o rotor dos motores de passo são compostos de materiais com alta permeabilidade magnética. Uma seção transversal de uma pequena parte de um motor de passo é mostrada no esquema da Figura 12. Um fluxo magnético atravessa o espaço entre os “dentes” do estator e rotor. De acordo com o tipo de motor de passo, a fonte do fluxo magnético pode ser um ímã permanente, bobinas que conduzem correntes, chamadas de enrolamentos ou uma combinação de ambos. No entanto, o efeito é o mesmo: os “dentes” exercem forças mesmo módulo mas em sentidos opostos, que tentam empurrar os dentes próximos um dos outros e minimizar o espaço livre entre eles (ACARNLEY, 2002).

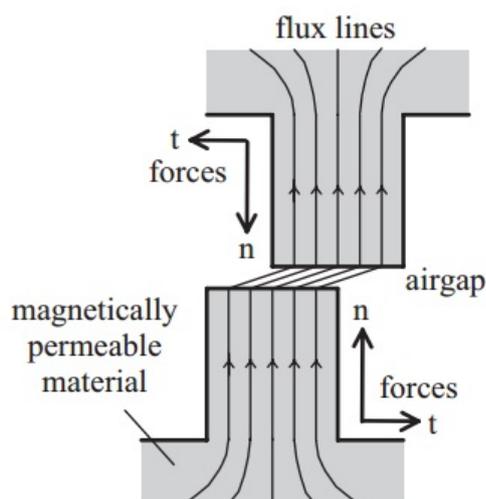


Figura 12: Linhas de campo e força entre dois dentes permeáveis magneticamente.

Fonte: (ACARNLEY, 2002, p. 2)

Os motores de passo podem ser classificados em três tipos básicos: motores de relutância variável, motores de ímã permanente e híbridos.

2.6.1 Motores de relutância variável

Os motores de relutância variável possuem o estator e rotor feitos de aço doce laminado, de forma que os campos magnéticos produzidos possam ser rapidamente alterados sem causar perdas excessivas no ferro. O campo magnético destes motores é produzido por bobinas colocadas nos dentes do estator, isto resulta em um torque estático nulo e em uma baixa inércia de rotor, impossibilitando sua aplicação onde existam altas carga

inerciais. A rotação destes motores ocorre quando os pólos do rotor são atraídos pelo fluxo magnético gerado no estator, de forma que o sistema se equilibre, buscando a menor relutância possível. A Figura 13 mostra uma vista da estrutura interna deste tipo de motor de passo (ACARNLEY, 2002).

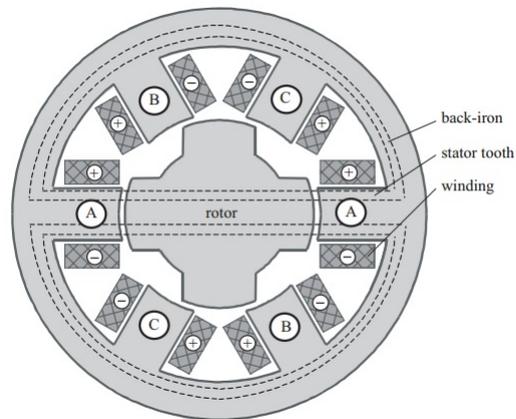


Figura 13: Seção transversal de um motor de passo de relutância variável.

Fonte: (ACARNLEY, 2002, p. 7)

2.6.2 Motores de ímã permanente

Os motores de ímã permanente possuem menor resolução de passo, o seu rotor é construído com ímãs permanentes e não possui dentes. Por serem magnetizados, os pólos do rotor oferecem um fluxo magnético mais intenso, conseqüentemente estes motores apresentam um maior torque se comparados aos motores de relutância variável. A Figura 14, ilustra este tipo de motor (ACARNLEY, 2002).

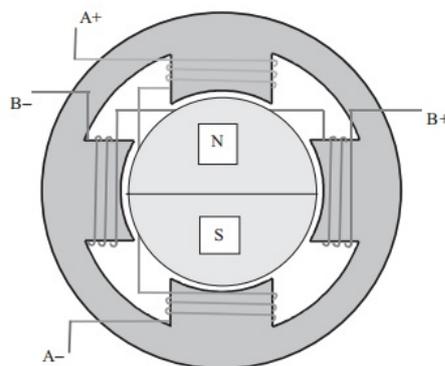


Figura 14: Seção transversal de um motor de passo de ímã permanente.

Fonte: (ACARNLEY, 2002, p. 12)

2.6.3 Motores Híbridos

Os motores híbridos combinam características dos motores de imã permanente e relutância variável: sua excitação é composta por bobinas e um imã permanente. As bobinas são colocadas nos pólos do estator e o imã permanente é montado no rotor. Tanto os pólos do estator quanto o rotor são dentados. O motor híbrido apresentado na Figura 15 possui 8 pólos no estator, onde cada pólo possui 2 dentes, totalizando 16 dentes, já o rotor possui 18 dentes.

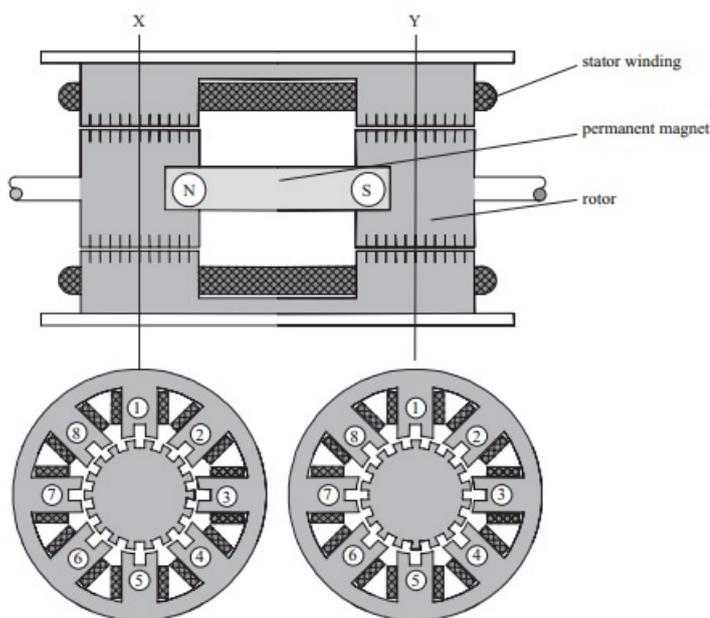


Figura 15: Seção transversal paralela ao eixo de um motor de passo híbrido com três estágios.

Fonte: (ACARNLEY, 2002, p. 4)

Os pólos do estator possuem bobinas que induzem o fluxo magnético de acordo com a posição que se deseja alcançar. No caso da Figura 15 existem duas bobinas (fases), cada uma das bobinas passa por 4 dos 8 polos do estator. A bobina A é colocada nos polos 1,3,5,7 e a bobina B é colocada nos pólos 2,4,6,8. Pólos sucessivos de uma mesma fase são colocados em sentidos opostos, por exemplo, se a bobina A(ou fase A) é excitada por uma corrente positiva, o campo magnético resultante é direcionado radialmente para fora nos polos 3 e 7, mas radialmente para dentro nos polo 1 e 5. Um esquema similar é usado para a bobina B e a situação para todo o motor é mostrada na Figura 16.

Uma pesquisa baseada em dados de fabricantes, feita por Harris et al. (1977), revela que a capacidade de produzir torque para um dado volume (tamanho) de motor é maior no motor híbrido do que em motores de relutância variável, logo o motor híbrido é uma escolha natural para aplicações que requeiram uma alta resolução de passo e alto torque em um espaço de trabalho de dimensões limitadas. Quando as bobinas do motor híbrido

Winding	Current direction	Pole field direction	
		Radially outward	Radially inward
A	positive	3, 7	1, 5
A	negative	1, 5	3, 7
B	positive	4, 8	2, 6
B	negative	2, 6	4, 8

Figura 16: Relação entre as correntes nas bobinas e a direção dos campos magnéticos.

Fonte: (ACARNLEY, 2002, p. 10)

não estão excitadas, o fluxo magnético produz um pequeno torque estático, que mantém o rotor na posição de passo atual. Apesar do torque estático ser menor que o torque nominal do motor com uma ou mais bobinas energizadas, isto pode ser vantajoso para aplicações onde a posição do rotor deve ser mantida durante uma falha de energia. Em contrapartida, uma vantagem que os motores de relutância variável apresentam em relação aos motores híbridos é o fato de a inércia mecânica destes motores ser menor, pois eles não possuem um ímã permanente no rotor, em muitos casos a inércia do rotor contribui em grande parte para a carga total inercial do motor e a redução desta inércia permite uma aceleração mais rápida.

2.6.4 Erro de posição devido ao torque de carga

Se um torque de carga externa é aplicado ao motor, então o motor deve adotar uma posição onde ele produza torque suficiente para balancear o torque de carga e manter o equilíbrio. O máximo torque que o motor é capaz de produzir, e conseqüentemente, a máxima carga que pode ser aplicada ao eixo do motor sob condições estáticas é igual ao torque de pico estático [*peak static torque*]. Se a carga excede este torque então o motor não pode manter a carga na posição demandada pela excitação de fase (ACARNLEY, 2002).

2.6.5 Micropasso em motores de passo

O micropasso é uma forma de acionamento de motores de passo que torna o movimento do rotor mais suave se comparado a modos de operação em passo completo ou meio passo. Motores de passo possuem um torque pulsante, isto é, este torque varia no decorrer do tempo, sendo que nos motores de passo esta variação segue a forma de uma onda senoidal. A Equação 2.13 representa o torque desenvolvido pelo motor (T) em

função do torque estático (T_H), da distância entre o fluxo do estator (f_s) e a posição do rotor (f_r).

$$T = T_H \times \text{sen}(f_s - f_r) \quad (2.13)$$

O acionamento por micropasso atua de forma a alterar o fluxo magnético do estator, causando o surgimento de diferentes níveis de corrente que passam a circular pelas bobinas, cada um desses níveis resulta em uma nova posição de parada. Logo, cria-se um fluxo rotacional capaz de parar em qualquer posição magnética desejada. Pode-se perceber que o micropasso faz com que o rotor se mova de uma forma muito mais suave, pois o fluxo do estator é alterado de forma mais contínua se comparado aos modos de passo completo e meio passo.

Este tipo de acionamento causa uma menor vibração mecânica e uma grande redução nos ruídos gerados a cada passo. Além disso, é possível obter-se uma maior resolução de posicionamento, onde o motor pode ser movido em incrementos angulares muito pequenos.

Existem diversos modos de micropasso que vão desde 1/3 do passo até valores menores que 1/32 do passo. Como exemplo, um motor de passo com 200 passos e 1,8° de passo ao ser acionado em modo de micropasso de relação 1/16 passa a ter uma resolução de aproximadamente 3200 passos por revolução e 0,11° por passo. Em contrapartida, o ganho em resolução acarreta em uma perda acentuada na acurácia do motor, pois o torque incremental do motor cai drasticamente.

2.6.6 Controle de motores de passo em malha fechada

A princípio, motores de passo são motores feitos para funcionarem em malha aberta, fornecendo posicionamento preciso dentro de um número inteiro de passos, sem a necessidade de utilização de quaisquer sensores. Assumindo que não há perdas de passo, a posição é mensurada através da contagem de passos dados.

Porém, o desempenho dos motores de passo em malha aberta é relativamente limitado. O rotor pode não seguir os comandos de posição se a capacidade de torque e velocidade do sistema for ultrapassada, o que é chamado de perda de passos. O torque de carga deve ser muito menor que o torque nominal do motor para que se possa evitar possíveis perdas de passo. Além disso, o motor pode gerar oscilações de torque indesejadas que resultam em oscilações no sistema (TSUI, 2008).

O uso de micropassos, apesar de adicionar uma grande resolução aos motores de passo, traz como principal ponto negativo uma significativa redução do torque disponível no eixo do motor, sendo que quanto maior for a relação de micropassos, menor será o torque incremental do motor.

A Figura 17 ilustra a quantidade de torque disponível, em porcentagens do torque total, em função do número de micropassos sendo utilizados.

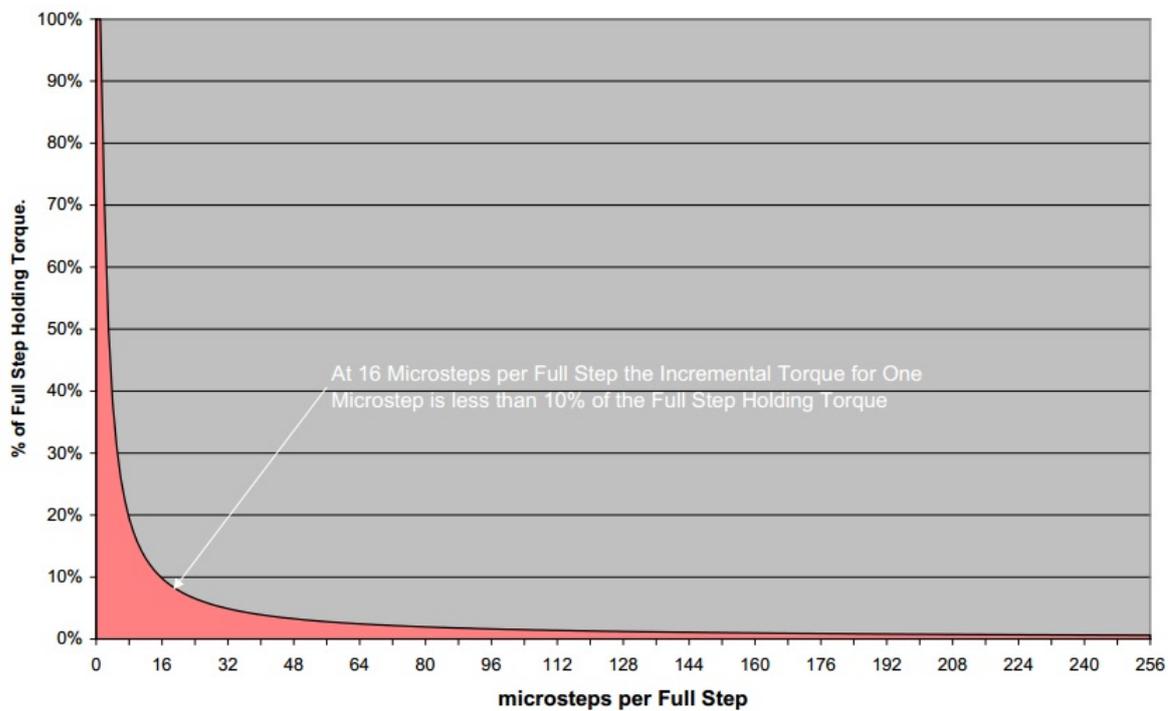


Figura 17: Degradação do torque ao se usar micropassos

Fonte: (BEAUCHEMIN, 2003, p. 3)

A possibilidade de que o torque de carga somado ao atrito do motor seja maior que o torque incremental gerado pelo micropasso aumenta consideravelmente. Ou seja, ao se dar um micropasso não é possível se afirmar que o eixo do motor efetivamente irá se mover, pois para que isso ocorra o torque acumulado deve ser maior que a soma dos torques de carga e estático, além do atrito e para que o movimento ocorra podem ser necessários sucessivos micropassos.

A maior parte das aplicações dos motores de passo envolve o posicionamento preciso de uma carga mecânica. Por exemplo, a posição de uma cabeça de impressão é definida muito precisamente pelo número de comutações que ocorreram no motor controlado. Torques externos de carga, as vezes causados por atrito, causam um pequeno erro na posição quando o motor está parado. O motor deve desenvolver torque suficiente para balancear (compensar) o torque da carga e o rotor é então desviado em um pequeno ângulo com relação a posição esperada.

3 Método proposto

Neste trabalho foram implementadas diferentes estratégias de controle na impressora 3D. Para a realimentação do sistema, foram instalados *encoders* magnéticos em dois eixos da impressora 3D, capazes de medir a posição planar da cabeça de extrusão durante toda sua trajetória. Para a realização da sintonia das estratégias de controle utilizadas, um modelo dos eixos foi levantado. Em seguida, foi definida uma trajetória alvo para testar todas as estratégias de controle. Ao final, todos os resultados foram comparados com o intuito de se identificar a(s) melhor(es) estratégia(s).

3.1 *Hardware*s utilizados: Prusa i3

Prusa i3 é a terceira versão da Impressora 3D criada por Joseph Prusa, possuindo uma maior rigidez em seu frame e uma montagem mais fácil se comparada as versões anteriores. Esta impressora é feita sob a licença GPL, cujo significado é GNU *Public License*, esta licença garante que usuários executem, estudem e modifiquem os *softwares* referentes a um projeto que tenha sido feito sob esta licença.

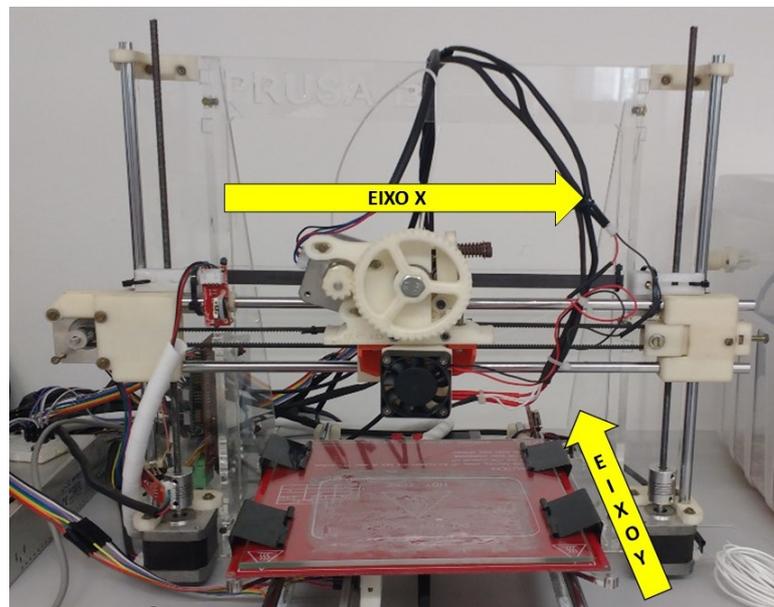


Figura 18: Impressora 3D utilizada.

Conforme pode se observar na Figura 18, a Prusa i3 possui uma estrutura mecânica basicamente composta de peças plásticas que podem ser impressas em uma outra impressora

3D, um conjunto de fusos, eixos lineares retificados e um *frame* feito de termoplástico acrílico. Para acionamento e controle, existem cinco motores de passo híbridos modelo 17HS4401, *switches* de fim de curso para cada eixo, uma placa *Arduino*[®] Mega 2560 e um *shield* modelo RAMPS 1.4 para interface com os demais dispositivos.

A impressora 3D, modelo Prusa i3, foi montada durante o desenvolvimento do presente trabalho. Para maiores detalhes o Apêndice A deve ser consultado.

3.1.1 Drivers de acionamento

Os *drivers* utilizados para acionamento dos motores são fabricados pela *Allegro MicroSystems* LLC, modelo A4988. Estes *drivers* comandam motores de passo bipolares em 5 modos distintos: passo completo, meio passo, 1/4, 1/8 ou 1/16 de passo, sendo os três últimos chamados de modos de micro-passo. Os *drivers* são capazes de comandar motores de até 35V e 2A. Além disso, há um conversor embutido nos *drivers*, que permite comandar os motores por dois pinos apenas: STEP e DIR, pulsos no pino STEP fazem com que o motor execute passos na direção especificada por um bit no pino DIR. O *driver* A4988 pode ser visto na Figura 19.

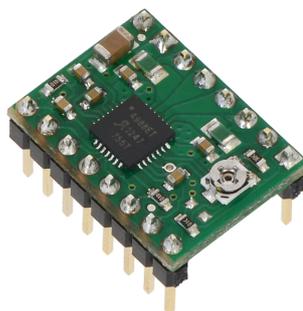


Figura 19: Driver de micropasso Pololu a4988

Fonte: (POLOLU, 2016)

No presente trabalho, os *drivers* foram utilizados no modo de 1/16 de passo, isto significa que os motores aumentaram sua resolução original de 200 passos por revolução para 3200 passos por revolução.

3.1.2 Motores de passo e transmissão dos movimentos

Todos motores de passo utilizados foram fabricados pela empresa *Motion King*. Tratam-se de motores híbridos, modelo 17HS4401, torque estático de 40 *N.cm*, 4 fios, 200 passos por volta e peso de 280 g.

Os eixos dos motores referentes as juntas prismáticas X e Y da impressora estão acoplados a polias modelo *GT*[®] 2, de 16 dentes, cujo passo entre dentes é de 2mm. Estas polias são conectadas a correias dentadas, que por sua vez transmitem o torque dos motores ao sistema da extrusora e da mesa, realizando assim os movimentos necessários.

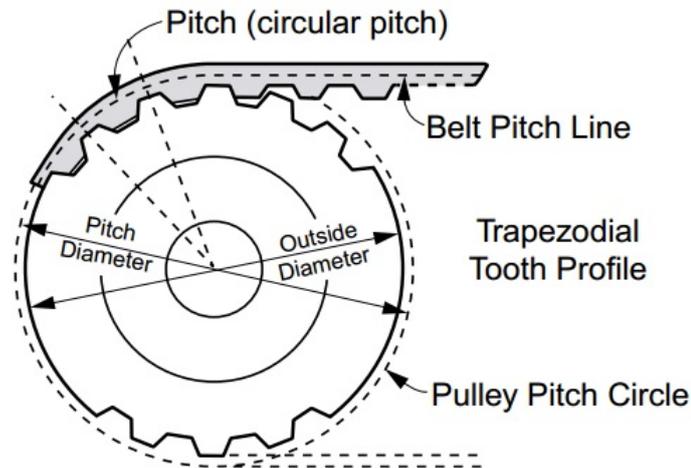


Figura 20: Estrutura do conjunto de transmissão: polia e correia

Fonte: (SDP-SI, 2007, p. 1)

Um sistema de transmissão semelhante ao utilizado pode ser visto na Figura 20. Este sistema é capaz de transmitir altos torques e ser submetido a grandes acelerações. Além disso, a folga entre a correia e a polia é mínima a ponto de ser irrelevante (SDP-SI, 2007).

3.1.3 Encoders

Os *encoders*, modelo NSE-5310, são fabricados pela *Austrian MicroSystems*. Estes *encoders* possuem um conjunto de sensores *Hall* que transformam intensidades de campo magnético em posições. Quando ocorre um movimento relativo entre o *encoder* e uma tira de ímãs, a intensidade do campo magnético varia, este valor é então convertido em um valor de posição dentro de uma faixa de 2 milímetros, que corresponde ao comprimento de cada dipolo. Na Figura 21 tal funcionamento pode ser visualizado.

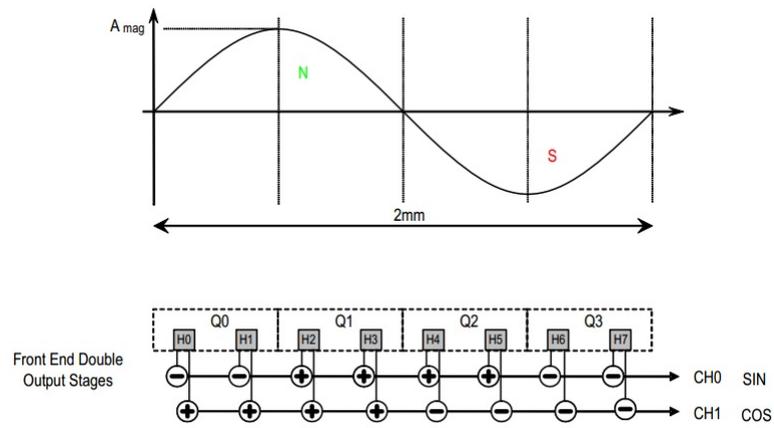


Figura 21: Conversão das intensidades de campo em posições.

Fonte: (AMS... , 2013, p. 11)

O *encoder* se comunica através do protocolo I^2C e fornece o valor da posição absoluta dentro da faixa de 0 a 2 mm, com uma resolução de 12 bits. Quando a transição entre dois dipolos ocorre, um pulso é gerado no pino *Index*, dessa forma é possível medir de forma incremental a distância total percorrida. A Figura 22 mostra como os dados são tratados pelo *encoder* utilizado.

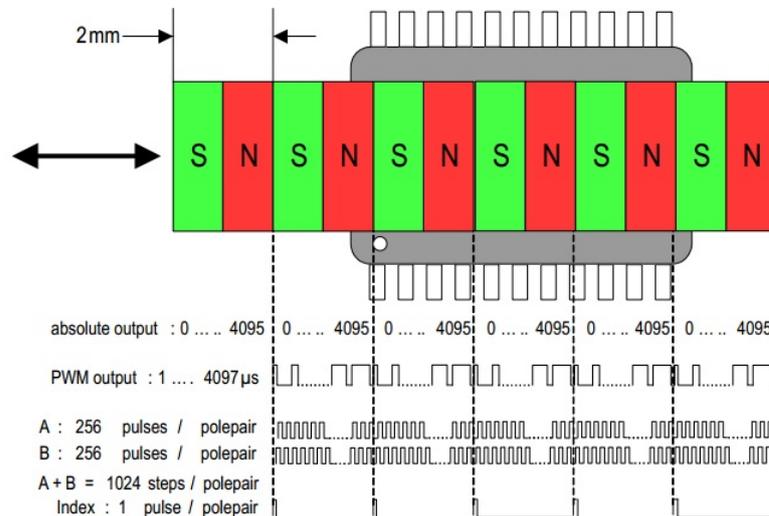


Figura 22: Funcionamento do *encoder* NSE-5310

Fonte: (AMS... , 2013, p. 9)

O fato dos *encoders* utilizados medirem a posição da cabeça de extrusão de forma direta torna o seu uso vantajoso se comparado a *encoders* que medem posições no eixo do motor, pois eliminam-se erros causados por folgas ou quaisquer fatores construtivos que

não seriam eliminados caso fosse utilizada a cinemática direta para estimar a posição do efetuator final e, conseqüentemente, é alcançada uma maior precisão do sinal que será realimentado para o controlador.

Para a fixação dos *encoders*, foram realizadas modificações na estrutura da impressora: foram projetadas peças plásticas, impressas na própria impressora 3D, para que os circuitos integrados fossem fixados juntos aos eixos X e Y.

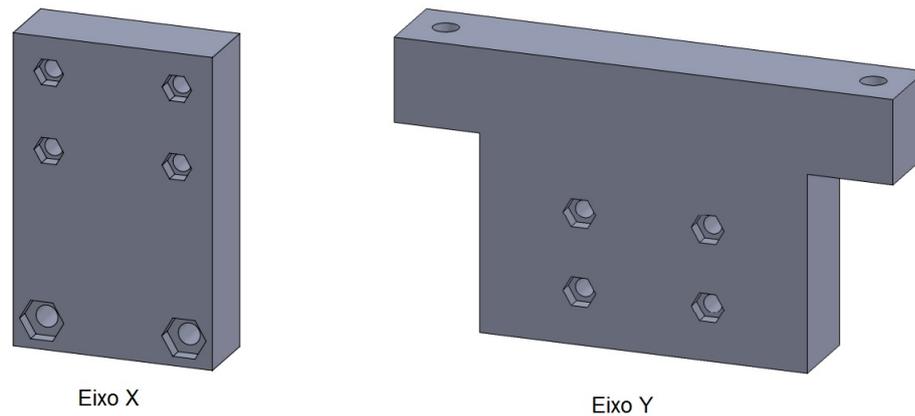


Figura 23: Suportes projetados para os *encoders*.

Para a fixação das tiras de ímãs em ambos os eixos, foi projetada uma peça, feita de termoplástico acrílico. Foram fabricadas duas unidades em uma máquina de corte à laser. O projeto da peça é mostrado na Figura 24.

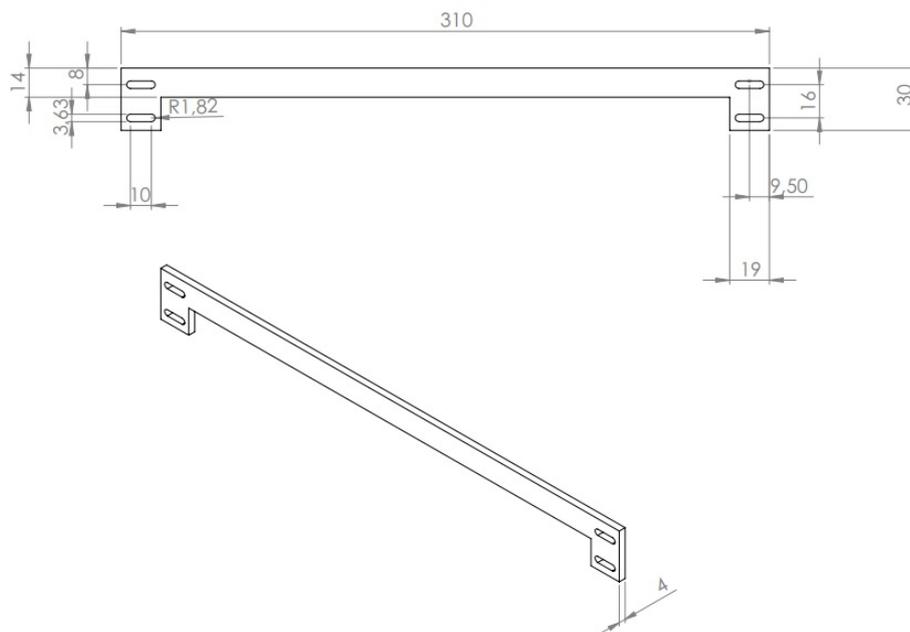


Figura 24: Suporte projetado para as tiras de ímãs.

Os suportes da tira de ímãs e do *encoder* fixados nos Eixos X e Y podem ser visualizados na Figura 25.

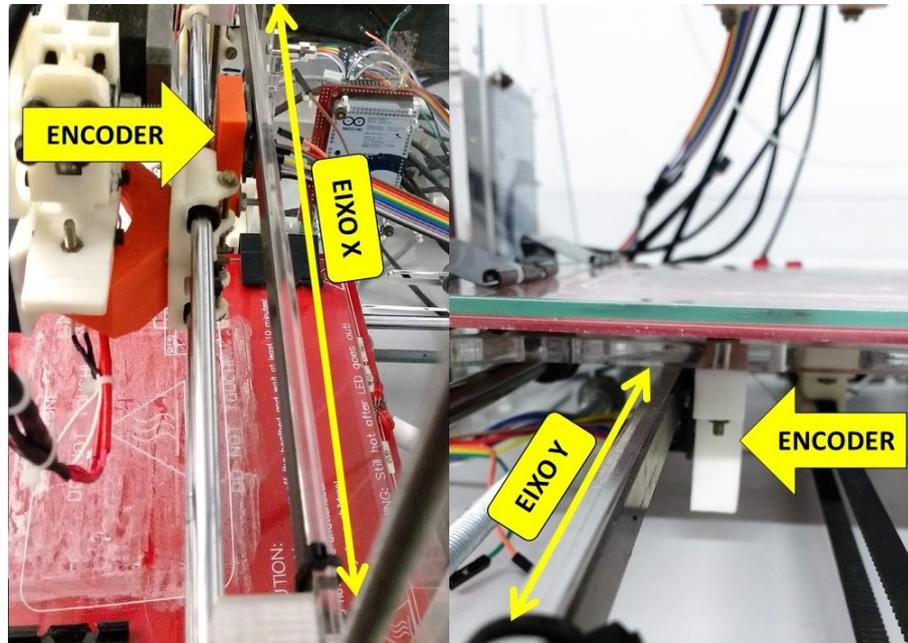


Figura 25: Suportes projetados para os eixos X (esq.) e Y (dir.).

3.1.4 Arduino MEGA 2560

Arduino é uma plataforma eletrônica de prototipagem, de código aberto, que se baseia em *hardwares* e *softwares* de fácil utilização. Para isto, as placas Arduino possuem microcontroladores da fabricante *Atmel* embutidos, que podem ser programados em uma IDE através de uma linguagem de alto nível, chamada de *Wiring*.

Atualmente, existem diversos modelos de placas Arduino disponíveis. Cada placa varia basicamente no número de pinos de entrada e saída e no poder de processamento do microcontrolador embutido, cabendo ao usuário escolher a placa que melhor se adapte ao seu projeto.

A placa Arduino MEGA 2560 (Figura 26) possui um microcontrolador *Atmel* ATMega 2560 embutido e é indicada para projetos mais complexos, tais como impressoras 3D. Ela possui 54 pinos digitais de I/O e 16 entradas analógicas, além de poder se comunicar através de protocolos seriais como SPI ou I²C (ARDUINO..., 2016).

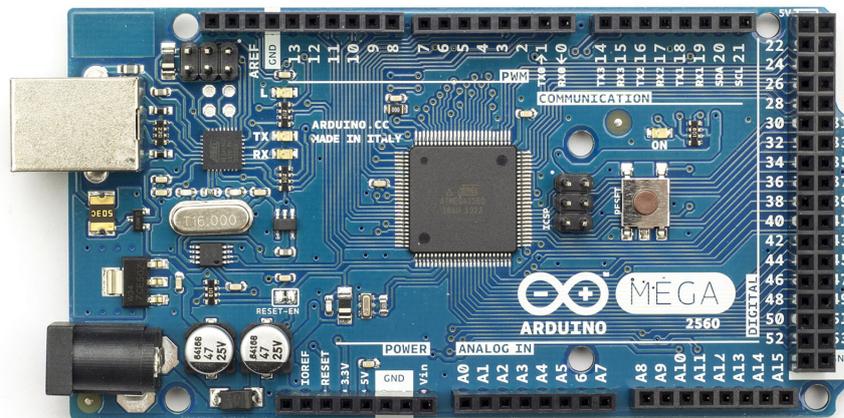


Figura 26: Placa Arduino MEGA 2560.

Fonte: (ARDUINO..., 2016)

3.2 Softwares utilizados

3.2.1 MATLAB

MATLAB, acrônimo de *MATrix LABoratory* ou laboratório de matrizes é ao mesmo tempo um *software* de computação numérica e uma linguagem de programação proprietária desenvolvida pela *MathWorks*. Este *software* é uma ferramenta criada para auxiliar na resolução de problemas científicos e de engenharia de diferentes áreas, sendo possível realizar diversas operações como: manipulação de matrizes, análise de dados, plotagem de funções, criação de interfaces gráficas para o usuário, dentre outros. Há ainda um pacote adicional chamado de *Simulink* e que permite simulações gráficas, projetos baseados em modelos para sistemas dinâmicos e embarcados.

3.3 Controle cinemático de trajetória aplicado a Impressora 3D

No presente trabalho foram testadas diferentes abordagens para o problema de controle cinemático de trajetória:

- Controle em malha aberta;
- Controlador proporcional (P) com malha *feedforward*;

- Controlador PID com método de sintonia robusto.

Nas subseções à seguir, serão detalhadas cada uma das abordagens seguidas, além de ser apresentada a modelagem da Impressora 3D, realizada com intuito de sintonizar os parâmetros dos controladores.

3.3.1 Modelagem da impressora 3D

As funções de transferência que descrevem os movimentos das juntas X e Y da impressora representam a dinâmica dos sistemas a serem controlados. Estas funções apresentam o seguinte comportamento: valores de velocidade são dados como entrada, obtendo-se na saída valores de posição. Neste caso é possível obter as funções de transferência como um modelo integrador, descrito por:

$$G(s) = k' \times \frac{e^{-\theta s}}{s}, \quad (3.1)$$

onde θ corresponde ao atraso do sistema e k' é o ganho do processo em malha aberta. Estes valores são calculados conforme mostrado na Figura 27.

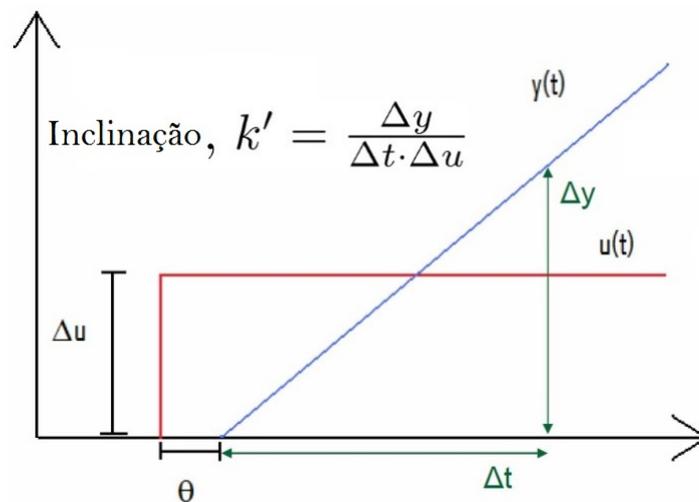


Figura 27: Ganho em malha aberta para um processo com comportamento integrador com atraso. Modificado de (SKOGESTAD; GRIMHOLT, 2012).

De forma prática, os parâmetros do modelo foram obtidos a partir da resposta ao degrau do sistema em malha aberta (SKOGESTAD; GRIMHOLT, 2012). Foram aplicadas nas entradas de cada uma das duas juntas prismáticas (X e Y) sinais de referência de velocidade em forma de um degrau de amplitude 10 mm/s . Os eixos X e Y apresentaram ganhos k' equivalentes a 0,90 e 0,94, respectivamente, além de um atraso $\theta = 0,1 \text{ segundos}$. Portanto,

$$G_x(s) = 0,90 \frac{e^{-0,1s}}{s}, \quad (3.2)$$

$$G_y(s) = 0,94 \frac{e^{-0,1s}}{s}. \quad (3.3)$$

Os modelos foram validados pelo cálculo do erro quadrático médio e apresentaram os seguintes valores para os eixos X e Y, respectivamente: $0,07 \text{ mm}^2$ e $0,02 \text{ mm}^2$. As Figuras 28 e 29 ilustram as curvas obtidas experimentalmente e as curvas obtidas através da simulação dos modelos 3.2 e 3.3.

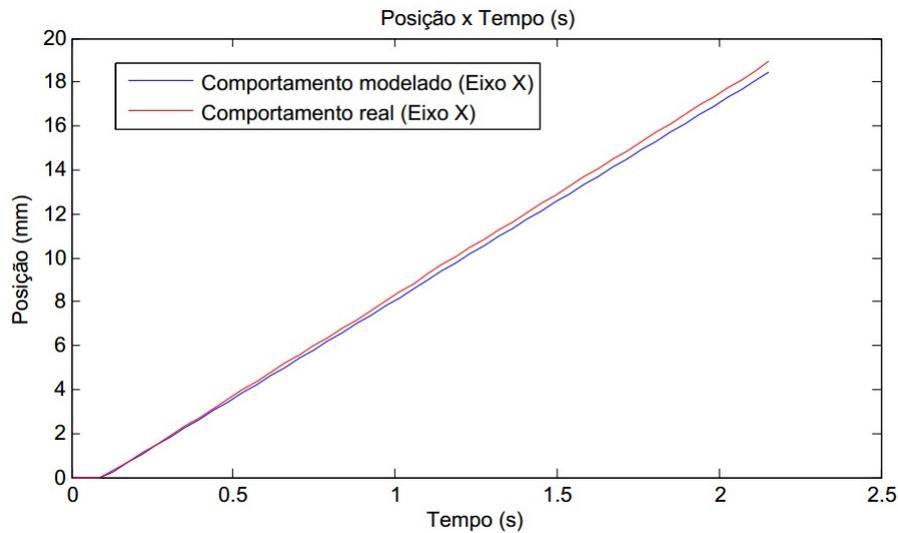


Figura 28: Dinâmica modelada e dinâmica real do Eixo X.

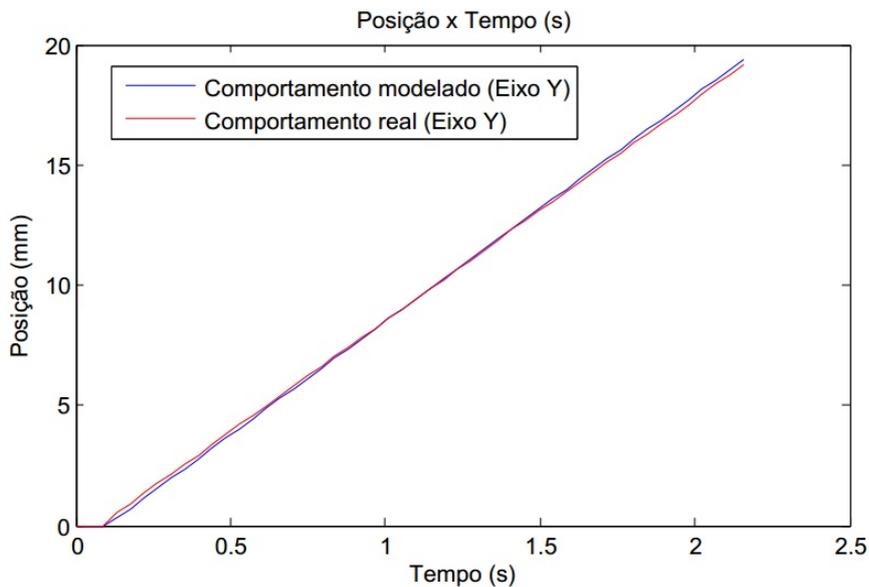


Figura 29: Dinâmica modelada e dinâmica real do Eixo Y.

3.3.2 Controle em malha aberta

O controle em malha aberta funciona da seguinte forma: uma trajetória de entrada $x(t)$ é recebida. Em cada instante t , os erros de posição para cada eixo ($e(t)$) são calculados e convertidos em passos. Estes valores são enviados aos motores, que executam estes passos em uma velocidade constante. A posição atual da extrusora é estimada através da contagem dos passos dados, esta contagem é realizada e armazenada pelo Arduino.

A fórmula utilizada para determinar a relação entre distância linear percorrida e os passos dados pelo motor é dada pela Equação 3.4 :

$$r = \frac{D \times T}{S \times \mu} \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4, D corresponde ao valor de passo da polia [mm], T ao número de dentes da polia, S corresponde ao número de passos do motor e μ ao modo de micro-passos do motor. Como resultado obtêm-se o valor da constante r , cuja unidade é $\frac{mm}{passo}$.

De acordo com os motores e polias utilizados, as constantes possuíam os seguintes valores: $S = 200$ passos, $\mu = \frac{1}{16}$, $D = 2 \text{ mm}$ e $T = 16$, assim obteve-se a relação $r = 0,01 \frac{mm}{passo}$.

3.3.3 Controlador proporcional (P) com malha *feedforward*

A primeira estratégia de controle em malha fechada testada trata-se de um controlador proporcional com malha *feedforward*. Conforme discutido na seção 2.3, este controlador comporta-se como um seguidor de referência.

A Figura 30 apresenta a malha de controle utilizada.

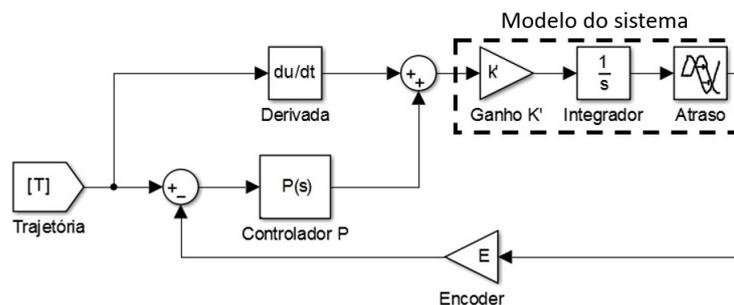


Figura 30: Malha de controle Feedforward

Como visto na seção 2.2, a matriz jacobiana da impressora 3D é uma matriz identidade, logo pode-se suprimir a matriz jacobiana inversa na malha em questão.

Para sintonia deste controlador foi utilizada a função *PID Tuner* presente no pacote *Simulink* do software *MATLAB*®.

3.4 Controlador PID com método robusto de sintonia

Um outro controlador testado trata-se de um controlador PID sintonizado através de um método robusto. Tal método foi desenvolvido por Normey-Rico et al. (2001) e foi utilizado originalmente para o problema de seguimento de caminhos em um robô móvel. Este método permite que o controlador seja sintonizado considerando como parâmetros especificações de desempenho e robustez. Para isto, parte-se de um modelo simples do sistema, conforme desenvolvido na subseção 3.3.1 e divide-se o processo de sintonia em dois passos. No primeiro passo, um ganho proporcional é sintonizado, de forma que a dinâmica integradora do sistema se transforme em um processo estável, permitindo assim a sintonia do controlador PID de forma simples no segundo passo.

A malha deste esquema de controle é ilustrada na Figura 31.

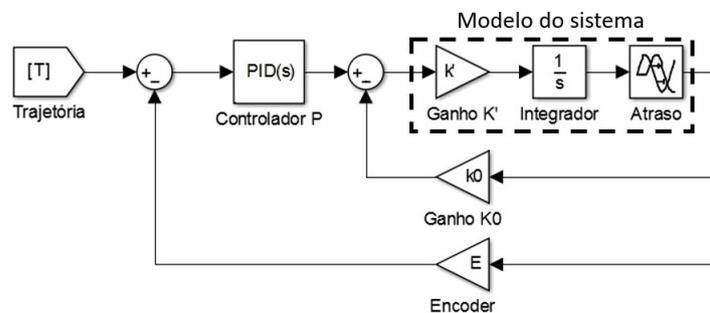


Figura 31: Malha de controle PID com ganho de realimentação K_0 .

O ganho proporcional K_0 foi definido de forma que se evitasse respostas oscilatórias nas saídas dos sistemas. Para isto, foi utilizada a Equação 3.5.

$$K_0 = \frac{1}{2\theta} \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 parte de uma regra simples que determina que a margem de fase do *loop* mais interno seja igual a 60° . Esta margem produz respostas com valores de *overshoot* menores que 5% (NORMEY-RICO et al., 2001).

Para determinar a robustez do controlador, foi utilizado um parâmetro γ . Este parâmetro varia dentro de uma faixa de 0 a 0,75. Quanto maior for o valor deste parâmetro, maior será a robustez do controlador, porém as respostas do sistema se tornam mais lentas. Caso este parâmetro possua valores menores, respostas mais rápidas serão observadas. Portanto, γ deve ser escolhido de forma a manter um compromisso entre robustez e velocidade de resposta.

A lei de controle é dada conforme a Equação 3.6:

$$u(s) = Kp(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1+T_f s}) \quad (3.6)$$

Sendo T_f um filtro passa baixas no ganho derivativo, cujo valor é função do atraso do sistema ($T_f = \gamma\theta$). T_i é o tempo integral e T_d é o tempo derivativo.

Os parâmetros do controlador são dados pelas seguintes equações:

- $0 < \gamma < 0,75$;
- $T_d = \frac{\theta}{1,5-\gamma} - \gamma\theta$;
- $T_i = (1,5 - \gamma)\theta$;
- $K_p = (\frac{1,5-\gamma}{\theta})(4\gamma + 1 - 4\sqrt{\gamma^2 + \frac{\gamma}{2}})$;

A partir deste método, foram testadas 4 configurações de sintonia diferentes, variando-se os valores de γ e considerando o valor de K_0 obtido pela Equação 3.5. Os valores de γ utilizados, bem como os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 1

Tabela 1: Parâmetros dos controladores PID

γ	K_p	T_i	T_d	K_0
0,3	2,8849	0,1200	0,0533	5
0,5	1,7157	0,1000	0,0500	5
0,7	1,0715	0,0800	0,0550	5
0,75	0,9526	0,0750	0,0583	5

3.4.1 Algoritmo de geração de trajetórias circulares

Todas as estratégias de controle foram implementadas no domínio discreto do tempo, assim foi necessário criar um algoritmo capaz de gerar trajetórias discretizadas e enviá-las ao controlador. Estas trajetórias de referência resultavam em um conjunto de pontos de referência finitos.

Para a trajetória circular, foi implementado um algoritmo que recebe como entrada as coordenadas do centro do arco, o seu raio, o ângulo final e o ângulo inicial. A partir destes parâmetros são gerados dois vetores com as coordenadas de tal arco, um dos vetores corresponde ao eixo X e outro corresponde ao eixo Y. É gerado também um terceiro vetor com as restrições temporais para cada posição gerada; estas restrições são calculadas dividindo-se a distância euclidiana entre dois pontos no espaço bidimensional por uma velocidade média considerada. O Algoritmo 1 mostra como este cálculo ocorre:

Algorithm 1 Algoritmo Gerador de arcos

- 1: Recebe as coordenadas de centro (X_c, Y_c) , raio, $angulo_{inicial}$ e $angulo_{final}$
 - 2: $\alpha = angulo_{final} - angulo_{inicial}$
 - 3: $secao_{curva} = 0.5$
 - 4: $comprimento = raio * \alpha$
 - 5: $passos = comprimento / secao_{curva}$
 - 6: **para** cada passo i **faça**
 - 7: $traj_x(i) = X_c + raio * \cos(angulo_{inicial} + \alpha * (i/passos))$
 - 8: $traj_y(i) = Y_c + raio * \sin(angulo_{inicial} + \alpha * (i/passos))$
 - 9: $tempo(i) = \sqrt{(traj_x(i) - traj_x(i-1))^2 + (traj_y(i) - traj_y(i-1))^2} / Vel_{média}$
 - 10: **fim para**
-

4 Experimentos e Discussão dos resultados

Para testar as estratégias de controle implementadas no seguimento da trajetória definida, foram realizados uma série de experimentos com os controladores propostos. Para cada controlador foram testados diversos valores de ganhos, analisando o compromisso entre o desempenho e a robustez. Para validação, foram medidos os erros médios quadráticos entre a trajetória de referência e a trajetória realizada em cada esquema de controle. Nas subseções seguintes, são apresentados os experimentos realizados.

A trajetória utilizada nos testes consiste em uma circunferência centrada na posição (50mm, 50mm), de raio igual a 10 mm.

4.1 Controle em malha aberta

Para o controle em malha aberta, os seguintes resultados foram obtidos:

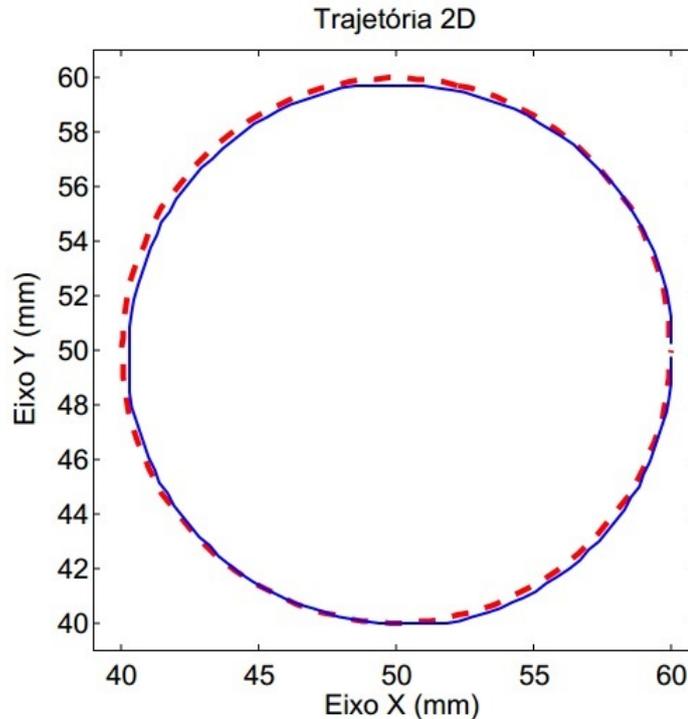


Figura 32: Resultado controle em malha aberta para trajetória circular.

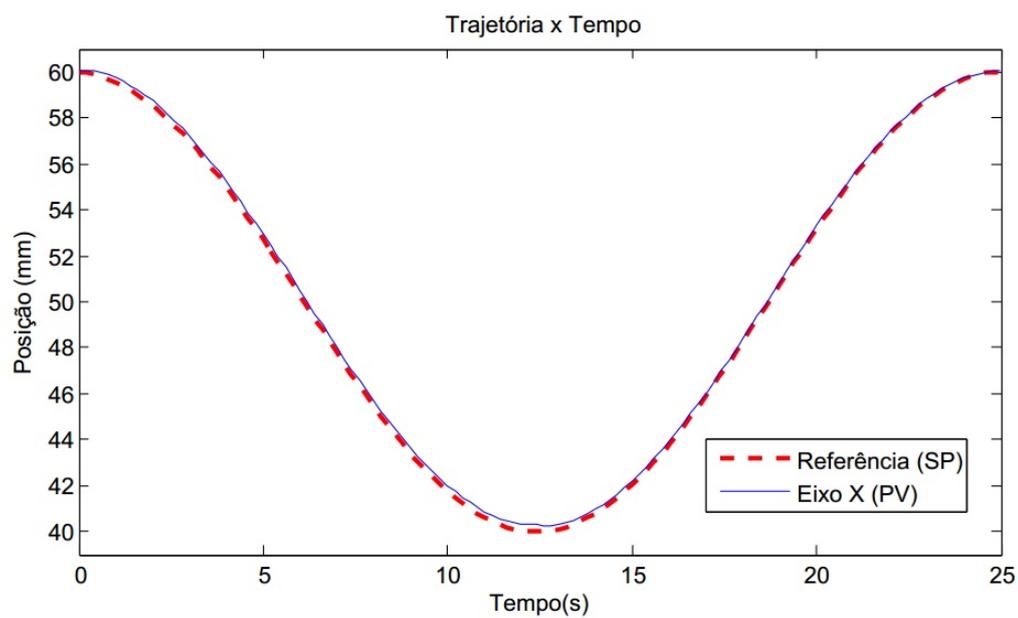


Figura 33: Trajetória no eixo X para controle em malha aberta.

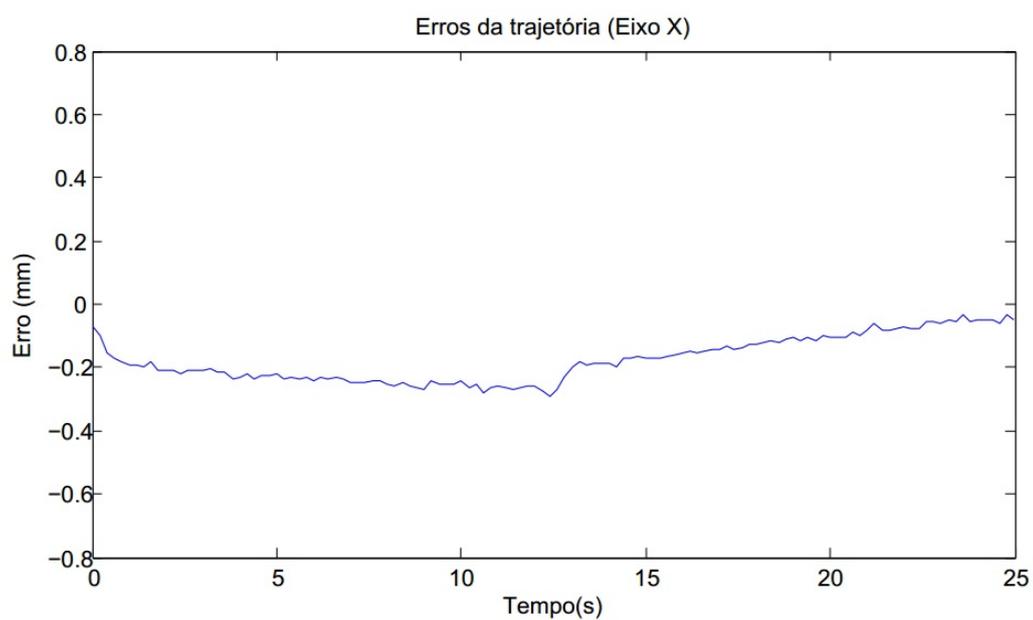


Figura 34: Erros no eixo X para controle em malha aberta.

O eixo X apresentou um erro médio quadrático equivalente a $0,0355 \text{ mm}^2$.

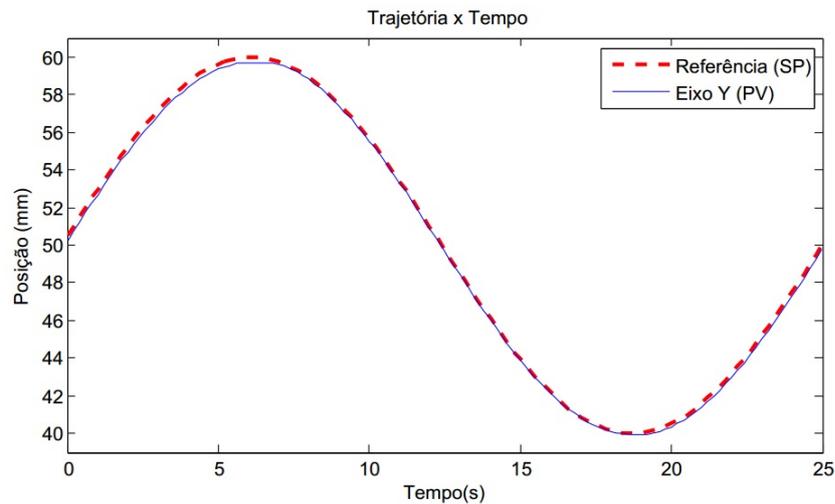


Figura 35: Trajetória no eixo Y para controle em malha aberta.

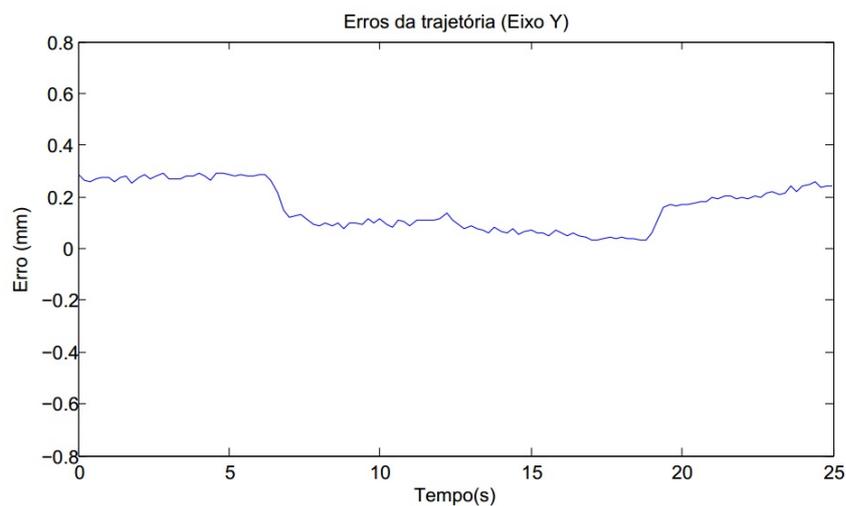


Figura 36: Erros no eixo Y para controle em malha aberta.

O eixo Y apresentou um erro médio quadrático equivalente a $0,0339 \text{ mm}^2$.

O erro médio quadrático total foi de $0,0694 \text{ mm}^2$.

No controle em malha aberta, pode-se notar que o erro não alcançou, em nenhum instante da trajetória, um valor nulo. Isto deixa claro que em malha aberta não existe nenhuma ação compensatória para o erro que esteja efetivamente presente no sistema, pois não há realimentação da saída do sistema na entrada do controlador. O sistema apenas é capaz de estimar os valores de erro a partir da contagem dos passos dados, porém, não é possível identificar erros provenientes da perda de passo dos motores, atrito entre as partes móveis ou quaisquer outros motivos.

4.2 Controle P com malha *feedforward*

Dentre os 4 diferentes valores de ganho testados para o controlador proporcional com malha *feed forward*, o ganho que apresentou o melhor resultado nos experimentos equivale a $K_p = 4,3$. Os resultados obtidos com este ganho são apresentados a seguir:

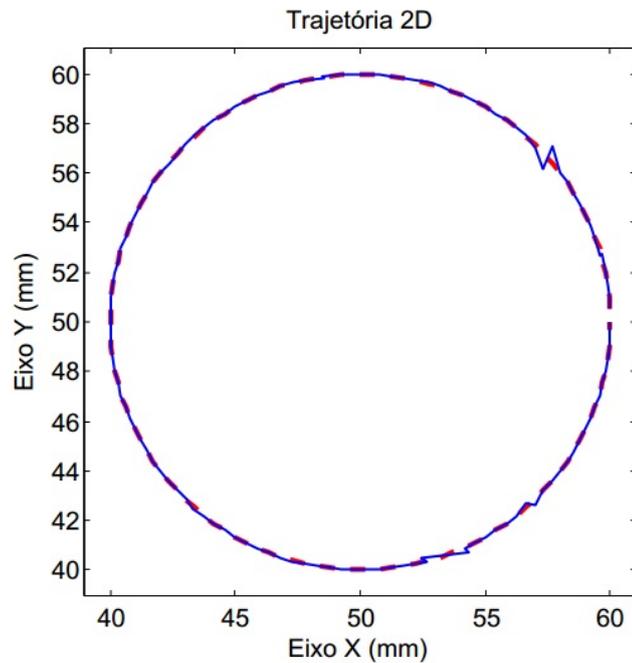


Figura 37: Resultado controle proporcional com malha *feedforward* para trajetória circular.

Na Figura 38 é mostrada a trajetória realizada pelo Eixo X comparada a trajetória de referência:

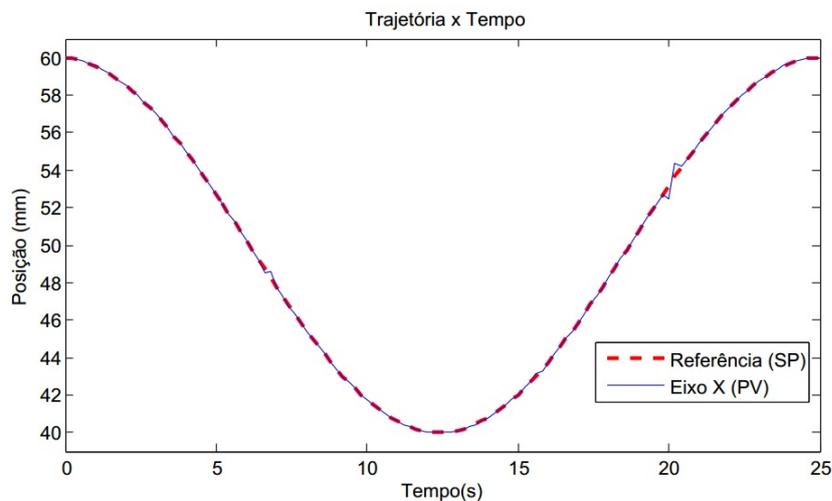


Figura 38: Trajetória no eixo X para controle proporcional com malha *feedforward*.

Na Figura 39 é apresentada a curva de erros da trajetória para o Eixo X:

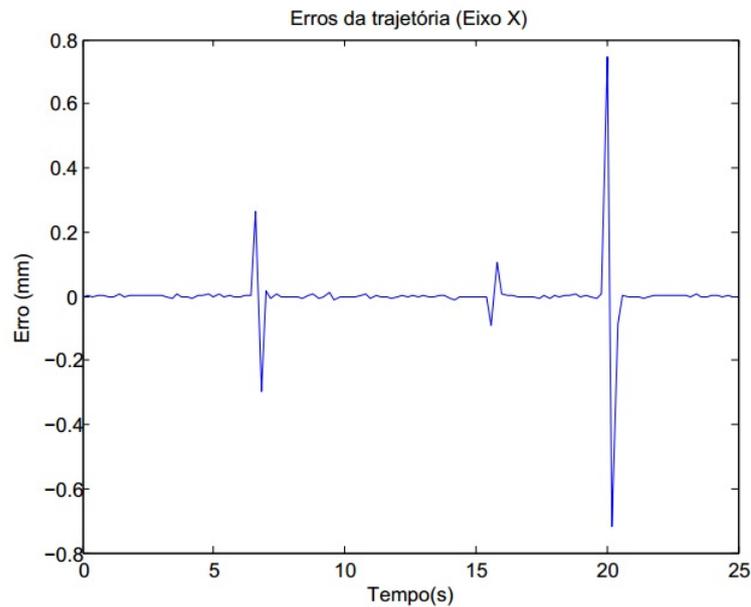


Figura 39: Erros no eixo X para controle proporcional com malha *feedforward*.

Na Figura 40 é mostrada a trajetória realizada pelo Eixo Y comparada a trajetória de referência:

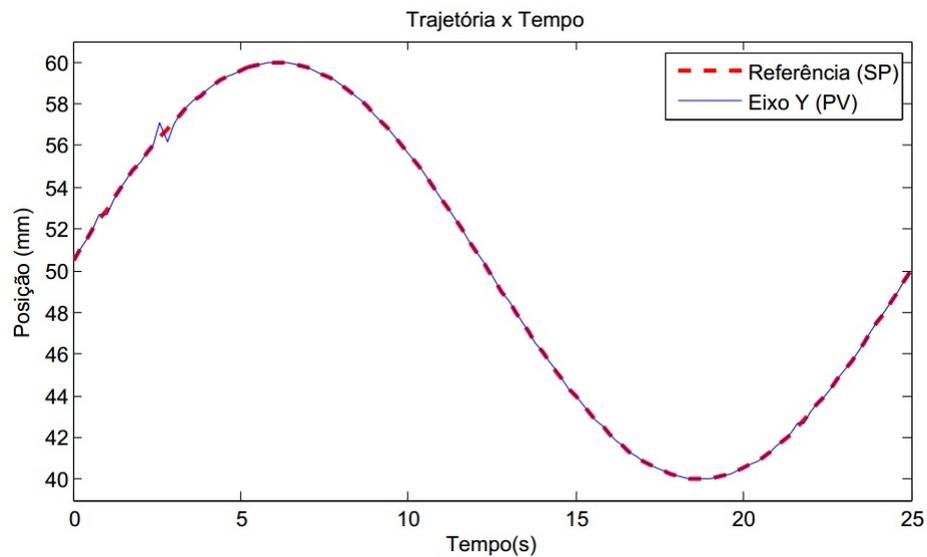


Figura 40: Trajetória no eixo Y para controle proporcional com malha *feedforward*.

Na Figura 41 é apresentada a curva de erros de trajetória para o Eixo Y:

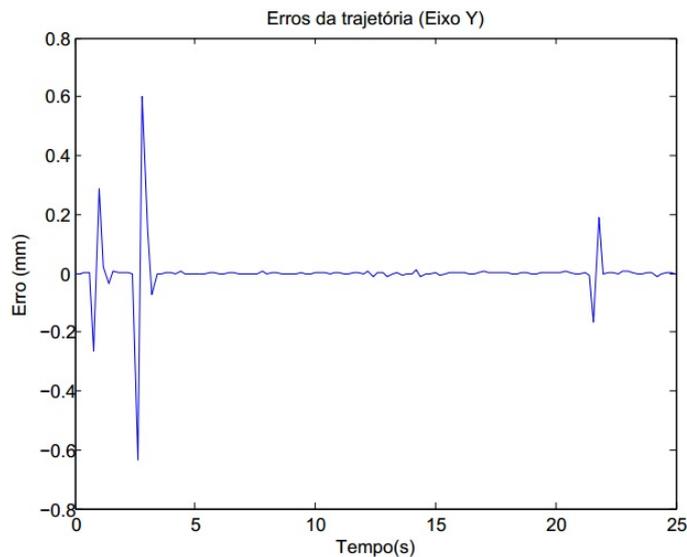


Figura 41: Erros no eixo Y para controle proporcional com malha *feedforward*.

Na Tabela 2, são apresentados os valores de erro médio quadrático obtidos para cada um dos valores de ganho testados:

Tabela 2: Erros médios quadráticos para todos os ganhos testados no controlador P com malha *feedforward*.

K_p	MSE (Eixo X)[mm^2]	MSE (Eixo Y)[mm^2]	MSE Total[mm^2]
3,0	0,0042	0,0439	0,0481
4,0	0,0030	0,0475	0,0505
4,3	0,0100	0,0080	0,0180
5,0	0,2265	0,6557	0,8822

Para o controle proporcional com malha *feedforward*, pode-se observar que o erro do sistema em ambos os eixos se manteve próximo a zero em praticamente toda a trajetória e quando ocorrem variações consideráveis no erro, o sistema rapidamente responde com uma ação de controle que retornava o erro a um valor igual ou muito próximo a zero.

Com relação aos diversos ganhos testados, pode-se observar pela Tabela 2 que à medida que o ganho aumentou, o valor de erro diminuiu, mas quando o ganho se tornou igual a 5, o valor do erro aumentou consideravelmente. Conforme discutido na seção 2.4, isto é explicado pela limitação que a dinâmica do sistema traz ao valor do ganho máximo, pois a partir de um certo valor o sistema começa a ter uma resposta mais oscilatória.

4.3 Controle PID com método robusto de sintonia

Para as diferentes configurações de robustez testadas, a configuração que apresentou o melhor resultado nos experimentos corresponde ao valor de $\gamma = 0,5$. Os resultados obtidos com esta configuração são apresentados a seguir:

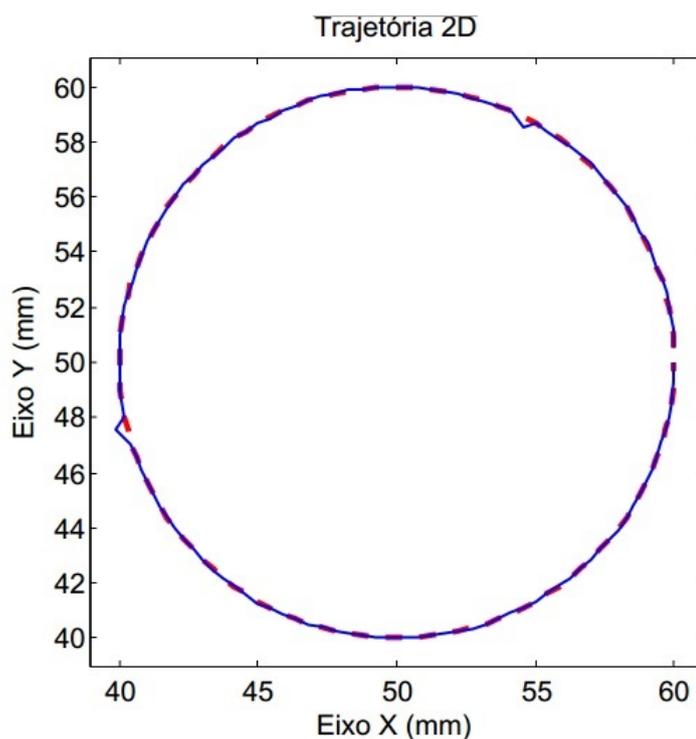


Figura 42: Resultado do controle PID para trajetória circular.

A Figura 43 mostra a trajetória realizada pelo Eixo X comparada a trajetória de referência:

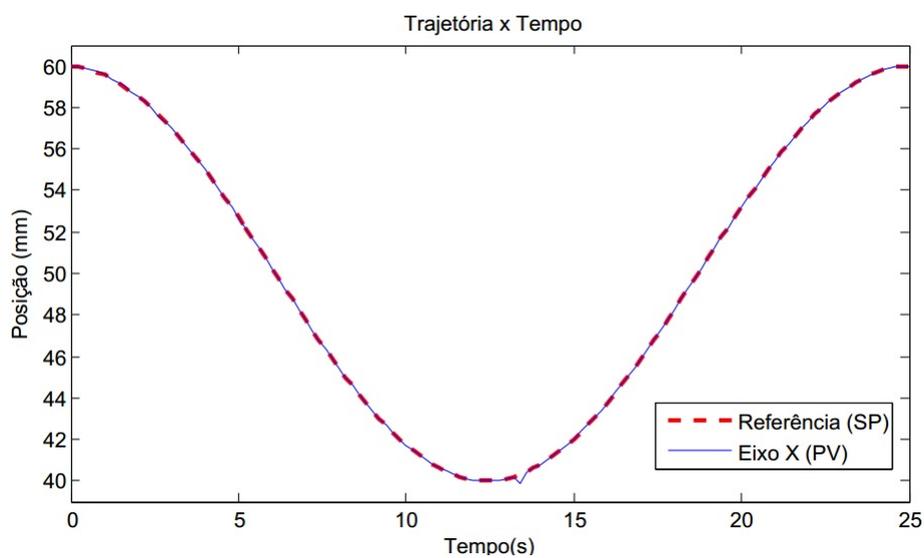


Figura 43: Trajetória no eixo X para controle PID.

A Figura 44 mostra os erros da trajetória realizada pelo Eixo X:

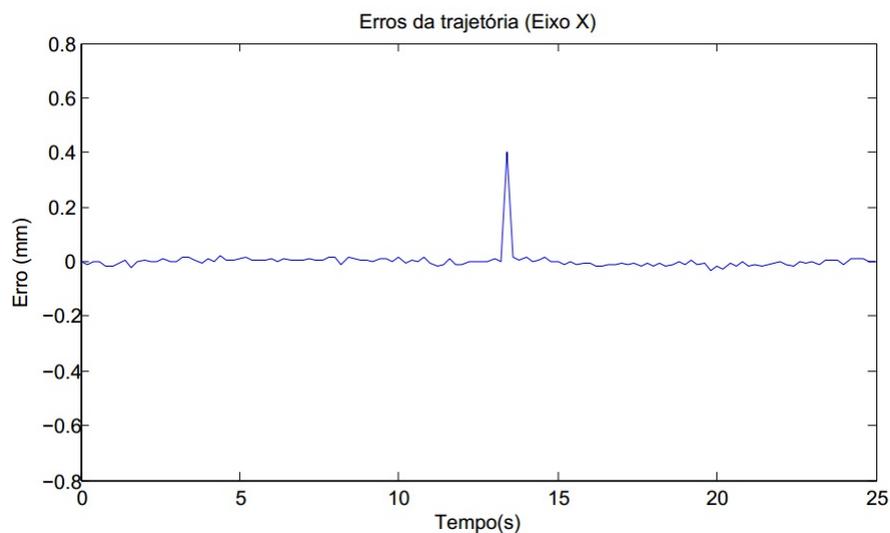


Figura 44: Erros no eixo X para controle PID.

A Figura 45 mostra a trajetória realizada pelo Eixo Y comparada a trajetória de referência:

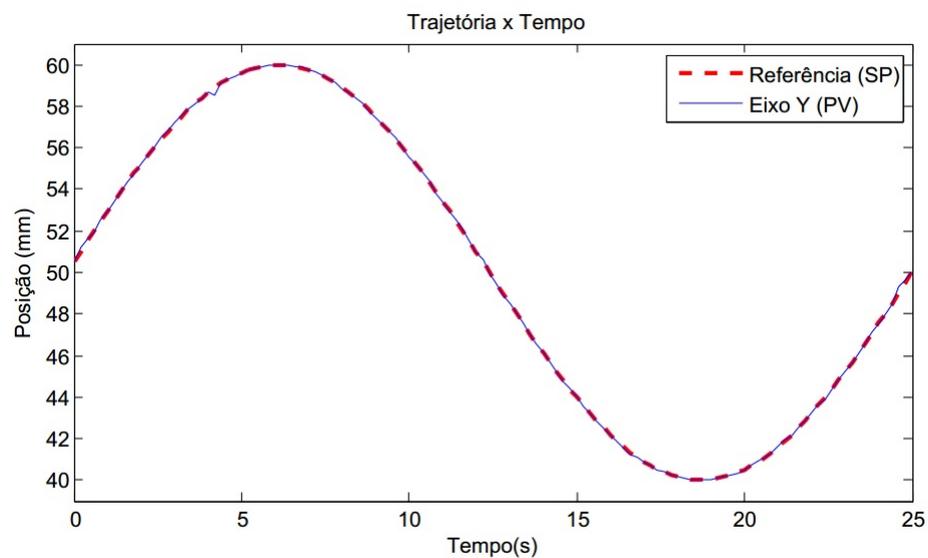


Figura 45: Trajetória no eixo Y para controle PID

A Figura 46 mostra os erros da trajetória realizada pelo Eixo Y:

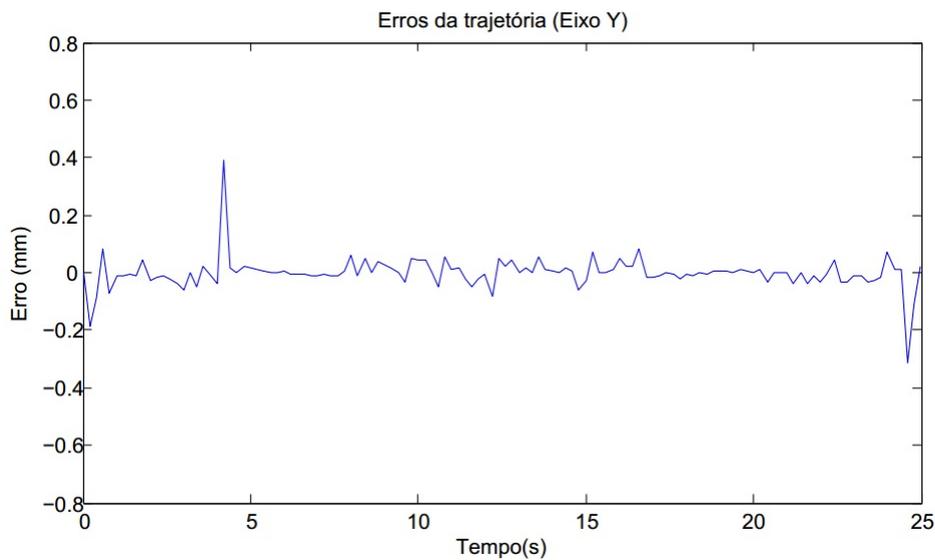


Figura 46: Erros no eixo Y para controle PID.

Na Tabela 3, são apresentados os valores de erro médio quadrático obtidos para cada uma das configurações de robustez (γ) testadas.

Tabela 3: Erros médios quadráticos para todas as configurações testadas no controlador PID.

γ	MSE (Eixo X)[mm^2]	MSE (Eixo Y)[mm^2]	MSE Total[mm^2]
0,30	0,0786	0,4265	0,5051
0,50	0,0014	0,0033	0,0047
0,70	0,0829	0,3964	0,4793
0,75	0,0502	0,4191	0,4693

A partir da análise dos resultados apresentados, é possível perceber que o valor de $\gamma = 0,5$ corresponde a configuração que trouxe menores erros ao sistema. Esta configuração apresentou um bom compromisso entre desempenho e robustez, pois o sistema respondeu de forma rápida variações bruscas no erro, levando-o a valores próximos ou iguais a zero.

4.4 Análise Comparativa

A Tabela 4 apresenta os melhores resultados obtidos em cada estratégia testada:

Tabela 4: Erros médios quadráticos dos melhores resultados apresentados em cada estratégia de controle

Estratégia	MSE (Eixo X)[mm^2]	MSE (Eixo Y)[mm^2]	MSE Total[mm^2]
MA	0,0355	0,0339	0,0694
$P + FF$	0,0100	0,0080	0,0180
PID	0,0014	0,0033	0,0047

Pela análise desta tabela, é possível concluir que a estratégia de controle PID sintonizada através de um método robusto apresentou os melhores resultados para ambos

os eixos. A estratégia de controle PID foi capaz de reduzir o erro médio quadrático total em mais de 93% em relação à estratégia de controle em malha aberta, que apresentou o pior resultado. Se compararmos a estratégia PID com a estratégia de controle proporcional, a redução no erro médio quadrático foi de aproximadamente 74%.

Nas curvas de erro e trajetória apresentadas pelas estratégias de controle em malha fechada é possível perceber que apesar do erro se manter muito próximo do valor zero, em alguns instantes ocorreram variações bruscas nestes valores. Ao se observar o comportamento aleatório destas variações, pode-se supor que elas ocorreram devido à ruídos nos sinais de interrupção enviados pelo *encoder*. Outro fato que corrobora esta hipótese é que, no começo deste trabalho foram encontrados problemas relativos à ruídos desta natureza. Estes ruídos foram amenizados através de um a técnica chamada *debouncing*, proposta por Ganssle (2008), mas aparentemente não foram eliminados. Por outro lado, se estas variações forem analisadas como distúrbios no sistema, fica comprovada a capacidade do sistema de responder rapidamente a distúrbios e reduzir novamente o erro para valores iguais ou próximos a zero.

5 Considerações finais

O presente trabalho apresentou soluções de controle para o problema de seguimento de trajetória em uma Impressora 3D. Para isto, foram aplicadas diferentes estratégias de controle existentes na literatura.

Foi apresentada uma revisão de literatura, abordando os conceitos fundamentais da robótica, teoria de controle e motores de passo. Esta revisão foi importante para o desenvolvimento do trabalho, pois o problema de seguimento de trajetória não é de simples solução e possui diferentes abordagens. Um bom conhecimento da dinâmica do processo a ser controlado foi de fundamental importância para que bons resultados fossem atingidos.

O método utilizado consistiu em levantar um modelo integrador, capaz de representar as dinâmicas dos sistemas controlados e definir estratégias de controle para o problema de seguimento de trajetórias. A estratégia de controle PID sintonizada através de um método robusto, apesar de ser simples, apresentou bons resultados para este problema; mesmo quando ocorreram algumas variações bruscas, a ação de controle foi capaz de retornar o erro para valores muito próximos de zero.

Em trabalhos futuros sugere-se utilizar métodos de filtragem de sinal para que seja solucionado o problema de ruídos do *encoder*. Para verificação do comportamento dos controladores em diferentes trajetórias, sugere-se que sejam testadas trajetórias onde ocorram variações mais abruptas nos valores de referência, como ondas quadradas, triangulares, etc.

Referências

- ACARNLEY, P. P. **Stepping motors: a guide to theory and practice**. [S.l.]: Iet, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 30 e 31.
- AMS Datasheet NSE-5310 Miniature Position Encoder with Zero Reference and I2C Output. [S.l.]: Austrian MicroSystems / New Scale Technologies, 2013. <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Linear-Position/NSE-5310>. Acessado em: 22/01/16. Citado na página 37.
- ARDUINO, Site. [S.l.]: Arduino, 2016. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. Acessado em: 15-01-2017. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- ASTM. **American Society for Testing and Materials, Site**. [S.l.]: American Society for Testing and Materials, 2010. <https://www.astm.org>. Acessado em: 01-11-2016. Citado na página 11.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **Pid controllers: theory, design, and tuning**. 1995. ISA Research Triangle Park, NC, 1995. Citado na página 27.
- BEAUCHEMIN, G. A. **Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities**. [S.l.]: MicroMo Electronics Inc, 2003. <http://www.micro-drives.com>. Acessado em: 05/12/16. Citado na página 33.
- CORKE, P. **Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB**. [S.l.]: Springer, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- EXCHANGE, S. **3D Printing, Stack Exchange, Site**. Stack Exchange, 3D printing, 2016. Acessado em: 22-11-2016. Disponível em: <<http://3dprinting.stackexchange.com/questions/3013/shifted-layers-on-replicator-2>>. Citado na página 13.
- GANSSELE, J. **The art of designing embedded systems**. [S.l.]: Newnes, 2008. Citado na página 56.
- HARRIS, M.; ANDJARGHOLI, V.; LAWRENSON, P.; HUGHES, A.; ERTAN, B. Unifying approach to the static torque of stepping-motor structures. In: **IET. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. [S.l.], 1977. v. 124, n. 12, p. 1215–1224. Citado na página 30.
- NORMEY-RICO, J. E.; ALCALÁ, I.; GÓMEZ-ORTEGA, J.; CAMACHO, E. F. Mobile robot path tracking using a robust pid controller. **Control Engineering Practice**, 2001. Elsevier, v. 9, n. 11, p. 1209–1214, 2001. Citado na página 44.
- OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. Citado na página 27.
- POLOLU. **Pololu, Site**. 2016. <https://www.pololu.com/product/1182>. Acessado em: 07-06-16. Citado na página 35.

- SDP-SI, C. D.-. **Handbook of timing belts and pulleys**. [S.l.]: Stock Drive Products / Sterling Instrument, 2007. <http://www.sdp-si.com/D265/PDF/D265T003.pdf>. Acessado em: 18/04/16. Citado na página 36.
- SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. Robotics: modelling, planning and control, ser. advanced textbooks in control and signal processing. **Springer**, 2009. v. 26, p. 29, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 20, 22 e 23.
- SKOGESTAD, S.; GRIMHOLT, C. The simc method for smooth pid controller tuning. In: **PID Control in the Third Millennium**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 147–175. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 41.
- SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. [S.l.]: Wiley New York, 2007. Citado na página 27.
- TSUI, W.-h. K. **An advanced controller for hybrid stepper motor with novel damping technique**. Tese (Doutorado) — The Hong Kong Polytechnic University, 2008. Citado na página 32.
- ZMORPH. **Zmorph, Site**. 2016. <http://blog.zmorph3d.com/closed-loop-system-explained/>. Acessado em: 09-12-16. Citado na página 13.

Anexos

ANEXO A – Descrição dos problemas encontrados ao longo da montagem da impressora 3D.

A impressora 3D, modelo Prusa i3, utilizada como objeto deste trabalho foi montada pelo próprio aluno, autor desta monografia.

Durante a montagem e utilização da impressora, diversos problemas foram encontrados. Este anexo descreve de forma sucinta tais problemas, com o intuito de auxiliar outras pessoas que por ventura venham montar uma impressora 3D.

A.1 Problemas de entupimento do bico de extrusão

O entupimento no bico de extrusão da impressora 3D é um problema que pode possuir diversas causas. Algumas das causas identificadas, bem como as soluções utilizadas ao longo deste trabalho são descritas à seguir:

- Aquecimento excessivo da câmara de extrusão: O aquecimento excessivo da câmara de extrusão presente na impressora 3D causa um amolecimento do plástico que está sendo introduzido na extrusora. Desta forma, o parafuso extrusor torna-se incapaz de tracionar o filamento e levá-lo até o bico de extrusão, causando um acúmulo indevido de plástico e entupindo o bico de extrusão. Como solução, foi acoplado um *cooler* na câmara de extrusão, permitindo que a câmara de extrusão se mantivesse fria durante toda a impressão. É importante destacar que o *cooler* deve ser utilizado sempre, para que se evite este tipo de problema.
- Desgaste do parafuso trator: Na extrusora, é possível ajustar a quantidade de compressão que o parafuso trator realizará sobre o filamento. Caso uma grande compressão seja aplicada, o parafuso trator irá sofrer um desgaste excessivo em suas ranhuras, impedindo de que o tracionamento seja feito da forma correta. O mau tracionamento do filamento impedirá que um volume ideal de plástico seja extrudado, causando falhas na peça. Além disso, o tracionamento excessivo pode desgastar o filamento a ponto de ser produzido um pó de plástico muito fino, que ao longo do tempo entupirá a extrusora. Para que estes problemas sejam evitados, recomenda-se

aplicar uma compressão no filamento e verificar se não estão sendo deixadas marcas no filamento, caso esteja, a compressão deve ser reduzida.

- Filamento com umidade: Os plásticos ABS e PLA utilizados como filamentos na impressora são plásticos que absorvem umidade com facilidade. Caso o plástico esteja úmido, no momento em que ele é aquecido durante impressão, a água presente no interior do plástico evapora e gera bolhas na sua superfície, resultando em peças mal acabadas. Como solução para este problema, foi criada uma caixa para acondicionamento das bobinas de filamento. Nesta caixa foi introduzida sílica gel para que o ar no entorno do filamento se mantivesse seco. A Figura 47 mostra a caixa criada.



Figura 47: Caixa projetada para controle de umidade do filamento

A.2 Erros dimensionais nas peças impressas

As peças impressas estavam apresentando erros dimensionais, onde o sólido impresso apresentava dimensões consideravelmente diferentes das dimensões definidas no projeto da peça. Foi verificado que o volume de plástico sendo extrudado era diferente do volume previsto. Isto ocorre devido a variações no diâmetro do filamento que alimenta a extrusora. Para que este problema seja amenizado, deve-se pegar um paquímetro e realizar diversas

medições de diâmetro ao longo do filamento. O valor médio obtido deve ser usado como parâmetro no *software* de impressão utilizado.

A.3 Isolamento térmico da impressora 3D

Durante a impressão, no momento em que o plástico é extrudado, correntes de ar entram em contato com o material e provocam o seu encruamento. Este encruamento pode acarretar em problemas dimensionais, visto que o plástico se deforma pela mudança abrupta de temperatura. Para que isto fosse evitado, uma caixa de isolamento térmico foi projetada e fabricada através do método de corte a laser em termoplástico acrílico. A Figura 48 mostra a caixa projetada.

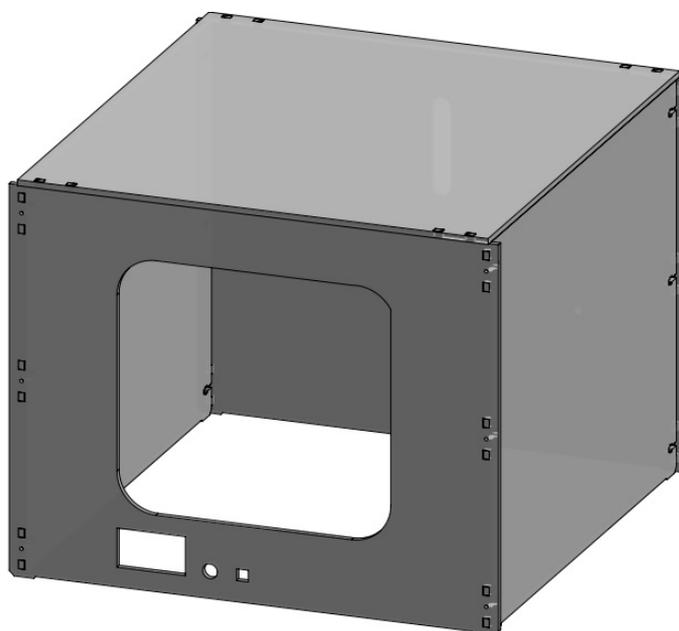


Figura 48: Caixa projetada para isolamento térmico

A.4 Adesão da peça à mesa de impressão

Quando o plástico ABS era utilizado, as peças descolavam da mesa em algumas impressões, sendo necessário reiniciar todo o processo. Este problema ocorre devido a uma falta de aderência entre a mesa e o objeto. Após terem sido testados diversos métodos de aderência, observou-se que a utilização de cola bastão se mostrou como a melhor maneira para aumentar a aderência entre a peça e a mesa. Dentre as colas testadas, a cola bastão Scotch[®] 3M foi que apresentou os melhores resultados.