



Felipe Rebelo Lopes

**Desenvolvimento e controle de um acoplador
elástico baseado em elastômeros para SEA**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. PhD. Marco Antonio Meggiolaro
Coorientador: Prof. D.Sc. Helon Vicente Hultmann Ayala

Rio de Janeiro
Maio de 2022

Felipe Rebelo Lopes

**Desenvolvimento e controle de um acoplador
elástico baseado em elastômeros para SEA**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. PhD. Marco Antonio Meggiolaro

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. D.Sc. Helon Vicente Hultmann Ayala

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Ph.D. Mauro Speranza Neto

Pesquisador Autônomo

Prof. D.Sc. Vivian Suzano Medeiros

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. D.Sc. Luciano Luporini Menegaldo

Departamento de Engenharia Biomédica - UFRJ

Ph.D. Thiago Boaventura Cunha

EESC - USP

Rio de Janeiro, 11 de Maio de 2022

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe Rebelo Lopes

Graduou-se em Engenharia Mecatrônica pela Universidade do Estado do Amazonas (Amazonas, Brasil). Fez mestrado no Instituto Militar de Engenharia - IME, na seção de Engenharia Mecânica e de Materiais especializando-se na área de Sistemas Dinâmicos.

Ficha Catalográfica

Lopes, Felipe Rebelo

Desenvolvimento e controle de um acoplador elástico baseado em elastômeros para SEA / Felipe Rebelo Lopes; orientador: Marco Antonio Meggiolaro; coorientador: Helon Vicente Hultmann Ayala. – 2022.

126 f: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Atuador Elástico em Série. 3. Controle de Sistemas Mecânicos. 4. Junta Flexível. 5. Manipulador Robótico. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Vicente Hultmann Ayala, Helon. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Em primeiro lugar a minha esposa que me deu suporte nos momentos mais difíceis nesta tese e à minha família que mesmo longe sempre me deram apoio incondicional.

Ao meu orientador e ao co-orientador que me motivaram e me ajudaram incansavelmente durante toda a tese. E todos do laboratório que foram peças fundamentais nessa jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e com o apoio da FAPERJ por meio do edital FAPERJ nota 10 - doutorado.

Resumo

Lopes, Felipe Rebelo; Meggiolaro, Marco Antonio; Vicente Hultmann Ayala, Helon. **Desenvolvimento e controle de um acoplador elástico baseado em elastômeros para SEA**. Rio de Janeiro, 2022. 126p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Questões de segurança têm sido fatores cruciais para que robôs se tornem aptos a trabalhar em colaboração com seres humanos. Esse esforço envolve um controle de força mais refinado e uma certa flexibilidade nas juntas para que a adaptação dos robôs ao ambiente real e às atividades comuns dos seres humanos seja efetiva. Uma das tecnologias com esse objetivo é o Atuador Elástico em Série (SEA - Series Elastic Actuator), que apresenta um bom desempenho para controle de força, tolerância a impactos causados por agentes externos, baixa impedância, e a redução de vibrações mecânicas. Em um SEA, um elemento elástico passivo é adicionado entre o motor e o elo acionado, a fim de gerar flexibilidade. Este elemento pode ser uma mola, ou outro elemento deformável com flexibilidade caracterizada por sua geometria e pela elasticidade do material utilizado. Esta tese propõe um Atuador Elástico em Série Baseado em Elastômero (eSEA), cuja flexibilidade é obtida a partir de um elastômero depositado entre dois elementos metálicos: um interno acoplado ao atuador, e o outro externo acoplado ao elo. O eSEA foi projetado e avaliado por software de CAD e Elementos Finitos, com o intuito de obter a flexibilidade desejada para a aplicação. Foram produzidas duas versões do eSEA, com duas durezas diferentes: 10 e 55 Shore A. Testes estáticos com células de carga foram executados para caracterizar a rigidez dos eSEA. Os eSEA foram instalados em manipuladores robóticos especialmente desenvolvidos para essa tese. Experimentos compararam o desempenho das técnicas de controle com e sem a influência dos eSEA, mostrando que o uso dos eSEA diminuiu os erros de posicionamento do manipulador e possibilitou o controle de força sem a necessidade de sensores específicos. A fim de criar um modelo para que a estimativa do torque seja mais precisa a partir do eSEA, foram realizadas técnicas de identificação para estimar uma função de transferência que melhor representa o alongamento da borracha. E combinados com modelos NARX e NARMAX do erro de estimativa, gerou-se um modelo híbrido para o elemento elástico no qual soma-se a função de transferência com o erro modelado.

Palavras-chave

Engenharia Mecânica - Teses; Atuador Elástico em Série; Controle de Sistemas Mecânicos; Junta Flexível; Manipulador Robótico.

Abstract

Lopes, Felipe Rebelo; Meggiolaro, Marco Antonio (Advisor); Vicente Hultmann Ayala, Helon (Co-Advisor). **Design and control of an elastomer-based elastic coupling for SEA**. Rio de Janeiro, 2022. 126p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Safety issues have been crucial factors for robots to become able to work in collaboration with humans. This effort involves more refined force control and a certain flexibility at the joints, for the robots to better adapt to real environments and common human tasks. A technology with this objective is the Series Elastic Actuator (SEA), which presents good performance for force control, tolerance to impacts caused by external agents, low impedance, and dampening of mechanical vibrations. In an SEA, a passive elastic element is added between the motor and the driven link, in order to generate a desired flexibility. This element can be a spring, or else another deformable element with flexibility characterized by its geometry and material elasticity. This thesis proposes an Elastomer-Based Series Elastic Actuator (eSEA), whose flexibility is obtained from an elastomer deposited between two metallic elements: an internal element attached to the actuator, and an external element attached to the link. The eSEA was designed and evaluated by CAD and Finite Element software, in order to obtain the desired flexibility for the application. Two versions of the eSEA were produced, with two different hardnesses: 10 and 55 Shore A. Static tests with load cells were then executed to characterize the stiffness of the eSEA. The eSEA elements were installed on robotic manipulators especially developed for this thesis. Experiments compared the performance of control techniques with and without the influence of eSEA, showing that the use of the eSEA reduced manipulator positioning errors and enabled force control without the need for specific sensors. In order to create a model for more accurate torque estimation from eSEA, identification techniques were performed to estimate a transfer function that best represents the rubber elongation. And combined with NARX and NARMAX models of the estimation error, a hybrid model was generated for the elastic element in which the transfer function is added together with the modeled error.

Keywords

Series Elastic Actuator; Control of Mechanical System; Flexible Joint; Robotic Manipulato.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Impactos da Robótica	15
1.2	Motivação	16
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivo	19
1.5	Contribuições	19
1.6	Organização	20
2	Revisão Bibliográfica	22
2.1	Controle de Força	22
2.2	Atuador Elástico em Série (SEA)	23
2.2.1	SEA Baseado na Geometria	26
2.2.2	SEA Baseado no Material	28
2.3	Tipos de Juntas Flexíveis	31
2.3.1	Atuador de Rigidez Variável - (VSEA)	31
2.3.2	Atuador Elástico em Paralelo (PEA) e Atuador Elástico em Série e Paralelo - (SE+PEA)	32
2.3.3	Elo Elástico em Série (SEL)	33
2.4	Sistema de Controle para Juntas Flexíveis	34
2.5	Modelagem do Elemento Elástico	35
2.6	Análise da Literatura	37
2.7	Contribuições Originais	37
3	Metodologia	39
3.1	Modelo de 1 GDL com Atuador Elástico em Série	39
3.1.1	Crerios de Avaliao	40
3.2	Modelo de n GDL com Atuador Elástico em Série	41
3.3	Projeto do Elemento Elástico em Série baseado em Elastômero	41
3.3.1	Caracterização - Teste Estático	42
3.3.2	Caracterização - Validação	43
3.4	Projeto da Bancada de Teste	43
3.5	Estimador de Estados	45
3.6	Filtro de Kalman	45
3.7	Modelos Viscoelásticos	47
3.7.1	Modelo Baseado no Sistema de Maxwell	47
3.7.2	Modelo Baseado no Sistema de Kelvin-Voigt	47
3.7.3	Modelo Baseado no Sistema de Zener	47
3.7.4	Modelo Baseado no Sistema de Burgers	48
3.7.5	Modelo NARX	48
3.7.6	Modelo NARMAX	50
4	Projeto e desenvolvimento do Elemento Elástico Baseado em Elastômeros	52
4.1	Requisitos e Simulação	52

4.2	Manufatura	53
4.3	Teste Estático	55
4.4	Validação do Experimento com eSEA	57
4.5	Critérios de avaliação do projeto do eSEA	58
4.5.1	Variação de K_e	58
4.5.2	Variação de I	60
5	Validação Experimental do eSEA	61
5.1	Modelo do Sistema em Espaço de Estados	61
5.2	Identificação do Sistema	62
5.3	Estratégias de Controle	67
5.3.1	Controle de Posição	67
5.3.1.1	Controle I - Controle PD	69
5.3.1.2	Controle II - Controle PD + FeedForward	70
5.3.1.3	Controle III - Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque	71
5.3.1.4	Termos relacionados com o eSEA	74
5.3.1.5	Esforço do Controlador	76
5.3.1.6	Comparação entre diferentes velocidades de oscilação	77
5.3.2	Controle de Força	78
6	Modelagem do Elemento Elástico	81
6.1	Aquisição de dados	81
6.2	Metodologia proposta	82
6.3	Resultados	84
6.3.1	Modelo viscoelástico	84
6.3.2	Metodologia proposta	92
6.4	Discussão	96
7	Conclusão	99
A	Desenvolvimento do eSEA - Especificação, características e preparo.	102
A.1	Molde base	102
A.2	Borracha líquida	103
A.3	Preparo do material	103
B	Datasheet dos Elementos Eletrônicos	106
C	Representação do Sistema em Solidworks	108
D	Video do eSEA	113
	Referências bibliográficas	114

Lista de figuras

Figura 2.1	Linha do Tempo do SEA Baseado na Geometria.	26
Figura 2.2	Linha do Tempo do SEA Baseado no Material.	28
Figura 3.1	Atuador Elástico em Série. a) Modelo de 1 Elo com SEA. b) Representação plana.	39
Figura 3.2	Representação do teste estático	42
Figura 3.3	Representação do teste para validação do eSEA.	43
Figura 3.4	Bancada de Teste Experimental. O componente inovador eSEA produzido pelo autor é descrito pelo autor em [108]	44
Figura 3.5	Esquema de Funcionamento do Filtro de Kalman	46
Figura 3.6	Tipos de Modelos Reológicos. a) Modelo de Maxwell. b) Modelo de Kelvin-Voigt. c) Modelo de Zener. d) Modelo de Burgers	48
Figura 3.7	Diagrama de blocos da estimativa proposta utilizando função de transferência em adição ao modelo NARX e NARMAX.	49
Figura 4.1	Dispositivo eSEA desenvolvido no trabalho. A) Comparativo de tamanho e tipos de borrachas utilizadas, a esquerda borracha com dureza Shore A 55, e a direita borracha com dureza Shore A 10. B) Descritivo do desenho em Solidworks com escala em milímetros.	52
Figura 4.2	Simulação de Torque x Deslocamento Angular	53
Figura 4.3	Nível de dureza em borrachas. Borracha da cor azul Shore A 10 e borracha da cor preta Shore A 55. Figura adaptada de [116].	54
Figura 4.4	Posicionamento do eSEA e do Encoder em um elo. A) Vista do elo com o lado do encoder. B) Vista do elo com o lado oposto onde fica o eSEA. C) Dispositivo eSEA proposto neste trabalho.	54
Figura 4.5	Bancada experimental para a realização do teste estático	55
Figura 4.6	Estimativa do eSEA Shore 10A.	56
Figura 4.7	Estimativa do eSEA Shore 55A.	56
Figura 4.8	Bancada de teste para validação do eSEA. A) Vista superior com o movimento do elo no plano. B) Vista lateral para mostrar o paralelismo do elo e a célula de carga.	57
Figura 4.9	Gráfico de validação do eSEA.	58
Figura 4.10	Critérios de avaliação do eSEA - Variação de K_e	59
4.10(a)	Sensibilidade a Forças externas	59
4.10(b)	Flexibilidade	59
4.10(c)	Transmissibilidade	59
Figura 4.11	Critérios de avaliação do eSEA - Variação de I	60
4.11(a)	Sensibilidade a Forças externas	60
4.11(b)	Flexibilidade	60
4.11(c)	Transmissibilidade	60

Figura 5.1	Descrição do sinal de excitação para o sistema de identificação em malha aberta usando o controle On-Off.	62
Figura 5.2	Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta rígida. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.	63
Figura 5.3	Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo rígido e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.	64
Figura 5.4	Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta flexível eSEA 55A. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.	64
Figura 5.5	Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo com eSEA 55 e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.	65
Figura 5.6	Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta flexível eSEA 10A. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.	65
Figura 5.7	Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo com eSEA 10 e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.	66
Figura 5.8	Diagrama de Blocos dos Controles Propostos. I) Controle I - Controle PD; II) Controle II - Controle PD com <i>FeedForward</i> ; III) Controle III - Controle PD com <i>FeedForward</i> e <i>feedback</i> de Torque.	67
Figura 5.9	Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle I.	69
Figura 5.10	Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle PD adicionado de um Feedforward.	70
Figura 5.11	Gráfico de comparação entre erro de posição $q_{des} - q_{estimado}$ dos controles I e II.	71
Figura 5.12	Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle Controle PD + Feedforward = Feedback de Torque.	72
Figura 5.13	Gráfico de comparação entre erro de posição $q_{des} - q_{estimado}$ do Controle PD + Feedforward e Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque.	72
Figura 5.14	Gráfico de comparação de velocidades do sistema.	73
Figura 5.15	Sinais de erro de posição do elo. Este gráfico apresenta apenas o intervalo entre 5 e 7 segundos a fim de eliminar o transiente e o sinal subsequente continua com as oscilações de maneira estável.	74
Figura 5.16	Gráfico da diferença entre a posição do motor e do elo ($\theta - q$)	75

Figura 5.17 Gráfico da diferença entre a velocidade do motor e do elo ($\dot{\theta} - \dot{q}$).	76
Figura 5.18 Comparação entre sinais de torque do controle II.	77
Figura 5.19 Comparação entre sinais de torque do controle III.	77
Figura 5.20 Comparação do sinal de erro de posição ($q_{desejado} - q_{estimado}$) para três diferentes frequências de oscilação.	78
Figura 5.21 Teste de Bancada para Controle de Força. A célula de carga mede a força do elo e a distância entre o eixo de rotação e onde a força é aplicada, é conhecida.	79
Figura 5.22 Comparação da força de controle. O sinal medido é o valor da célula de carga, o sinal estimado é calculado baseado no valor do eSEA, e o sinal do controlador ODrive é calculado pelo controlador.	80
Figura 6.1 Bancada de Teste Experimental para Caracterização do Elemento Elástico.	81
Figura 6.2 Exemplos de sinais de entrada. A) Sinal de senoide com amplitude e frequência determinada. B) Degrau suavizado gera função degrau em períodos de tempos determinados. C) Sinal do tipo <i>Chirp</i> com frequências que aumentavam com o tempo.	82
Figura 6.3 Diagrama de blocos da estimativa para os valores da função de transferência com número de pólos entre 2 e 9.	83
Figura 6.4 Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico utilizando o sinal de senoide S1 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.	85
Figura 6.5 Gráfico de histerese do elemento elástico utilizando o sinal de senoide S1 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.	86
Figura 6.6 Gráfico do teste de validação do modelo utilizando o sinal de degrau suavizado DS3 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.	86
Figura 6.7 Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico usando o sinal S6. Curvas de valores medidos x valores estimados.	87
Figura 6.8 Gráfico de histerese do elemento elástico usando o sinal de senoide S6. Curvas de valores medidos x valores estimados.	87
Figura 6.9 Gráfico do teste de validação do modelo usando o sinal de degrau suavizado DS3. Curvas de valores medidos x valores estimados.	88
Figura 6.10 Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.	89
Figura 6.11 Gráfico de histerese do elemento elástico usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.	89
Figura 6.12 Gráfico do teste de validação do modelo usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.	90
Figura 6.13 Gráfico do teste de validação do modelo usando degrau suavizado com o modelo de Burgers. Curvas de valores medidos x valores estimados.	91

Figura 6.14 Sinal de Excitação do tipo Chirp. O sinal oscila a frequência entre 0.1 e 10Hz durante 120 segundos	94
Figura 6.15 Modelo NARX do Erro de Estimativa	96
Figura 6.16 Comparativo do modelo utilizando apenas a função de transferência e do modelos propostos H1 e H2 que utiliza uma função de transferência de oitava ordem com uma compensação do erro pelo modelo NARX e outro pelo modelo NARMAX.	97
Figura 6.17 Comparativo dos resíduos entre os sinais do modelo apenas com a função de transferência e do modelo proposto.	98
Figura A.1 Posição da peça interna no molde base.	102
Figura A.2 Posição da peça externa no molde base.	103
Figura A.3 Fluxograma para produção do elemento elástico.	104
Figura A.4 Peças do eSEA com o elemento elástico recém produzidos.	105
Figura B.1 Configurações da Placa Controladora Utilizada na Tese.	106
Figura B.2 Guia do Motor Utilizado na tese.	106
Figura B.3 Datasheet do Encoder Utilizado na Tese.	107
Figura C.1 Desenho Geométrico Elos. Representação das vistas em Solidworks	108
Figura C.2 Desenho Geométrico de peças A e B da base do manipulador. Representação das vistas em Solidworks	109
Figura C.3 Desenho Geométrico das peças C e E da base do manipulador. Representação das vistas em Solidworks	110
Figura C.4 Desenho Geométrico do Elemento Elástico do SEA. Note que a parte hachurada é feita de borracha enquanto a interna e externa de alumínio 7075.	111
Figura C.5 Vistas da montagem de um braço com SEA. a) Vista Superior. b) Vista lateral. c) Vista frontal. d) Vista isométrica.	111
Figura C.6 Visões do Projeto no software SolidWorks. a) Visão Superior. b) Visão Frontal. c) Visão Lateral	112
Figura C.7 Desenho da Montagem de 1 Elo com SEA no software SolidWorks. a) Visão Explodida. b) Peça que Contem o Elemento Elástico. c) Representação da Posição do SEA e Encoders	112
Figura D.1 QR code com o caminho para o video mostrando a facilidade para a troca de elementos elásticos.	113

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Valores medidos nos testes estático	56
Tabela 5.1	Nomeclatura dos Tipos de Controle	68
Tabela 5.2	Ganhos do controlador	69
Tabela 5.3	Comparação dos tipos de controle utilizados.	74
Tabela 6.1	Sinais de Entrada Utilizados na Tese.	83
Tabela 6.2	Estimativa do modelo Zener usando uma entrada. As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1	85
Tabela 6.3	Estimativa do modelo de Burgers usando uma entrada. As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1	90
Tabela 6.4	Estimativa do modelo de Zener usando duas entradas (multiobjetivo). As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1	91
Tabela 6.5	Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada seno (S3 - Tabela 6.1)	92
Tabela 6.6	Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada degrau suavizado (DS1 - Tabela 6.1)	93
Tabela 6.7	Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada <i>chirp</i> (C1 - Tabela 6.1)	93
Tabela 6.8	Coeficientes utilizados no modelo NARMAX polinomial	95
Tabela 6.9	Comparativo entre metodologias de identificação utilizada na tese	95

Lista de Abreviaturas

GDL – Graus de Liberdade

SEA – Series Elastic Actuators – Atuador Elástico em Série

eSEA – Elastomer-based SEA – Atuador Elástico em Série baseado em Elastômero

VSEA – Variable Series Elastic Actuator – Atuador Elástico em Série Variável

SMC – Sliding Mode Control – Controle de modos deslizantes

UAV – Unmanned Aerial Vehicles – Veículos Aéreos Não

Tripulados

DOB – Disturbance Observer – Observador de Distúrbios

PEA – Parallel Elastic Actuator – Atuador Elástico em Paralelo

SE+PEA – Series-Parallel Elastic Actuator – Atuador Elástico em Série e Paralelo

SMC – Sliding Mode Control – Controle por Modos Deslizantes

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

SEL – Series Elastic Link – Elo Elástico em Série

SEM-TA – Series Elastic Mmuscle-Tendon Actuator)

MRAC – Model Reference Adaptive Control - Controle Adaptativo por referência

HRI – Human-Robot Interaction – Interação Robô-Humano

NFO – Neighborhood Field Optimization – Otimização por Vizinhança

AI – Artificial Intelligence - Inteligência Artificial

ROV – Remote Operating Vehicles - Veículos de Operação Remota

1

Introdução

A Robótica tem sido aplicada nos mais variados campos de pesquisa. Na década de 1960, o desenvolvimento das tecnologias de circuitos integrados permitiram a criação e programação de robôs essenciais na automação de sistemas de manufatura. Embora o controle fosse rudimentar, estas máquinas obtiveram avanços em diversas indústrias como a eletrônica e a de alimentos, dentre outras. A indústria automotiva foi sem dúvida a mais beneficiada com o emprego de robôs.

Nas décadas seguintes, foram concentrados esforços de modo a criar robôs que pudessem se locomover em um ambiente (a princípio conhecido), e/ou puderem manipular objetos. Em seguida, a pesquisa teve como foco o auxílio para humanos na ergonomia e segurança do trabalho, evitando a fadiga de um operador, por exemplo, ou sua substituição em ambientes perigosos. Além disso, surgiram os denominados robôs de serviço, utilizados para serviços domésticos ou em campo.

Robôs mostraram-se essenciais para dificuldades encontradas nas indústrias pelo esforço repetitivo e precisão requeridas, e rapidamente expandiram-se também para atividades mais complexas e desafiadoras. Logo ficou evidente o suporte que robôs poderiam fornecer em atividades que necessitam alta precisão, trabalhos em ambientes nocivos ao ser humano como em usinas nucleares, e em ambientes inóspitos tais como oceanos e espaço.

1.1

Impactos da Robótica

Sempre houve o desejo de se ter robôs que efetuem trabalhos domésticos, seja por falta de tempo, habilidade ou capacidade. A ideia de uma máquina que possa realizar diversas atividades como lavar louças, limpar a casa, cozinhar, entre outras, sempre foi um atrativo não só pessoal como também comercial.

O desenvolvimento da área de robôs com inteligência social expandiu-se ajudada pelos avanços da inteligência artificial (AI), o que possibilitou uma maior interação com o público, além do reconhecimento de voz e face. Este tópico motiva muitas pesquisas a fim de criar uma relação estável que mantenha o robô atraente e trazendo benefícios para as pessoas [1]. Eles se estendem a

diversos tipos de tarefas como robôs assistentes [2–5], na área educacional [6,7], dentre outros.

No campo da saúde, inúmeros avanços podem ser citados, destacando-se no ramo da robótica de reabilitação [8–10] e da medicina [11–13] com sistemas robóticos aptos a executarem cirurgias de invasão mínima.

Atividades de risco são uma das mais importantes áreas em que os robôs podem ser utilizados, como na necessidade de retirada de pessoas de locais potencialmente perigosos. Apesar de ainda não apresentarem as mesmas habilidades que seres humanos, em certas ocasiões um robô é suficiente para a tarefa. No Japão, um robô conseguiu ultrapassar portas, chegar até os reatores danificados e então avaliar a destruição causada pelo tsunami na Usina Nuclear em Fukushima. Esta ação foi importante, pois a usina apresentava níveis altíssimos de radiação, os quais causariam alto risco aos trabalhadores.

Muitas plataformas de petróleo já possuem estratégias que envolvem a área da robótica. Exemplos claros de sucesso são as operações realizadas com ROV (Remote Operating Vehicles), para inúmeras inspeções submarinas, drones (UAV - Unmanned Aerial Vehicles) que desempenham a atividade de inspeção nas estruturas de flares e cascos, e *pigs* inteligentes para limpeza de dutos. A colaboração da comunidade de robótica em pesquisas na indústria de óleo e gás tem aumentado, em parte pelo desafio proposto por agências francesas e americanas, chamado ARGOS (Autonomous Robot for Gas and Oil Sites), onde as equipes são encorajadas a criarem a nova geração de robôs autônomos para esta produção específica [14].

1.2

Motivação

Segundo Kydd et. al., (2015) [14], plataformas robóticas proporcionariam ganhos em potencial em duas grandes áreas:

1. Saúde, Segurança e Meio ambiente (Health, Safety and Environment - HSE)
 - Emergências, o robô alcançaria fontes de vazamento em locais remotos muito mais rápido, o que reduziria ou eliminaria a intervenção humana.
 - Em áreas de alto risco, ele seria mais rápido na detecção de vazamentos, minimizando assim a exposição dos operadores.
2. Operacional (redução de custo, aumento de eficiência e produção)

- O robô consegue realizar tarefas em ambientes hostis onde operadores têm limitações para intervir, com maior produtividade.
- Em locais de difícil acesso, uma investigação primária sem a presença de humanos pode levar a ganhos em disponibilidade, economia de tempo e recursos de transporte.

Com todas essas possibilidades que a robótica proporciona, nota-se o quanto esta área pode resolver problemas reais, seja salvando vidas ou criando oportunidades de operação em determinados ambientes onde o ser humano, anteriormente, não conseguia atingir.

Manipuladores robóticos tradicionais possuem estruturas robustas e atuadores potentes geralmente para isolar a influência das forças de reação causadas pelas cargas manipuladas. No entanto, vem crescendo o interesse em manipuladores com juntas flexíveis, possibilitando o trabalho interagindo diretamente com seres humanos com mais segurança [15].

A nova indústria 4.0 traz novas formas de trabalho, como a cooperação entre humanos e robôs, criando assim os chamados *COBOTS* (Robôs colaborativos). Esta nova geração de robôs precisa ter certa flexibilidade a fim de se adaptar ao ambiente e às atividades. Processos em que uma pessoa deva carregar um objeto com a ajuda de um robô, ou ambientes em que a máquina precise trabalhar com humanos por perto, são exemplos da importância desta flexibilidade.

Soluções relacionadas à adição de flexibilidade podem ser divididas em duas áreas: A flexibilidade ativa e a flexibilidade passiva.

- Flexibilidade ativa: É usado algum método de controle que considere a posição e a força de contato, geralmente controlando a impedância dos motores elétricos para manter a rigidez do atuador.
- Flexibilidade passiva: Utiliza elementos elásticos físicos, seja por molas mecânicas lineares ou espirais, seja por elementos especiais deformáveis com flexibilidade projetada para obter uma relação desejada entre torques (ou forças) e deslocamentos angulares (ou lineares).

Com as novas formas de trabalhos colaborativos entre humanos e robôs, cada vez mais um atuador rígido não é suficiente para a atividade. Em certos casos, como trabalhos de precisão, essa rigidez é necessária, mas em casos em que existam contatos com seres humanos o manipulador deve ser naturalmente flexível. Caso essas duas variáveis sejam necessárias na atividade (precisão e contato), deve ser feito um balanço para o melhor controle possível. Este controle de força mais refinado exige sensores de força mais precisos e

consequentemente mais caros. Uma classe de atuadores tem sido utilizada com alto desempenho e baixo custo em robôs industriais e robôs de pesquisa. Os chamados Atuadores Elásticos em Série (SEA - Series Elastic Actuator) acrescentam a flexibilidade através de um elemento elástico conectado entre o motor e o elo (flexibilidade passiva). Este atuador tem mostrado diversas vantagens:

- Melhora drasticamente a saída de força de um atuador ([16])
- Reduz efeitos indesejados da transmissão
- Melhor tolerância a choques mecânicos
- Baixa impedância (segurança em interação robô-humano)
- Realimentação de torque real no elo (possibilita compensar efeitos indesejados de atrito nas juntas)
- Redução da largura de banda do sistema (similar ao movimento humano)
- Robusto a mudança de carga
- Baixo custo

Além do Atuador Elástico em Série com rigidez fixa, existem também uma classe de atuadores com rigidez variável (VSA - Variable Stiffness Actuator), que não é objeto deste estudo.

Em face destas motivações, esta tese visa desenvolver e caracterizar um elemento elástico em série de baixo custo, modular e com um controle simples, a fim de aplicá-lo em atividades de manipulação com necessidade de controle de posição ou força, e com capacidade de atuar com segurança em parceria com seres humanos.

1.3 Justificativa

A utilização de robôs em qualquer área é apreciada pelo grande potencial de retirar o operador de ambientes desconfortáveis que possam causar danos à sua saúde física e mental. A indústria de óleo e gás, por exemplo, tem se interessado pelo desenvolvimento de novas tecnologias para automação de plataformas [17], como os ROVs trabalhando em oceanos profundos com o intuito de auxiliar nos trabalhos de manutenção. E também recentemente têm procurado utilizar robôs bípedes ou quadrúpedes para inspeção e monitoramento de plantas.

Os atuadores elásticos em série (SEA) têm se mostrado como uma alternativa eficiente e barata para um robô com um controle de torque mais refinado, com tolerância a impactos e com baixa impedância.

A gama de aplicações em que o SEA é utilizado tem crescido conforme estes dispositivos ficam mais baratos e simples de serem reproduzidos. Na ideia inicial de robôs colaboradores até as mais novas aplicações de robótica bípede, próteses robóticas, e robótica de reabilitação, o SEA tem sido aplicado não só em pesquisa, mas em aplicações mecatrônicas comerciais. Uma desvantagem desse tipo de sistema é que, por característica, o SEA diminui a faixa de frequência com que o ele pode atuar. Diversas técnicas vem sendo utilizadas para sanar esse problema criando controles mais robustos.

Tratando-se de interação com seres humanos o SEA possui vantagens pela segurança e flexibilidade que o atuador oferece. No entanto, outra desvantagem para esse tipo de aplicação é o modelo de rigidez e histerese da mola não estarem acurados o suficiente causando oscilações indesejadas e por conseguinte o desconforto do operador. A ideia de utilizar elastômeros para ser o elemento elástico em um sistema do tipo SEA foi validada por vários trabalhos visto que é possível criar um modelo viscoelástico e o próprio amortecimento do material causa um conforto a mais para o ser humano que vai utilizar o exoesqueleto, ou sistema de reabilitação entre outros.

Por isso, esta tese se justifica como uma contribuição para sistemas robóticos que necessitam de flexibilidade pelo desenvolvimento de um elemento elástico baseado em elastômeros de fácil reprodução, aumentando assim as possibilidades de aplicações finais. Além disso, a modelagem deste elemento é discutida a fim de possuir um modelo robusto para as aplicações.

1.4 Objetivo

O objetivo desta tese é projetar, desenvolver e avaliar um novo elemento elástico baseado em elastômero para realizar um controle de posição e força, a fim de aplicá-lo em tarefas que necessitam de flexibilidade.

Os objetivos específicos incluem modelar, simular e desenvolver um elemento elástico que possua flexibilidade para ser utilizado em sistemas do tipo SEA em aplicações robóticas, propor controladores de posição e de força que sejam efetivos em sua aplicação no manipulador com atuador elástico em série com rigidez linear, e criar um modelo robusto para o elemento elástico que descreva o comportamento do material viscoelástico.

1.5 Contribuições

- Projeto de um atuador elástico em série utilizando elastômeros que seja modular e de baixo custo. Este item gerou um artigo no Congresso Bra-

sileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 2021): Lopes, F. R., e Meggiolaro, M. A. Design of a low-cost series elastic actuator for application in robotic manipulators. In: 26 TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. ABCM, 2021.

- Mesmo utilizando modelos mais robustos para a estimativa de torque a partir de funções de transferências, ainda existem incertezas inerentes ao sistema como erros nos sensores, atritos, folgas entre outros. Por isso, foi criado um modelo NARX ajustado por redes neurais e um modelo NARMAX polinomial do erro gerado pela estimativa desta função de transferência criada a fim de gerar uma compensação para o modelo do elemento elástico. Esta abordagem híbrida, permite garantir maior interpretabilidade (caixa-cinza dos modelos estudados) e capacidade de simulação (caixa-preta).
- O sistema de controle em cascata gerado nesta tese apresentou resultados satisfatórios visto que foi usada uma constante elástica baseada na lei de Hooke. Como os parâmetros do sistema foram todos identificados a priori, o controle baseado no modelo e o filtro de Kalman conseguiram controlar o sistema de um grau de liberdade.
- Concepção de uma bancada de teste para identificação e controle de sistemas com junta rígida ou flexível.

1.6 Organização

Além do capítulo atual de introdução, esta tese está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Revisa técnicas de controle de força utilizando SEA, sejam baseadas na geometria do elemento ou no material elástico no qual ele é composto. Além de apresentar uma breve revisão sobre alguns tipos de SEA existentes.
- Capítulo 3 - Aborda os fundamentos teóricos para a realização da pesquisa, tais como modelagem do SEA para 1 grau de liberdade e para n graus de liberdade e o filtro de Kalman utilizado no sistema de controle. Além disso, descreve o funcionamento da bancada de teste para a caracterização, validação e controle do elemento elástico com modelo de mola constante.
- Capítulo 4 - Apresenta o projeto e desenvolvimento do atuador elástico em série, bem como os testes para realizar o cálculo da rigidez da mola de forma que a constante elástica inerente ao material seja linear.

- Capítulo 5 - Demonstra o sistema experimental com a identificação dos parâmetros, e a implementação do controle de posição e força.
- Capítulo 6 - Analisa um modelo mais robusto para o elemento elástico baseado em modelos do tipo Zener, Burgers entre outros. E por fim, um modelo NARX e um modelo NARMAX são gerados a fim de modelar o erro da estimativa e ser utilizado como compensador.
- Capítulo 7 - Apresenta as conclusões do trabalho, seguido de apêndices com esquemas do sistema experimental, datasheet dos componentes eletrônicos e um tutorial de como fazer o elemento elástico.

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Controle de Força

O Atuador é um mecanismo que transforma alguma forma de energia em movimento e força. Possuem diversos tipos como elétricos, hidráulicos e pneumáticos além das diferenças de atuações que podem ser lineares, rotativas entre outros. Em manipuladores robóticos, grande parte dos atuadores apresenta imprecisão na geração de forças nas juntas devido fenômenos que induzem ruídos de força no atuador, tais como fricção, deslizamento, força de ruptura nas vedações, folga nas transmissões e *cogging* no motor (torque de retenção ou “sem corrente”). [16]

Em um bom controle de força esses ruídos de medição podem acarretar ações não desejadas o que pode ser perigoso tanto para a pessoa que trabalha próximo ao robô quanto para o próprio sistema levando a instabilidade e/ou danos mecânicos. Robinson et al. (1999) [16] salientam que bons atuadores que possuem controle de força tem importantes medidas a serem consideradas, como: Largura de banda de força, Impedância de saída, Faixa dinâmica e Densidade de força e potência

- A largura de banda da força permite avaliar o quão rápido o atuador consegue gerar as forças desejadas no efetuador.
- A impedância mecânica de saída de um manipulador é a quantidade mínima de força que o atuador realiza na carga. Atualmente, existem muitos motores com baixa impedância que são os chamados *Backdrivable*.
- A faixa dinâmica avalia quanto o atuador é sensível a forças externas com relação à capacidade de força total. Uma grande faixa dinâmica é desejável, pois permite o atuador utilize de maneira versátil em atividades sensíveis e em grandes situações de força. [16]
- Densidade de força e potência relaciona a capacidade do atuador gerar uma força com a unidade de massa e volume dele. Isto é, um objeto pequeno com altas densidades de força e potência consegue produzir altas energias.

Na interação do robô com o ambiente é necessário controlar a força do manipulador. O mesmo deve ser apto a sentir e controlar forças e mesmo assim conseguir controlar também sua posição. Este controle não pode ser realizado regulando apenas posição, pois uma força maior ou menor que a necessária, o efetuator do manipulador pode perder o contato ou pressionar demais uma superfície. Siciliano e Villani (2012) [18] constataam que ambientes com interação rígida ou dinâmica, apenas o controle de posição não é recomendado, pois, as forças de contato podem alcançar valores inseguros.

Com relação aos graus de liberdade, durante a fase de contato o robô tem o movimento restrito, tornando-o um mecanismo de cadeia fechada. Esta mudança de fase pode ter suas próprias leis de controle como abordado por Al-Shuka e Song (2017) [19].

O controle de torque refinado pode ser também dependente da precisão dos sensores de deflexão de molas. Esses sensores comerciais apresentam boa acurácia, no entanto, tem um custo bem elevado tornando um projeto muitas vezes inviável. [20]

Um trabalho recente com o humanoide BHR-6P [21] realizado por Li et al. (2020) teve foco no modelo viscoelástico para as juntas a fim de realizar o controle de flexibilidade mais refinado no momento de grandes impactos. A partir do modelo foi possível calcular a relação entre força de contato e posição linear/angular sendo utilizado no tornozelo para a caminhada e nos braços para proteger de quedas.

2.2

Atuador Elástico em Série (SEA)

O Atuador Elástico em Série tem se mostrado como uma alternativa com alto potencial e de baixo custo agregado não apenas em robôs industriais como em robôs de pesquisas. Este atuador adiciona flexibilidade por meio de um elemento rígido entre o motor e o elo e tem sido amplamente utilizado em aplicações de mecatrônica, especialmente em humanoides e exoesqueletos.

De Luca e Book (2016) [22] afirmam que essa flexibilidade mecânica garante um desacoplamento do atuador com o elo, reduzindo a energia cinética envolvida em colisões desconhecidas. E que também os torques dos motores e de perturbação tornam-se fisicamente colocalizados, característica importante para a rejeição de vibrações.

Aumentando a constante da mola, aumenta tanto a frequência natural do sistema quanto a largura de banda do controle de torque. No entanto, uma mola mais rígida reduz a deflexão da mola e, conseqüentemente, a resolução do sensor de torque. [16]

O balanço ótimo entre flexibilidade passiva depende de algumas considerações de material, bem como as especificações da resolução do sensor de torque e absorção de energia. Molas mais rígidas proporcionam melhores faixas de detecção de torque por unidade de deflexão angular, portanto melhor largura de banda de controle de torque embora aumentem as forças transmitidas aos redutores, atuadores e robô. Em molas mais flexíveis e com maior deflexão, há uma maior absorção de energia, mas amplifica erros de posição devido à gravidade e inércia. Estes erros são somados quando se trabalha com múltiplas cadeias cinemáticas. [20]

No entanto, a histerese do elemento elástico inserido no sistema pode causar imprecisão relevante nas medições. Apesar dessas dificuldades diversas aplicações com SEA tem demonstrado seu potencial como robôs quadrupedes, robôs bípedes, robôs com 2 braços, e robôs vestíveis. [23]

Diversos trabalhos utilizando SEA podem ser encontrados na literatura e separados por categorias como: Robótica de Reabilitação [24–26]; Exoesqueletos e Próteses [27–29]; Robôs Bípede [30–32]; E Interação Física Robô-Humano (pHRI - Physical Human-Robot Interaction) [33,34].

Pratt e Williamson (1995) [35] apresentam os primeiros conceitos e as características do SEA bem como seus benefícios de ser tolerante ao choque mecânico, a baixa inércia refletida no atuador, um controle de força mais preciso e estável, menor dano ao ambiente ou ser-humano, e armazenamento de energia. Posteriormente, Pratt et al. (2002) [36] dizem que o SEA é uma arquitetura que vai contra o projeto do “quanto mais rígido melhor” e apresenta o sistema físico bem como possíveis aplicações para o mecanismo.

Ekkelenkamp et al. (2007) [37] utilizaram um SEA com cabos flexíveis. A ideia era um disco interno ser movido pelo motor enquanto cabos ligados a molas lineares eram alongados e realizavam torque no elo. Este sistema foi utilizado em um robô para reabilitação de marcha humana conhecido por LOPES (Lower-extremity Powered ExoSkeleton).

Martins et al. (2014) [38] projetaram um SEA para serem montados em motores Dynamixel e integrados ao robô humanoide de competições. O atuador era acoplado a uma espécie de caixa que continha duas molas e ao realizar o torque, um came pressionava uma mola enquanto a base tensionava a outra mola. Tudo isso era medido por um sensor magnético posicionado no centro da montagem.

Jeon et al. (2018) [39] apresentaram um projeto e controle ótimo de dedos robóticos antropomórficos impressos em impressoras 3D. A estrutura das juntas permite flexão e extensão por meio de um elemento flexível (borracha de silicone) gerando uma alta flexibilidade nos testes de força.

Alguns trabalhos estudam a passividade no SEA como no realizador por Lee et al. (2021) [40] que incorporaram um observador de passividade a um controle de passividade e mostraram que a rigidez máxima do controle de impedância em um SEA pode ser maior que o considerado em trabalhos anteriores como valor máximo. O estudo experimental de Lee et al. (2019) [41] mostraram que a rigidez do controle de impedância pode alcançar valores mais altos que a própria rigidez inerente ao SEA, dependendo da condição dinâmica da carga. Apresentando o robô SARA da DLR, Iskandar et al. (2020) [42] apresentam um controlador que utiliza a posição do elo para realizar a realimentação do sistema, diferente de trabalhos anteriores que utilizam a posição do motor por ser um sistema localizado. Desta forma eles provaram que a passividade do robô com o ambiente pode ser assintoticamente estável utilizando sensores de alta resolução.

Lee et al. (2019) [43] utilizaram o DOB (Observador de Distúrbios - Disturbance Observer) para o controle do SEA a fim de melhorar o controle de interação homem-máquina em uma aplicação física conhecida por Steer-By-Wire. Utilizando o DOB, Jo et al. (2019) [44] estavam interessados em como aliviar um impacto em um SEA. Para isso eles criaram um critério de performance baseado na potência e realizaram estudos experimentais com um controle que alternava entre controle de posição e controle de força. Haninger et al. (2020) [45] apresentam uma análise do impacto do DOB no controle de impedância, tanto utilizando os distúrbios do motor quanto do torque de saída, além de mostrarem a importância do controle de *feedforward* para a passividade utilizando métodos de DOB. Yun et al. (2020) [46] estudaram um robô de três graus de liberdade com SEA para aplicações de robótica colaborativa e que utiliza um controlador baseado em observador de distúrbios (DOB). Este controle foi capaz não só de melhorar a performance do robô como também a performance de atividades no espaço cartesiano.

Abe et al. (2020) [47] apresentam um controle híbrido de posição e força utilizando um robô com SEA. O sistema possui um compensador de avanço de fase no controle do servomotor e em seguida em inserido um observador para realizar um controle de estados completos. Para o teste foi simulado uma atividade de um manipulador de dois graus de liberdade com liberdade para movimentar-se na direção Y e realizar força na direção X. No entanto, mesmo nesta atividade simples, o manipulador obteve dificuldade em manter a posição desejada já que não trabalha com os espaços admissíveis para separar as matrizes de projeção de posição e força.

O trabalho de Sun et al. (2022) [48] está focado em um novo tipo de elemento elástico baseado em elastômeros que é 23,33 % mais leve em compa-

ração com os sensores de torque elástico de última geração. Neste trabalho eles modelam a histerese do elemento usando um modelo melhorado de Regressão Paramétrica de Processo Gaussiano (PGPR) baseado na estrutura NARMAX. Desta forma, o modelo reduz o MAE (Erro Médio Absoluto) em 7 % em comparação com outros resultados de modelagem de histerese.

2.2.1

SEA Baseado na Geometria

Alguns trabalhos apresentam um elemento mecânico que liga o círculo interno com o motor ou caixa de redução e o círculo externo ligado ao elo do manipulador. Alguns exemplos são apresentados na Figura 2.1 e comentados em seguida.



Figura 2.1: Linha do Tempo do SEA Baseado na Geometria.

Um dos primeiros trabalhos que utilizam a geometria da peça para gerar a elasticidade do sistema foi apresentado por Stienen et al. (2008) [49] e logo

depois uma nova versão por Lagoda et al. (2010) [50]. O objetivo do trabalho foi auxiliar as juntas de um exoesqueleto que atuavam na reabilitação de movimentos dos membros.

Diftler et al. (2011) [51] desenvolveram um trabalho no qual o elemento foi desenhado para gerar elasticidade nas juntas de um robô humanoide desenvolvido pela NASA em parceria com a empresa GM. Utilizando esse SEA os autores conseguiram uma boa sensibilidade de força externa e implementar diversos controles de impedância.

Utilizando a técnica de elementos finitos, Carpino et al. (2012) [52] criaram um SEA a fim de obter maior sensibilidade de força e maior largura de banda nos atuadores.

O trabalho de Wang et al. (2013) [53] apresentou um novo SEA que consiste em um atuador linear e uma mola com espiral dupla capaz de medir torques entre 0.08 Nm e 100 Nm sem histerese ou folgas. Este SEA foi utilizado em um exoesqueleto chamado *Minwalker* e o resultado foi um Sistema com menos de 3Kg de peso.

A NASA, por exemplo, apresentou o seu primeiro robô humanoide que utiliza o SEA nas juntas através de um elemento mecânico com forma flexível. Radford et al. (2015) [54] apresentaram alguns avanços inseridos neste humanoide com a característica de possuir SEA nas juntas para que a manipulação pudesse ser flexível nas atividades com os humanos.

A pesquisa de reabilitação realizada por Dos Santos et al. (2017) [55] possui um elemento customizado para ser utilizado com pessoas respeitando o torque máximo a ser realizado além de mostrarem a possibilidade de regular a impedância na caminhada.

Liu et al. (2018) [56] estudaram uma mola torsional customizada para reduzir o volume nas juntas do manipulador avaliaram a vibração no sistema por meio do controle RRC. Além disso, tornaram o sistema robusto adicionando observadores de distúrbios tanto para o motor quanto para o conjunto do elo. Desta forma, foi possível compensar distúrbios externos e incertezas do sistema.

Cappello et al. (2019) [57] introduziram o conceito de SEA multivariável, onde o motor é ligado a um elemento elástico que possui múltiplas configurações de equilíbrio. Desta forma, foi possível aumentar a eficiência desejada e liberar mais energia.

2.2.2

SEA Baseado no Material

Neste caso existe um elemento elástico, em muitos casos elastômeros, responsáveis por realizarem a reação ao torque imposto no motor. Novamente, alguns exemplos são apresentados na Figura 2.2 e discutidos posteriormente.

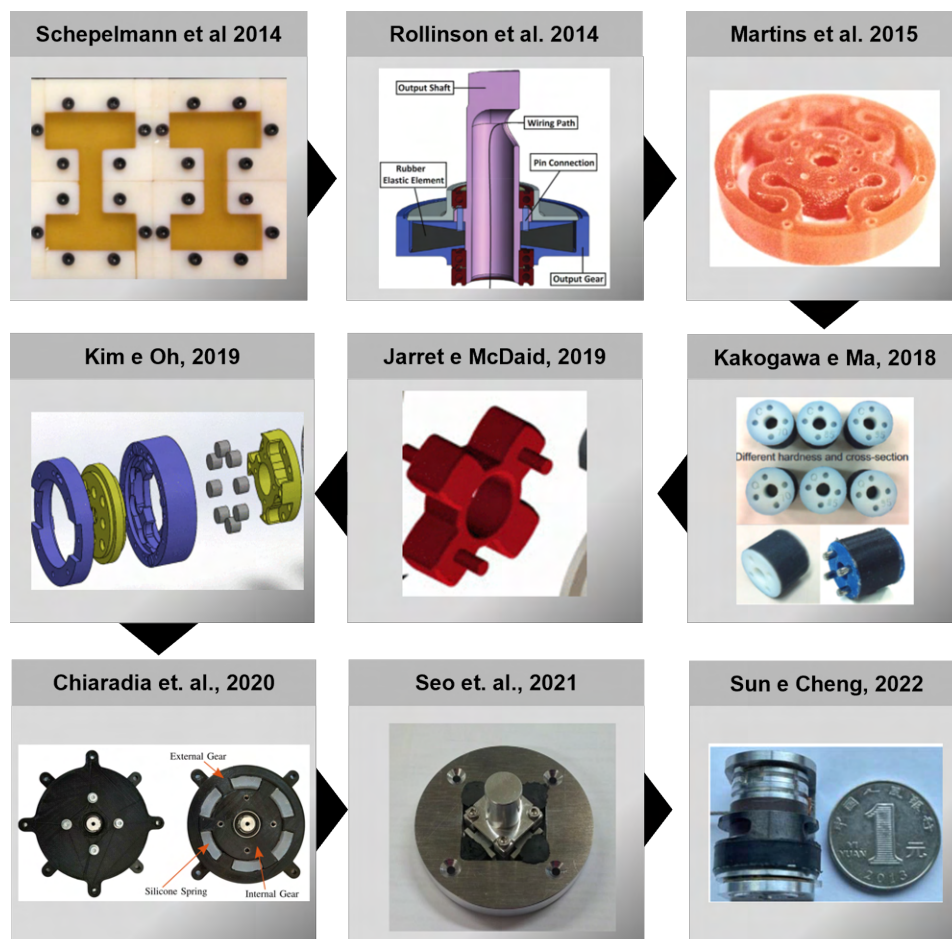


Figura 2.2: Linha do Tempo do SEA Baseado no Material.

Schepelmann et al. (2014) [58] apresentam um conceito de mola não linear passiva que utiliza cames rotativos para alongar estas molas e assim criar flexibilidade no sistema. Com esse sistema foi possível recriar perfis de torque não lineares definidos pelo usuário.

Rollinson et al. (2014) [59] abordaram um sistema modular com SEA que foi conectado em cadeia em forma de uma cobra (Snake Robot). Cada módulo tem conexão Ethernet, sensor IMU e controlador ARM. O robô conseguiu controlar posição, velocidades e torques, mas algumas melhorias foram discutidas visto que as propriedades da borracha são sensíveis às mudanças de temperatura no ambiente. Com isso, eles utilizaram filtros recursivos a fim de atualizar a constante elástica do elemento. A partir de

medições recorrentes de deflecções do elemento elástico a uma taxa de 1KHz, é possível criar uma função heurística de forma que a rigidez seja aproximada do valor ideal.

Martins et al. (2015) [15] apresenta um tipo diferente de SEA que depende da geometria para criar o efeito de mola mas também utiliza-se do material, neste caso um disco de poliuretano é modelado por elementos finitos. O Sistema mecânico é de fácil manufatura e a eletrônica foi projetada para plataforma Arduino. O sistema utiliza um controle PID e os autores realizaram uma identificação do sistema usando um modelo Auto-Regressivo (ARX) para aproximar de uma equação polinomial linear. Já para a constante elástica, foram realizados experimentos baseados no princípio da alavanca onde foram geradas 20 torques conhecidos e foram medidos os deslocamentos. Desta forma é possível estimar a constante pela lei de Hooke.

O estudo de Kakogawa e Ma (2018) [60] apresenta um robô de inspeção com muitos elos que utiliza o SEA com mola de borracha. Esta configuração foi proposital para que o tamanho do robô fosse menor e aumentasse a rigidez da articulação e ao mesmo tempo fosse leve para a aplicação. No entanto o torque alcançado pelo SEA não foi o suficiente para a aplicação requerida (subir uma parede) o que pode ser contornado alterando o tipo de elemento elástico de acordo com a aplicação ou criar um tipo de elemento elástico variável a fim de alternar enquanto estiver subindo ou estiver em linha reta na horizontal. Outro problema detectado pelos autores foi o aquecimento que influencia diretamente no elemento elástico fazendo com que não seja o mais adequado para este tipo de aplicação.

Jarrett e McDaid (2019) [61] apresentam como uma solução em potencial que é utilizar elementos baseados em elastômeros no lugar de molas. O modelo chamado eSEA foi testado em exoesqueleto e apresenta um estudo da elasticidade bem como avaliação da histerese. Os autores identificaram que a histerese em longos períodos eram estudadas apenas por modelos de molas por isso propuseram um estudo mais específico no qual foi criado um modelo baseado na elasticidade, na relação de relaxamento do material e em um operador que simulava a histerese. Entretanto, havia uma flutuação de temperatura que acabava influenciando no relaxamento da borracha (como identificado também por Rollinson et al. (2014) [59]). Além disso, o controlador utilizado pelos autores não era robusto o suficiente para seguir corretamente o valor desejado nos ciclos de transição. Outro problema que identificaram foi a não identificação dos parâmetros dinâmicos do sistema e nem das não-linearidades do encoder, o que pode ter influenciado nesse controle do sistema.

Kim e Oh (2019) [62] apresentam um SEA com um conjunto de elastô-

meros circular espaçados igualmente e que ao receber o torque do motor, um conjunto de elastômeros recebe esse torque enquanto os outros se distanciam da base. Foi proposto um modelo de histerese, baseado em um polinômio e uma exponencial, e um método de compensação para estimar os torques. Eles apresentaram um modelo de histerese 10% melhor comparado ao da Lei de Hooke no entanto o erro de controle de torque alcançou 13%. Isso porque não foi possível diminuir o erro no modelo de histerese para o eSEA que eles propuseram, o que gerou avaliações para uma melhora neste modelo de histerese baseado em deformação.

O trabalho de Chiaradia et al. (2020) [63] apresenta um novo tipo de elemento elástico para SEA, um Elemento Visco-Elástico em Série (Series Visco-Elastic Joint - SVEJ). Os autores realizam a modelagem do SVEJ utilizando o modelo de NEO-Hookean para materiais hiperelásticos. O torque estimado é dado pela equação de carga e descarga usando a soma de 3 componentes: o torque estático médio; o torque estático variável; e o torque dinâmico. Como parte do elemento é impressa em 3D, é um elemento de baixo custo e leve. E o simples sistema de controle PD permite um sistema estável.

Ao analisarmos alguns tipos de SEA baseados em geometria percebemos que são grandes e pesados devido ao tipo de aplicação requerida e uma crítica que é feita por Seo et al. (2021) [64] é justamente levar este tipo de dispositivo para uma aplicação mais leve. Com base nessa afirmação, os autores criaram um tipo de SEA utilizando borracha e que considera o modelo de Bouc-Wen para a histerese inerente ao elemento elástico. Os autores indagam que os trabalhos com SEA, em sua maioria, ignoram os termos viscoelásticos ou apenas utilizam um modelo caixa preta. Eles conseguiram diminuir o erro em 75% quando comparado a rigidez linear considerando a lei de Hooke e para trabalhos futuros vão criar uma metodologia onde o usuário possa escolher a rigidez desejada, o que direciona o trabalho para um atuador elástico com rigidez variável.

O trabalho de Sun et al. (2022) [48] apresenta um sensor de torque baseado em elastômeros para exoesqueletos onde conseguiram tanto a miniaturização do elemento quando a diminuição do peso. Se comparado ao estado da arte, a relação volume-torque do sensor proposto é reduzido em 15,48 % e o peso é reduzido em 23,33 %. Em trabalhos que utilizam molas de metal (torsional, helicoidal ou estrutural) as relações peso-rigidez e volume-rigidez são bastante altas. Com relação ao modelo, eles afirmam que as características de amplitude e frequência tem influência na histerese e por isso devem ser consideradas simultaneamente no modelo. Por isso, na modelagem do elemento eles utilizam um modelo de regressão de processo Gaussiano (Parametric Gaussian

Process Regression - PGPR) baseado na estrutura NARMAX a fim de caracterizar a histerese do elemento. Assim como abordado por Kim e Oh (2019) [62], a relação de torque-deformação da mola de borracha foi assimétrica onde as deformações em uma direção chegavam a 12.4°, e em outra direção chegou a -11.3°.

2.3

Tipos de Juntas Flexíveis

Estudos relacionados ao SEA estão progredindo em vários campos, tanto no controle mais robusto quanto no tipo de SEA se este for variável ([65]), reconfigurável ([66]), pneumático, baseado em fios, paralelos, paralelo e em série ao mesmo tempo, entre outras configurações. A seguir serão apresentados três tipos de SEA que estão sendo bastante estudados atualmente.

2.3.1

Atuador de Rigidez Variável - (VSEA)

Apesar das vantagens do atuador elástico em série, o sistema ainda sofre com alguns problemas de performance em parte porque a rigidez é constante. A fim de aprimorar este tipo de atuador, uma espécie de atuador elástico em série variável (Variable Series Elastic Actuator - VSEA) vem ganhando interesse dos pesquisadores nos últimos anos ([67–77]). A ideia de você possuir um elemento elástico que pode gerar rigidez diferente e que possa ser utilizado em diferentes aplicações, permite que o sistema possa atuar em diversas aplicações. Por exemplo, quando a rigidez do elemento elástico é alta, a velocidade de resposta do sistema de controle é aprimorada. Em contrapartida, se a rigidez do elemento elástico é baixa, o SEA possui uma impedância de saída menor e um control de força mais robusto. Este tipo de atuador VSEA possui variações de rigidez de forma física, seja por configuração de molas, seja por combinação de borrachas, dentre outras formas de alteração da rigidez.

Existem diversas formas de se alterar a rigidez fisicamente, como no trabalho de Pan et al. (2017) [73] que usa uma liga de memória de forma (shape memory alloy - SMA) para reduzir a rigidez total e aumentar o amortecimento. Este sistema é inspirado nos músculos e tendões dos seres humanos. Neste trabalho eles utilizam um modelo de quarta ordem e um observador baseado em redes neurais adaptativas a fim de controlar a liga de memória de forma.

Outra forma de variar a rigidez do elemento elástico de um SEA encontrada por Abbood et al. (2022) [77] foi criando uma mola em espiral (ou mola espiral logarítmica). Este elemento em espiral consegue alcançar variações tanto na rigidez quanto no amortecimento e é controlado de maneira simples

a partir de uma equação calibrada previamente. Apesar do simples controle PID utilizado, mostrou-se eficaz ao suprimir as oscilações de saída e reduzir o tempo necessário para atingir a estabilidade no regime permanente. Contudo, ao desenrolar a espiral, o controlador PID exibiu picos que afetaram consideravelmente o sistema.

Liu et al (2023) [78] apresentam um atuador de rigidez variável usado no exoesqueleto. Para o controlador, eles utilizam um controle de impedância em cascata combinado com um observador de distúrbios (DOB) que, apesar de trabalhos anteriores ([74]) explorarem o DOB com um sistema VSEA, nenhum aborda a eficácia deste tipo de controlador ao desempenhar um tipo de tarefa. O observador de distúrbios projetado como um observador de entrada desconhecido (Unknown Input Observer - UIO) considera a variação de rigidez que existe no VSA. Ao analisarem as faixas de frequência e um controle de impedância mais acurado, eles foram capazes de melhorar a performance do controlador a fim de serem utilizados no treinamento para a reabilitação usando o exoesqueleto. Além disso, o controle proposto pode ser embarcado em outros tipos de VSEA.

2.3.2

Atuador Elástico em Paralelo (PEA) e Atuador Elástico em Série e Paralelo - (SE+PEA)

Ao considerarmos a maneira que a mola está disposta com o motor no sistema, existem diversos trabalhos ([79–83]) que exploram não só o sistema com a mola em paralelo com o motor, chamados de atuadores elástico em paralelo (Parallel Elastic Actuator - PEA), como também os que usam a combinação de molas em paralelo e em série com o motor, os chamados atuadores elástico em série e paralelo (SE+PEA).

As pesquisas de SEA também avançam em áreas em que se necessita mimetizar o tornozelo humano. Como se pensava em sistemas para exoesqueleto, ou fisioterápicos, em um primeiro momento a solução comum foi utilizar molas a fim de auxiliar os impactos que poderiam ocorrer nos motores devidos as cargas enfrentadas. O SEA se mostrou bastante eficaz quando se tratou de próteses para tornozelo mas a fim de entender qual a melhor disposição das molas, o trabalho de Grimmer et al. (2012) [84] fez uma comparação entre atuador elástico em série (SEA), atuador elástico em paralelo (Parallel Elastic Actuator - PEA) e atuador elástico em série e paralelo (SE+PEA). Eles chegaram a conclusão de que a mola em paralelo melhora a potência que é entregue no sistema mas que a mola em série garante uma quantidade de energia necessária para movimentar o motor menor. A combinação entre os dois

acabou pegando apenas as desvantagens de cada configuração. Além disso os autores ressaltam a importância de se utilizar um modelo elástico não linear para aprimorar os resultados.

Com o avanço das pesquisas na área, mostrou-se as vantagens que o sistema com molas em paralelo e em série poderiam agregar ([85,86]) aumentando a flexibilidade dos atuadores e reduzindo as exigências nos atuadores. Em [81] os autores afirmam que a área que combina SE+PEA é bem menos documentada que a de SEA e PEA mas que estes novos atuadores são capazes de melhorar o desempenho do torque do motor. Entretanto, as estruturas mecânicas são bem mais complexas e pesadas o que dificultam sua aplicação. E neste trabalho eles utilizam o sistema SE+PEA em um exoesqueleto chamado PALExo para recuperação de pacientes. O sistema de controle é robusto e conta com um controle PID mais um control interno de velocidade além de um observador de distúrbios (DOB). Mesmo com um sistema de controle robusto, ele não foi capaz de resitir a distúrbios de alta frequência o que sugere que o DOB necessita de algumas modificações como o observador de distúrbios estendido. Além disso, como não é modelado a rigidez do sistema, é necessário utilizar algum controle de impedância que possa mitigar esse efeito de acordo com os requisitos do exoesqueleto.

Um trabalho recente utilizando apenas a mola em paralelo com o motor apresentado por Guo et al. (2022) [82] formula uma função convexa capaz de representar um sistema PEA linear e não-linear e chegaram a conclusão de que o sistema linear possui uma redução de consumo de energia do motor de 31 % se comparado ao modelo linear. Além disso, os autores comparam a energia gasta na presença de cargas cinemáticas e incertezas cinéticas, tanto para o sistema do tipo paralelo como para o sistema do tipo em série. Desta forma eles conseguiram avaliar que se as perdas por aquecimento são dominantes com relação às perdas de atrito viscoso, o projeto ótimo de PEA superam o desempenho do sistema SEA, reduzindo ainda mais o consumo de energia do motor em até 63 %.

2.3.3

Elo Elástico em Série (SEL)

Inspirado no SEA, Calanca et al. (2018) [?] introduzem um novo conceito de sistema chamado Elo Elástico em Série (Series Elastic Link - SEL) que efetivamente utiliza a flexibilidade do material e a geometria do link para alcançar o controle de força/torque no manipulador. Os autores mostram que a modelagem do SEL é semelhante à de um SEA e há vantagens em utilizar este novo tipo de atuador. É possível, por exemplo, usar um elo mais leve e

ter um baixo custo quando se usa um elo de material plástico. Com relação à segurança, os autores comentam que o SEL pode melhorar a tolerância ao impacto e estima melhor as forças atuantes.

2.4

Sistema de Controle para Juntas Flexíveis

Muitas técnicas de controle são empregadas com efetividade em manipuladores com juntas flexíveis. Exemplos de realimentação de estados foram utilizados por Thomas et al. (2020) [88] que abordava o controle por passividade e por Lopes et al. (2020) [89] que utilizam os estados completos do sistema para um controle de trajetória de um manipulador de quatro barras.

Em se tratando dos controladores de impedância existentes para SEA, todos fazem uso de realimentação de força explícita, o que significa que a força é explicitamente medida e alimentada de volta ao sistema de controle. Isto porque o controle da força implícita (onde a força é fornecida em circuito aberto através do controle da corrente do motor) não pode mascarar a inércia do motor e não pode amortecer as oscilações das molas em série. [90]

Fotuhi e Bingul (2021) [91] realizam um controle de impedância híbrido em um atuador de músculo-tendão elástico em série (SEM-TA series elastic muscle-tendon actuator) obtendo o desempenho desejado em cada tipo de ambiente, grama (macio), carpete (médio) e chão sólido (duro). Outro trabalho que emprega o controle de impedância é o realizado por Haninger et al. (2020) [45] que apresenta um controle de impedância híbrido usando um observador de distúrbios melhorando o monitoramento de torque do sistema.

Existem também técnicas adaptativas que podem ser utilizadas em juntas flexíveis como a apresentada no trabalho realizado por Calanca e Fiorini, 2014 [92] que apresentam um controle adaptativo baseado no modelo (MRAC). Neste tipo de aplicação, a dinâmica do ser humano que estará em contato com o dispositivo é fundamental no entanto existem diversas incertezas difíceis de serem calculadas. Sendo assim, os autores utilizaram modelos dinâmicos bem simplificados que representassem o ser humano no sistema. E aplicando a técnica adaptativa foi possível gerar um controle com muitas vantagens perante ao controle baseado em passividade, isso porque atende às especificações de controle de força desejadas mesmo quando a dinâmica acoplada muda, e porque não precisam de um ajuste refinado já que são adaptativos. Outro trabalho que utiliza o modelo MRAC é apresentado por Lanh et al. (2022) [93]. Eles propuseram o controle MRAC combinado com o algoritmo de *back-stepping* para superar as incertezas do sistema com SEA em um bípede. Apesar do modelo se apresentar apropriado nas simulações, ainda é necessário validar

esse controle no sistema físico.

Um controle de movimento robusto que utiliza o SEA é avaliado experimentalmente por Sariyildiz et al. (2020) [94]. Eles apresentam um novo controle de movimento usando um observador de distúrbios de torque e o controle por modos deslizantes. Desta forma o sistema conseguiu controlar trajetórias de maneira desejada e com segurança mesmo em ambientes desconhecidos ou dinâmicos. Este controle permite que o modelo do sistema não necessite um ajuste preciso das suas variáveis. Quando a dinâmica do lado da ligação e características como atrito e folga são desconhecidas e difíceis de modelar, o controle por DOB provou ser capaz de melhorar a robustez do controle de força. Há vários esquemas de controle usando DOB, como por exemplo, no trabalho de Han et al. (2023) [95] é utilizada perturbação total em bloco para representar todos os efeitos dinâmicos desconhecidos. Este modelo ultra-local acoplado ao observador de distúrbio estendido consegue um controle de força robusto e preciso de um SEA de baixa rigidez.

As aplicações conhecidas como interação homem-robô (HRI) estão aumentando com o avanço dos sistemas de controle de força tipo SEA. Esta técnica de controle é estudada por Calanca e Fiorini (2014) [96] para avaliar a estabilidade e o desempenho. Devido aos autores lidarem com um sistema robótico assistivo, há muitas incertezas quando se trata de modelar o ser humano. Assim, eles utilizaram um controle robusto de modos deslizantes (Sliding-Mode Controle - SMC) onde lidam com uma região bem definida no espaço de estados, que define a força desejada apesar das incertezas.

2.5

Modelagem do Elemento Elástico

Em controles que dependem do modelo é importante que as variáveis sejam muito bem conhecidas e validadas conforme o sistema. Em se tratando de sistemas com atrito e/ou histerese esse modelo é cada vez mais difícil de ser escrito. Para isto é necessário o procedimento de identificação usando alguns passos como modelagem, projeto experimental, aquisição de dados, processamento de sinais, estimativa de parâmetros e validação do modelo [97]. Existem dois tipos de técnicas de identificação de parâmetros, as técnicas online e as offline. Ambas utilizam sinais de entrada e saída de acordo com uma trajetória, no entanto, as técnicas offline usam as informações de entrada e saída, em seguida é feito o pré-processamento e no fim estima-se os parâmetros. No caso das técnicas online, o pré-processamento e as estimativas de parâmetros são realizadas enquanto a trajetória é realizada. Estas estimativas geralmente utilizam métodos de otimização tais como mínimos quadrados, máxima vizinhança

entre outras [98].

Baseado no princípio do acoplamento, o trabalho de Paskarkeit et. al., (2013) [99] visa um modelo dinâmico linear de ordem reduzida que representa a histerese do elemento elástico em questão. Na primeira etapa é feita uma identificação do sistema utilizando o modelo de caixa preta com o modelo Hammerstein-Wiener (HW model). Mas a fim de simplificar o modelo de elastômero, foi realizada uma identificação de caixa cinza baseada em um modelo de molas e amortecedores (do tipo Kelvin-Voigt). O modelo alcançou uma precisão de 84,76% usando um arranjo de 5 até parâmetros. Através destes dois testes, os autores demonstraram que os sistemas lineares são capazes de representar o modelo do elemento elástico.

A modelagem do elemento elástico dos sistemas do tipo eSEA (atuador elástico em série baseado em elastômeros) é realizada de várias maneiras. Alguns trabalhos negligenciam termos viscoelásticos inerentes ao sistema ([61]) e tentam gerar equações que representam comportamento de histerese. Outra maneira de modelar o elemento elástico é usar um modelo de caixa preta ([99]) onde uma abordagem indireta é seguida para produzir um modelo de tempo contínuo do acoplamento elástico a partir de seus dados de entrada e saída. Alguns autores utilizam modelos reológicos que simulam elementos físicos, tais como mola e amortecedor.

Como reportado em Jarret e Mcdaid, (2019) [61], a identificação de parâmetros em robôs é de suma importância para o controle do sistema. E no trabalho de Miranda-Colorado et al. (2018) [100] é abordada a técnica offline para juntas flexíveis. Eles realizam a estimativa através da entrada de torque e as medidas de posição do elo e do motor. Em seguida a identificação utiliza a velocidade do motor e do elo usando um algoritmo de diferenciação. Este procedimento permite a identificação de manipuladores com n graus de liberdades para robôs com juntas flexíveis. No trabalho de Bolívar-Nieto et al. (2021) [101] é apresentado um novo tipo de SEA e a identificação é realizada apenas para os termos de atrito viscoso e atrito de Coulomb. Usando a técnica offline, eles validam o sistema comparando o modelo com o sistema experimental ajustando a curva via método de mínimos quadrados. No trabalho de Chen et al. (2022) [102] foi utilizada a técnica online de identificação de parâmetros para um exoesqueleto usando uma otimização de vizinhança (Neighborhood Field Optimization - NFO) para a geração de uma trajetória de excitação. Esta trajetória é comparada com o modelo dinâmico e um controle adaptativo de *backstepping* é projetado para ajustar uma trajetória satisfatória.

2.6

Análise da Literatura

Os autores tratam de diversas formas o modelo de SEA. Os trabalhos de Austin et.al., 2015 [104], Paskarbeits et.al., 2013 [99] e Wei et.al., 2021 [105] por exemplo utilizam modelos fenomenológicos para representar o material em estudo. Modelos do tipo Zenner para materiais viscoelásticos são lineares e acabam não representando o comportamento de um SEA não linear. No trabalho de Jarrett e McDaid, 2019 [61] e de Kim e Oh, 2019 calculam o torque no SEA utilizando polinômios e equações exponenciais de acordo com a histerese da borracha. Esta estratégia também pode excluir algumas não linearidades presentes no material que é constituído o SEA. Uma possibilidade ainda não explorada na literatura de SEA é usar modelos de ordem fracionais. O trabalho de Rodrigues e Oliveira, 2015 [106] apresenta um estudo do modelo de ordem fracional aplicado a materiais viscoelásticos e compara com os modelos já existentes de Maxwell e Voigt. Esta forma de modelagem é bastante interessante para um modelo de SEA variável já que possível alternar entre valores de deformação desejados.

Outra forma de modelagem é não utilizar uma equação física representativa, apenas gerar um modelo em caixa preta e utilizar no sistema. É desta forma que Paskarbeits et.al., 2013 [99] e Sun et.al., 2022 [48] realizam a modelagem do seu dispositivo SEA. Uma das desvantagens deste método é que sem um modelo representativo, é mais difícil de otimizar o sistema físico.

Logo, o modelo caixa cinza onde necessita-se de um modelo físico a priori, pode tornar o modelo muito complexo a ponto de influenciar no controle do sistema e não representar o comportamento do material que é composto o SEA. O modelo caixa preta onde não há modelo físico representativo, pode gerar equações que simulem o comportamento não linear do elemento elástico no entanto, se for necessário realizar algum tipo de atualização ou otimização, não será possível entender o que cada coeficiente representa para o sistema físico. Dessa forma, é interessante ter um modelo representativo do material que o SEA é composto, no entanto é crucial que as não linearidades do elemento também sejam captadas no modelo a fim de gerar uma estimativa de torque mais precisa e confiável.

2.7

Contribuições Originais

A partir de todos os trabalhos comentados nas subseções 2.2.1 e 2.2.2 optou-se por criar um SEA baseado em materiais por causa dos custos envolvidos na fabricação do elemento elástico já que este seria uma produção

específica a exemplo dos trabalhos de Radford et al. (2015) [54] e Cappelo et al. (2019) [57]. Com o SEA baseado em elastômeros, é possível criar um molde e reproduzir diversos elementos elásticos da mesma forma que Jarret e Mcdaid (2019) [61] e Kim e Oh (2019) [62]. As desvantagens neste caso seriam a natureza não linear da borracha que afetaria diretamente o controle do sistema, e a garantia de que o elemento elástico não separaria do restante. Essa não linearidade do elemento elástico desenvolvido pode ser contornado a partir de controles robustos ou implementando uma identificação de sistemas que considere um modelo não linear para a constante elástica como reportado por Zhou et al. (2021) [103]. Como estratégia de controle, o observador de distúrbios proposto por Haninger et al. (2020) [45] tornou-se muito utilizado em trabalhos recentes que utilizam SEA por não necessitarem de uma identificação precisa do elemento elástico em questão. Nesta tese, o controle do eSEA está baseado no modelo que necessita de técnicas de identificação para estimar os parâmetros do sistema a priori. Em um primeiro momento é utilizado o modelo linear baseado na lei de Hooke para o elemento elástico que foi caracterizado pelo princípio da alavanca. Em seguida, para um modelo mais robusto são considerados modelos para materiais elásticos e viscoelásticos baseado em configurações contendo molas e amortecedores como nos trabalhos de Paskarbeits et. al., (2013) [99], Austin et. al., (2015) [104] e Wei et. al., (2021) [105]. Por fim, o erro gerado pelo deslocamento entre o motor e o elo é identificado por um modelo NARX ajustado por redes neurais e por um modelo NARMAX polinomial a fim de compensar o sistema.

Portanto, um sistema experimental foi projetado com um novo elemento elástico baseado em elastômeros de baixo custo e versátil de modo a testar diferentes valores de rigidez. O elemento elástico criado na tese possui uma borracha de silicone sendo apresentado mais detalhadamente no capítulo 4 e seu teste experimental em um manipulador de 1 grau de liberdade é testado e validado no capítulo 5. Este elemento elástico é feito de modo que seja possível antes da aplicação, alterar a borracha interna e consequentemente o valor da rigidez necessária para o sistema. No capítulo 6 é feita a modelagem mais robusta do elemento elástico. Enquanto anteriormente tratávamos como uma constante, neste momento a rigidez passa a ser dada por um modelo representativo para o material visco-elástico.

3

Metodologia

A ideia deste capítulo é apresentar os fundamentos necessários para a execução do estudo. São apresentados os modelos do SEA para 1 e n graus de liberdade, o projeto e caracterização do elemento elástico para SEA, os modelos fenomenológicos de materiais e as arquiteturas NARX e NARMAX utilizadas.

3.1

Modelo de 1 GDL com Atuador Elástico em Série

O trabalho de Pratt e Williamson (1995) [35] introduziu o conceito de SEA e depois Pratt et al. (2002) [36] apresentaram algumas características e aplicações possíveis. Uma análise comparativa entre os três tipos de SEA é apresentado por Paine et al. (2013) [107] e logo após por Lee et al. (2017) [23].

Tomando como exemplo o modelo representado pela Figura 3.1, são utilizadas as medidas da posição do eixo do motor (θ), a posição do elo q , e a constante elástica da mola K_e para o cálculo do torque de reação da mola τ_e .

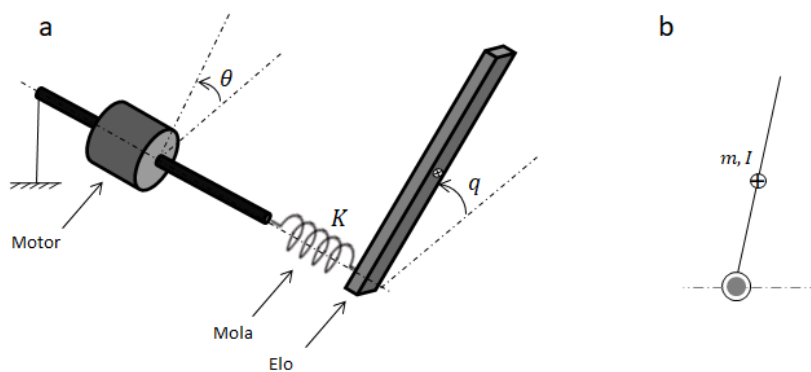


Figura 3.1: Atuador Elástico em Série. a) Modelo de 1 Elo com SEA. b) Representação plana.

Assumindo pequenas deformações, o comportamento do SEA é linear e a equação dinâmica baseada na Figura 3.1 é dada por:

$$I\ddot{q} + D\dot{q} + mgl\sin(q) = \tau_e + \tau_{ext} \quad (3-1)$$

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = \tau - \tau_e \quad (3-2)$$

$$K_e(\theta_d) = \tau_e \quad (3-3)$$

onde I , m e l correspondem à inércia, massa e comprimento do elo, respectivamente, J e B são as inércias e coeficiente de fricção do motor, g a aceleração da gravidade, K_e a constante elástica, τ o torque do motor, τ_{ext} o torque externo sentido no elo e τ_e o torque elástico devido ao SEA. Além disso, θ_d é a deflexão angular da mola que pode ser calculada por $\theta_d = \theta - q$. A importância da Equação (3-3) para a dinâmica do sistema é notada por ser o termo de acoplamento entre a dinâmica do motor e a dinâmica do elo. Em outras palavras, a atuação é originada no motor, que transmite o torque para o elo por meio do elemento elástico.

Com as equações da dinâmica determinam-se as funções de transferência através da transformada de Laplace, na forma:

$$P_m(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{1}{Js^2 + Bs} \quad (3-4)$$

$$P_{elo}(s) = \frac{q(s)}{\tau_e(s)} = \frac{1}{Is^2 + Ds + mgl} \quad (3-5)$$

$$P_e(s) = \frac{\theta_d(s)}{\tau_e(s)} = \frac{1}{K_e} \quad (3-6)$$

onde $P_m(s)$, $P_{elo}(s)$, $P_e(s)$ são as funções de transferência do motor, do elo, e elástico da mola, respectivamente.

3.1.1

Crítérios de Avaliação

Alguns critérios de avaliação abordados por Lee et al. (2017) [23] ajudam a observar certas características relevantes do SEA: Sensibilidade de Força, Flexibilidade e Transmissibilidade.

A partir da Sensibilidade de Força, podemos avaliar o nível de resposta do sistema quando é exercida uma força externa. Com isso, podemos identificar o quanto conseguimos medir precisamente, assim como controlar a força de interação com o ambiente externo. Como afirma Lee et al. (2017) [23], a sensibilidade de força pode ser definida como o quanto o elemento elástico pode deformar com respeito a uma força externa causada no sistema. Para quantificar esse valor, é possível definir uma função de transferência do tipo:

$$S(s) = \frac{\theta_d(s)}{\tau_{ext}} \quad (3-7)$$

Com relação à Flexibilidade, o SEA deve assegurar uma interação segura com o ambiente, e a proteção da transmissão contra forças externas de impacto. Por ser uma das vantagens do SEA comparado aos manipuladores rígidos, o cálculo dessa característica torna-se necessário. Portanto, tem-se que:

$$C(s) = \frac{\omega_{elo}(s)}{\tau_{ext}} \quad (3-8)$$

onde $\omega_{elo}(s) = s.q(s)$

Por fim, a Transmissibilidade também é o indicador necessário no projeto do SEA que reflete a eficiência na transmissão de torque do motor para o elo. Este cálculo é dado por:

$$T(s) = \frac{\tau_e(s)}{\tau} \quad (3-9)$$

3.2

Modelo de n GDL com Atuador Elástico em Série

A equação geral de um manipulador robótico serial que utiliza SEA nas juntas é dada por:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \tau_{en} + \tau_{ext} \quad (3-10)$$

$$\mathbf{J}_n\ddot{\theta}_n + \mathbf{B}_n\dot{\theta}_n = \tau_n - \tau_{en} \quad (3-11)$$

$$\mathbf{K}_{en}(\theta_n - \mathbf{q}_n) = \tau_{en} \quad (3-12)$$

onde H , C , D , G são as matrizes de inércia, de acelerações de Coriolis e centrífugas, de amortecimento e de aceleração da gravidade do manipulador, respectivamente. O termo $K_{en}(q_n - \theta_n)$ é o de acoplamento do elo com o motor, onde K_e é a constante elástica da mola. E J_n e B_n a inércia e o coeficiente de atrito do n-ésimo motor, respectivamente.

3.3

Projeto do Elemento Elástico em Série baseado em Elastômero

O projeto realizou testes com duas borrachas distintas de diferentes níveis de dureza. Uma borracha mais macia (borracha azul Shore A 9-10) usualmente utilizada para moldes e a outra mais dura (borracha preta Shore A 55) amplamente utilizada em pneus.

As características de posicionamento, proporção de catalisador bem como o passo a passo para realizar o elemento elástico são apresentados no apêndice A.

3.3.1

Caracterização - Teste Estático

Neste teste utilizou-se apenas um elo com dois encoders e um Elemento Elástico em Série baseado em elastômero (Elastomer-based Series Elastic Element - eSEE) (Figura 3.2).

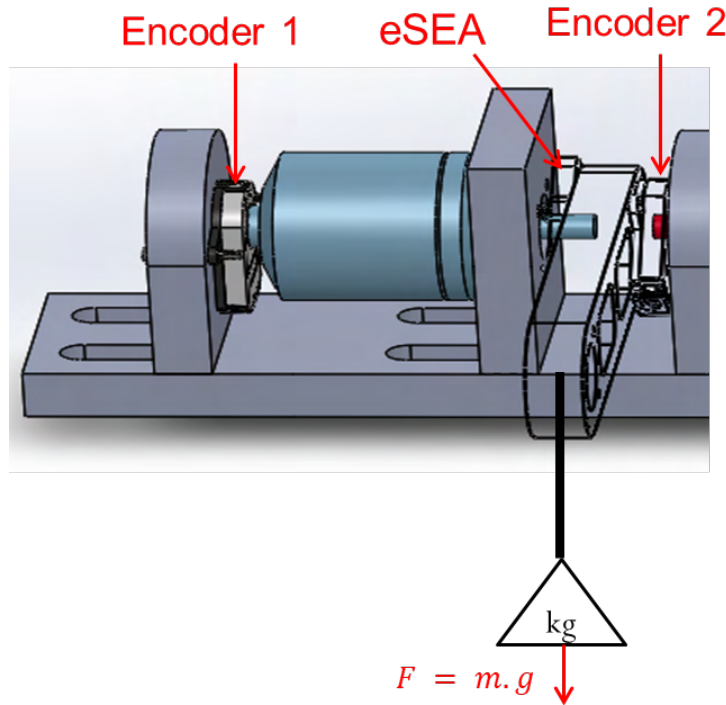


Figura 3.2: Representação do teste estático

Foi utilizado o princípio da alavanca semelhante ao trabalho de Martins et al. 2015 [15]. Basicamente utilizando um peso conhecido na alavanca, esta rotaciona com o encoder 2 e a parte externa do eSEE causando o deslocamento q . Por outro lado, o elemento elástico causa um torque de reação que faz o motor girar com a parte interna do eSEE acarretando o movimento angular θ medido pelo encoder 1. Conhecendo a distância em que é aplicada a força peso, o cálculo do torque produzido pelo peso é dado por:

$$\tau = \mathbf{d} \times \mathbf{F} \quad (3-13)$$

Com o valor do torque produzido, e conhecendo a deflexão θ_d entre o encoder 1 e encoder 2, é possível calcular a constante elástica do eSEE, considerando *a priori* que este elemento se comporta como uma mola linear, utilizando a lei de Hooke dada por:

$$\tau = -K\theta_d \quad (3-14)$$

onde τ é o torque de reação, K é a constante elástica da mola torsional e θ_d é a deflexão que ocorre entre os dois encoder calculado por $\theta_d = \theta - q$.

3.3.2

Caracterização - Validação

É necessário saber o quanto o eSEE transmite de torque e quanto é o esperado. Desta forma foi montada uma bancada de testes (Figura 3.3) com uma célula de carga posicionada na trajetória do elo para medir a força realizada. Desta maneira é selecionada a posição angular desejada para o motor θ_{des} sendo medidos a deflexão θ_d do elo para com o motor (diferença entre encoder 1 e encoder 2) e a força sentida na célula de carga. Sabendo a distância entre o eixo de rotação e onde a força é aplicada (comprimento de um furo a outro do elo), podemos calcular o torque sentido por meio da Equação 3-13.

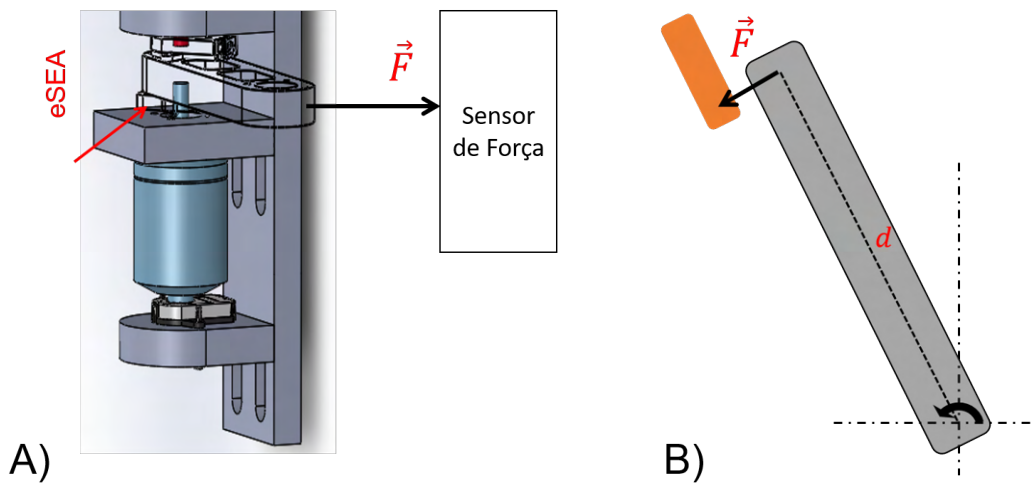


Figura 3.3: Representação do teste para validação do eSEA.

3.4

Projeto da Bancada de Teste

A bancada experimental é projetada para ser modular de forma que é possível mudarmos o elemento elástico eSEA e gerar novos testes em poucos minutos. Além disso, foi pensado em um elemento rígido do mesmo tamanho e formato do eSEA para serem feitos testes com o elo rígido. Isso acaba nos permitindo três tipos diferentes de testes onde um possui o elo rígido e os outros dois tem elementos elásticos flexíveis. Nesta bancada são feitos testes de identificação de parâmetros do sistema (subseção 5.2) e em seguida aplicadas as técnicas de controle de posição e de força (subseção 5.3).

As partes mecânicas do manipulador são feitas de alumínio 7075-T6 a base de zinco, conhecido como alumínio aeronáutico ou duralumínio. Este material foi escolhido por ser um material leve e que possui uma resistência mecânica elevada. Estas partes foram cortadas em jato d'água, pois o formato do eSEA seria de extrema dificuldade para usinagem. Os elos e bases possuem espessura de 16 mm e a distância do centro de rotação do elo até o pino é de 120 mm. Já o eSEA possui 6.35 mm (1/4 polegada) sendo a parte externa e interna de alumínio e entre essas peças uma borracha líquida é depositada para gerar o efeito elástico.

As partes eletrônicas usam dois encoders CUI AMT 102 com resolução de 8192 CPR (ciclos por revolução) e intervalo de 7500 RPM. Um encoder está responsável por medir a posição do motor e outro do elo. Com esses valores de posição é possível calcular o torque no eSEA. Já o motor possui dois eixos do tipo DC brushless D5065/270KV com um torque máximo de 1.99 Nm. Para o controle, foi utilizado um controlador ODrive conectado a uma fonte de 42V. Este controlador é de *software* e *hardware* aberto, ou seja, existe a liberdade para modificar tanto a programação interna quanto aos componentes de hardware. A comunicação entre o controlador e o computador é realizada por cabo USB de modo a usar linguagem python para o controle.

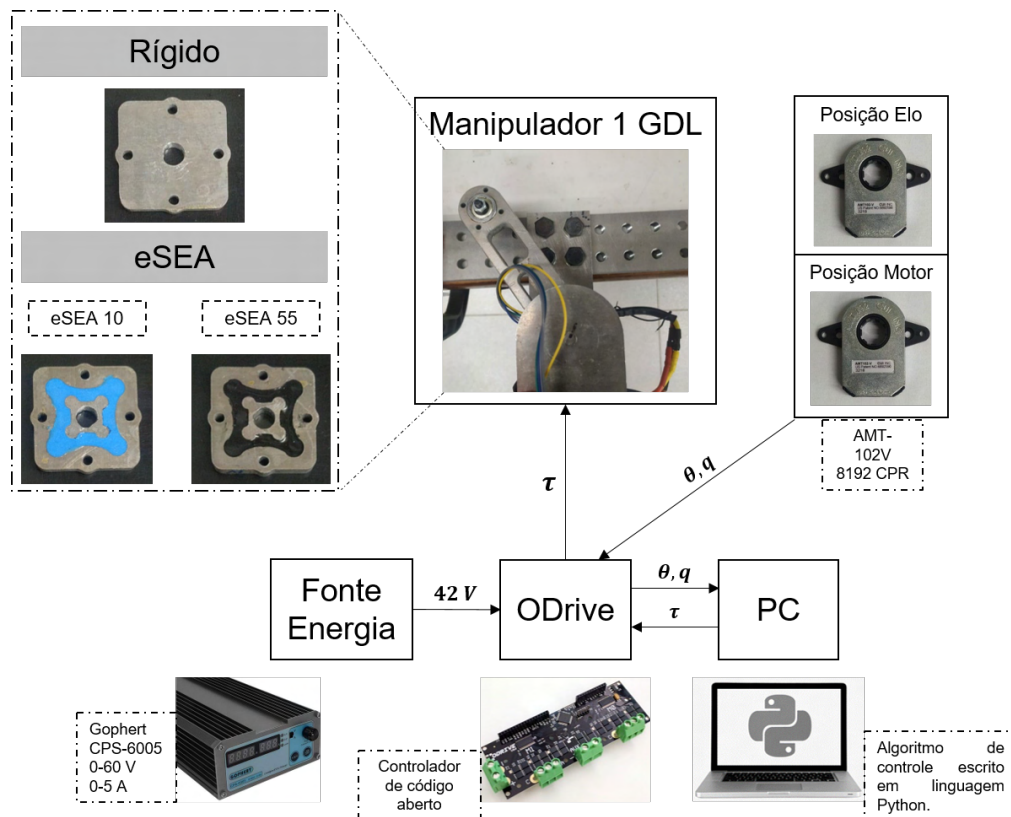


Figura 3.4: Bancada de Teste Experimental. O componente inovador eSEA produzido pelo autor é descrito pelo autor em [108]

3.5

Estimador de Estados

O estimador de estados é uma técnica que estima os valores de estado do sistema. A partir de dados de entrada e saída, os valores de estados são atualizados automaticamente a fim de estimar os valores dos estados desejados. O estimador é utilizado geralmente quando possui incertezas inerentes ao sistema seja distúrbios no processo ou nas medições. No caso do controlador ODrive, ele recebe os dados do sensor de posição mas não possui dados de sensor de velocidade. Por isso, ele possui um estimador de estados que estima o valor da velocidade do motor. O cálculo do estimador é dado por:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{L}[\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (3-15)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (3-16)$$

onde o vetor de estados $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, a matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ são os estados do sistema, a matriz $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times l}$ relaciona o vetor de controle $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^l$ aos estados, a matriz \mathbf{C} relaciona as saídas do sistema, a matriz \mathbf{D} relaciona a alimentação do sistema, e a matriz \mathbf{L} é um multiplicador dos erros observados.

Como o controlador ODrive é aberto, é possível acessar a matriz de ganhos e realizar a alteração, no entanto é necessário realizar a sintonia do controlador a cada vez que o sistema é alimentado. Por isso nesta tese foi utilizado o filtro de Kalman que não tem ligação com os parâmetros internos da placa eletrônica.

3.6

Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é uma técnica comum para estimar os estados de um sistema com incerteza nas medições produzindo então uma estimativa de estados que minimiza o erro médio quadrática baseado em uma sequência de observações.

Basicamente o filtro de Kalman trabalha usando pesos para os sensores. Se um sensor possuir um erro menor de medição, possui um peso maior neste estimativa. Em contrapartida, se o sensor tem um erro maior de medição o peso deste na estimativa é menor. Esses pesos são representados em uma matriz de covariância dos sensores onde, quanto maior a covariância, menor é o peso do resultado final para cada sensor na estimativa final. A versão discreta do filtro de Kalman pode ser representada pela Figura 3.5 e é calculada por:

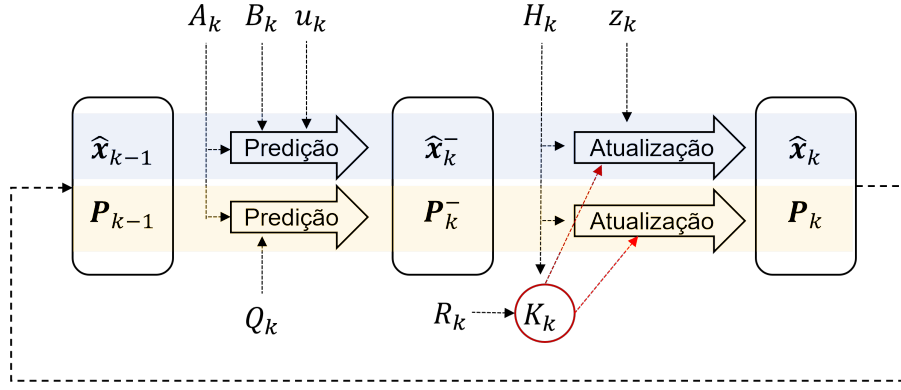


Figura 3.5: Esquema de Funcionamento do Filtro de Kalman

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}x_{k-1} + \mathbf{B}u_k + \mathbf{w}_{k-1} \quad (3-17)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}x_k + \mathbf{v}_k \quad (3-18)$$

onde o vetor de estados $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, a matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ são os estados do sistema, a matriz $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times l}$ relaciona o vetor de controle $u \in \mathbb{R}^l$ aos estados, a matriz $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ relaciona os estados as medições $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$. E as variáveis \mathbf{w} e \mathbf{v} são os ruídos de processo e medição respectivamente.

As variáveis são previstas a cada passo da forma:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}u_k \quad (3-19)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (3-20)$$

em que $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ é o vetor de estados preditos e a matriz de covariância \mathbf{P}_k^- . E \mathbf{Q} é a matriz de covariância dos ruídos de processo.

Com isso, é possível calcular o ganho de Kalman na forma:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (3-21)$$

onde \mathbf{K}_k minimiza a covariância dos erros estimados e \mathbf{R} é a matriz de covariância dos ruídos de medição.

No fim, as estimativas de estados e a matriz de covariância são corrigidas por:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (3-22)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (3-23)$$

3.7

Modelos Viscoelásticos

No primeiro momento foi avaliado o modelo de Zener que é o modelo padrão para um material viscoelástico assim como foi feito por Austin et.al., (2015) e Wei et.al., (2021) [104, 105]. Em seguida, o elemento elástico foi estimado no modelo de Burgers que possui um parâmetro a mais que o de Zener.

3.7.1

Modelo Baseado no Sistema de Maxwell

O modelo de Maxwell é usado em materiais com tensão uniforme e é representado por uma mola e um amortecedor em série, como mostra a Figura 3.6a). A equação para esse tipo de modelo é dado por:

$$\sigma \frac{\eta}{E} \dot{\epsilon} = \eta \dot{\epsilon} \quad (3-24)$$

onde σ é a tensão, ϵ é a deformação e η e E são os coeficientes que representam o amortecimento e a constante de mola, respectivamente.

3.7.2

Modelo Baseado no Sistema de Kelvin-Voigt

De maneira análoga ao modelo de Maxwell, o modelo de Kelvin-Voigt tem dois elementos, nos quais estão arranjados em paralelo (Figura 3.6b). Este modelo é utilizado para explicar o comportamento de deslizamento do material e é expresso pela equação:

$$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon} \quad (3-25)$$

onde σ é a tensão, ϵ é a deformação e η e E são os coeficientes que representam o amortecimento e a constante de mola, respectivamente.

3.7.3

Modelo Baseado no Sistema de Zener

O modelo do tipo Zener, também conhecido como modelo de sólido linear padrão, consiste em duas molas conectadas a um amortecedor (Figura 3.6c). Este modelo combina o comportamento de deslizamento e o de relaxamento de maneira que seja bem representado o material viscoelástico. A equação para este modelo é dado por:

$$\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon} \quad (3-26)$$

onde σ é a tensão, ϵ é a deformação, η é o coeficiente de amortecimento e E_1 e E_2 são as constantes elásticas das molas.

3.7.4

Modelo Baseado no Sistema de Burgers

O modelo de Burgers representa melhor um material viscoelástico que tem ambas propriedades de elasticidade e viscosidade. São usados quatro elementos neste modelo, dois amortecedores e duas molas (Figura 3.6d). E a equação é dada por:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon} \quad (3-27)$$

onde σ é a tensão, ϵ é a deformação, η_1 e η_2 são os coeficientes de amortecimento e E_1 e E_2 são as constantes elásticas das molas.

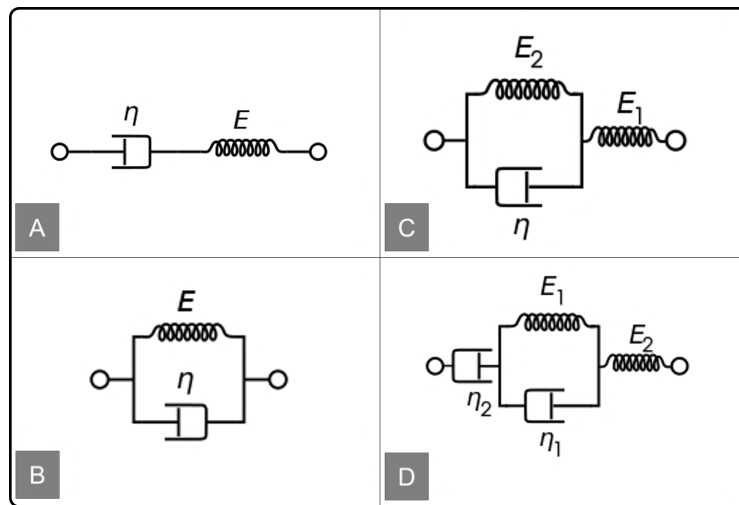


Figura 3.6: Tipos de Modelos Reológicos. a) Modelo de Maxwell. b) Modelo de Kelvin-Voigt. c) Modelo de Zener. d) Modelo de Burgers

3.7.5

Modelo NARX

O modelo NARX é um modelo auto-regressivo não linear com entrada exógena e é conhecido como uma estrutura para a identificação de sistemas não lineares, cujo objetivo principal é construir modelos que são bastante gerais e que apresentam estruturas simples. Ou seja, o modelo NARX não só ajusta os modelos ao comportamento dos sistemas investigados, mas também ajuda a entender a dinâmica não-linear inerente a tais sistemas, uma vez que a simplicidade estrutural de seus modelos tornaria possível uma análise das propriedades dinâmicas fundamentais ([109, 110]). A representação em caixa preta do modelo NARX pode ser calculado por:

$$y_k = F(y_{k-1}, \dots, y_{k-n_y}, u_{k-1}, \dots, u_{k-n_u}) \quad (3-28)$$

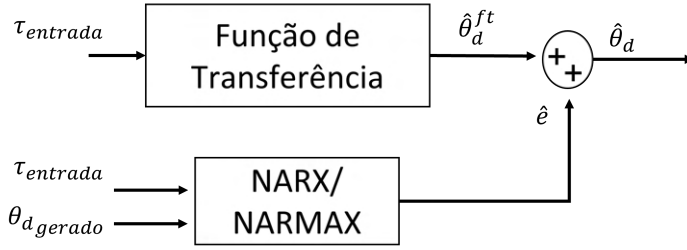


Figura 3.7: Diagrama de blocos da estimativa proposta utilizando função de transferência em adição ao modelo NARX e NARMAX.

onde y_k é a saída no instante k , u_k é o sinal de entrada que é obtido medindo os dados contínuos $y(t)$ e $u(t)$ no intervalo T_s respectivamente. Os valores de n_y e n_u são os atrasos máximos de entrada e saída respectivamente.

A identificação usando o modelo NARX tem como objetivo prever os erros entre o valor medido e o valor estimado pela função de transferência gerada anteriormente. O modelo considera como entradas o torque do motor u e o alongamento θ_d da borracha. Portanto a equação que representa esse modelo é dada por:

$$\hat{e}_k = F(e_{k-1}, \dots, e_{k-n_e}, \tau_{k-1}, \dots, \tau_{k-n_\tau}, \theta_{dk-1}, \dots, \theta_{dk-n_\theta}) \quad (3-29)$$

Com a estimativa do erro finalizada, esse valor é usado para compensar a estimativa antes feita pela função de transferência, na forma:

$$\hat{\theta}_d = \hat{\theta}_d^{ft} + \hat{e} \quad (3-30)$$

O modelo NARX possui uma função não-linear F (Eq. 3-29) que deve ser ajustada de acordo com a entrada e saída em questão. Neste caso, utiliza-se uma rede neural multicamadas a fim de realizar essa estimativa da função de erro do sistema (Figura 3.7). O treinamento da rede neural se deu pelo método ADAM de otimização o qual utiliza apenas gradiente de primeira ordem e por isso utiliza menos memória ([111]). Basicamente o método calcula taxas de aprendizagem adaptativas individuais para diferentes parâmetros a partir de estimativas de primeiro e segundo momentos dos gradientes. No que diz respeito a função de ativação, foi utilizada a função exponencial (Exponential Linear Unit - ELU) que mostrou-se mais rápida e precisa em diversos cenários ao lidar com redes neurais profundas ([112]). A função ELU é definida por:

$$ELU(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1), & \text{se } x < 0 \\ x, & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

A rede neural é treinada e validada usando a biblioteca Tensorflow escrita em python ([113]) usando 4 camadas escondidas com 256 neurônios em

cada camada. Utilizou-se 32.000 épocas com taxa de 64 amostras. Para os coeficientes do modelo, o número de saídas passadas utilizadas foi $Sy=9$, o número de entradas passadas para o torque foi de $Nu_1=6$ e para o alongamento foi de $Nu_2=8$.

3.7.6

Modelo NARMAX

O modelo NARMAX é uma extensão do modelo NARX que possui médias móveis (Nonlinear AutoRegressive Moving Average with Exogenous input - NARMAX). Este modelo realiza um mapeamento não linear das entradas e saídas e é capaz de representar uma ampla classe de sistemas não lineares evitando uma grande quantidade de parâmetros. Uma grande vantagem de utilizar modelos NARMAX polinomiais é a facilidade com que é obtida informações analíticas do modelo. A base de um modelo NARMAX pode ser calculado por:

$$y(t) = F^l[y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-\tau_d), \dots, u(t-\tau_d-n_u+1), \quad (3-32)$$

$$e(t-1), \dots, e(t-n_e)] + e(t) \quad (3-33)$$

onde F^l é uma função polinomial não linear de $y(t)$, $u(t)$ e $e(t)$ que possui grau de não linearidade l . Seguido por τ_d que é o atraso de transporte ou tempo morto, $e(t)$ são efeitos não representados pela função F , e n_y , n_u e n_e são os atrasos máximo de saída, entrada e erro respectivamente.

O método de estimação utilizando o NARMAX pode ser representado pelo diagrama da Figura 3.7. Esta tese utiliza a biblioteca escrita em python *sysidentpy* que é aberta e é muito utilizada para identificação do tipo NARMAX ([114]).

Para validação são utilizadas duas métricas de medição de performance da rede neural, o cálculo do erro médio quadrático (mean square error - MSE), e o cálculo do coeficiente de correlação cruzada (R^2) dado pela Eq. 3-34.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i = 1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i = 1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3-34)$$

Explica-se que o erro médio quadrático (MSE) deve ser mais próximo do zero de forma que os valores estimados estejam próximos dos valores experimentais. Já na análise de R^2 , o ideal é que o valor encontrado esteja o mais próximo de $R^2 = 1$ pois mostra correlação entre valores estimados e medidos.

Quanto a predição, foram utilizadas duas técnicas para analisar a qua-

lidade do modelo: Um passo a frente (One Step Ahead - OSA); E Simulação livre (Free Run Simulation - FR). Basicamente a técnica de um passo a frente (OSA) realiza a predição usando os valores anteriores medidos para calcular o modelo de forma que o resíduo pode ser calculado através da comparação entre predição e medição. Esta técnica é importante para cruzar o modelo com os dados de medição e saber sua aderência. A simulação livre (FR) por sua vez utiliza os dados anteriores para prever os dados futuros mas vai acumulando erros das medições anteriores que influenciam no resultado final. Essa simulação é a mais indicada para sistemas dinâmicos pois reflete um modelo real. Apesar disso, a técnica de um passo a frente (OSA) é bastante utilizada pois é necessário ter um modelo que minimamente tenha aderência aos dados a priori já que na simulação livre o modelo vai utilizar também esses dados.

4

Projeto e desenvolvimento do Elemento Elástico Baseado em Elastômeros

4.1

Requisitos e Simulação

O Elemento Elástico em Série baseado em elastômeros proposto neste trabalho (Figura 4.1) visou um elemento de baixo custo e que fosse modular (que pode ser alterado facilmente no sistema). Este elemento precisa ter flexibilidade para poder trabalhar na interação com seres humanos, mas que não afetasse o peso do manipulador.

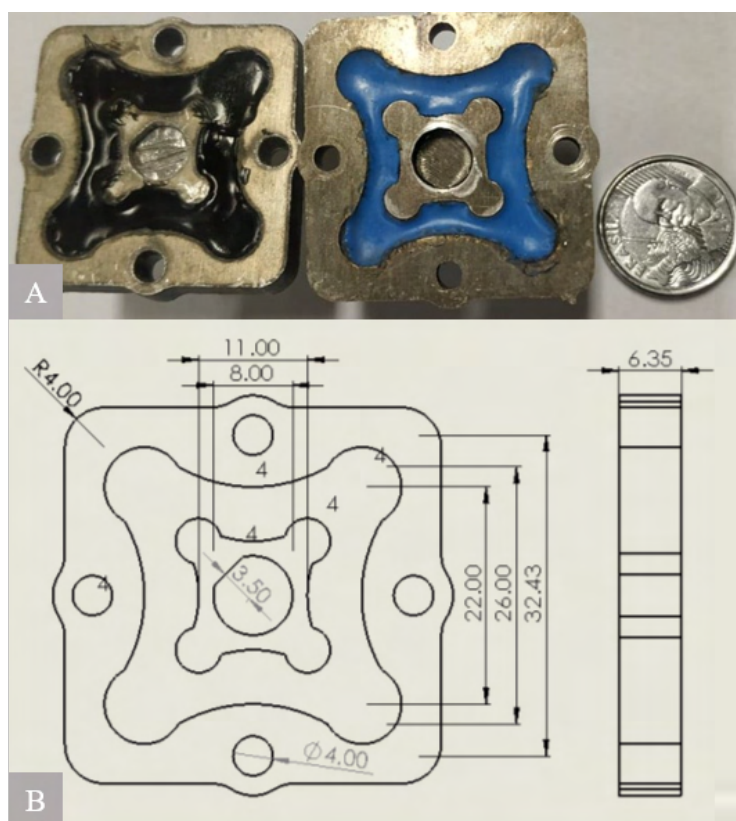


Figura 4.1: Dispositivo eSEA desenvolvido no trabalho. A) Comparativo de tamanho e tipos de borrachas utilizadas, a esquerda borracha com dureza Shore A 55, e a direita borracha com dureza Shore A 10. B) Descritivo do desenho em Solidworks com escala em milímetros.

Outro requisito é que o encoder tenha resolução suficiente para medir as mínimas variações no eSEA. Neste caso, o primeiro passo foi desenhar vários formatos no software SolidWorks que garantissem essa premissa. Partiu-se da ideia de um conjunto com uma peça externa e outra interna de alumínio com espessura de 1/4 de polegadas (6,35mm). Entre elas, é colocado um elastômero bi-componente resistente com dureza Shore A 55 e em outra com dureza Shore A 10. O formato do elemento foi desenhado para não deslizar as peças de alumínio e o elemento elástico.

Utilizou-se em seguida o software ANSYS para realizar simulações de torque. O teste consiste em aplicar um torque mínimo de 0.1 Nm na peça interna e medir o deslocamento angular na peça externa resultado do torque de reação do elemento elástico entre eles, com as propriedades intrínsecas a borracha de silicone. Este teste é importante, pois a partir deste deslocamento medido, é possível saber a resolução dos encoders a serem utilizados. A Figura 4.2 apresenta a simulação em ANSYS e o resultado com deslocamento angular no eixo Z de 0,026°.

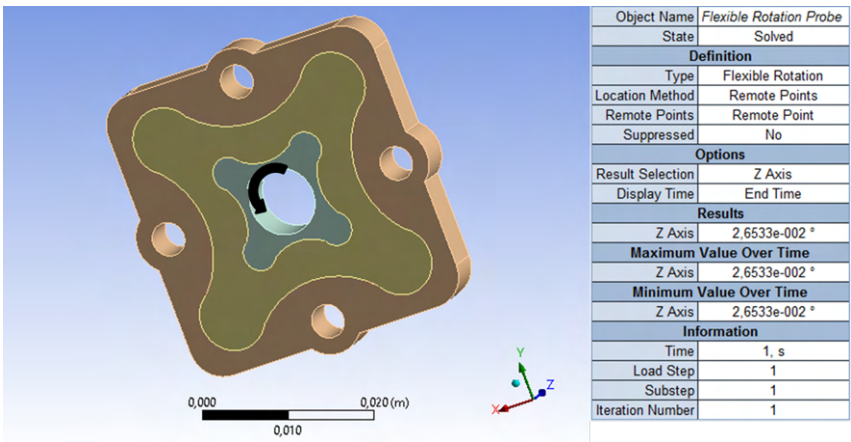


Figura 4.2: Simulação de Torque x Deslocamento Angular

4.2
Manufatura

Para melhor exemplificar a rigidez dos materiais utilizados, observe a Figura 4.3 na qual apresenta uma tabela com diversos níveis de dureza de elementos comuns para a comparação do material utilizado.

As características de posicionamento, proporção de catalisador, bem como o passo a passo para fazer o elemento elástico são apresentados no apêndice A.

Para exemplificar a montagem do encoder no elo, é apresentado o elo montado com um eSEA e o encoder na Figura 4.4. Este posicionamento faz

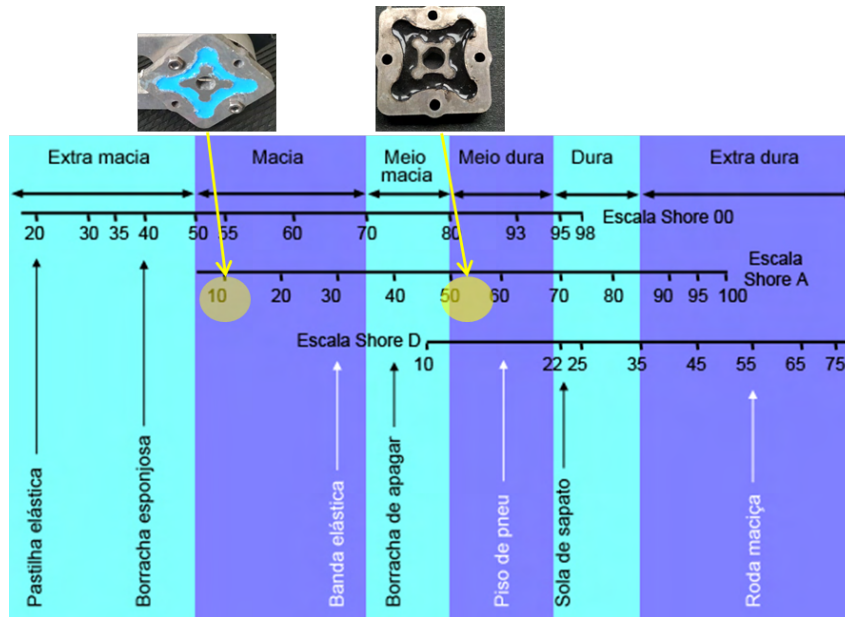


Figura 4.3: Nível de dureza em borrachas. Borracha da cor azul Shore A 10 e borracha da cor preta Shore A 55. Figura adaptada de [116].

com que o eSEA e o encoder tenham centros de rotação diferentes. Mesmo que estejam no mesmo centro com relação à base, o eixo do motor que gira o eSEA não é prolongado até o encoder. O encoder, por outro lado, rotaciona conforme o elo e possui um eixo fixo na base que permite realizar a medição.

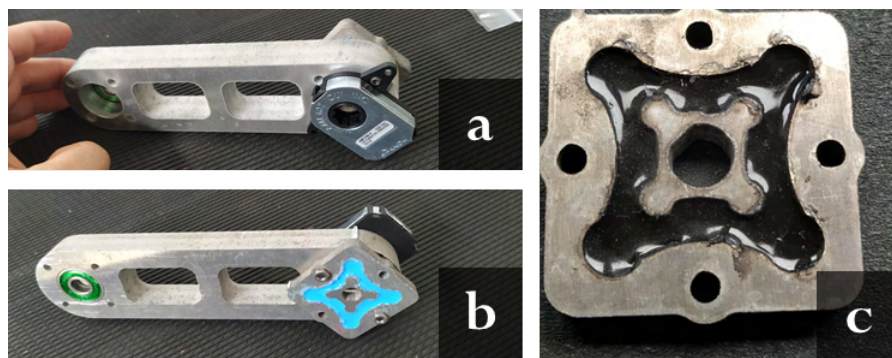


Figura 4.4: Posicionamento do eSEA e do Encoder em um elo. A) Vista do elo com o lado do encoder. B) Vista do elo com o lado oposto onde fica o eSEA. C) Dispositivo eSEA proposto neste trabalho.

Com os resultados das simulações e o elemento elástico pronto, foram realizados alguns testes experimentais para calcular a constante elástica da mola e consequentemente validar o eSEA.

4.3

Teste Estático

No primeiro teste utilizou-se apenas um elo com dois encoders e um eSEA (Figura 4.5). O aparato experimental desenvolvido possui uma alavanca de comprimento 130 mm e espessura de 4 mm. Esta alavanca foi impressa com manufatura aditiva utilizando o material PLA. A alavanca possui três furos com 45 mm de distância um do outro, além do primeiro furo possuir uma distância de 40 mm do centro de rotação e está posicionada entre o eSEA e o encoder 2.

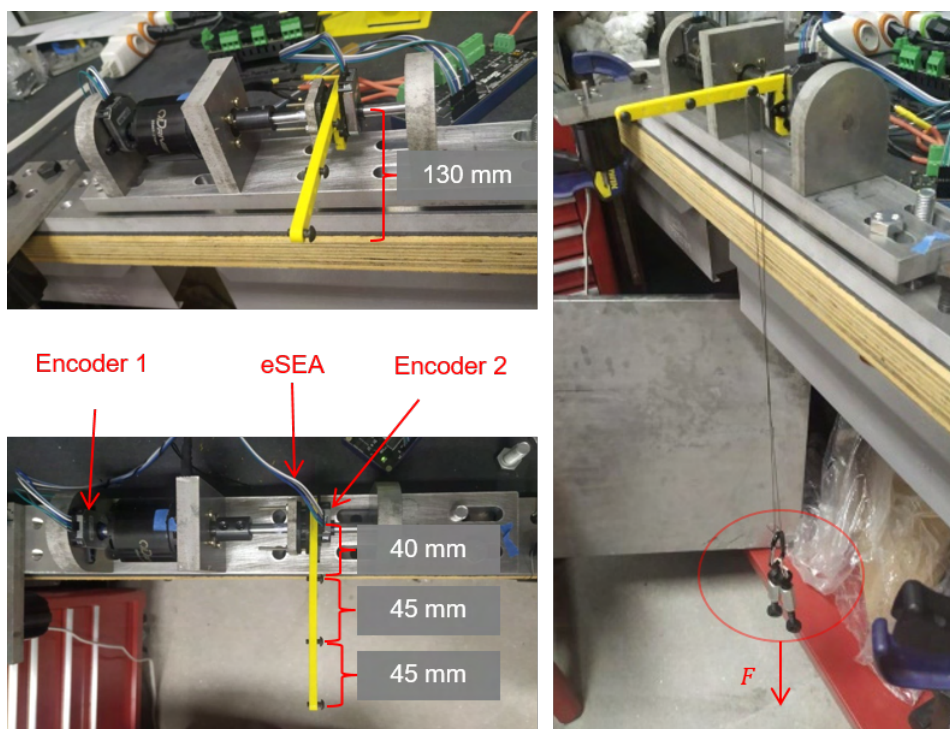


Figura 4.5: Bancada experimental para a realização do teste estático

Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 4.1.

Observando os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7, os testes estimaram os valores da constante da mola de 1,9824 Nm/rad para a borracha azul e 8,549 Nm/rad para a borracha preta. Cummings et al. (2016) [20] afirmam que a constante da mola altera linearmente com a espessura do material para uma geometria de mola planar. Portanto, podemos dizer que a quantidade de borracha depositada no eSEA é muito sensível visto a diferença entre os valores encontrados neste trabalho. Apesar de serem produzidas em simultâneo, uma balança de precisão de uma casa decimal não foi o suficiente para determinar o valor exato para cada elemento elástico. Cummings et al. (2016) [20] sugerem ser simples substituir a mola e conseguir uma grande variedade de constantes de mola possíveis em um desenho modular com apenas pequenas alterações na

Tabela 4.1: Valores medidos nos testes estático

Medidas	Alongamento 10A (rad)	Alongamento 55A (rad)
Carregamento	0	0
	0,091905583	0,014261228
	0,137158016	0,023843095
	0,174369034	0,035341479
	0,187383903	0,042639872
	0,197750257	0,044940843
Descarregamento	0,197750257	0,044940843
	0,190080353	0,043406863
	0,177413027	0,040710412
	0,145199431	0,032668997
	0,10477664	0,024115376
	0	0

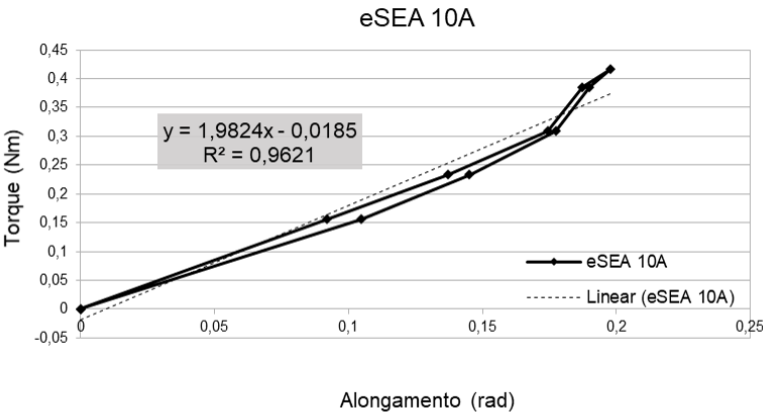


Figura 4.6: Estimativa do eSEA Shore 10A.

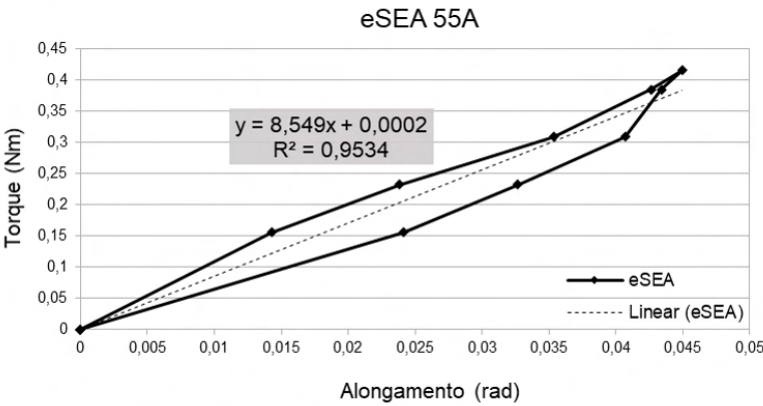


Figura 4.7: Estimativa do eSEA Shore 55A.

geometria da parte externa. Na forma que o sistema foi desenvolvido, o eSEA produzido por este trabalho tem a liberdade de utilizar materiais elásticos de durezas diferentes para se ajustar a cada aplicação.

4.4

Validação do Experimento com eSEA

Os testes de validação destas constantes elásticas são necessários para termos certeza que a constante elástica está correta. Conhecendo a distância entre o eixo de rotação e onde a força é aplicada, podemos calcular o torque sentido por meio da Equação (3-13). A Figura 4.8 mostra a configuração do teste de validação realizado.

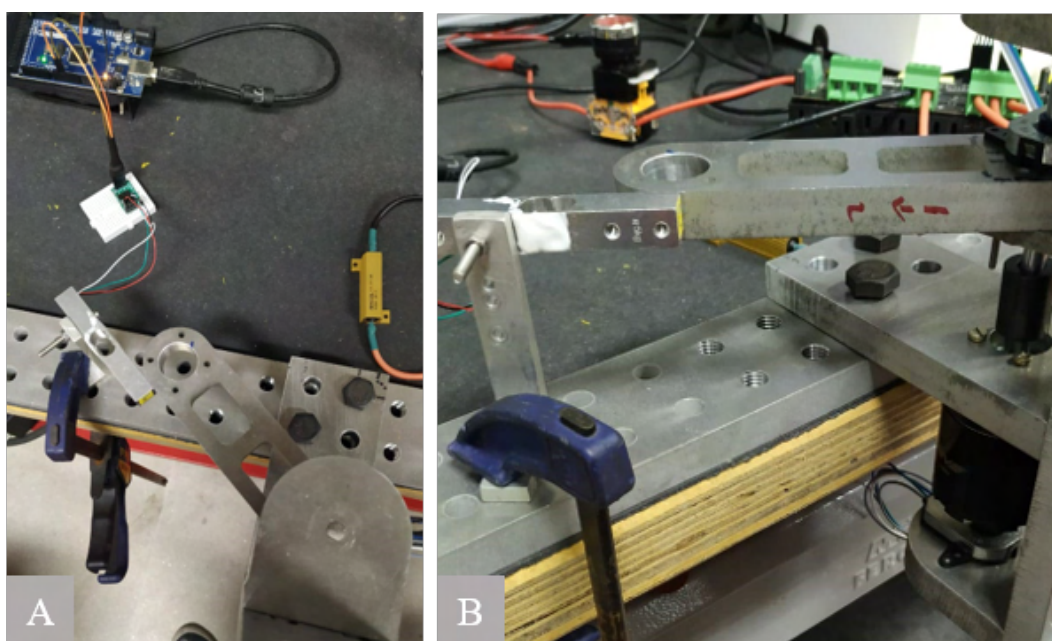


Figura 4.8: Bancada de teste para validação do eSEA. A) Vista superior com o movimento do elo no plano. B) Vista lateral para mostrar o paralelismo do elo e a célula de carga.

Com os testes realizados, podemos constatar na Figura 4.9 que a linha em azul é o valor medido pela célula de carga, enquanto os símbolos em azul são os valores calculados pela lei de Hooke e a constante elástica de 1,9824 Nm/rad estimados no teste anterior. Da mesma forma, a linha preta representa o valor medido pela célula de carga, enquanto o símbolo preto é o valor calculado utilizando a constante elástica do eSEA como 8,549 Nm/rad. O eSEA com a borracha azul (mais macia) tem a constante elástica mais próxima da ideal, enquanto a borracha preta (mais rígida) inclina-se para perder um pouco a referência de torque medido.

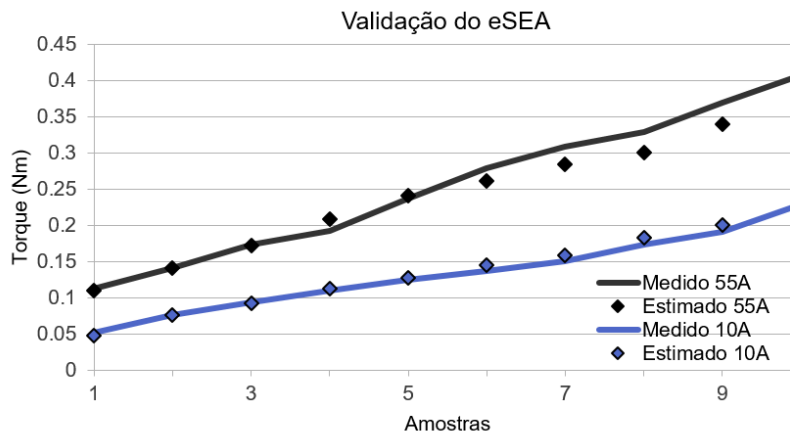


Figura 4.9: Gráfico de validação do eSEA.

É importante destacar como a constante elástica afeta a dinâmica do sistema, o intervalo de detecção de torque, resolução, e velocidade com que o sistema opera de maneira segura [20]. Sabendo da diferença de rigidez entre os dois eSEA produzidos, avaliamos alguns critérios importantes como sensibilidade de força, flexibilidade e transmissibilidade.

4.5

Critérios de avaliação do projeto do eSEA

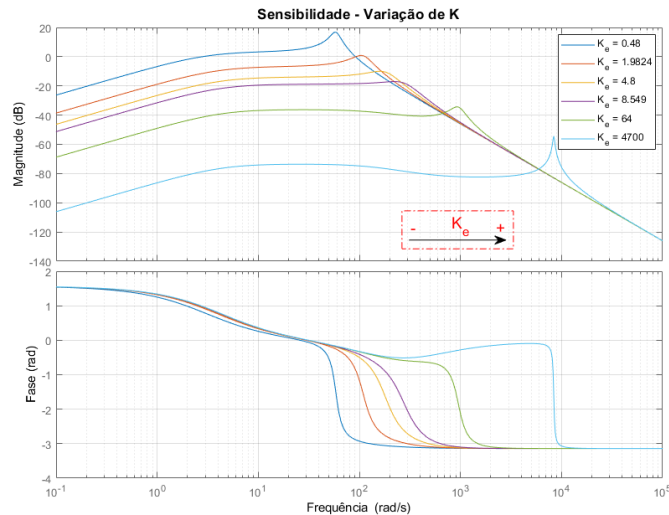
Esses critérios nos ajudam a avaliar o projeto do eSEA realizando a simulação e gerando gráficos de Bode de cada critério. Utilizando as Equações (3-7), (3-8) e (3-9), é possível analisar o sistema com valores determinados.

4.5.1

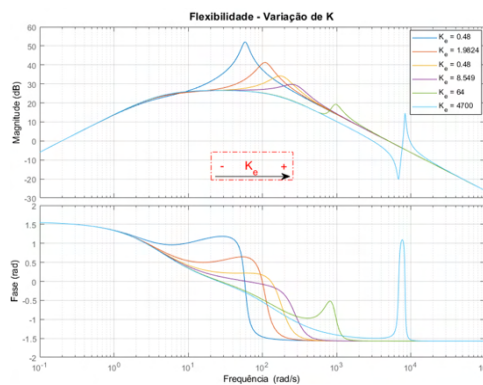
Variação de K_e

O primeiro teste é simular uma variação da constante elástica do eSEA e analisar os três critérios. A Figura 4.5.1 apresenta as curvas variando a constante elástica com valores de 0,48 Nm/rad, 1,9824 Nm/rad (eSEA azul deste trabalho), 4,8 Nm/rad (constantes elástica apresentada por Lee et al. (2017) [23]), 8,549 Nm/rad (eSEA preto desenvolvido nesta tese), 64 Nm/rad e 4.700 Nm/rad.

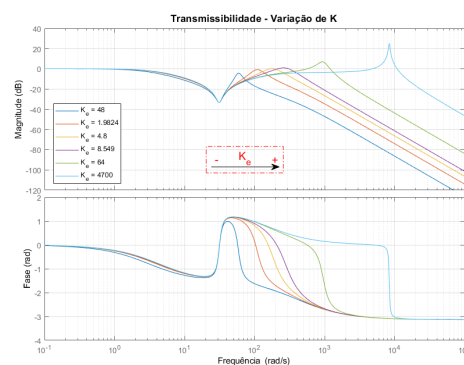
É possível notar que quanto maior a constante elástica, menor é essa sensibilidade a forças externas. Além disso, quanto maior a constante elástica, menor é a deformação do eSEA do sistema. Outra constatação também é a resolução do encoder que irá medir o deslocamento entre o motor e o elo. Para constante elásticas maiores (no caso 4700 Nm/rad), os encoders necessitam de uma alta resolução.



4.10(a): Sensibilidade a Forças externas



4.10(b): Flexibilidade



4.10(c): Transmissibilidade

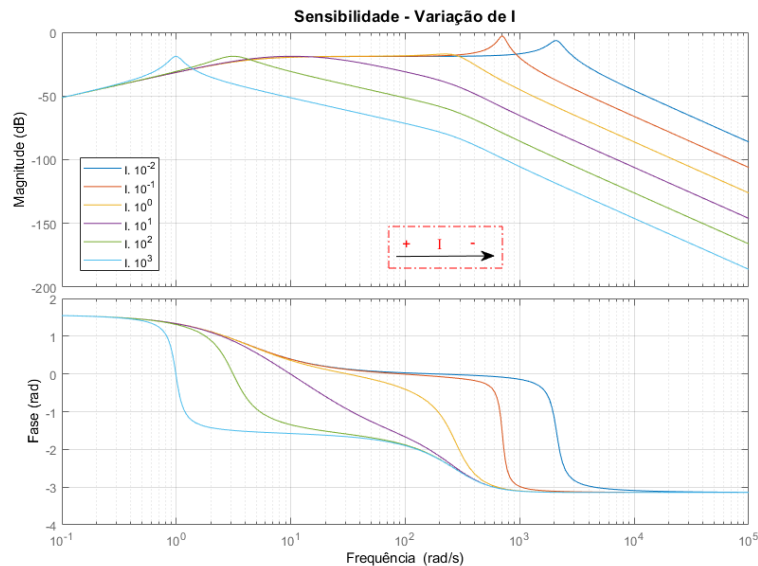
Figura 4.10: Critérios de avaliação do eSEA - Variação de K_e

Ao observarmos o gráfico de flexibilidade percebe-se que, quanto maior a constante elástica do eSEA, menor o pico de ressonância, no entanto, na constante elástica mais alta, 4700 Nm/rad, há características de ressonância e anti-ressonância. Estas características são explicadas por Lee et al. (2017) [23] como um movimento muito rápido em certa frequência e um travamento na anti-ressonância. Outro motivo dos picos de ressonância é porque não foi considerado uma redução no sistema, como mostra Lee et al. (2017) [23].

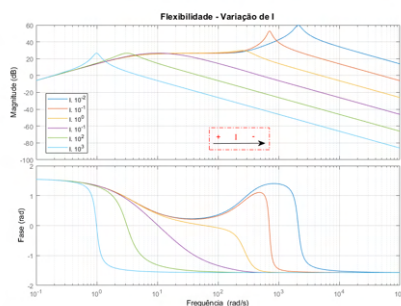
Para a transmissibilidade, quanto maior a constante elástica, maior a transmissibilidade em altas frequências. Observa-se que constantes elásticas menores, não conseguem entregar todo o torque conforme aumenta a frequência. A comparação realizada por Lee et al. (2017) [23] mostra que a transmissão de torque é mais eficiente em SEA que possuam redução o que era esperado.

4.5.2 Variação de I

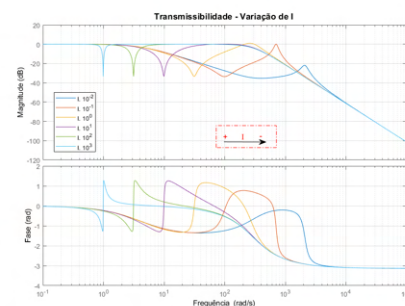
Neste segundo teste foi simulado uma variação da inércia do manipulador e assim analisar a variação em cada um dos três critérios. A Figura 4.5.2 apresenta as curvas relacionadas aos critérios.



4.11(a): Sensibilidade a Forças externas



4.11(b): Flexibilidade



4.11(c): Transmissibilidade

Figura 4.11: Critérios de avaliação do eSEA - Variação de I

Nota-se que a variação da inércia do manipulador altera a sensibilidade a forças externas. Quanto menor a inércia do manipulador, maior é essa sensibilidade. No entanto, não é perceptível alguma alteração a ponto de relacionarmos com a resolução do encoder. Além disso, quanto menor for a inércia, maior o pico de ressonância, mas não altera a ponto de criar uma anti-ressonância. Para o terceiro critério, quanto menor a inércia, menor será a transmissibilidade do sistema.

5

Validação Experimental do eSEA

Neste capítulo iniciam-se os testes de bancada de modo a validar o controle com o eSEA apresentando o modelo em espaço de estados e o método de identificação realizado para determinar os valores dos parâmetros do sistema. Em seguida as estratégias de controle são exibidas bem como os resultados gerados para a análise posterior.

5.1

Modelo do Sistema em Espaço de Estados

Como a bancada de teste permite a troca de elemento elástico para elemento rígido e vice-versa, são apresentados os dois modelos de um grau de liberdade em espaço de estados, por meio das Equações (5-1) e (5-2).

– Junta Rígida

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-B_v}{(J+I)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{(J+I)} \end{bmatrix} \cdot u \quad (5-1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

onde q, \dot{q}, \ddot{q} são as posições, velocidades e acelerações do elo, respectivamente. Os termos J e I são as inércias do motor e do elo, respectivamente. E B_v é o atrito viscoso do motor.

– Junta Flexível com eSEA

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-K_e}{J} & \frac{-B_v}{J} & \frac{K_e}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_e}{I} & 0 & \frac{-K_e}{I} & \frac{-D}{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \quad (5-2)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

onde $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ são as posições, velocidades e acelerações do motor, respectivamente. Já os termos q, \dot{q}, \ddot{q} são as posições, velocidade e acelerações do elo, respectivamente. Os termos J e I são as inércias do motor e do elo, respectivamente. E B_v e D são os atritos viscosos do motor e do elo, respectivamente. K_e é a constante elástica da borracha (considerando um termo linear calculado pelo autor em Lopes e Meggiolaro (2021) [108]).

5.2 Identificação do Sistema

Neste trabalho foi realizado uma identificação de sistemas offline com um experimento em malha aberta. Foi utilizado um controle do tipo On-Off para gerar o sinal de excitação. Basicamente é enviado um valor de torque para o motor de 0,07 Nm que gira em uma direção. Em certo momento em que a posição do motor alcança um valor pré-determinado de 15° e -15° , o torque no motor tem o sinal invertido para -0,07 Nm de forma que o motor gire para o lado oposto. O teste pode ser visualizado pela Figura 5.1.

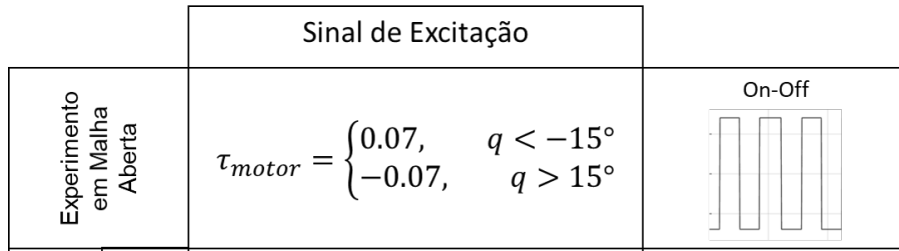


Figura 5.1: Descrição do sinal de excitação para o sistema de identificação em malha aberta usando o controle On-Off.

A partir dos modelos apresentados na seção 5.1 usamos X como o vetor de estados na forma $\dot{X} = g(X, u)$ e a identificação dos parâmetros foi realizada através da resolução de um problema de otimização de sistemas. Ao definir Y como o vetor de medições experimentais, usa-se \bar{Y} como vetor de simulações de modelos, N o comprimento da janela móvel de otimização, P o vetor de parâmetros desconhecidos, e \mathbb{X} o conjunto dos estados possíveis do sistema, o referido problema de otimização é definido como se segue:

$$\begin{aligned}
 \min_{X_{k+1, k+N+1}, P} \quad & \sum_{i=k}^{k+N-1} (\bar{Y}_i - Y_i)^2 \\
 \text{s.t.} \quad & X_{i+1} - g(X_i, u_i) = 0, \quad i = k, k+1, \dots, k+N-1 \\
 & X_i \in \mathbb{X}, \quad i = k, k+1, \dots, k+N-1
 \end{aligned} \tag{5-3}$$

Em cada um dos sistemas foi utilizado a identificação e os parâmetros \bar{Y} e Y são os valores de velocidade angulares medidos e estimados, respectivamente.

Para o problema de otimização foi utilizado o algoritmo de *multiple-shooting* implementado em MATLAB usando a biblioteca de otimização CasADi. Os parâmetros estimados foram o atrito viscoso B_v e a inércia do elo I e as curvas de comparação foram as de velocidade angular do elo.

Para a identificação utilizou-se as três configurações possíveis do nosso sistema: Elo rígido; Elo com eSEA de rigidez 55 Shore A; E elo com eSEA de rigidez 10 Shore A. Em todos os experimentos de identificação foram utilizados o controle On-Off. Utilizou-se inicialmente o experimento com junta rígida como mostra a Figura 5.2.

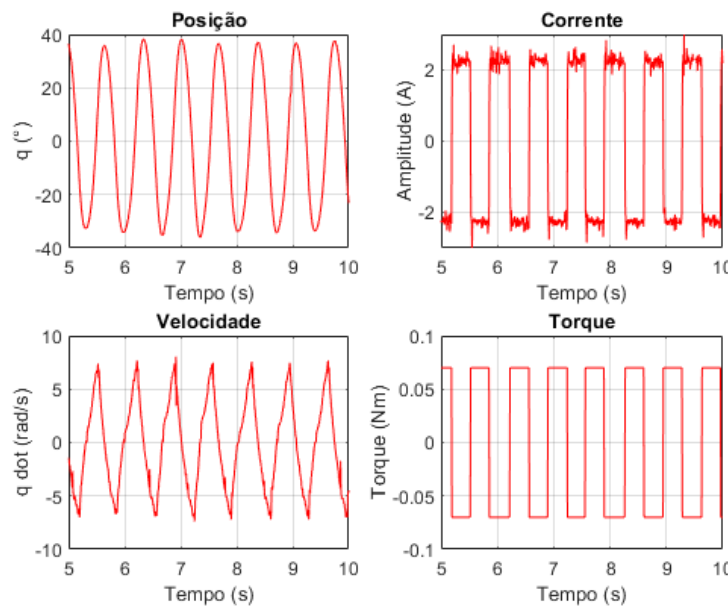


Figura 5.2: Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta rígida. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.

Observa-se que a posição angular atinge 40 graus, mesmo o limite estabelecido em 15° . Isto deve-se à alta velocidade de aproximação da ligação com um torque constante de 0,07 Nm. A velocidade angular máxima medida foi de cerca de 7,38 rad/s e a corrente máxima medida foi de 2,38 A. A Figura 5.3 mostra um ajuste do modelo aos valores experimentais. Nota-se que o modelo consegue gerar uma curva próxima do valor medido e estimaram-se os parâmetros $B_v = 1.10^{-4} \text{ Kg/rad.s}$ (fricção viscosa) e $I = 14.10^{-4} \text{ Kg.m}^2$ (inércia do elo). O valor de inércia do elo foi aproximado ao obtido pelo software SolidWorks e o valor de atrito viscoso é utilizado em malha fechada para realizar o projeto do sistema de controle.

Em segundo lugar, foi utilizado o eSEA de rigidez 55A e a Figura 5.4 mostra os parâmetros da resposta em malha aberta.

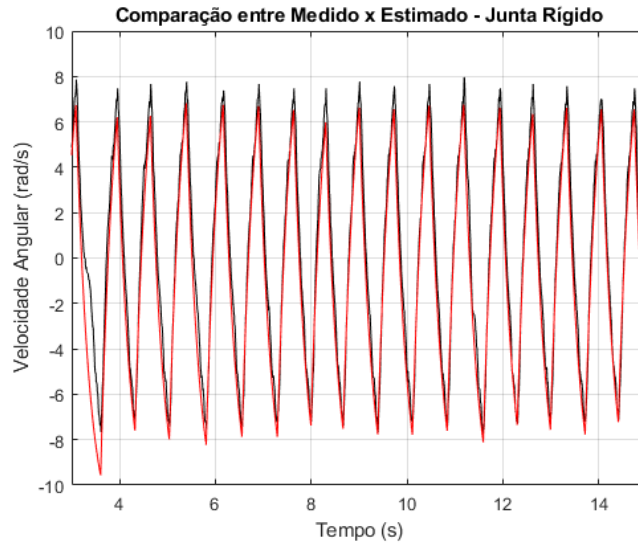


Figura 5.3: Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo rígido e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.

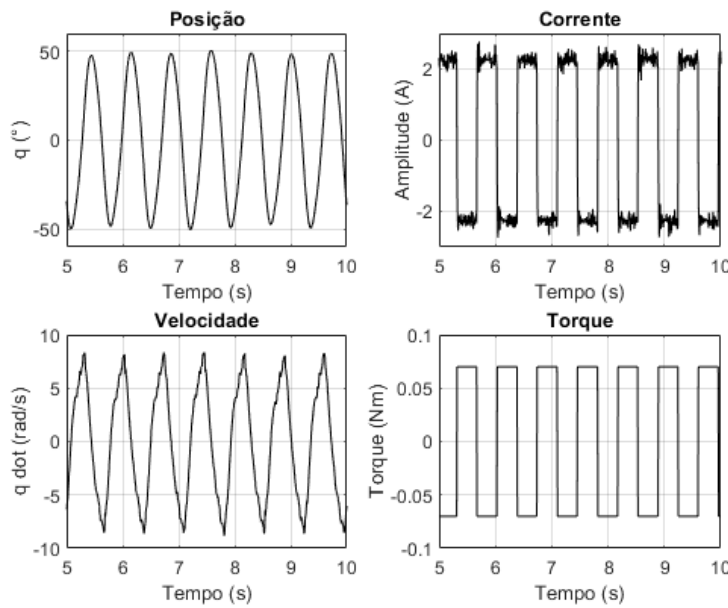


Figura 5.4: Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta flexível eSEA 55A. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.

Com a junta flexível utilizando o eSEA 55, a posição angular atingiu cerca de 50° de deslocamento e uma velocidade angular de cerca de 8,05 rad/s. Como o torque é o mesmo para todos os testes em malha aberta, a corrente medida foi também a mesma. A Figura 5.5 mostra o ajuste do modelo para o elo com junta flexível eSEA 55. Observa-se que apesar da curva de valores medidos estar seguindo a curva dos valores estimados pelo modelo, a identificação

dos parâmetros teve maior dificuldade para ajustar com relação ao de junta rígida. Mesmo assim os valores encontrados foram idênticos ao anterior de $Bv = 1.10^{-4}Kg/rad.s$ (fricção viscosa) e $I = 14.10^{-4}Kg.m^2$ (inércia do elo).

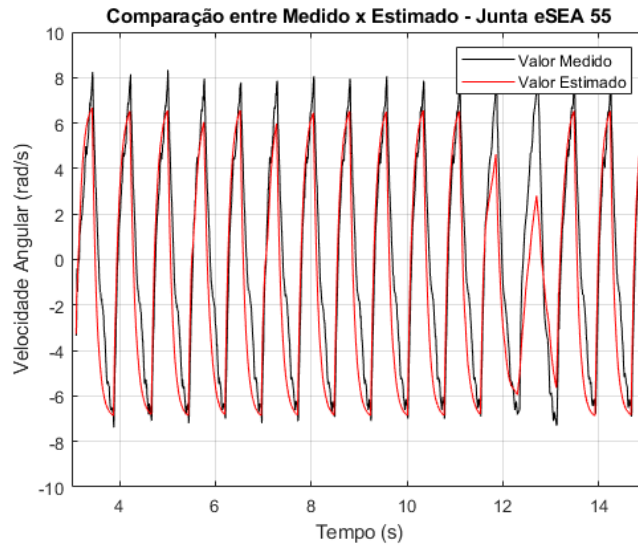


Figura 5.5: Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo com eSEA 55 e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.

Por último foi utilizado o eSEA de rigidez 10A e a Figura 5.6 mostra os parâmetros da resposta em malha aberta.

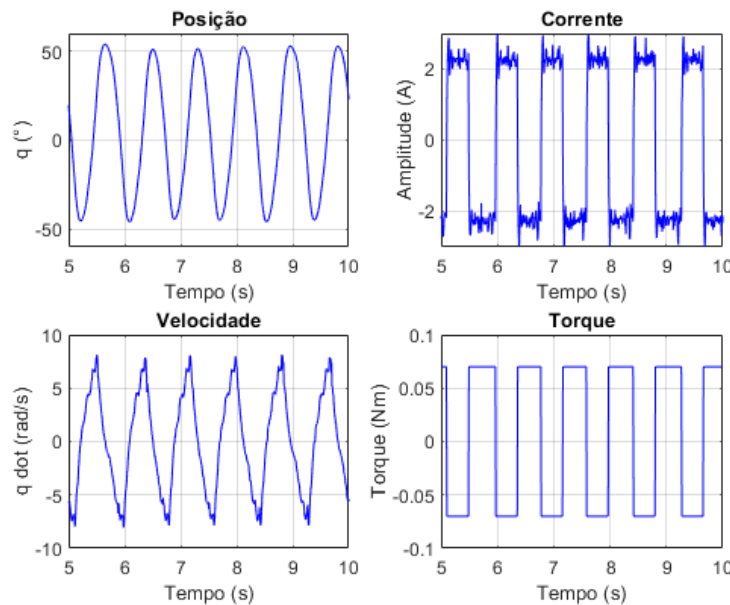


Figura 5.6: Resposta do experimento em malha aberta usando uma junta flexível eSEA 10A. A posição angular do elo q é medido em graus, a velocidade angular do elo medido em rad/s, a corrente enviada ao motor é medida em Ampere, e o torque desejado do motor em Nm.

Quando foi usado o eSEA 10, a medida da posição angular foi cerca de 60° com uma velocidade angular máxima de $8,7 \text{ rad/s}$.

A Figura 5.7 apresenta o ajuste do modelo para o elo com junta flexível eSEA 10. Novamente o ajuste do modelo segue a curva de valores medidos em bancada para o eSEA 10, no entanto, o modelo com o elo de junta rígida ainda é o que mais se aproxima dos valores reais medidos. Ainda assim os valores encontrados foram idênticos ao do elo com junta rígida e do elo com junta flexível eSEA 55 de $Bv = 1.10^{-4} \text{ Kg/rad.s}$ (fricção viscosa) e $I = 14.10^{-4} \text{ Kg.m}^2$ (inércia do elo). Isso nos permite usar estes valores com mais segurança no nosso modelo já que em todos os casos eles foram estimados com o mesmo valor.

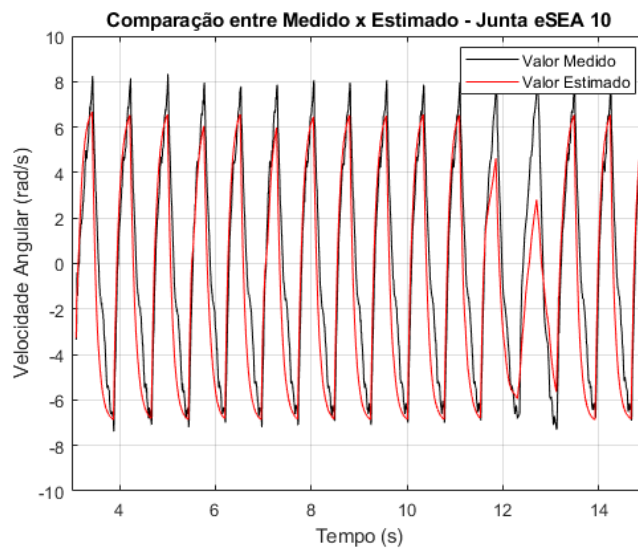


Figura 5.7: Comparação entre os valores medidos no teste de bancada para elo com eSEA 10 e os valores gerados no modelo estimado pelo CasADi.

Outra observação é que a flexibilidade causa variação na posição angular devido à transmissibilidade, como esperado. Se a junta tem um pequeno valor da constante elástica, por exemplo, o eSEA 10, o elo tem um deslocamento maior por o amortecimento ser maior que outros. No eSEA 55, o valor da constante elástica está entre eSEA10 e a junta rígida causando o amortecimento, mas com uma transmissibilidade superior a do eSEA10. Observa-se esta diferença analisando os gráficos de posição angular. Estas respostas mostram que a junta rígida tem mais ciclos, com 5 a 10 segundos, do que a eSEA55. E, consequentemente, a eSEA55 tem mais ciclos do que a eSEA10.

5.3

Estratégias de Controle

O sistema de controle é projetado em duas partes, a primeira sendo o sistema de controle de posição onde uma dada posição desejada para o elo é pré-determinada e o manipulador deve alcançar este valor. A segunda parte diz respeito ao controle de força fundamental para o dispositivo eSEA a fim de que ele possa medir forças que estão sendo realizadas pelo manipulador final. Para as técnicas de controle foi decidido estudar apenas o eSEA 55 visto que a transmissibilidade baixa do eSEA 10 demandaria mais esforço do controlador.

5.3.1

Controle de Posição

Para efeito de comparação foram projetados três tipos de controles simples para realizar o teste. O esquema de controle e a entrada de excitação do teste podem ser visualizados na Figura 5.8.

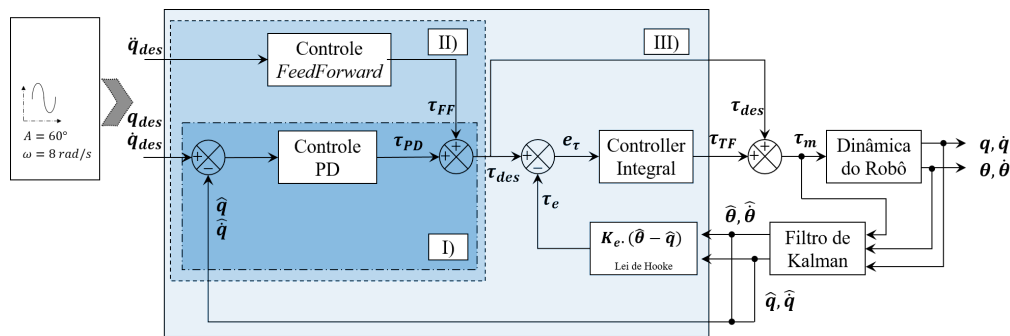


Figura 5.8: Diagrama de Blocos dos Controles Propostos. I) Controle I - Controle PD; II) Controle II - Controle PD com *FeedForward*; III) Controle III - Controle PD com *FeedForward* e *feedback* de Torque.

Basicamente iniciou-se o teste com um controle simples PD e em seguida inseriu-se uma alimentação direta de uma parte do termo de aceleração e no fim adicionando a realimentação de torque a partir da medição do eSEA. É importante citar que o sistema eletrônico utiliza uma placa controladora ODrive que fornece valores de posição e velocidade a partir das medições do encoder. A posição está em voltas, e a velocidade está em voltas/s. Dados estes dois estados utiliza-se a velocidade para prever a posição ao longo do tempo. Isto é importante para interpolar a posição do encoder entre contagens discretas. Logo, consideramos a posição esperada a todo o momento, mesmo quando se está entre pulsos do encoder. Isto permite um controle mais suave e uma maior precisão.

No entanto, como esse estimador de estados do controlador ODrive é ajustado com valores *a priori* pelo fabricante, foi necessário adicionar a malha

de controle um estimador de filtro Kalman a fim de ter uma estimativa ótima da posição e da velocidade do sistema.

No bloco de controle I foi utilizado um simples PD com a realimentação das estimativas de posição e velocidades do elo ($\hat{q}, \dot{\hat{q}}$) calculadas pelo filtro de Kalman. Já o bloco de controle II utiliza-se o controle PD adicionado de um termo de alimentação direta do termo de aceleração do elo (\ddot{q}_{des}) multiplicado pelos termos de inércia. Finalmente é proposto o bloco de controle III que inclui um termo de realimentação de torque sendo este torque calculado pelo eSEA. Esta realimentação acrescenta um termo integral responsável por ajustar o torque desejado e o torque estimado. A estimativa de torque realizada pelo eSEA é calculada usando a lei de Hooke (Equação 3.3.1) usando estimativas de posição do motor $\hat{\theta}$, e elo \hat{q} . A partir deste momento são utilizadas as nomenclaturas da Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Nomeclatura dos Tipos de Controle

Nome	Controle
Controle I	PD
Controle II	PD com <i>feedforward</i>
Controle III	PD com <i>feedforward</i> e <i>feedback</i> de Torque

onde $\hat{\theta}$ e \hat{q} são as posições angulares do motor e do elo, respectivamente, estimado usando o filtro de Kalman.

Portanto, a lei de controle proposta com todos os termos adicionados é dada por:

$$u := K_i \cdot \int_0^t [K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \dot{e}(t) + (I + J) \cdot \ddot{q}_{des} - K_e \cdot (\hat{\theta} - \hat{q})] \cdot dt \quad (5-4)$$

onde K_i , K_p e K_d são ganhos do controle I e do controle integral. Os termos I e J são as inércias do elo e do motor respectivamente. Os termos de erro $e(t) = q_{des} - \hat{q}$ e $\dot{e}(t) = \dot{q}_{des} - \dot{\hat{q}}$ estão relacionados com a posição e velocidade do elo respectivamente. O termo \ddot{q}_{des} é a aceleração desejada do elo e K_e , $\hat{\theta}$ e \hat{q} são definidos pela Equação 3.3.1.

Para o projeto de controle foram utilizados os modelos da seção 5.1 com o comando *pidtune* do software Matlab para calcular os valores dos ganhos proporcional e derivativo. Esses valores são usados como iniciais e ajustados *a posteriori* por testes experimentais. Os valores da Tabela 5.2 apresentaram um melhor desempenho com relação ao erro de posição.

Uma das primeiras modificações realizada no controle do sistema é usar um filtro de Kalman para estimar os valores da posição e velocidade do elo. Este valor é importante visto que ele será realimentado no sistema de controle

Tabela 5.2: Ganhos do controlador

Parâmetro	Valor
$^{PD}K_p$	5.625
$^{PD}K_d$	0.0419
$^{TF}K_i$	0.03

e sinais com ruídos podem influenciar na estabilidade. O sistema possui dois encoders para medir a posição do motor e do elo, no entanto, não conta com um sensor de velocidade *a priori*. Neste contexto o próprio controlador ODrive realiza uma estimativa a partir dos encoders pré estabelecidos usando um estimador simples. Geralmente os sensores da marca CUI AMT são ideais para funcionar com o controlador ODrive e ele já vem de fábrica com os ganhos ajustados para este tipo de sensor. No entanto, nos testes preliminares, esta estimativa não se mostrou satisfatória com relação aos parâmetros de posição e velocidade. Mesmo assim são exibido nos gráficos seguintes os resultados dos diferentes tipos de controle usando os valores estimados pelo controlador ODrive e os estimados pelo filtro de Kalman.

5.3.1.1

Controle I - Controle PD

O primeiro teste de bancada foi realizado com o controle mais simples de PD (proporcional e derivativo) apresentado no bloco I da Figura 5.8 e o resultado é apresentado na Figura 5.9.

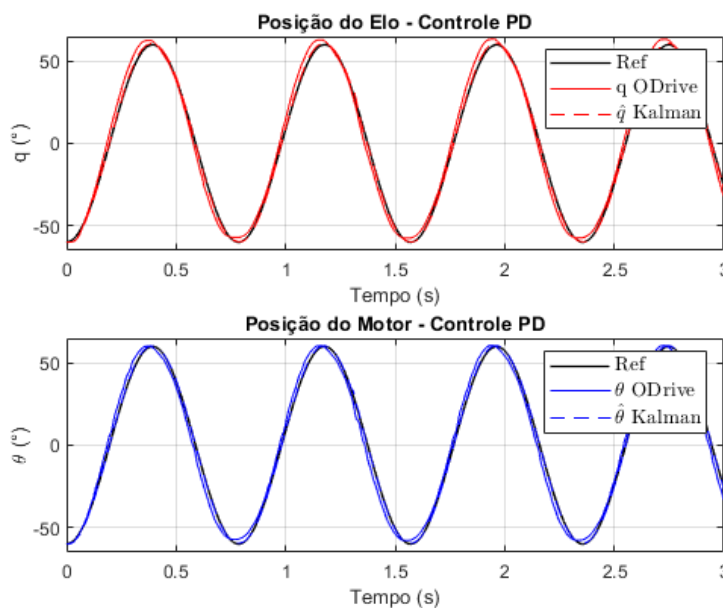


Figura 5.9: Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle I.

O gráfico da Figura 5.9 apresenta uma comparação entre a posição usando o controle PD. As linhas em vermelho são relacionadas com o elo (q), as linhas azuis representam os valores de posição do motor (θ), e a linha preta é a linha de referência (posição desejada). Além disso, as linhas cheias representam as medições realizadas pelo controlador ODrive e as linhas tracejadas são estimadas pelo filtro de Kalman. Nota-se que a curva de posição do estimado acompanha a curva de posição desejada, mas com uma defasagem entre elas.

5.3.1.2

Controle II - Controle PD + FeedForward

O segundo teste adiciona um termo de *feedforward* dependente da aceleração do sistema como mostra o bloco II da Figura 5.8 e o resultado é apresentado na Figura 5.10.

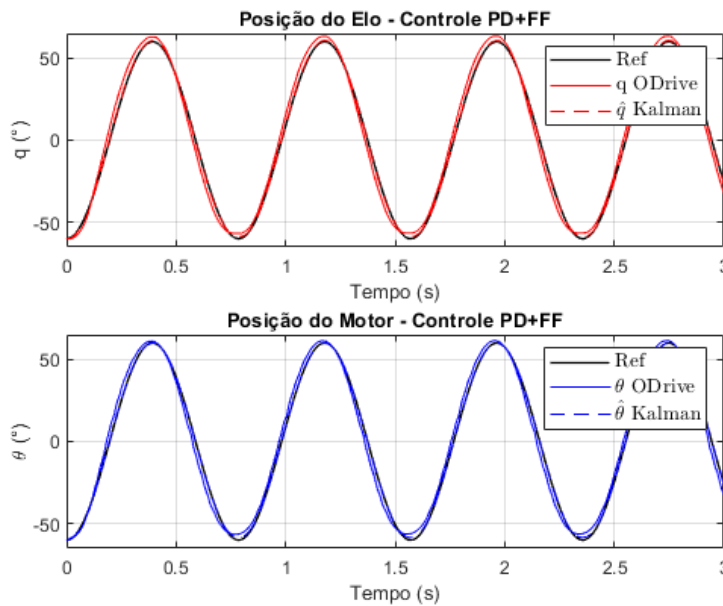


Figura 5.10: Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle PD adicionado de um Feedforward.

Na Figura 5.10 percebe-se novamente a posição do elo e motor usando agora um controle PD + Feedforward. As linhas cheias exibem a posição do elo e do motor estimados pelo controlador ODrive, enquanto as tracejadas mostram a estimativa do elo e do motor a partir do filtro de Kalman. Percebe-se que a defasagem que existia no manipulador quando estava sob o controle PD, agora não é notada no controle PD + Feedforward. Isso porque o termo de *feedforward* faz uma correção rápida conforme o valor de referência predizendo o efeito das variáveis de entrada diretamente na variável manipulada.

Na Figura 5.11 é possível notar a diferença entre as amplitudes das curvas. O controle PD + Feedforward apresenta uma curva de amplitude menor

que do controle I fazendo com que o elo realize a trajetória de entrada de maneira mais efetiva. Extraíndo cinco segundos do experimento para a melhor visualização, mas é importante notar que o comportamento do elo permaneceu o mesmo durante todo o teste. Com o controle I, o erro de trajetória situou-se entre $\pm 1,5^\circ$. Ao olhar para o controle PD + Feedforward com a inclusão de um termo de *feedforward*, este erro diminui em $\pm 0,5^\circ$ em relação ao controle PD.

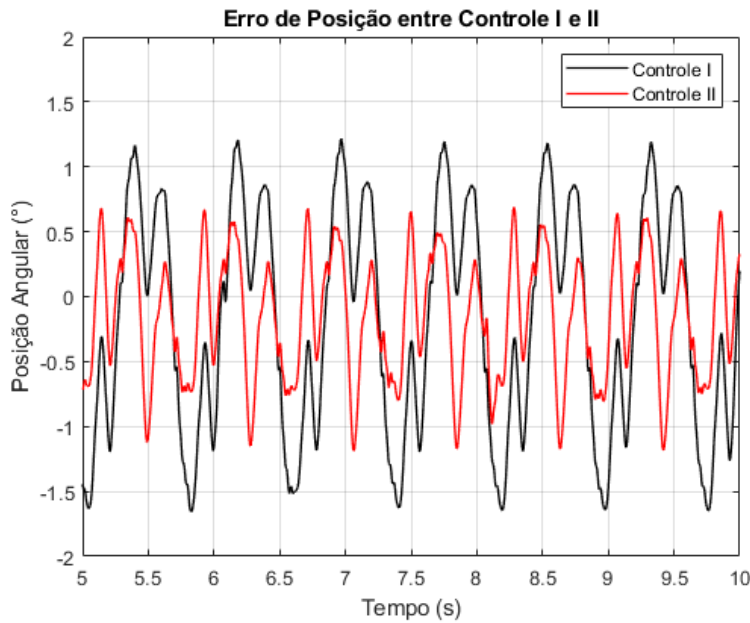


Figura 5.11: Gráfico de comparação entre erro de posição $q_{des} - q_{estimado}$ dos controles I e II.

5.3.1.3

Controle III - Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque

O terceiro teste adiciona no bloco II uma realimentação do torque que ocorre na junta (como mostra o bloco III da Figura 5.8) e as curvas de posição do elo e do motor são apresentadas na Figura 5.12.

Um exemplo da diferença entre a medida que o controlador ODrive realiza com a estimada pelo filtro de Kalman é visualizada na Figura 5.12 pois a linha tracejada (estimada por Kalman) acompanha a posição desejada, enquanto a linha cheia (estimado pelo controlador ODrive) apresenta uma defasagem do desejado. Comparando o Controle PD + Feedforward e Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque (Figura 5.13) através do erro de posição do elo, nota-se a diferença de amplitude denotando uma melhora no sistema ao adicionar o termo de *feedback* de torque. Entretanto, a amplitude do erro no sentido positivo é menor que no sentido negativo. Isso ocorre devido ao

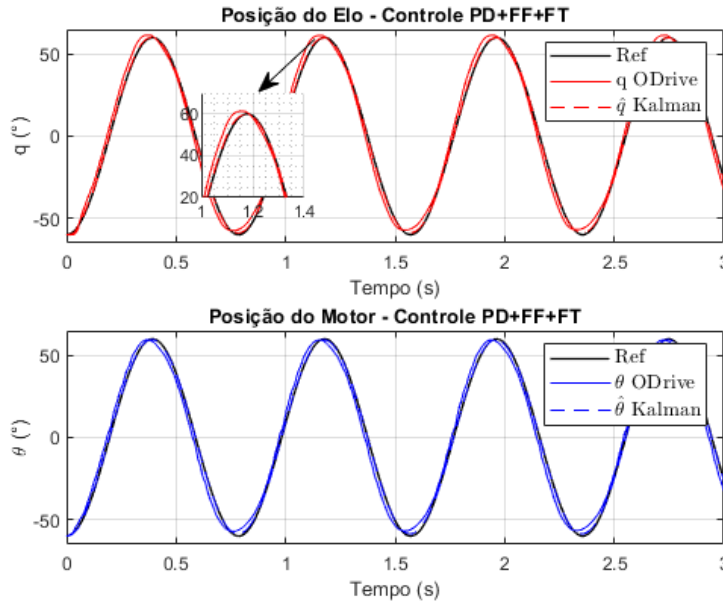


Figura 5.12: Gráfico de comparação de posição do sistema utilizando o controle Controle PD + Feedforward = Feedback de Torque.

atrito presente em uma direção apenas e afeta o início de cada período do movimento.

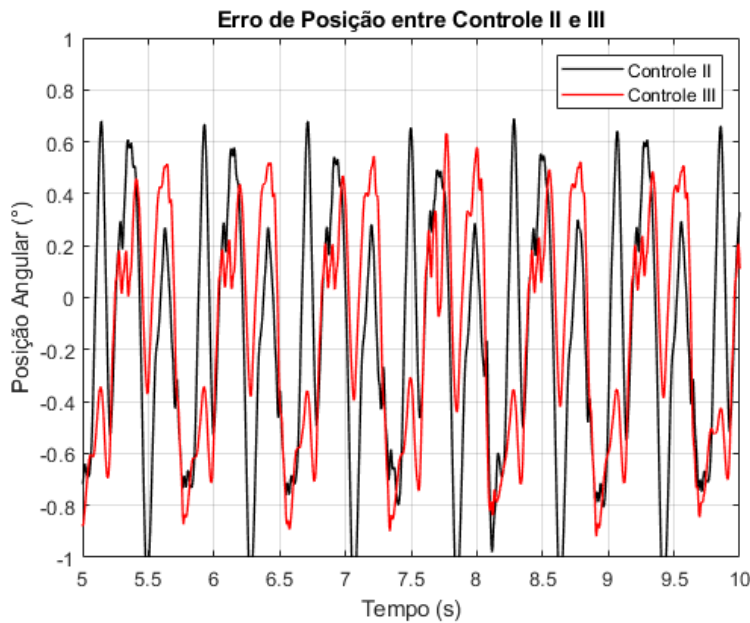


Figura 5.13: Gráfico de comparação entre erro de posição $q_{des} - q_{estimado}$ do Controle PD + Feedforward e Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque.

Percebe-se uma diferença entre os valores de posição medidos pelo controlador ODrive e o estimado pelo filtro de Kalman. Os valores estimados estão mais próximos dos valores desejados de posição, enquanto nas mudanças

de direção do elo, o controlador ODrive perde a referência. Como o controlador é um sistema *open source*, é possível acessar o algoritmo e modificar os ganhos do estimador que está no controlador ODrive, no entanto, optou-se pelo filtro de Kalman por ser um algoritmo bem consolidado e não precisar fazer muita alteração no controlador.

Contudo, observando a Figura 5.14 que podemos concluir sobre a diferença que o filtro de Kalman exerce no sistema em relação ao que estimador do controlador ODrive realiza. Verifica-se um certo ruído nas curvas de posição do elo estimado pelo controlador ODrive, enquanto a curva de posição do elo estimado pelo filtro de Kalman é bem mais suave. Todavia, é no gráfico de velocidade, ainda na Figura 5.14, que evidencia-se a diferença entre cada estimativa. A velocidade do motor estimado pelo controlador ODrive contém um ruído que afetaria diretamente o controle de realimentação, tanto no controle I quanto para o Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque.

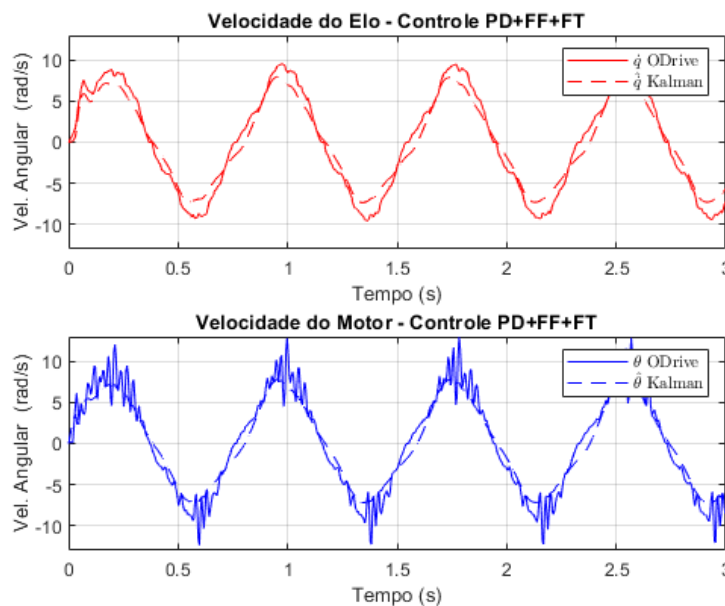


Figura 5.14: Gráfico de comparação de velocidades do sistema.

Em seguida, quando se adiciona um termo de *feedback* de torque, o erro de trajetória fica entre -1 e $+0,5^\circ$. Para comparação, utiliza-se um caso particular em que o Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque existe, mas utilizando o *feedback* de velocidade fornecido pelo controlador ODrive (ou seja, sem o filtro de Kalman para estimar os valores de posição e velocidade do elo). Este sinal, devido a ser estimado pelo controlador e não refinado para o caso em específico, forneceu um valor muito ruidoso, visto que foi reduzido a frequência de oscilação da trajetória desejada. Por isso é necessário o uso do filtro Kalman apresentado no esquema de controle da seção 5.3.

Para comparar o erro dos quatro controles, é possível avaliar a Tabela 5.3 que mostra o valor de cada curva de erro de posição para cada controle por um período de 15 segundos.

Tabela 5.3: Comparação dos tipos de controle utilizados.

Controlador	I	II	III	III sem Filtro de Kalman
RMS	0,8813	0,5032	0,4593	0,6338

A Figura 5.15 apresenta o sinal de controle aprimorado deste trabalho. O Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque tem uma curva mais suave e isto proporciona mais estabilidade ao sistema e diminui o esforço do controlador. Neste ponto, analisando o teste deste controle com e sem filtro de Kalman com base no sinal de controle, percebe-se o esforço do controlador sem filtro Kalman é maior que quando utilizando o filtro de Kalman com uma diferença de cerca de 0,5 Nm.

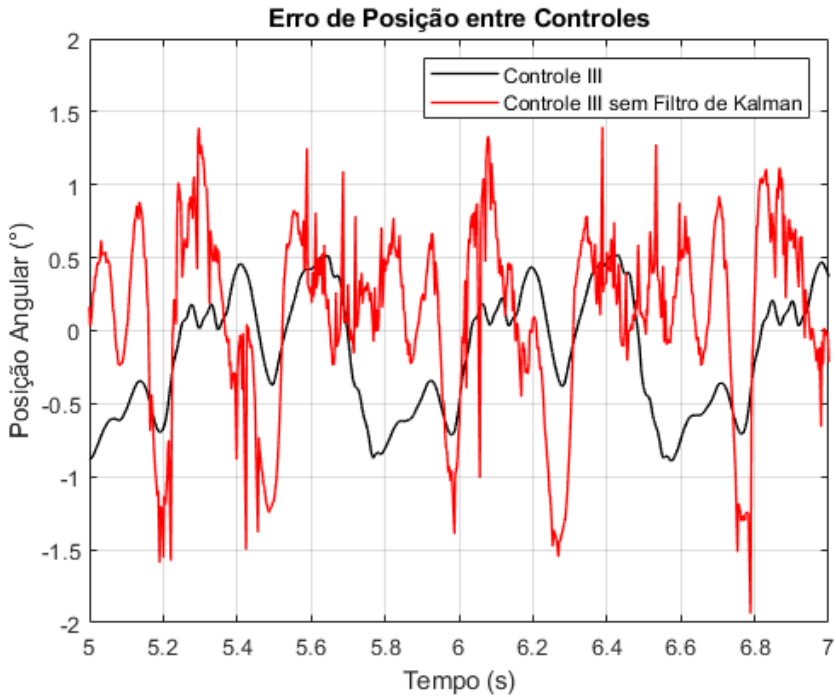


Figura 5.15: Sinais de erro de posição do elo. Este gráfico apresenta apenas o intervalo entre 5 e 7 segundos a fim de eliminar o transiente e o sinal subsequente continua com as oscilações de maneira estável.

5.3.1.4
Termos relacionados com o eSEA

A diferença entre a posição do motor e do elo é o termo principal do controle de FT, qualquer ruído afeta completamente o controle, visto que a Equação (3.3.1) é uma aproximação linear do termo elástico da junta flexível

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612789/CA

(lei de Hooke). Desta forma, o gráfico da Figura 5.16 representa esta diferença. Enquanto a curva de $\theta - q$ estimados pelo filtro de Kalman permanecem oscilando em amplitudes similares, tanto na parte positiva quanto na parte negativa, a curva de $\theta - q$ que foram fornecidas pelo controlador ODrive diferem a respeito da amplitude positiva e negativa. Enquanto a amplitude máxima positiva chega a $1,25^\circ$, a amplitude negativa alcança cerca de $-2,8^\circ$, mais que o dobro. Esta grande diferença pode estar relacionada com as proteções internas do controlador que não foram totalmente exploradas neste trabalho. No entanto, no início dos testes de bancada foi verificado que em sinais de excitações oscilatórios, o motor só entregava todo o torque desejado para um sentido em específico, enquanto no outro sentido ele oferecia um valor 60% do esperado. Este sistema de proteção é do próprio controlador de modo a proteger a placa de desenvolvimento e a fonte de alimentação e pode ser contornado utilizando um resistor de potência adequado e alterando alguns parâmetros internos da placa controladora.

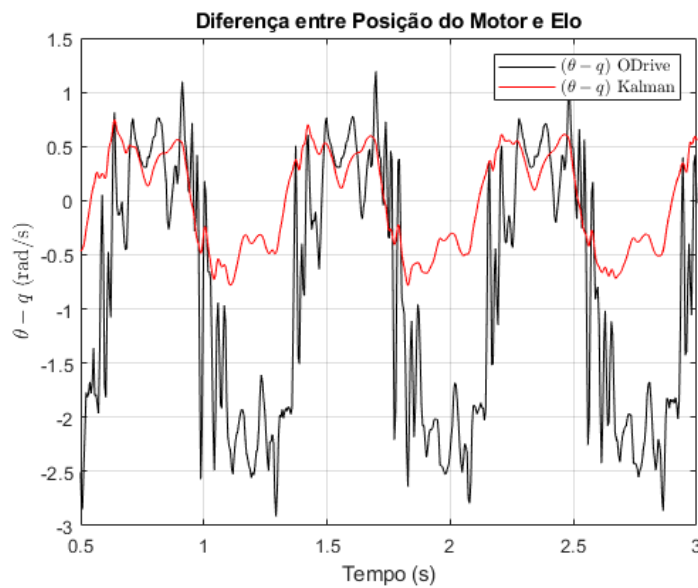


Figura 5.16: Gráfico da diferença entre a posição do motor e do elo ($\theta - q$)

Foi apresentado anteriormente que a diferença de posição entre o motor e o elo é importante para o funcionamento do controle do sistema. Agora observa-se outro aspecto que não está contemplado neste trabalho, mas que servirá para trabalhos futuros no mesmo mecanismo. Neste caso o termo de amortecimento ($\dot{\theta} - \dot{q}$) que pode ser considerado no modelo da constante elástica visando a não linearidade do eSEA. Observando, por exemplo, a Figura 5.17, identifica-se uma oscilação quatro vezes mais alta da velocidade estimada pelo controlador ODrive com relação à velocidade estimada pelo filtro de Kalman.

Desta forma é possível concluir que apenas a medição gerada pelo controlador ODrive afetaria o controle que utiliza esse termo.

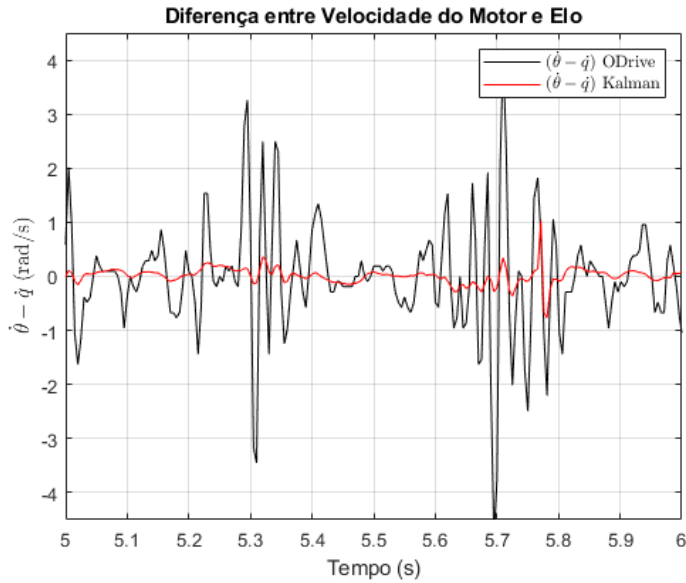


Figura 5.17: Gráfico da diferença entre a velocidade do motor e do elo $(\dot{\theta} - \dot{q})$.

5.3.1.5

Esforço do Controlador

Nesta subseção estuda-se o esforço do controlador referente a cada controle utilizado no sistema. Como no sinal de controle I o valor da contribuição do PD é idêntica ao do controle desejado, apresenta-se apenas os sinais das contribuições do Controle PD + Feedforward e do Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque

Nos gráficos da Figura 5.18 nota-se a contribuição do torque *feedforward* de maneira contínua já que independe de valores realimentados do sistema, ou seja, depende apenas de valores diretos como, por exemplo, a inércia do elo e do motor. Neste caso como o sistema tem apenas um grau de liberdade, esses termos são simples parâmetros do sistema. Em casos com mais grau de liberdade do manipulador, é possível utilizar um controle de torque computado para alimentar diretamente o sistema de controle. No mesmo gráfico percebe-se também a magnitude da contribuição que não ultrapassa a contribuição do controle de *feedforward*.

Em se tratando do Controle PD + Feedforward + Feedback de Torque, têm-se as contribuições de cada termo da lei de controle representado na Figura 5.19. É confirmada a contribuição do termo de *feedforward* idêntica ao Controle PD + Feedforward como esperado, no entanto, a contribuição do controle PD neste caso ultrapassa a do *feedforward*. Isso acontece em parte pela ajuda

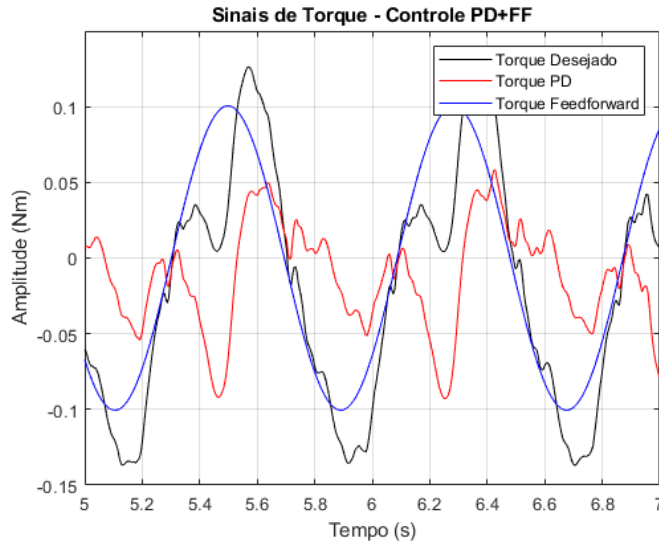


Figura 5.18: Comparação entre sinais de torque do controle II.

que o outro termo de controle (termo integral) gera no sistema. Apesar de a contribuição do termo integral ser 10 % a do termo de *feedforward*, ele gera um torque maior e consequentemente um movimento maior no elo. E como o termo integral baseia-se no eSEA com constante elástica linear, a curva desta contribuição é oscilatória sem sofrer ruídos já que as estimativas de posição também possuem curvas suaves.

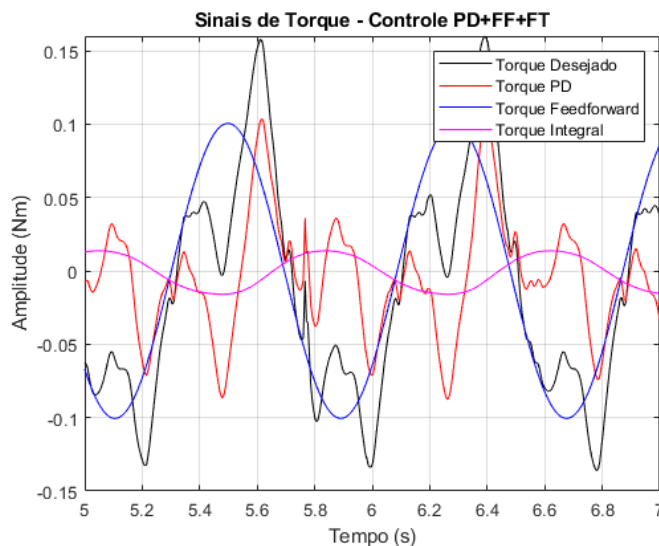


Figura 5.19: Comparação entre sinais de torque do controle III.

5.3.1.6

Comparação entre diferentes velocidades de oscilação

Para mensurar como o eSEA se comportava em frequências de oscilações mais altas, foi alternado no controle do sistema a velocidade com que o elo iria

se mover. Em todos os testes anteriores utilizou-se uma frequência de referência de $w_d = 8\text{rad/s}$, em seguida é alterada para $w_d = 10\text{rad/s}$ e novamente para $w_d = 13\text{rad/s}$. Desta forma o manipulador se movimentava mais rápido conforme a frequência de referência era aumentada.

A Figura 5.20 apresenta o sinal de erro de posição do elo (q) de cada frequência. Percebe-se que, quanto maior a frequência, mais a posição do elo (q) erra o valor desejado. Isto é esperado visto que juntas flexíveis com SEA apresentam esta desvantagem que em muitos casos são contornados usando Observadores de Distúrbios (DOB - Disturbance Observer) ou controle adaptativo. Como o intuito desta tese é gerar um dispositivo que pudesse controlar posição e força de maneira simples, este estudo de controle mais robusto ficou fora do escopo. No entanto, a partir desta tese e com o eSEA desenvolvido e validado, os próximos trabalhos podem atacar estas técnicas mais robustas e realizar um novo modelo para o eSEA, este agora respeitando a natureza não linear do componente elástico dentro do eSEA.

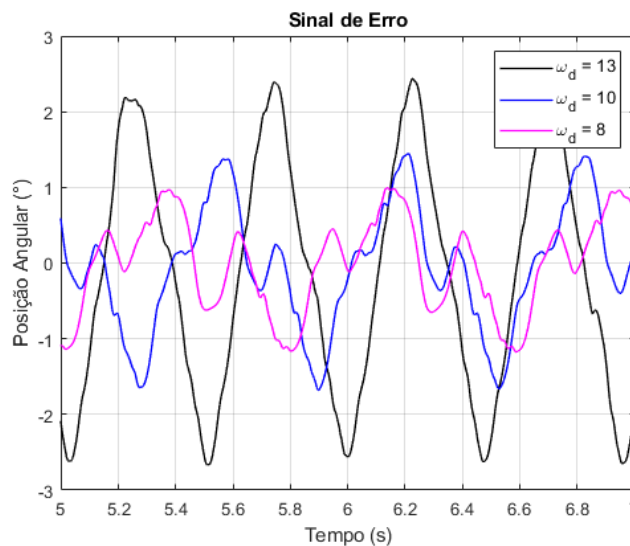


Figura 5.20: Comparação do sinal de erro de posição ($q_{desejado} - q_{estimado}$) para três diferentes frequências de oscilação.

5.3.2

Controle de Força

O esquema de controle é uma parte significativa para este trabalho visto que o eSEA deve ser projetado com o intuito de estimar efetivamente o torque que acontece no motor. Desta forma é relevante uma análise do quanto de força o eSEA consegue estimar usando a lei de Hooke, sendo uma equação linear, e quanto de força o elo consegue realmente desempenhar. Por isso o teste a ser conduzido nesta etapa se utiliza da mesma bancada de teste de controle

de posição acrescentando uma célula de carga posicionada na direção horizontal e paralela ao elo. Com isso é possível assegurar que a direção onde a força está sendo aplicada na célula de carga é a ideal.

O esquema de controle de força é representado pela Figura 5.21 e a bancada experimental pode ser visualizada na Figura 4.8.

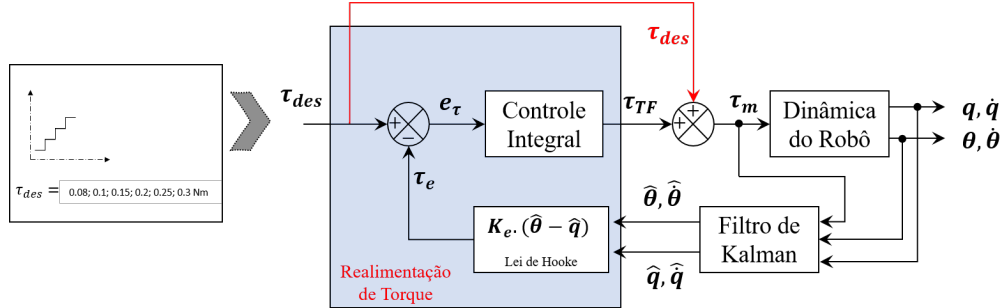


Figura 5.21: Teste de Bancada para Controle de Força. A célula de carga mede a força do elo e a distância entre o eixo de rotação e onde a força é aplicada, é conhecida.

Neste caso o controle I e de *feedforward* são retirados restando apenas a realimentação de torque. Além disso, uma realimentação direta do torque desejado também é adicionado já que a realimentação de torque atua no controle empregando um termo integral. A lei de controle de força proposta é dada por:

$$u := \tau_{des} + K_i \cdot \int_0^t [K_e \cdot (\hat{\theta} - \hat{q})] \cdot dt \quad (5-5)$$

Em relação ao controle de força, a Figura 5.22 mostra uma comparação entre os torques em questão. Neste caso, tem-se o torque desejado introduzido então no controlador para que este se reproduza a partir do controle projetado. O torque medido é uma inferência a partir da célula de carga. A força da célula de carga multiplicada pela distância entre o centro de rotação e o ponto onde a força é aplicada (utilizando o princípio da alavanca). O torque estimado é calculado a partir da Equação (3.3.1) usando a lei de hooke (considerando a borracha da eSEA linear). Finalmente, o torque do controlador ODrive é o sinal de corrente multiplicado pela constante de torque do motor dado pelo fabricante.

Examinando o gráfico percebeu-se que o torque estimado pela eSEA está próximo do valor desejado com erros de 10^{-3} Nm. O valor medido pela célula de carga tem um erro de 10^{-2} Nm. Isto é causado em parte pelo modelo linear do *feedback* de torque que limita a saída devido à natureza não linear da borracha inserida na junta.

Observando a Figura 5.15 nota-se uma diferença na amplitude que a ligação atinge na direção positiva é menor que na direção negativa. Isto pode

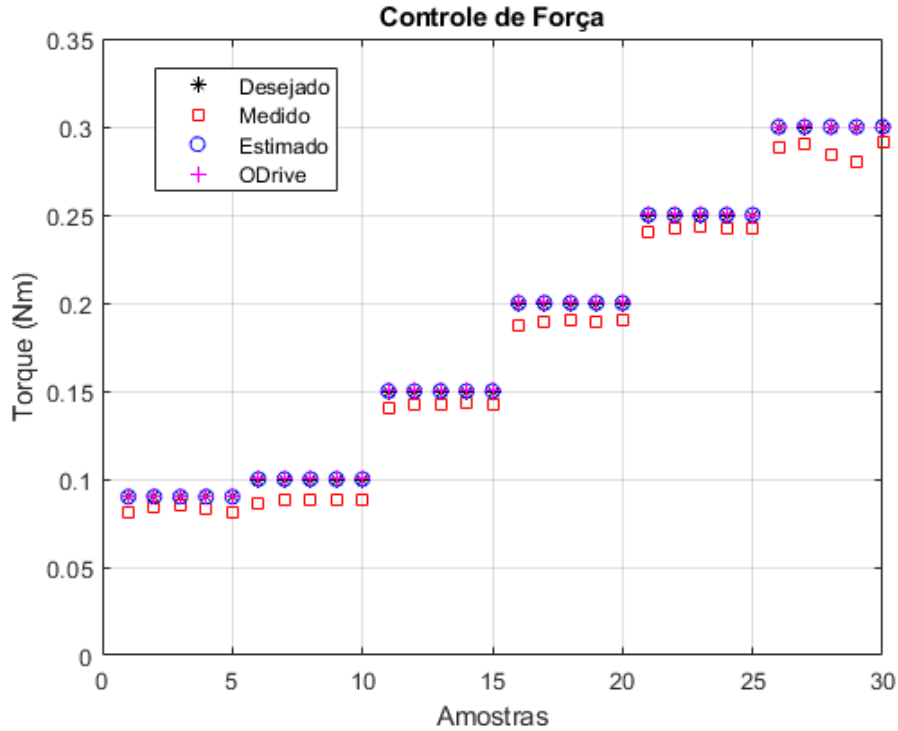


Figura 5.22: Comparação da força de controle. O sinal medido é o valor da célula de carga, o sinal estimado é calculado baseado no valor do eSEA, e o sinal do controlador ODrive é calculado pelo controlador.

acontecer devido a algum tipo de atrito ou amortecimento não modelado no sistema, visto que ao observar o sinal de controle (Figura 5.19) não notamos esta diferença de amplitude num lado específico. Quando se trata do sinal de esforço do controlador, é valioso notar que quanto mais linear for este torque do motor, melhor será o movimento de ligação e a estimativa de torque por eSEA. Nos casos em que há muitas oscilações do torque motor, o elemento elástico absorve ou liberta mais energia sob a forma de energia potencial e pode causar instabilidades no sistema.

6

Modelagem do Elemento Elástico

6.1

Aquisição de dados

Para a caracterização do elemento elástico é utilizado uma configuração específica na bancada de teste (Figura 6.1). O elo é posicionado de forma que ele não tenha movimento algum e apenas o motor rotacione. Desta forma, excita-se o motor com entradas específicas e então é medido o deslocamento angular do motor. Como o elo está parado, o deslocamento θ_d é igual ao deslocamento do motor.

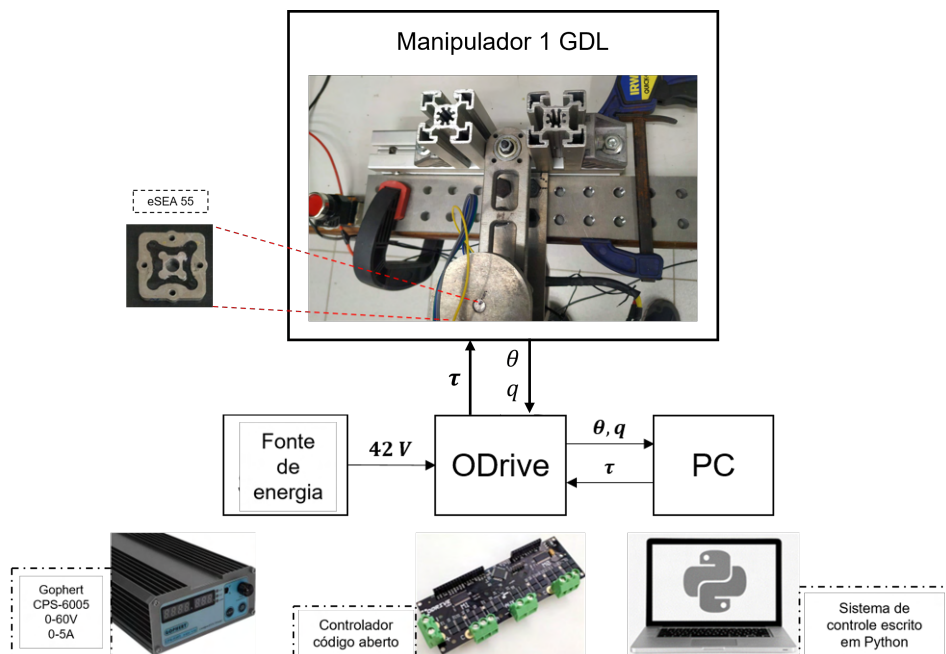


Figura 6.1: Bancada de Teste Experimental para Caracterização do Elemento Elástico.

Foram gerados diversos sinais de entrada de torque a fim de realizar a melhor identificação do elemento elástico e na Figura 6.2 podem ser vistos alguns exemplos. Os sinais de senoide (Figura 6.2 a) variam de amplitudes de 0.1 a 0.2 e frequência de 3, 5 e 8 rad/s. O sinal de degrau suavizado permanece com o valor de 0.2 Nm durante um período de tempo de 90, 120, 240 e 300 segundos (Figura 6.2 b). E o sinal de Chirp alternava o valor da frequência de

0.1 a 10 Hz durante 120 segundos (Figura 6.2 c). A Tabela 6.1 apresenta cada um dos sinais utilizados. A escolha dos sinais se deu de acordo com a literatura que utiliza o sinal de senoide para avaliar o modelo do elemento elástico a uma dada frequência e torque específico. O degrau suavizado foi escolhido para que o modelo pudesse estimar o relaxamento que a borracha sofre durante a mudança de sentido do torque e o amortecimento que o elemento elástico causa durante um torque constante [61,62,105]. O sinal de *chirp* é utilizado a fim de estudar as diversas frequências envolvidas no sistema enquanto o elemento elástico realiza a mudança no sentido de rotação. Nos sinais de senoide a amplitude A e a frequência ω são alternadas entre os sinais de entrada. No sinal de degrau suavizado, a amplitude A é de 0.2 Nm, o valor de Δ define o quanto a subida/descida ao degrau será suavizada semelhante a uma função sigmóide e a frequência é o tempo em que é alterado o sentido do degrau enviado para o motor. O sinal de Chirp inicia na frequência de 0.1 Hz e cresce até a frequência de 10 Hz.

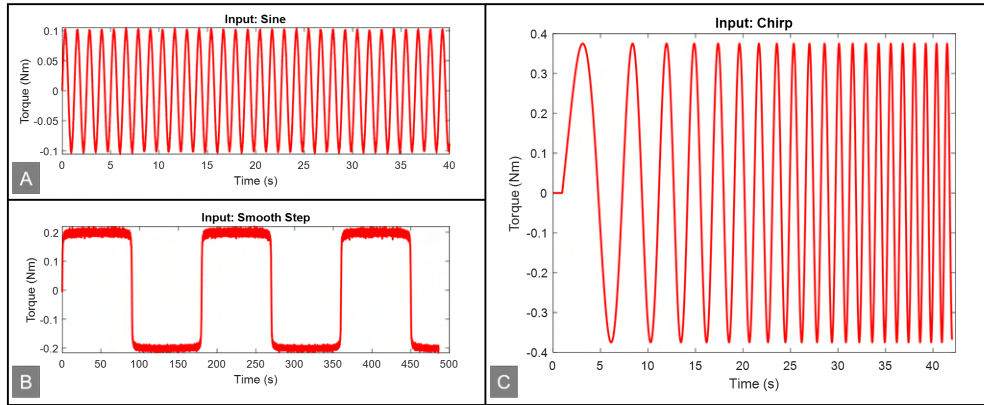


Figura 6.2: Exemplos de sinais de entrada. A) Sinal de senoide com amplitude e frequência determinada. B) Degrâu suavizado gera função degrau em períodos de tempos determinados. C) Sinal do tipo *Chirp* com frequências que aumentavam com o tempo.

6.2

Metodologia proposta

Como esses modelos apresentados anteriormente são lineares, é possível representá-los por uma função de transferência do tipo:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (6-1)$$

onde $Y(s)$ e $X(s)$ são a saída e a entrada do sistema respectivamente, n e m são os números de pólos e zeros presentes na função de transferência

Tabela 6.1: Sinais de Entrada Utilizados na Tese.

Sinal	Código	Características
Senoide	S1	$A = 0.1$; ω : 3 rad/s
Senoide	S2	$A = 0.1$; ω : 5 rad/s
Senoide	S3	$A = 0.1$; ω : 8 rad/s
Senoide	S4	$A = 0.2$; ω : 3 rad/s
Senoide	S5	$A = 0.2$; ω : 5 rad/s
Senoide	S6	$A = 0.2$; ω : 8 rad/s
Degrau Suavizado	DS1	$A = 0.2$; $\Delta = 0.01$; Frequência: $\frac{1}{120}$
Degrau Suavizado	DS2	$A = 0.2$; $\Delta = 0.01$; Frequência: $\frac{1}{240}$
Degrau Suavizado	DS3	$A = 0.2$; $\Delta = 0.01$; Frequência: $\frac{1}{90}$
Degrau Suavizado	DS4	$A = 0.2$; $\Delta = 0.01$; Frequência: $\frac{1}{300}$
Sinal Chirp	C1	$f_0=0.1$; $f_1=10$ Hz; $t=120$ s

do sistema respectivamente, e a_n e b_n são os coeficientes que multiplicam cada termo.

A partir da função de transferência, estudou-se modelos com número de pólos e zeros alternando entre 2 e 9 a fim de criar um modelo mais robusto e a estimativa de alongamento do elemento elástico ser mais precisa (Figura 6.3).

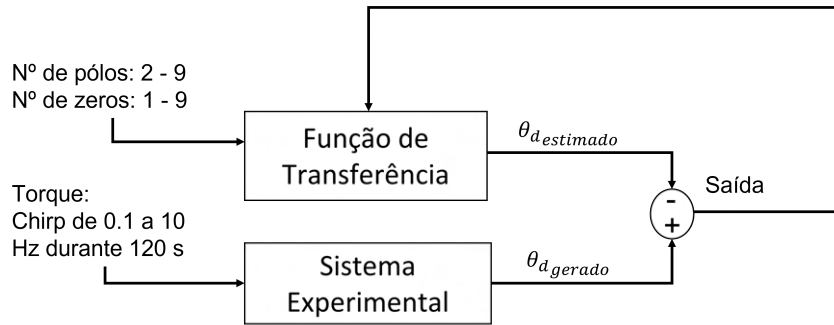


Figura 6.3: Diagrama de blocos da estimativa para os valores da função de transferência com número de pólos entre 2 e 9.

Utilizando o software Matlab e a função *tfest* foi criado uma rotina de teste para alternar os valores do número de pólos e zeros e ajustar os valores dos coeficientes a_n e b_n , a fim de gerar a porcentagem de acerto da função de transferência escolhida bem como calcular o erro médio quadrático. Usou-se o método *n4sid* ([117]) para estimar o modelo a partir de subespaços do espaço de estados e a matriz de pesos utiliza uma atualização por decomposição por valores singulares. Os horizontes de predição retornam um vetor de linha com três elementos: r que é o horizonte máximo de previsão passo a frente; sy é o número de saídas passadas; e su é o número de entradas passadas que são usadas para as previsões. Nesta estimativa foram utilizados três sinais diferentes: Um sinal de senoide (S3 - Tabela 6.1); Um sinal de degrau com

uma suavização nas transições (DS1 - Tabela 6.1)); E um sinal *Chirp* (C1 - Tabela 6.1).

A fim de aumentar a acurácia do modelo estimado para o elemento elástico, é proposto nesta tese além de um modelo de função de transferência com número de pólos e zeros variando entre 1 e 9, um modelo do erro gerado no sistema experimental que foi ajustado tanto por um modelo NARX quanto um modelo NARMAX, como mostra a Figura 3.7. Como não há um conhecimento prévio da física relativa ao erro, uma identificação caixa preta é indicada para o problema visto que ela aproxima funções a fim de descrever a relação entre entradas e saída. Essa nova metodologia combina um modelo robusto com função de transferência e um modelo caixa preta para o erro da estimativa desta função de transferência. Desta forma, as não linearidades não representadas pela função de transferência podem ser consideradas pelo modelo caixa preta gerando mais robustez ao modelo do elemento elástico.

6.3 Resultados

O objetivo inicial é criar um modelo acurado de forma que represente o comportamento viscoelástico do material utilizado nesta tese. Serão apresentados os resultados para o modelo do tipo Zener e do tipo Burgers. Em seguida são apresentadas as variações de função de transferência em busca de um modelo mais robusto permutando o número de zeros e pólos entre 1 e 9. Por fim, são criados um modelo NARX e um NARMAX que represente o resíduo entre o sinal de saída medido e o sinal de saída estimado pela função de transferência mais adequada para o elemento elástico.

6.3.1 Modelo viscoelástico

No primeiro momento realizou-se a estimativa do modelo Zenner. Foram usados no torque do motor seis sinais de senoide e apenas um sinal de degrau suavizado pois este apresentou o melhor resultado entre os sinais de entrada a degrau, e os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 6.2. É possível notar que o erro entre valores estimados e valores medidos é reduzido quando aplicado um sinal de senoide com amplitude 0.1 Nm e frequência de 3 rad/s (Tabela 6.1).

Como podemos observar na Figura 6.4, o modelo Zener gerou uma estimativa próxima dos valores medidos com um erro de 0.108364 no entanto esse sinal é oscilatório o que sugere uma alteração dos valores mesmo não sendo nos picos onde ocorre o intervalo de mudança de sentido, como uma espécie

Tabela 6.2: Estimativa do modelo Zener usando uma entrada. As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1

Zener						
Estimativa					Validação	
Entrada	Erro	η	E_1	E_2	Entrada	Erro
S1	0,108364	0,007	0,0585	0,134	DS3	167,5012
S2	0,110545	0,0045	0,0591	0,1617	DS3	158,2243
S3	0,357606	3167,1	3,7	-3,6	DS3	3,5935+13
S4	0,18945	0,0064	0,00762	0,129	DS3	111,7926
S5	0,247598	0,0039	0,0795	242,8059	DS3	140
S6	0,182143	0,0028	0,0757	0,0959	DS3	108,9906
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S1	34,2393
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S2	34,9775
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S3	32,3208
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S4	38,9176
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S5	42,8715
DS3	0,147911	0,0894	0,0667	0,0138	S6	40,2861

de vibração. Apesar de ser uma oscilação baixa, em torno de 0.2 graus, pode se tornar considerável para o caso de um modelo mais robusto.

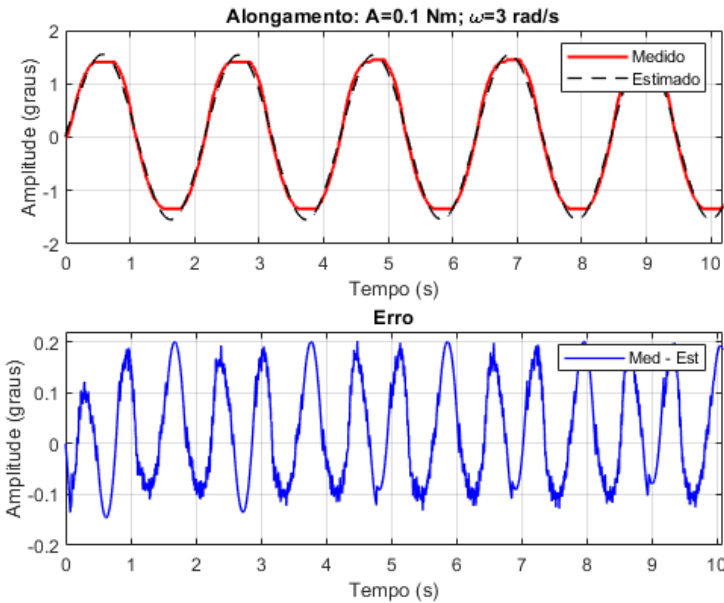


Figura 6.4: Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico utilizando o sinal de senoide S1 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.

No gráfico de histerese (Figura 6.5) é demonstrado novamente o modelo ajustado as medições mas existe uma descontinuidade na qual o modelo não consegue ajustar nos picos, onde a direção do motor é alterada. Usando esse modelo estimado e fazendo uma validação com outro sinal de entrada, do

tipo degrau suavizado, o erro do modelo é significativo. O valor do sinal de alongamento estimado ultrapassa em aproximadamente 1 grau o sinal medido o que pode acontecer devido o amortecimento do elemento elástico não estar bem representado no modelo e pode ser melhor observado no gráfico da Figura 6.6.

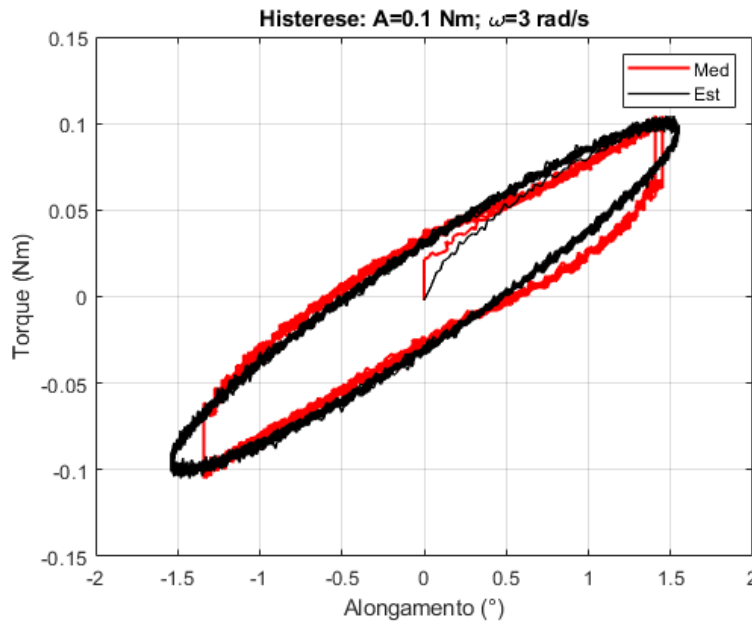


Figura 6.5: Gráfico de histerese do elemento elástico utilizando o sinal de senoide S1 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.

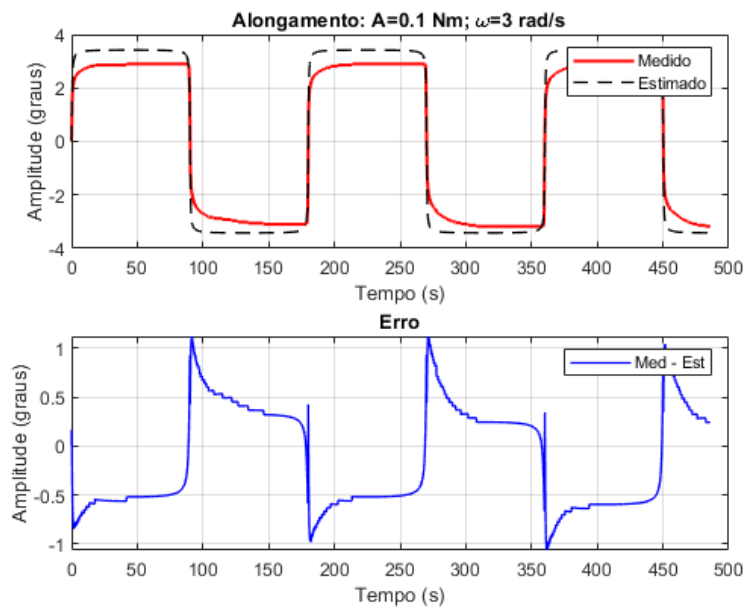


Figura 6.6: Gráfico do teste de validação do modelo utilizando o sinal de degrau suavizado DS3 (Tabela 6.1). Curvas de valores medidos x valores estimados.

Ainda na Tabela 6.2, o modelo estimado com a entrada senoide S6 (Tabela 6.1), tem o menor valor de erro médio para a validação. No entanto, observando os gráficos de estimativa deste modelo (Figura 6.7), nota-se que a curva estimada não se ajusta ao valor medido quanto a estimativa anterior da Figura 6.4 e o sinal de histerese (Figura 6.7) não se adapta ao valor medido.

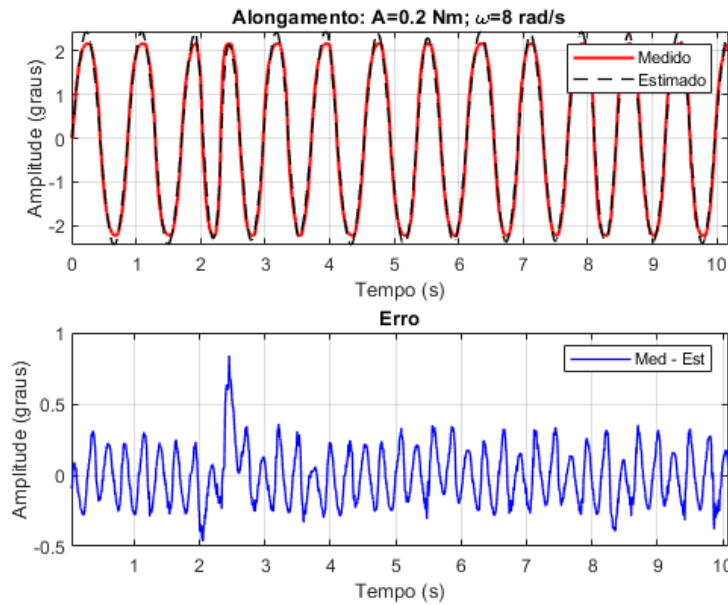


Figura 6.7: Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico usando o sinal S6. Curvas de valores medidos x valores estimados.

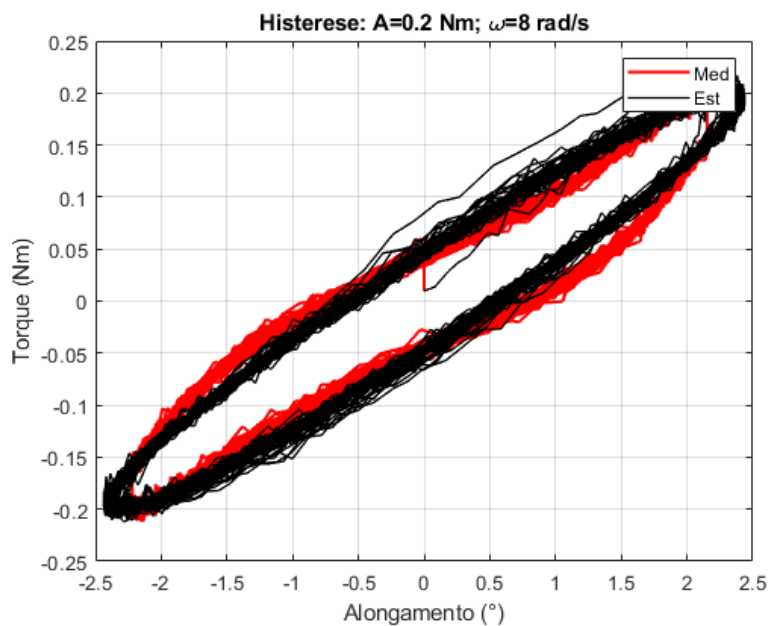


Figura 6.8: Gráfico de histerese do elemento elástico usando o sinal de senoide S6. Curvas de valores medidos x valores estimados.

Porém a Figura 6.9 mostra que a validação deste modelo utilizando a entrada de degrau suavizado obteve melhores resultados se comparada aos outros testes anteriores. Apesar da estimativa estar com o erro maior que os anteriores, a curva de validação tem um erro menor que os testes estimados pelos sinais de senoide. Observando as diferenças entre essas duas estimativas, é possível identificar que os valores de validação diminuem conforme o aumento no torque do sinal de entrada de senoide. Em contrapartida, alterando o valor da frequência não houve indicação de mudança perante a estimativa.

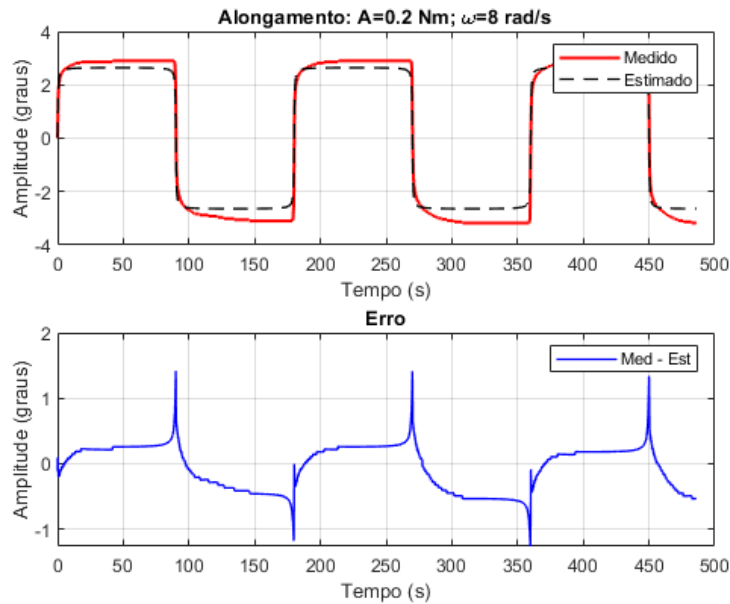


Figura 6.9: Gráfico do teste de validação do modelo usando o sinal de degrau suavizado DS3. Curvas de valores medidos x valores estimados.

Observa-se que os dados de medição possui um comportamento crescente no alongamento da borracha a partir do momento que inicia um degrau. Essa curva crescente pode ser avaliada como amortecimento inerente ao elemento elástico o qual o modelo de Burgers pode representar melhor que o modelo de Zener.

Analisando a estimativa do modelo do tipo Zener usando o sinal de entrada degrau suavizado (linha 7 Tabela 6.2), o erro de estimativa está entre os valores estimados com a entrada senoide, no entanto, a validação foi a menor em comparação aos modelos do tipo Zener. A Figura 6.10 apresenta um modelo bem ajustado com o erro ultrapassando 1° de alongamento no entanto no gráfico de histerese (6.11) percebe-se que o modelo está mal ajustado de acordo com a histerese dos dados experimentais.

O gráfico de validação (6.12) apresenta uma defasagem da oscilação com o gráfico de senoide o que pode causar um erro considerável na estimativa de torque do elemento elástico.

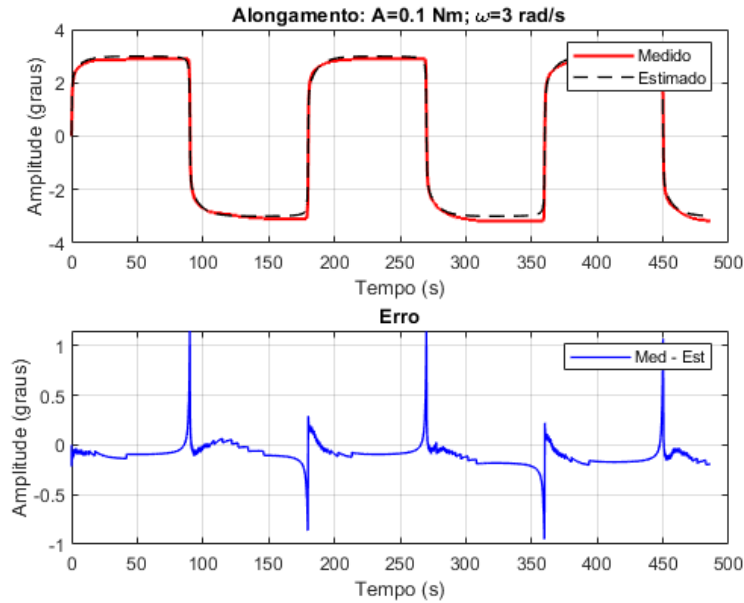


Figura 6.10: Gráfico de estimativa do alongamento do elemento elástico usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.

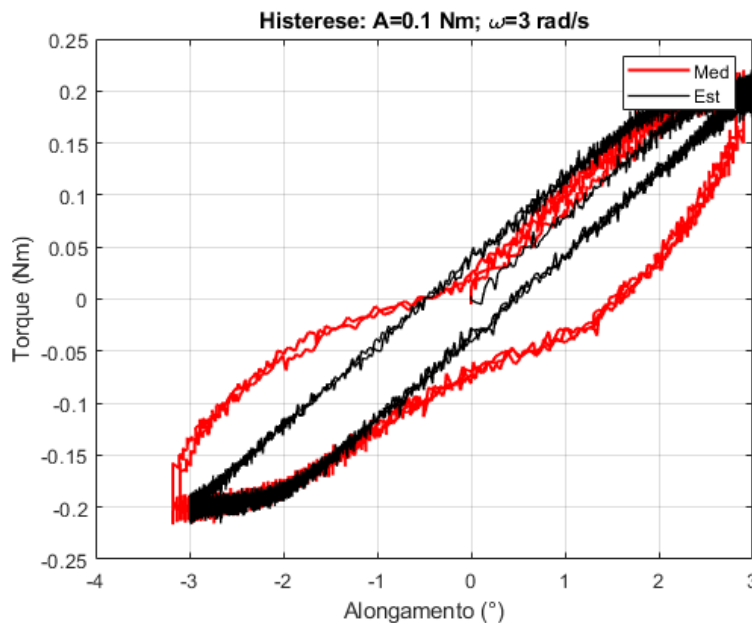


Figura 6.11: Gráfico de histerese do elemento elástico usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.

Como os dados experimentais apresentados anteriormente estão com uma inclinação devido ao material viscoelástico e seu comportamento de relaxamento, o modelo de Burgers pode ser uma proposta viável devido o elemento de amortecimento a mais se comparado ao modelo de Zener. Esse elemento cria um amortecimento contínuo semelhante com o que temos nas medições. Com isso, foram realizados os testes com o modelo de Burgers e os

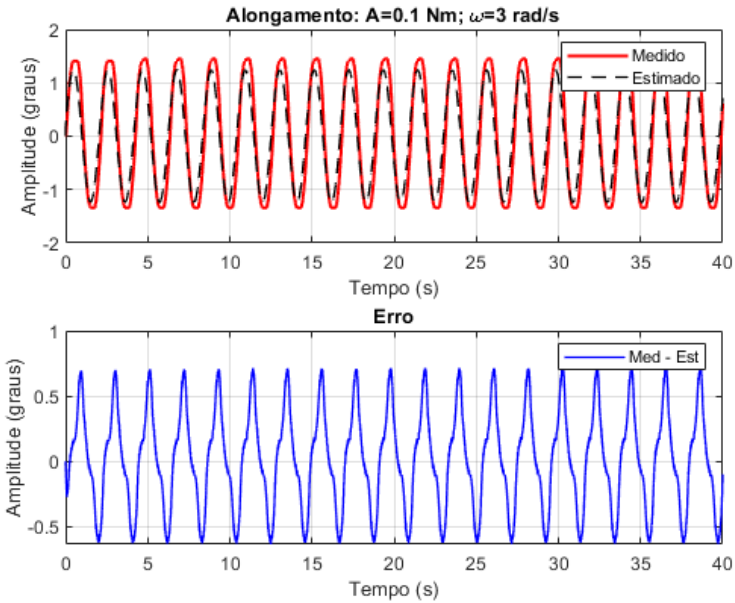


Figura 6.12: Gráfico do teste de validação do modelo usando degrau suavizado. Curvas de valores medidos x valores estimados.

resultados estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Estimativa do modelo de Burgers usando uma entrada. As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1

Burgers							
		Estimativa				Validação	
Sinal	Erro	η_1	η_2	E_1	E_2	Sinal	Erro
S1	0,105296	1,2445	0,0065	0,0595	0,1798	DS3	2646
S2	0,283013	0,0507	0,0507	0,035	0,035	DS3	32501
S3	0,284541	0,033	0,033	0,038	0,038	DS3	49960
S4	0,171603	0,8149	0,0055	0,0777	0,1999	DS3	4013,2
S5	0,247598	0,0039	97852	1105	0,0795	DS3	140
S6	0,18214	27,1462	0,0028	0,0757	0,0965	DS3	158,6147
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S1	31,943
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S2	33,3283
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S3	33,3956
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S4	51,5461
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S5	55,0215
DS3	0,232203	864,6336	864,5592	0,0541	0,0146	S6	53,1686

A Figura 6.13 apresenta o modelo de burger e a curva apresenta a inclinação esperada devido ao elemento de amortecimento presente no modelo. No entanto o modelo não se ajustou aos valores medidos porque essa inclinação não é limitada. Constata-se que após dois minutos de ação de torque constante, o elemento elástico não apresenta mais o comportamento de relaxamento, o que influencia diretamente no modelo de burgers.

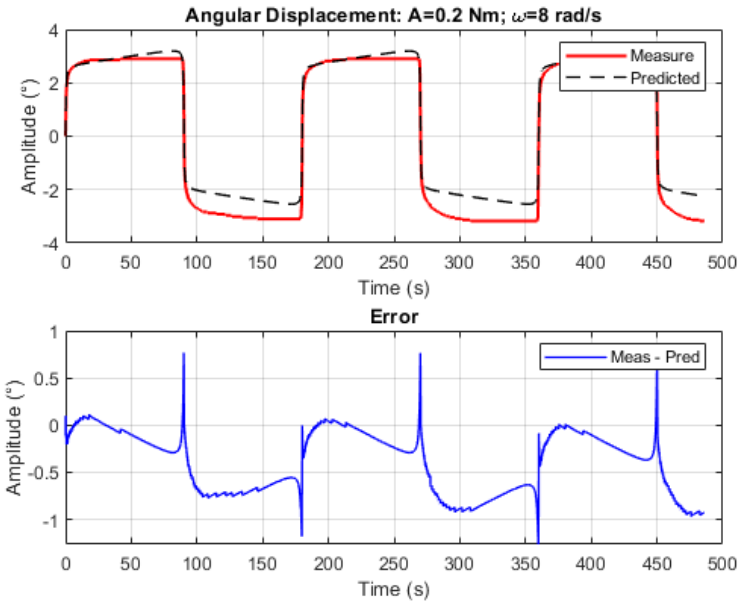


Figura 6.13: Gráfico do teste de validação do modelo usando degrau suavizado com o modelo de Burgers. Curvas de valores medidos x valores estimados.

Para a estimativa multiobjetivo, apenas o modelo do tipo Zener foi avaliado visto que o modelo de tipo Burgers apresenta essa característica de inclinação a qual não representa as medições obtidas com o elemento elástico em questão. Sendo assim, apenas a identificação por modelo Zener foi realizado para estimativa multiobjetivo e os resultados são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Estimativa do modelo de Zener usando duas entradas (multiobje-
tivo). As siglas e informações do sinal podem ser observadas na Tabela 6.1

Zenner					
Entrada 1	Entrada 2	Erro	η	E_1	E_2
S1	DS1	0,165676	0,007	0,0691	56583
S2	DS1	0,165211	0,0045	0,0692	53082
S3	DS1	0,13858	0,0032	0,0696	221920
S4	DS1	0,179373	0,0078	0,0701	0,0492
S5	DS1	0,21118	0,0049	0,0702	0,0506
S6	DS1	0,179575	0,0033	0,0702	0,0535
S1	DS2	0,154045	0,0069	0,0685	123890
S2	DS2	0,153055	0,0044	0,0686	242850
S3	DS2	0,12724	0,0032	0,0689	172630
S4	DS2	0,171062	0,008	0,0693	0,0466
S5	DS2	0,202267	0,005	0,0694	0,0481
S6	DS2	0,170178	0,0034	0,0694	0,0512

Apesar de utilizar duas entradas o modelo não apresenta o ajuste necessário e possui erros maiores do que quando havia apenas um sinal de entrada. Analisando os dados é possível perceber que a quantidade de dados

do sinal de senoide é bem menor que a do degrau suavizado (aproximadamente 5 vezes menos). Por causa disso, o modelo é sempre influenciado pelo sinal de entrada que tem mais amostras. Além disso o sinal de degrau suavizado possui muitas amostras em um valor constante o que direciona a estimativa e acaba gerando erros no modelo.

6.3.2

Metodologia proposta

Nesta etapa é gerada a estimativa utilizando um modelo com função de transferência e alterando a quantidade de parâmetros a fim de obter um modelo mais robusto. No primeiro momento utilizou-se um sinal de entrada sendo o padrão e todos os restantes seriam de validação. Dessa forma obtêm-se três tabelas sendo uma estimativa usando sinal de senoide (Tabela 6.5). Outra estimativa baseado no sinal de degrau suavizado (Tabela 6.6). Por fim, usa-se o sinal de chirp (Tabela 6.7) para realizar a estimação do sistema.

Tabela 6.5: Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada seno (S3 - Tabela 6.1)

	pólos zeros RMSE	4 3	4 2	5 4	8 6	5 1
		0.108286	0.108335	0.10834	0.108441	0.108552
Performance	S3 (%)	90.09	90.09	90.09	90.08	90.07
	S1 (%)	90.09	90.09	90.09	90.08	90.07
	S2 (%)	82.26	81.37	81.43	82.82	80.95
	S4 (%)	90.09	90.09	90.09	90.08	90.07
	DS1 (%)	77.93	80.02	78.67	44.34	79.78
	DS2 (%)	79.40	81.48	80.14	46.04	81.24
	DS3 (%)	80.10	82.06	80.79	47.76	81.83
	DS4 (%)	79.65	81.55	80.33	47.58	81.33
	C1 (%)	30.24	47.54	19.05	29.04	50.89

É possível afirmar que apesar do aumento de parâmetros a estimativa do modelo para uma entrada usando apenas senoide não é o mais adequado. Isso porque o senoide possui apenas uma frequência e dessa forma não é possível excitar as diversas frequências do sistema representando o comportamento do sistema como um todo. Os erros médios quadráticos dos modelos estimados com a senoide ficaram cerca de 30% menores que os modelos estimados usando o degrau suavizado. Isso sugere que o relaxamento pode ser estimado usando um sinal de entrada do tipo degrau suavizado. Além disso, a quantidade de parâmetros nas estimativas que ficaram melhor ajustadas aos dados medidos foram de 4 pólos e 3 zeros para o sinal de seno e 8 pólos e 3 zeros para o sinal de degrau suavizado. Nota-se na Tabela 6.7 que ao estimar um modelo a

Tabela 6.6: Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada degrau suavizado (DS1 - Tabela 6.1)

	pólos	8	3	7	6	2
	zeros	3	1	1	1	1
	RMSE	0.147118	0.154250	0.154254	0.154441	0.154448
Performance	DS1 (%)	94.76	94.50	94.50	94.49	94.49
	S1 (%)	69.82	45.42	40.63	45.67	45.89
	S2 (%)	58.15	45.25	41.20	45.98	46.88
	S3 (%)	69.82	45.42	40.63	45.67	45.89
	S4 (%)	69.82	45.42	40.63	45.67	45.89
	DS2 (%)	95.18	95.12	95.18	95.11	95.10
	DS3 (%)	92.99	92.72	92.68	92.71	92.70
	DS4 (%)	90.60	91.31	91.33	91.31	91.30
	C1 (%)	13.37	8.26	1.36	2.68	3.00

Tabela 6.7: Estimativa e validação do modelo a partir do sinal de entrada *chirp* (C1 - Tabela 6.1)

	pólos	8	9	9	8	9
	zeros	8	9	7	7	8
	RMSE	0.437005	0.437376	0.440397	0.440561	0.441148
Performance	C1 (%)	84.64	84.63	84.52	84.52	84.49
	S1 (%)	71.23	71.36	71.62	71.2	72.05
	S2 (%)	71.12	70.99	71.68	70.61	71.69
	S3 (%)	71.23	71.36	71.62	71.2	72.05
	S4 (%)	71.23	71.36	71.62	71.2	72.05
	DS1 (%)	89.14	89.43	89.58	89.56	90.31
	DS2 (%)	88.67	88.98	89.14	89.12	89.93
	DS3 (%)	86.57	86.86	87	86.98	87.73
	DS4 (%)	85.91	86.17	86.32	86.27	87

partir de um sinal do tipo *chirp*, o que se produz é um modelo mais acurado e robusto mesmo se for validado com sinais de entrada de torque diferentes. Isso se deve ao fato da varredura que o sinal de *chirp* faz em diversas frequências proporcionando um modelo mais próximo da realidade. A análise feita apenas com relação ao erro médio quadrático pode indicar o sinal de entrada senoide como o mais indicado para ser utilizado já que o índice foi maior para o modelo criado a partir da entrada de *chirp* em comparação aos outros dois anteriores. Entretanto este modelo criado pelo sinal de *chirp* alcança mais acertos em diversos cenários de entradas possíveis.

Como o modelo criado pelo sinal de entrada *chirp* de 8 pólos e 8 zeros foi o melhor com relação aos outros gerados anteriormente, este modelo é utilizado como referência para ajustar o modelo híbrido que compensa o erro de estimativa. O sinal do tipo *Chirp* utilizado pode ser observado na Figura 6.14.

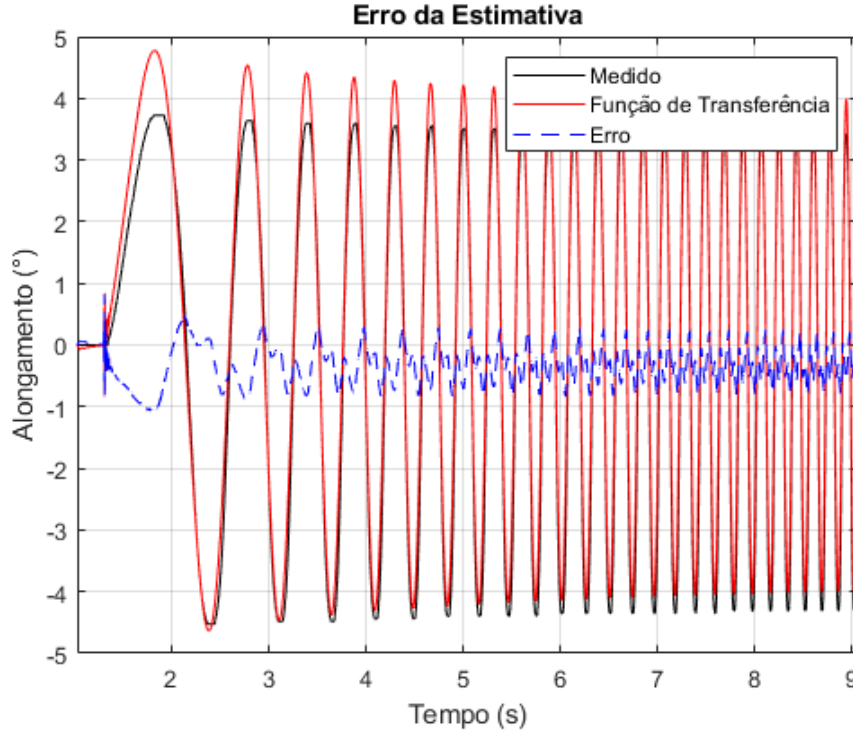


Figura 6.14: Sinal de Excitação do tipo Chirp. O sinal oscila a frequência entre 0.1 e 10Hz durante 120 segundos

É possível notar que a função de transferência não ajusta as medições fazendo com que os picos não sejam contemplados no modelo. O erro é de aproximadamente 1° de alongamento do elemento elástico e é possível notar que há uma diferença na medição de cada sentido, por exemplo o valor máximo na direção positivo é 3.65° enquanto que na direção negativa é de 4.30° . Essa diferença também é notada pelos autores em Kim et.al., (2019) e Sun et.al., (2022) [48,62] pois utiliza-se um elemento elástico baseado em elastômeros.

O modelo caixa preta do tipo NARX é modelado e pode ser notado em Figura 6.15. A equação que representa o modelo criado nesta tese usando função de transferência com 8 polos é dada por:

$$\frac{1.94e^4s^7 - 1.78e^4s^6 - 5.32e^4s^5 - 7.37e^4 - 1.31e^5s^3 - 86s^2 + 130.2s + 4.65}{s^8 + 8.68s^7 + 24.64s^6 + 58.34s^5 + 88.76s^4 + 80.85s^3 + 73.48s^2 + 23.38s + 0.32} \quad (6-2)$$

O modelo NARMAX polinomial é dado a partir dos coeficientes da Tabela 6.8.

Com os resultados obtidos pelos modelos criados de TF, H1 - Híbrido 1 que é a soma entre a função de transferência TF com o modelo NARX (Eq.3-29, H2 - Híbrido 2 que é a soma entre a função de transferência TF com o modelo NARMAX (Eq. 3-32), é criada a Tabela 6.9. A estimativa foi realizada

Tabela 6.8: Coeficientes utilizados no modelo NARMAX polinomial

	Regressor	Parâmetros	ERR
0	$y(k-1)$	4.0585E-01	6.49452275E-01
1	$x1(k-1)^2$	-2.0939E+00	9.01878015E-02
2	$y(k-5)y(k-4)$	-5.8359E-01	2.28061308E-02
3	$y(k-5)y(k-2)$	4.2282E-01	1.38225939E-02

com o sinal *chirp* pois mostrou-se mais eficaz que os outros sinais utilizados visto que ele consegue varrer uma gama maior de frequências e assim pegar o comportamento do sistema. Para a validação foram utilizados quatro tipos de sinais entre eles senoides e degraus apresentados na Tabela 6.1. Percebe-se que para sinais de senoide S1, S3 e S4 os valores de erro médio quadrático (MSE) se repetem tanto no modelo NARX quanto no modelo NARMAX. Isso mostra que apesar de caminhos distintos, os modelos chegaram a um modelo parecido para esse tipo de sinal. Os sinais de degrau não obtiveram valores de MSE baixo como se esperava. Isso porque o relaxamento da borracha influencia bastante nesse modelo e como esse comportamento é altamente não linear, o modelo pode não representá-lo totalmente.

Tabela 6.9: Comparativo entre metodologias de identificação utilizada na tese

	TF	H1 (FR)	H1 (OSA)	H2 (FR)	H2 (OSA)
Sinal	MSE	MSE	MSE	MSE	MSE
S1	0.3144149	0.3609968	0.0479	0.313009	0.19104
S2	0.3112599	0.335097945	0.0610	0.309025	0.18332
S3	0.3144149	0.360996894	0.0479	0.313009	0.19104
S4	0.3144149	0.360996894	0.0479	0.313009	0.19104
DS1	0.3047521	0.362476852	0.0916	0.37754	0.22719
DS2	0.3215895	0.389954841	0.0984	0.381449	0.23968
DS3	0.3847501	0.450091542	0.1206	0.426908	0.33049
DS4	0.4047908	0.479826461	0.1954	0.480129	0.40898

A Figura 6.15 apresenta os erros que foram modelados tanto o NARX ajustado por rede neural quanto NARMAX polinomial. Se comparado ao modelo que utiliza apenas a função de transferência, é possível notar que o modelo NARX ficou mais próximo em comparação ao NARMAX. Isso se deu pela robustez do ajuste que foi dado por redes neurais.

A função de transferência possui uma instabilidade no início do teste diferente do sinal do modelo NARX. Essa diferença pode criar um modelo mais robusto eliminando algumas medições indesejadas. Com esse modelo NARX é possível compensar o modelo criado pela função de transferência de 8 polos e 8 zeros. Com isso, ao adicionarmos o modelo NARX como compensação do erro para o modelo criado pela função de transferência (usando a Eq. 3-30),

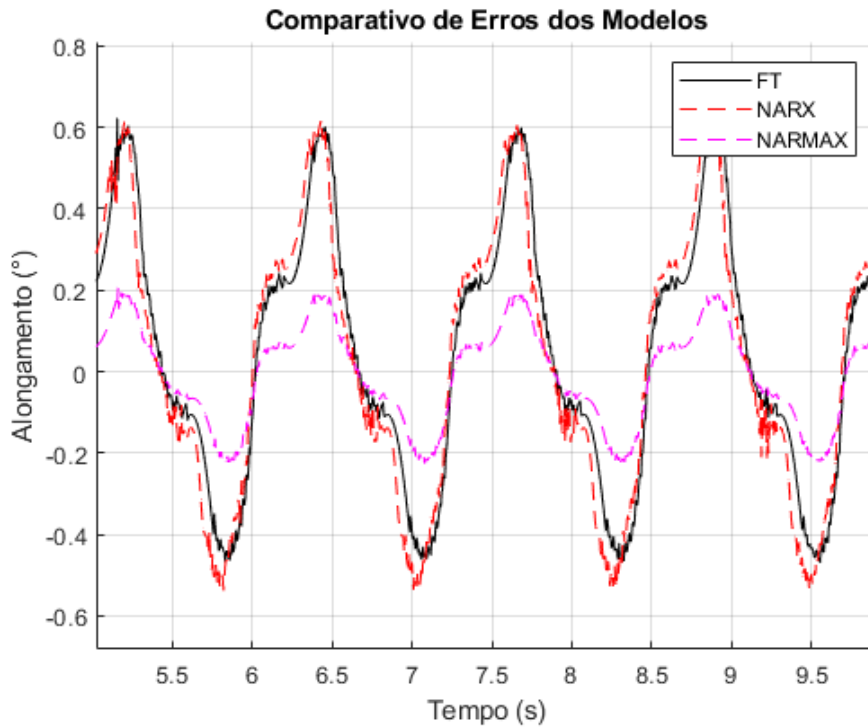


Figura 6.15: Modelo NARX do Erro de Estimativa

é possível notar na Figura 6.16 que o modelo aproxima do sistema real em comparação com o modelado apenas pela função de transferência. O início possui um transiente que pode afetar o sistema mas em seguida o modelo H1 se ajusta ao sinal de Chirp mesmo não alcançando os picos do sinal de medição. O modelo H2 também foi mais eficaz que o modelo gerado apenas pela FT o que sugere uma contribuição ao estudo de modelagem de um elemento elástico baseado em elastômeros e que pode aumentar a eficiência do controle de atuadores do tipo SEA com este tipo de elemento.

A melhoria no modelo é bem identificada pela Figura 6.17, onde o resíduo para o modelo H1 foi bem menor em comparação com os outros modelos. Neste caso, o erro fica em torno de 0.2° com o modelo H1, aproximadamente 0.4° para o modelo H2 e 0.6° se for utilizado apenas a FT com 8 pólos e 8 zeros.

6.4 Discussão

O método proposto para a modelagem do elemento elástico apresentou uma significativa melhora em comparação a estimativa do modelo Zener que é usado em [61, 62, 105] por exemplo. A função de Chirp apresenta uma característica importante para a identificação em relação as outras entradas utilizadas. Em comparação aos outros sinais estudados, o *chirp* consegue representar melhor o comportamento e dessa forma é o mais indicado para

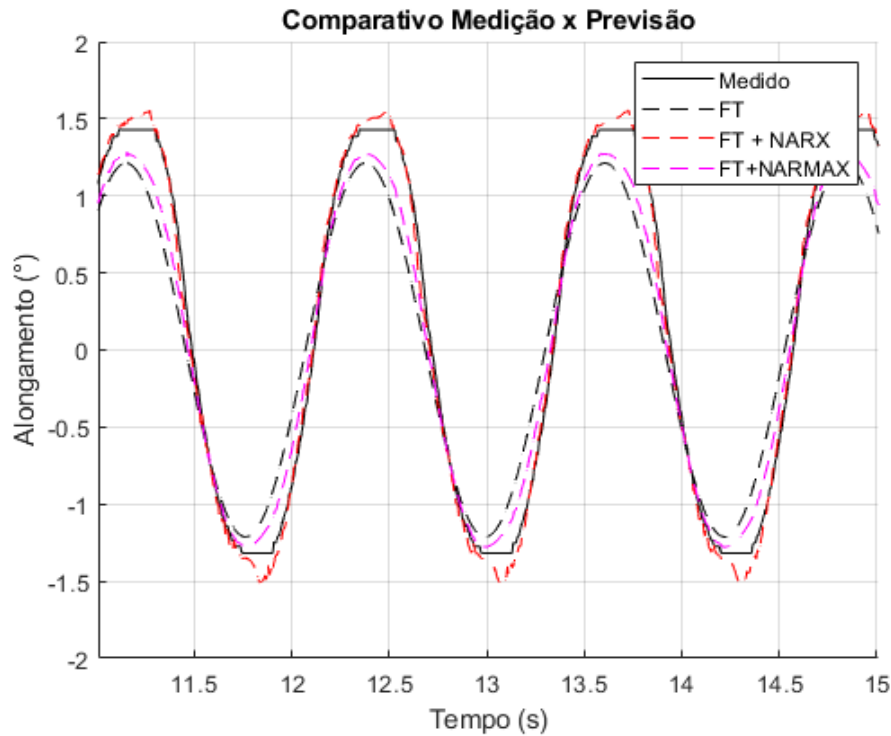


Figura 6.16: Comparativo do modelo utilizando apenas a função de transferência e dos modelos propostos H1 e H2 que utilizam uma função de transferência de oitava ordem com uma compensação do erro pelo modelo NARX e outro pelo modelo NARMAX.

identificação. Quando a estimativa foi realizada por uma senoide ou um degrau, a eficiência do modelo chegou a 90% no entanto ficava limitado aos sinais que seriam impostos ao sistema. Quando a estimativa foi realizada pelo sinal *chirp*, o modelo conseguiu generalizar mais e errar menos mesmo na presença de sinais de entrada bem diferentes.

No estudo de modelagem usando uma função de transferência foi possível alcançar um modelo de 91.8 % com 8 pólos e 8 zeros apresentado na Equação 6.3.2. Um ponto de melhoria dessa identificação pode ocorrer na aquisição dos dados. Diversas funções de entrada do tipo Chirp ou que consigam absorver a dinâmica completa do elemento elástico devem ser estudadas a fim de aprimorar essa modelagem. Outros modelos em caixa preta também podem ser estudados a fim de melhorar a performance da estimativa além de utilizar esse modelo NARX para modelar apenas o erro da estimativa. O modelo NARX com ajuste de redes neurais teve uma melhora de aproximadamente 67% em relação ao modelo de função de transferência de 8 pólos e 8 zeros.

Nota-se que a magnitude do torque influenciou na identificação sendo quanto maior o torque menor o erro médio. Percebe-se também que a mudança de frequência nos sinais de senoide não foram significativos para a identificação

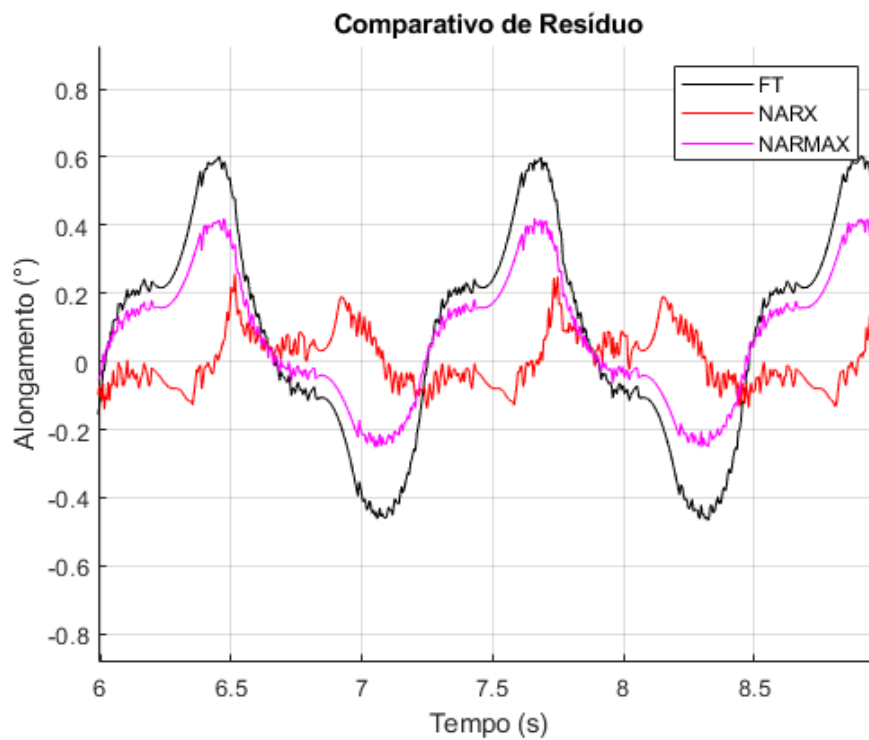


Figura 6.17: Comparativo dos resíduos entre os sinais do modelo apenas com a função de transferência e do modelo proposto.

apenas quando se utiliza o sinal Chirp que alterna entre vários valores de frequência.

Esta tese desenvolveu um elemento elástico com baixo custo de produção, leve e modular capaz de atender aos requisitos mínimos de sensibilidade às forças externas, flexibilidade e transmissibilidade. A possibilidade de desenvolver um elemento elástico com rigidez diferentes com o mesmo molde permitiu avaliar o quanto esta mesma rigidez do elemento elástico pode influenciar no sistema.

De modo a criar um elemento elástico de baixo custo e facilmente replicável, o desenho experimental é parte importante deste trabalho desde o protótipo em CAD até a caracterização do elemento elástico presente nas juntas. Como no trabalho de [118] que utilizam o conceito de SEA para gerar uma interação segura com o robô e desenvolve o trabalho em protótipo 3D para deixar o sistema de baixo custo.

Para utilizar a constante elástica linear no elemento elástico, é preciso uma identificação refinada dos outros parâmetros que afetam diretamente o controle, tais como o atrito no motor e a inércia de cada elemento. Além destes parâmetros, é fundamental saber o valor da constante elástica do elemento. Neste trabalho foi utilizado o valor calculado em [108] usando o teste estático. Utilizando a mesma bancada de testes, buscou-se estimar novamente a constante elástica do elemento elástico. Contudo, o algoritmo não corrigiu um único valor, concluindo que este tipo de experimento não é ideal para estimar o valor da constante elástica. A modelagem da histerese presente em elemento elástico são estudados mais detalhadamente em [103] com uma curva de histerese baseada em três etapas chamadas curva ascendente, curva descendente e linha de transição. Cada uma dessas etapas tem uma equação que gera o valor da histerese do componente. Este tipo de consideração pode ser feita em trabalhos futuros visto que o eSEA tem natureza não linear e apresenta histerese.

A partir da modelagem da constante elástica foi implementado um controle PD, um controle feedforward já que os parâmetros do sistema foram identificados, e um controle feedback de torque onde a constante elástica de 8.549 Nm/rad estimava de maneira eficiente o torque que acontece no elo.

Mesmo com o controle sendo estável, o modelo do elemento elástico não é o ideal visto que é um elemento viscoelástico. Para isso foi necessário

modelar o elemento elástico a partir de modelos mais robustos como Zener e Burgers. Como os modelos não foram capazes de representar o comportamento do material elástico utilizado, esta tese propôs um modelo de função de transferência contendo mais parâmetros que o modelo de Zener ou de Burgers (que utilizam quatro parâmetros) criando assim um sistema de molas e amortecedores a fim de simular o comportamento do material. Após uma busca por diversas composições do modelo, alterando o número de pólos e zeros entre 1 e 9, o modelo que mais se aproximou dos dados reais possui uma função de transferência com 8 pólos e 8 zeros. Ainda assim, o erro entre o valor experimental e o valor estimado foi cerca de 0.6° por isso a proposta da tese atuou nesta identificação do erro gerando uma melhora significativa (cerca de 67% em comparação ao modelo criado pela função de transferência). O modelo caixa preta criado foi responsável por modelar o erro entre os dados medidos e os dados estimados pela função de transferência. Foram utilizados os modelos de NARX ajustado com rede neural e o modelo NARMAX polinomial e esse modelo caixa preta foi adicionado ao modelo para compensar os erros de estimativa gerado para a função de transferência de oitavo grau.

Pensando em trabalhos futuros, dado que o elemento elástico é de fácil produção e possui modularidade, pensar em projetos educacionais pode agregar conhecimento básico de constante elástica de mola, como é apresentado por [120], além de técnicas de identificação e controle.

Um trabalho que muda o foco do modelo não linear e da modelagem da histerese é o de [119] que estuda não só a constante elástica do seu SEA como também o amortecimento deste elemento fazendo com que seja mais resistente a impactos em aplicações de robôs bípedes.

Outra área que utiliza o SEA é a robótica de reabilitação, no entanto o tamanho do dispositivo desenvolvido nesta tese consegue produzir um torque limitado fazendo com que em aplicações desta natureza seja necessário um escalonamento do dispositivo. E na área de humanoides um dispositivo que seja modular e de baixo custo pode diminuir consideravelmente o valor final de um robô deste tipo. Projetos como o de [121] apresentam um robô com juntas flexíveis, base móvel e manipuladores que podem ser criados para fins de pesquisa em laboratórios.

Por fim, utilizar estratégias de controle simples em um eSEA com bons resultados permite avaliar cada vez mais este tipo de atuador a fim de estimar o torque em cada junta de um manipulador robótico ou em exoesqueletos para fins de reabilitação. A variedade de aplicações em que um SEA está inserido viabiliza um projeto de baixo custo e que possua um sistema de controle simples e reprodutível. Ademais, uma identificação robusta para o elemento elástico

gera uma estimativa de torque mais próxima da realidade e que pode gerar melhorias para um controle do sistema.

A

Desenvolvimento do eSEA - Especificação, características e preparo.

O elemento elástico do sistema utiliza borrachas de silicone de dureza Shore A 10 e Shore A 55. Neste tutorial encontra-se o passo a passo para a reprodução destes.

A.1

Molde base

Para a deposição exata da borracha líquida é necessário uma base com centro de 8mm para posicionar corretamente a peça interna. Este eixo possui um perfil de eixo em D que ajuda nesta situação (veja Figura A.1). Para o posicionamento da peça externa existem furos de 4mm com distância de 32,43mm entre eles, exatamente como na peça externa (Figura A.2).

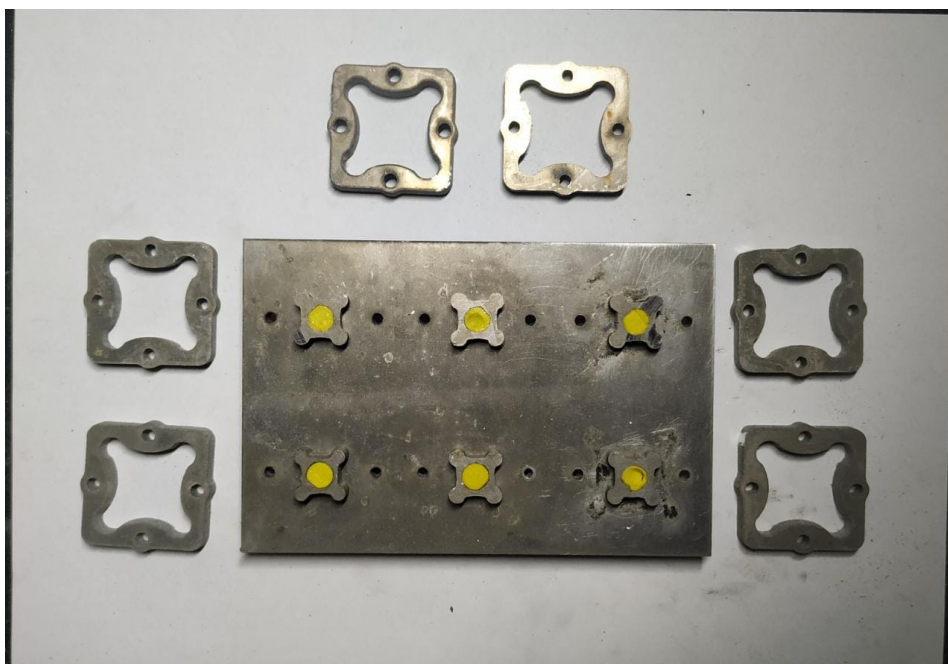


Figura A.1: Posição da peça interna no molde base.

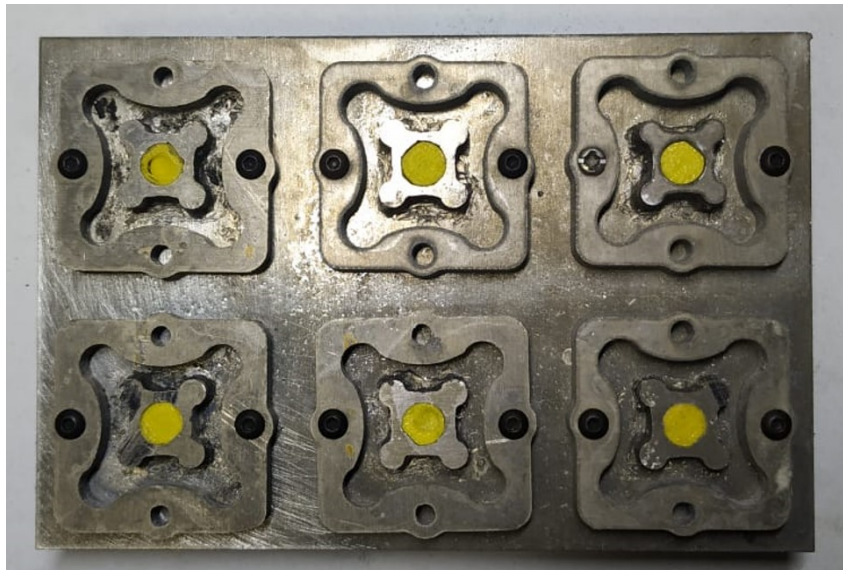


Figura A.2: Posição da peça externa no molde base.

A.2

Borracha líquida

As borrachas líquida utilizadas possuem dureza Shore A 10 (azul) e Shore A 55 (preta). Cada produto tem dois componentes: A borracha líquida que geralmente vem em recipientes com 1 Kg; E o catalisador responsável pela cura da borracha, tornando-a rígida. Considerando que foram utilizados 5 gramas em cada eSEA e são produzidos 4 peças, é possível calcular um uso de 2% de todo o material comprado. Sendo que cada kit de borracha custa R\$60,00, então cada peça custou cerca de R\$1,20.

A.3

Preparo do material

Siga irrestritamente os passos apresentados na Figura A.3 para produzir uma borracha de boa qualidade e que possua as propriedades desejadas.

Ao final, as peças prontas são apresentadas na Figura A.4

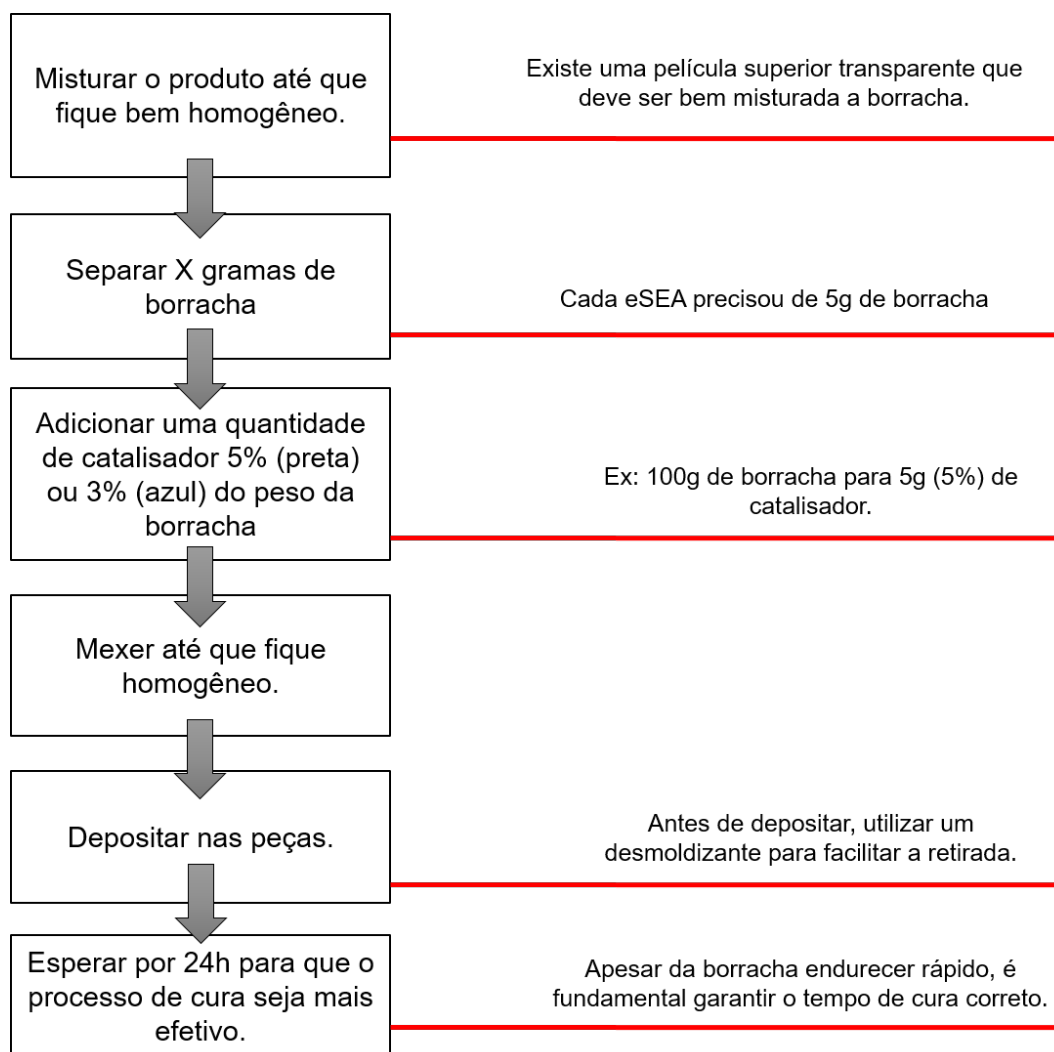


Figura A.3: Fluxograma para produção do elemento elástico.

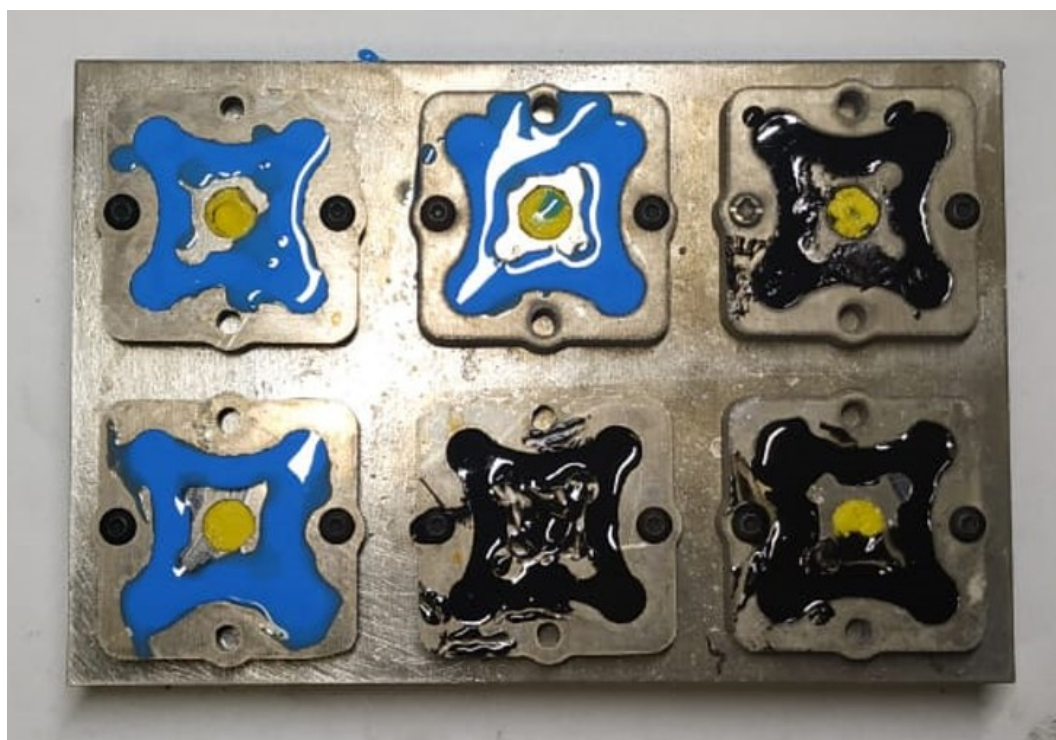


Figura A.4: Peças do eSEA com o elemento elástico recém produzidos.

B

Datasheet dos Elementos Eletrônicos

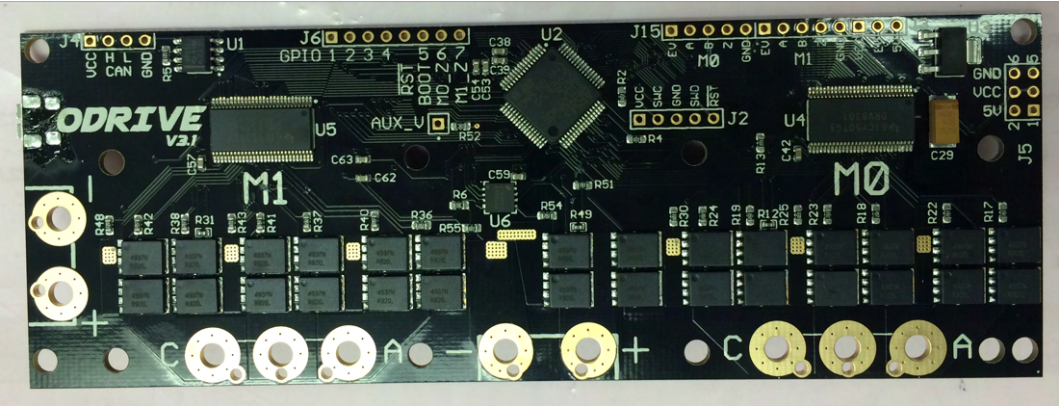


Figura B.1: Configurações da Placa Controladora Utilizada na Tese.

ODrive motor guide

Arquivo Editar Ver Inserir Formatar Dados Ferramentas Extensões Ajuda

Somente ver

Copy this spreadsheet to customize your analysis!

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Copy this spreadsheet to customize your analysis!	Speed Constant (Kv)	Max Current*	Max voltage	Phase Resistance	Price (qty 1pc)	Mass	Link	Torque	No-load speed		Power at base speed	Motor size constant (Km)	
2	(cells highlighted in blue are inputs)	rpm/V	A	V	mOhm	USD	g		Nm	RPM	Rad/s	W	Nm/sqrt(W)	
3	ODrive Robotics D5065 - 270kv	270	65	32	39	79	420	https://odrive	1.99	8640	904.78	1801	0.13	
4	ODrive Robotics D6374 - 150kv	150	70	48	39	109	890	https://odrive	3.86	5760	603.19	2328	0.23	
5	ODrive Robotics D5312 - 330kv	330	50	30		41	230	https://odrive	1.25	9900	1.036.73	1299		
6	Tarot 4008 330kv	330	25	24		32	80	https://www	0.63	7920	829.38	520		
7	Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-350kv	350	50	20		36	266	https://hobby	1.18	7000	733.04	866		
8	Turnigy Aerodrive SK3 - 5065-275kv	275	60	40		66	530	https://hobby	1.80	10560	1.105.84	1995		
9	KEDA 63-64 190KV	190	50	40		49	670	https://hobby	2.18	7296	764.04	1663		
10	Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-149kv	149	68	48		90	840	https://hobby	3.77	5722	599.16	2261		
11	9235-100KV Turnigy Multistar	100	57	48		103	674	https://hobby	4.71	3840	402.12	1896		
12	Hoverboard Hub-motor	16	25	48		40	a lot	https://www	12.92	614	64.34	831		

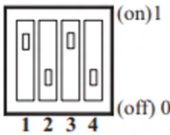
Figura B.2: Guia do Motor Utilizado na tese.

RESOLUTION SETTINGS

1 = On, 0 = Off

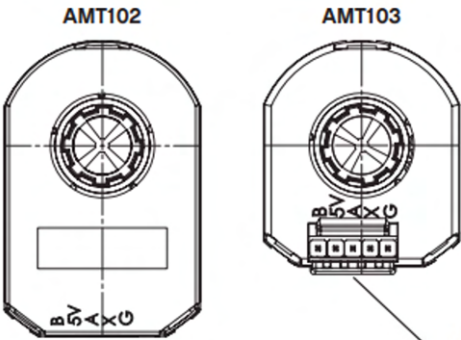
Resolution (PPR)	Maximum RPM	1	2	3	4
2048	7500	0	0	0	0
1024	7500	0	0	1	0
1000	7500	1	0	0	0
800	7500	0	1	0	0
512	15000	0	0	0	1
500	7500	1	0	1	0
400	7500	0	1	1	0
384	7500	1	1	0	0
256	15000	0	0	1	1
250	15000	1	0	0	1
200	15000	0	1	0	1
192	7500	1	1	1	0
125	15000	1	0	1	1
100	15000	0	1	1	1
96	15000	1	1	0	1
48	15000	1	1	1	1

DIP switch:
Example setting: 500 PPR



ENCODER INTERFACE

PINOUT CONNECTOR		
Function		
#	AMT102	AMT103
B	B CHANNEL	B CHANNEL
5V	+5 V	+5 V
A	A CHANNEL	A CHANNEL
X	INDEX CHANNEL	INDEX CHANNEL
G	GND	GND
T	UNUSED	N/A



Mating Connector:
Molex 50-57-9405 Housing
Molex 16-02-0086 Terminals

Mating Connector:
AMP 3-640440-5 (tin)
AMP 3-641237-5 (gold)

cuidevices.com

Figura B.3: Datasheet do Encoder Utilizado na Tese.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612789/CA

Technical drawing of a mechanical part, showing two views: a front view (left) and a side view (right).

Front View (Left):

- Overall height: 280
- Central slot height: 120
- Width: 40
- End features: Two circular end features with diameter $\varnothing 22$ and a central rectangular slot with height 120.
- Dimensions: 22,93, 120, 240, 280, 40, $\varnothing 22$.

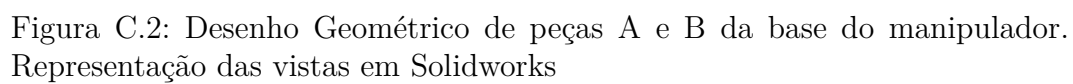
Side View (Right):

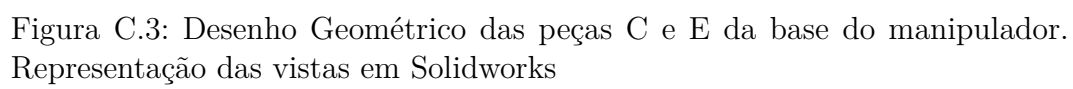
- Overall height: 160
- Width: 15,88
- End features: Two circular end features with diameter $\varnothing 22$ and a central rectangular slot with height 120.
- Dimensions: 22,93, 120, 160, 15,88, 40, $\varnothing 22$.

Table:

ITEM	QUANTIDADE	UNIDADE	VALOR	DATA
1	1	PC	1	10/10/2010
2	1	PC	1	10/10/2010
3	1	PC	1	10/10/2010
4	1	PC	1	10/10/2010
5	1	PC	1	10/10/2010
6	1	PC	1	10/10/2010
7	1	PC	1	10/10/2010
8	1	PC	1	10/10/2010
9	1	PC	1	10/10/2010
10	1	PC	1	10/10/2010
11	1	PC	1	10/10/2010
12	1	PC	1	10/10/2010
13	1	PC	1	10/10/2010
14	1	PC	1	10/10/2010
15	1	PC	1	10/10/2010
16	1	PC	1	10/10/2010
17	1	PC	1	10/10/2010
18	1	PC	1	10/10/2010
19	1	PC	1	10/10/2010
20	1	PC	1	10/10/2010
21	1	PC	1	10/10/2010
22	1	PC	1	10/10/2010
23	1	PC	1	10/10/2010
24	1	PC	1	10/10/2010
25	1	PC	1	10/10/2010
26	1	PC	1	10/10/2010
27	1	PC	1	10/10/2010
28	1	PC	1	10/10/2010
29	1	PC	1	10/10/2010
30	1	PC	1	10/10/2010
31	1	PC	1	10/10/2010
32	1	PC	1	10/10/2010
33	1	PC	1	10/10/2010
34	1	PC	1	10/10/2010
35	1	PC	1	10/10/2010
36	1	PC	1	10/10/2010
37	1	PC	1	10/10/2010
38	1	PC	1	10/10/2010
39	1	PC	1	10/10/2010
40	1	PC	1	10/10/2010
41	1	PC	1	10/10/2010
42	1	PC	1	10/10/2010
43	1	PC	1	10/10/2010
44	1	PC	1	10/10/2010
45	1	PC	1	10/10/2010
46	1	PC	1	10/10/2010
47	1	PC	1	10/10/2010
48	1	PC	1	10/10/2010
49	1	PC	1	10/10/2010
50	1	PC	1	10/10/2010
51	1	PC	1	10/10/2010
52	1	PC	1	10/10/2010
53	1	PC	1	10/10/2010
54	1	PC	1	10/10/2010
55	1	PC	1	10/10/2010
56	1	PC	1	10/10/2010
57	1	PC	1	10/10/2010
58	1	PC	1	10/10/2010
59	1	PC	1	10/10/2010
60	1	PC	1	10/10/2010
61	1	PC	1	10/10/2010
62	1	PC	1	10/10/2010
63	1	PC	1	10/10/2010
64	1	PC	1	10/10/2010
65	1	PC	1	10/10/2010
66	1	PC	1	10/10/2010
67	1	PC	1	10/10/2010
68	1	PC	1	10/10/2010
69	1	PC	1	10/10/2010

Figura C.1: Desenho Geométrico Elos. Representação das vistas em Solidworks





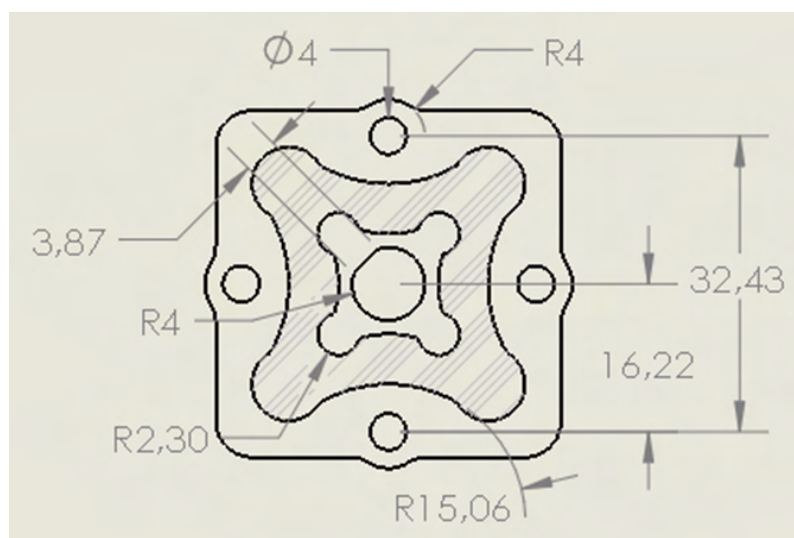


Figura C.4: Desenho Geométrico do Elemento Elástico do SEA. Note que a parte hachurada é feita de borracha enquanto a interna e externa de alumínio 7075.

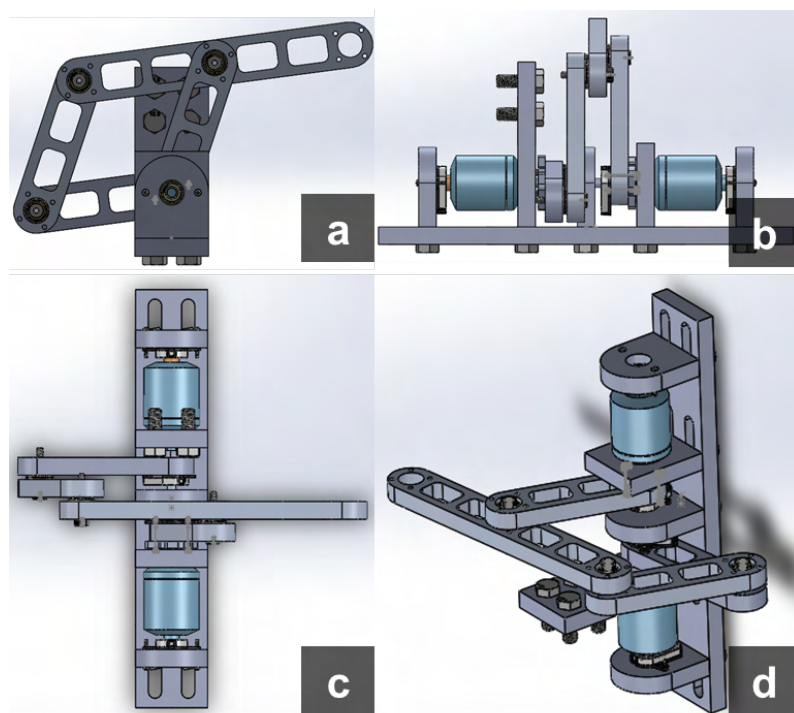


Figura C.5: Vistas da montagem de um braço com SEA. a) Vista Superior. b) Vista lateral. c) Vista frontal. d) Vista isométrica.

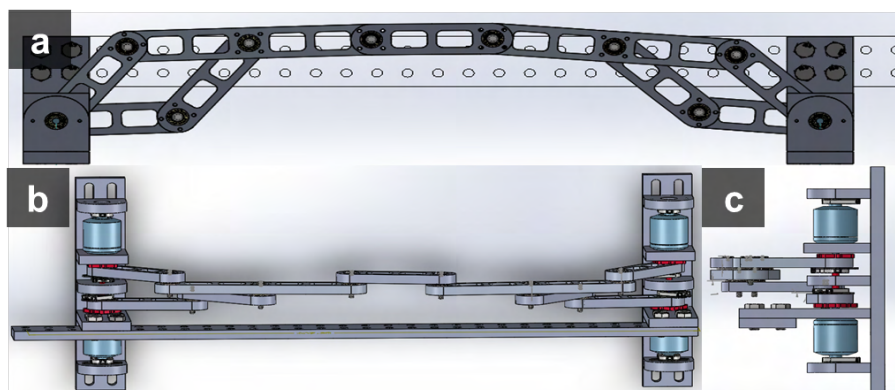


Figura C.6: Visões do Projeto no software SolidWorks. a) Visão Superior. b) Visão Frontal. c) Visão Lateral

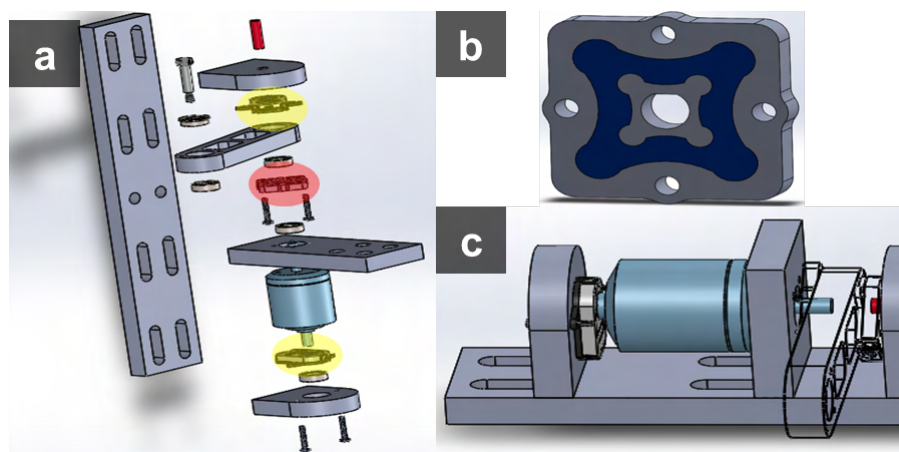


Figura C.7: Desenho da Montagem de 1 Elo com SEA no software SolidWorks. a) Visão Explodida. b) Peça que Contem o Elemento Elástico. c) Representação da Posição do SEA e Encoders

D

Video do eSEA



Figura D.1: QR code com o caminho para o video mostrando a facilidade para a troca de elementos elásticos.

Referências bibliográficas

- [1] BREAZEAL, C.; TAKANISHI, A. ; KOBAYASHI, T.. **Social robots that interact with people**. In: SPRINGER HANDBOOK OF ROBOTICS, chapter 58, p. 1349–1369. Springer, 2008.
- [2] **Blue Frog Robotics**. <http://www.bluefrogrobotics.com/en/home/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [3] **Mayfield Robotics**. <https://www.heykuri.com/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [4] **ASUS**. <https://zenbo.asus.com/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [5] **Omate**. www.omate.com/meet_yumi. Acesso em: Novembro de 2017.
- [6] BREAZEAL, C. L.. **Designing sociable robots**. MIT press, 2004.
- [7] KOZIMA, H.. **An anthropologist in the children's world: a field study of children's everyday interaction with an interactive robot**. In: PROC. INT. CONF. ON DEVELOPMENT AND LEARNING, ICDL-2006, BLOOMINGTON, IN, USA, 2006.
- [8] **Kinova Robotics**. <http://www.kinovarobotics.com/innovation-robotics/products/robot-arms/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [9] **Tyromotion**. <http://tyromotion.com/en/products/amadeo>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [10] **Hocomma**. <https://www.hocomma.com/solutions/arm-hand/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [11] **Intuitive Surgical, Inc.** <http://www.davincisurgery.com/>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [12] **All About Robotic Surgery**. <http://www.allaboutroboticsurgery.com/zeusrobot.html>. Acesso em: Novembro de 2017.

- [13] **RENISHAW**. <http://www.renishaw.com/en/neuromate-stereotactic-robot--10712>. Acesso em: Novembro de 2017.
- [14] KYDD, K.; MACREZ, S.; POURCEL, P. ; OTHERS. **Autonomous robot for gas and oil sites**. In: SPE OFFSHORE EUROPE CONFERENCE AND EXHIBITION. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [15] MARTINS, L. T.; TATSCH, C. A. A.; MACIEL, E. H.; GERNDT, R. ; GUERRA, R. D. S.. **A polyurethane-based compliant element for upgrading conventional servos into series elastic actuators**. IFAC-PapersOnLine, 48(19):112–117, 2015.
- [16] ROBINSON, D. W.; PRATT, J. E.; PALUSKA, D. J. ; PRATT, G. A.. **Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot**. In: 1999 IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS (CAT. NO. 99TH8399), p. 561–568. IEEE, 1999.
- [17] **InTech. Oil companies of future**. <http://www.isa.org>, 2012. Acesso em: Outubro de 2017.
- [18] SICILIANO, B.; VILLANI, L.. **Robot force control**, volumen 540. Springer Science & Business Media, 2012.
- [19] AL-SHUKA, H. F.; SONG, R.. **Adaptive hybrid regressor and approximation control of robotic manipulators in constrained space**. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, IJMME-IJENS, 17(3):11–19, 2017.
- [20] CUMMINGS, J. P.; RUIKEN, D.; WILKINSON, E. L.; LANIGHAN, M. W. ; GRUPEN, R. A.. **A Compact , Modular Series Elastic Actuator**. 8(August):1–11, 2016.
- [21] LI, Q.; YU, Z.; CHEN, X.; MENG, L.; HUANG, Q.; FU, C.; CHEN, K. ; TAO, C.. **A compliance control method based on viscoelastic model for position-controlled humanoid robots**. p. 3518–3524, 2020.
- [22] DE LUCA, A.; BOOK, W. J.. **Robots with flexible elements**. In: SPRINGER HANDBOOK OF ROBOTICS, p. 243–282. Springer, 2016.
- [23] LEE, C.; KWAK, S.; KWAK, J. ; OH, S.. **Generalization of series elastic actuator configurations and dynamic behavior comparison**. In: ACTUATORS, volumen 6, p. 26, 2017.

- [24] CHEN, S.; ZHAO, J. ; YU, Z.. **Adaptive sliding control for lower exoskeleton robot driven by the series elastic actuator.** In: 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION (ICMA), p. 2439–2444. IEEE, 2019.
- [25] DEBOON, B.; NOKLEBY, S.; LA DELFA, N. ; ROSSA, C.. **Differentially-clutched series elastic actuator for robot-aided musculoskeletal rehabilitation.** In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 1507–1513. IEEE, 2019.
- [26] MIYATA, C.; AHMADI, M.. **Compliant limb sensing and control for safe human-robot interactions.** In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 7484–7490. IEEE, 2019.
- [27] ALAMDARI, A.; HAGHIGHI, R. ; KROVI, V.. **Gravity-balancing of elastic articulated-cable leg-orthosis emulator.** Mechanism and machine theory, 131:351–370, 2019.
- [28] CONVENS, B.; DONG, D.; FURNÉMONT, R.; VERSTRATEN, T.; CHERELLE, P.; LEFEBER, D. ; VANDERBORGHT, B.. **Modeling, design and test-bench validation of a semi-active propulsive ankle prosthesis with a clutched series elastic actuator.** IEEE Robotics and Automation Letters, 4(2):1823–1830, 2019.
- [29] FREITAS, B.; SILVA, M.; CARVALHO, Ó.; RENJEWSKI, D.; FONSECA, J.; FLORES, P. ; ESPREGUEIRA-MENDES, J.. **Design, modelling and control of an active weight-bearing knee exoskeleton with a series elastic actuator.** In: 2019 IEEE 6TH PORTUGUESE MEETING ON BIOENGINEERING (ENBENG), p. 1–4. IEEE, 2019.
- [30] RUPPERT, F.; SPROWITZ, A. T.. **Series elastic behavior of biarticular muscle-tendon structure in a robotic leg.** Frontiers in neuro-robotics, 13:64, 2019.
- [31] SCHUMANN, E.; SMIT-ANSEEUW, N.; ZAYTSEV, P.; GLEASON, R.; SHORTER, K. A. ; REMY, C. D.. **Effects of foot stiffness and damping on walking robot performance.** In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 3698–3704. IEEE, 2019.
- [32] ZHANG, Z.-Q.; YANG, Q.; ZHAO, J. ; GUI, S.. **Dynamic model and performance analysis of rigid-flexible coupling four-bar**

- leg mechanism for small scale bio-inspired jumping robot. *Microsystem Technologies*, 25(9):3269–3285, 2019.
- [33] LEE, C.; OH, S.. Development, analysis, and control of series elastic actuator-driven robot leg. *Frontiers in neurorobotics*, 13, 2019.
- [34] SHI, Y.; ZHANG, W.; YANG, T.; WANG, Y.; LIU, L. ; CUI, Y.. Flexible joints of picking manipulator based on current feedback. *IEEE Access*, 8:85329–85338, 2020.
- [35] PRATT, G. A.; WILLIAMSON, M. M.. Series elastic actuators. In: *PROCEEDINGS 1995 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. HUMAN ROBOT INTERACTION AND COOPERATIVE ROBOTS*, volumen 1, p. 399–406. IEEE, 1995.
- [36] PRATT, J.; KRUPP, B. ; MORSE, C.. Series elastic actuators for high fidelity force control. *Industrial Robot: An International Journal*, 2002.
- [37] EKKELENKAMP, R.; VENEMAN, J. ; VAN DER KOOIJ, H.. Lopes: a lower extremity powered exoskeleton. In: *PROCEEDINGS 2007 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, p. 3132–3133. IEEE, 2007.
- [38] MARTINS, L. T.; DE MENDONÇA PRETTO, R.; GERNDT, R. ; DA SILVA GUERRA, R.. Design of a modular series elastic upgrade to a robotics actuator. In: *ROBOT SOCCER WORLD CUP*, p. 701–708. Springer, 2014.
- [39] JEON, W.; SON, K.; LEE, J.; JEONG, H. ; YANG, H.. Design, modeling and optimal control strategy for an under-actuated anthropomorphic robotic finger. In: *2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND BIOMIMETICS (ROBIO)*, p. 39–44. IEEE, 2018.
- [40] LEE, H.; RYU, J. H.; LEE, J. ; OH, S.. Passivity controller based on load-side damping assignment for high stiffness controlled series elastic actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(1):871–881, 2021.
- [41] LEE, H.; LEE, J.; RYU, J. ; OH, S.. Relaxing the conservatism of passivity condition for impedance controlled series elastic actuators. In: *2019 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS)*, p. 7610–7615, 2019.

- [42] ISKANDAR, M.; OTT, C.; EIBERGER, O.; KEPPLER, M.; ALBUSCHÄFFER, A. ; DIETRICH, A.. **Joint-level control of the dlr lightweight robot sara.** p. 8903–8910, 2020.
- [43] LEE, C.; CHEON, D. ; OH, S.. **High fidelity impedance control of series elastic actuator for physical human-machine interaction.** In: IECON 2019 - 45TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, volumen 1, p. 3621–3626, 2019.
- [44] JO, M.; LEE, H. ; OH, S.. **Switching position-torque control for series elastic actuators with disturbance observer.** In: IECON 2019 - 45TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, volumen 1, p. 3653–3658, 2019.
- [45] HANINGER, K.; ASIGNACION, A. ; OH, S.. **Safe high impedance control of a series-elastic actuator with a disturbance observer.** In: 2020 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 921–927, 2020.
- [46] YUN, W.; LEE, D. ; OH, S.. **Task-space zero impedance control of three-degree-of-freedom flexible manipulator based on disturbance observer.** In: 2020 IEEE 29TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE), p. 573–578, 2020.
- [47] ABE, K.; JIRALERSPONG, T. ; ISHIKAWA, J.. **Hybrid position/force control of manipulator using series elastic actuator with position controller.** In: IECON 2020 THE 46TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, p. 4415–4422. IEEE, 2020.
- [48] SUN, N.; CHENG, L. ; XIA, X.. **Design and hysteresis modeling of a miniaturized elastomer-based clutched torque sensor.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 71:1–9, 2022.
- [49] STIENEN, A. H.; HEKMAN, E. E.; TER BRAAK, H.; AALSMA, A. M.; VAN DER HELM, F. C. ; VAN DER KOOIJ, H.. **Design of a rotational hydro-elastic actuator for an active upper-extremity rehabilitation exoskeleton.** In: 2008 2ND IEEE RAS & EMBS INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL ROBOTICS AND BIOMECHANICS, p. 881–888. IEEE, 2008.
- [50] LAGODA, C.; SCHOUTEN, A. C.; STIENEN, A. H.; HEKMAN, E. E. ; VAN DER KOOIJ, H.. **Design of an electric series elastic actua-**

- ted joint for robotic gait rehabilitation training. In: 2010 3RD IEEE RAS & EMBS INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL ROBOTICS AND BIOMECHATRONICS, p. 21–26. IEEE, 2010.
- [51] DIFTLER, M. A.; MEHLING, J.; ABDALLAH, M. E.; RADFORD, N. A.; BRIDGWATER, L. B.; SANDERS, A. M.; ASKEW, R. S.; LINN, D. M.; YAMOKOSKI, J. D.; PERMENTER, F. ; OTHERS. **Robonaut 2-the first humanoid robot in space**. In: 2011 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, p. 2178–2183. IEEE, 2011.
- [52] CARPINO, G.; ACCOTO, D.; SERGI, F.; LUIGI TAGLIAMONTE, N. ; GUGLIELMELLI, E.. **A novel compact torsional spring for series elastic actuators for assistive wearable robots**. *Journal of Mechanical Design*, 134(12), 2012.
- [53] WANG, S.; MEIJNEKE, C. ; VAN DER KOOIJ, H.. **Modeling, design, and optimization of mindwalker series elastic joint**. In: 2013 IEEE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION ROBOTICS (ICORR), p. 1–8. IEEE, 2013.
- [54] RADFORD, N. A.; STRAWSER, P.; HAMBUCHEN, K.; MEHLING, J. S.; VERDEYEN, W. K.; DONNAN, A. S.; HOLLEY, J.; SANCHEZ, J.; NGUYEN, V.; BRIDGWATER, L. ; OTHERS. **Valkyrie: Nasa’s first bipedal humanoid robot**. *Journal of Field Robotics*, 32(3):397–419, 2015.
- [55] DOS SANTOS, W. M.; CAURIN, G. A. ; SIQUEIRA, A. A.. **Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary series elastic actuator**. *Control Engineering Practice*, 58:307–318, 2017.
- [56] LIU, H.; CUI, S.; LIU, Y.; REN, Y. ; SUN, Y.. **Design and vibration suppression control of a modular elastic joint**. *Sensors*, 18(6):1869, 2018.
- [57] CAPPELLO, L.; XILOYANNIS, M.; DINH, B. K.; PIRRERA, A.; MATTIONI, F. ; MASIA, L.. **Multistable series elastic actuators: Design and control**. *Robotics and Autonomous Systems*, 118:167–178, 2019.
- [58] SCHEPELMANN, A.; GEBERTH, K. A. ; GEYER, H.. **Compact nonlinear springs with user defined torque-deflection profiles for series elastic actuators**. In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 3411–3416. IEEE, 2014.

- [59] ROLLINSON, D.; BILGEN, Y.; BROWN, B.; ENNER, F.; FORD, S.; LAYTON, C.; REMBISZ, J.; SCHWERIN, M.; WILLIG, A.; VELAGAPUDI, P.; OTHERS. **Design and architecture of a series elastic snake robot.** In: 2014 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, p. 4630–4636. IEEE, 2014.
- [60] KAKOGAWA, A.; MA, S.. **A differential elastic joint for multi-linked pipeline inspection robots.** In: 2018 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), p. 949–954. IEEE, 2018.
- [61] JARRETT, C.; MCDAID, A.. **Modeling and feasibility of an elastomer-based series elastic actuator as a haptic interaction sensor for exoskeleton robotics.** IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 24(3):1325–1333, 2019.
- [62] KIM, D.-H.; OH, J.-H.. **Hysteresis modeling for torque control of an elastomer series elastic actuator.** IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 24(3):1316–1324, 2019.
- [63] CHIARADIA, D.; TISENI, L.; FRISOLI, A.. **Compact series viscoelastic joint (svej) for smooth torque control.** IEEE transactions on haptics, 13(1):226–232, 2020.
- [64] SEO, H.-T.; PARK, J.-I.; PARK, J.. **A compact series elastic element using a rubber compression mechanism.** Review of Scientific Instruments, 92(6):065004, 2021.
- [65] TOUBAR, H.; AWAD, M. I.; BOUSHAKI, M. N.; NIU, Z.; KHALAF, K.; HUSSAIN, I.. **Design, modeling, and control of a series elastic actuator with discretely adjustable stiffness (seadas).** Mechatronics, 86:102863, 2022.
- [66] QIAN, Y.; HAN, S.; AGUIRRE-OLLINGER, G.; FU, C.; YU, H.. **Design, modelling, and control of a reconfigurable rotary series elastic actuator with nonlinear stiffness for assistive robots.** arXiv preprint arXiv:2205.14412, 2022.
- [67] KIM, B.-S.; SONG, J.-B.. **Design and control of a variable stiffness actuator based on adjustable moment arm.** IEEE Transactions on Robotics, 28(5):1145–1151, 2012.
- [68] VANDERBORGHT, B.; ALBU-SCHÄFFER, A.; BICCHI, A.; BURDET, E.; CALDWELL, D. G.; CARLONI, R.; CATALANO, M.; EIBERGER, O.;

- FRIEDL, W.; GANESH, G. ; OTHERS. **Variable impedance actuators: A review**. *Robotics and autonomous systems*, 61(12):1601–1614, 2013.
- [69] JAFARI, A.. **Coupling between the output force and stiffness in different variable stiffness actuators**. In: *ACTUATORS*, volumen 3, p. 270–284. MDPI, 2014.
- [70] WOLF, S.; GRIOLI, G.; EIBERGER, O.; FRIEDL, W.; GREBENSTEIN, M.; HÖPPNER, H.; BURDET, E.; CALDWELL, D. G.; CARLONI, R.; CATALANO, M. G. ; OTHERS. **Variable stiffness actuators: Review on design and components**. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 21(5):2418–2430, 2015.
- [71] GRIOLI, G.; WOLF, S.; GARABINI, M.; CATALANO, M.; BURDET, E.; CALDWELL, D.; CARLONI, R.; FRIEDL, W.; GREBENSTEIN, M.; LAF-FRANCHI, M. ; OTHERS. **Variable stiffness actuators: The user’s point of view**. *The International Journal of Robotics Research*, 34(6):727–743, 2015.
- [72] GUO, Z.; PAN, Y.; WEE, L. B. ; YU, H.. **Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator**. *Sensors and Actuators A: Physical*, 225:71–80, 2015.
- [73] PAN, Y.; GUO, Z.; LI, X. ; YU, H.. **Output-feedback adaptive neural control of a compliant differential sma actuator**. *IEEE Transactions on control systems technology*, 25(6):2202–2210, 2017.
- [74] GUO, Z.; SUN, J.; LING, J.; PAN, Y. ; XIAO, X.. **Robust trajectory tracking control for variable stiffness actuators with model perturbations**. *Frontiers in Neurorobotics*, 13:35, 2019.
- [75] TRAN, D. T.; BA, D. X. ; AHN, K. K.. **Adaptive backstepping sliding mode control for equilibrium position tracking of an electrohydraulic elastic manipulator**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(5):3860–3869, 2019.
- [76] SHAH, S.; SAUND, B.. **Simpler: A series-elastic manipulator with passive variable stiffness for legged robots**. In: *2021 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, CONTROL AND ROBOTICS ENGINEERING (CACRE)*, p. 73–80. IEEE, 2021.
- [77] ABBOOD, W. T.; NACY, S. M.; YOUSSEF, G. ; ABDULLAH, O. I.. **Dynamic performance of a series elastic actuator with variable**

- stiffness logarithmic spiral spring. *Intelligent Service Robotics*, p. 1–13, 2022.
- [78] LIU, L.; LEONHARDT, S.; BERGMANN, L. ; MISGELD, B. J.. **Composite performance of variable stiffness actuator for exoskeleton administrated via impedance control and disturbance observer.** *Mechanism and Machine Theory*, 179:105096, 2023.
- [79] HONG, C.; TANG, D.; QUAN, Q.; CAO, Z. ; DENG, Z.. **A combined series-elastic actuator & parallel-elastic leg no-latch bio-inspired jumping robot.** *Mechanism and Machine Theory*, 149:103814, 2020.
- [80] AMARA, V. D.; MALZAHN, J.; ROOZING, W. ; TSAGARAKIS, N.. **Blending of series-parallel compliant actuation with field weakening control for explosive motion generation.** *IEEE Robotics and automation letters*, 6(2):2076–2083, 2021.
- [81] WANG, T.; ZHENG, T.; ZHAO, S.; SUI, D.; ZHAO, J. ; ZHU, Y.. **Design and control of a series–parallel elastic actuator for a weight-bearing exoskeleton robot.** *Sensors*, 22(3):1055, 2022.
- [82] GUO, S.; GREGG, R. D. ; BOLÍVAR-NIETO, E.. **Convex optimization for spring design of parallel elastic actuators.** In: 2022 AMERICAN CONTROL CONFERENCE (ACC), p. 3688–3694. IEEE, 2022.
- [83] LEE, H.; OH, S.. **Series elastic actuators-driven parallel robot with wide-range impedance realization for balance assessment and training.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022.
- [84] GRIMMER, M.; ESLAMY, M.; GLIECH, S. ; SEYFARTH, A.. **A comparison of parallel-and series elastic elements in an actuator for mimicking human ankle joint in walking and running.** In: 2012 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, p. 2463–2470. IEEE, 2012.
- [85] ZHU, Y.; YANG, J.; JIN, H.; ZANG, X. ; ZHAO, J.. **Design and evaluation of a parallel-series elastic actuator for lower limb exoskeletons.** In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), p. 1335–1340. IEEE, 2014.
- [86] WANG, T.; ZHU, Y.; ZHENG, T.; SUI, D.; ZHAO, S. ; ZHAO, J.. **Pa-lexo: A parallel actuated lower limb exoskeleton for high-load carrying.** *IEEE Access*, 8:67250–67262, 2020.

- [88] THOMAS, G. C.; MEHLING, J. S.; HOLLEY, J. ; SENTIS, L.. **Phase-relaxed-passive full state feedback gain limits for series elastic actuators**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 26(1):586–591, 2020.
- [89] LOPES, F. R.; MEGGIOLARO, M. A.. **Modeling and control of four-bar mechanism with series elastic actuators**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA-CBA, volumen 2, 2020.
- [90] CALANCA, A.; MURADORE, R. ; FIORINI, P.. **Impedance control of series elastic actuators: Passivity and acceleration-based control**. Mechatronics, 47:37–48, 2017.
- [91] FOTUHI, M. J.; BINGUL, Z.. **Novel fractional hybrid impedance control of series elastic muscle-tendon actuator**. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 2021.
- [92] CALANCA, A.; FIORINI, P.. **Human-adaptive control of series elastic actuators**. Robotica, 32(8):1301–1316, 2014.
- [93] LANH, L. A. K.; NGUYEN, H. H.; KIM, S. B.; NGUYEN, T. T. ; OTHERS. **Hybrid adaptive control for series elastic actuator of humanoid robot**. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2022.
- [94] SARIYILDIZ, E.; MUTLU, R. ; YU, H.. **A sliding mode force and position controller synthesis for series elastic actuators**. Robotica, 38(1):15–28, 2020.
- [95] HAN, S.; WANG, H.; TIAN, Y. ; YU, H.. **Enhanced extended state observer-based model-free force control for a series elastic actuator**. Mechanical Systems and Signal Processing, 183:109584, 2023.
- [96] CALANCA, A.; CAPISANI, L. ; FIORINI, P.. **Robust force control of series elastic actuators**. In: ACTUATORS, volumen 3, p. 182–204. MDPI, 2014.
- [97] SWEVERS, J.; VERDONCK, W. ; DE SCHUTTER, J.. **Dynamic model identification for industrial robots**. IEEE control systems magazine, 27(5):58–71, 2007.
- [98] WU, J.; WANG, J. ; YOU, Z.. **An overview of dynamic parameter identification of robots**. Robotics and computer-integrated manufacturing, 26(5):414–419, 2010.

- [99] PASKARBEIT, J.; ANNUNZIATA, S.; BASA, D. ; SCHNEIDER, A.. **A self-contained, elastic joint drive for robotics applications based on a sensorized elastomer coupling—design and identification.** *Sensors and Actuators A: Physical*, 199:56–66, 2013.
- [100] MIRANDA-COLORADO, R.; MORENO-VALENZUELA, J.. **Experimental parameter identification of flexible joint robot manipulators.** *Robotica*, 36(3):313–332, 2018.
- [101] BOLÍVAR-NIETO, E. A.; THOMAS, G. C.; ROUSE, E. ; GREGG, R. D.. **Convex optimization for spring design in series elastic actuators: From theory to practice.** In: 2021 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), p. 9327–9332. IEEE.
- [102] CHEN, Z.; GUO, Q.; YAN, Y. ; SHI, Y.. **Model identification and adaptive control of lower limb exoskeleton based on neighborhood field optimization.** *Mechatronics*, 81:102699, 2022.
- [103] ZHOU, L.; CHEN, W.; CHEN, W.; BAI, S.; ZHAO, Z.; WANG, J. ; YU, H.. **Hysteresis modeling and compensation of a rotary series elastic actuator with nonlinear stiffness.** *Review of Scientific Instruments*, 92(9):095005, 2021.
- [104] AUSTIN, J.; SCHEPELMANN, A. ; GEYER, H.. **Control and evaluation of series elastic actuators with nonlinear rubber springs.** In: 2015 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), p. 6563–6568. IEEE, 2015.
- [105] WEI, H.; XIANG, K.; CHEN, H.; TANG, B. ; PANG, M.. **Improvement of torque estimation for series viscoelastic actuator based on dual extended kalman filter.** In: ACTUATORS, volumen 10, p. 258. MDPI, 2021.
- [106] RODRIGUES, F. G.; DE OLIVEIRA, E.. **Introdução às técnicas do cálculo fracionário para estudar modelos da física matemática.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37:3305–1, 2015.
- [107] PAINE, N.; OH, S. ; SENTIS, L.. **Design and control considerations for high-performance series elastic actuators.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3):1080–1091, 2013.
- [108] LOPES, F.R. E MEGGIOLARO, M.. **Design of a low-cost series elastic actuator for application in robotic manipulators.** In:

- 26 TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. ABCM, 2021.
- [109] AGUIRRE, L. A.; BILLINGS, S.. **Improved structure selection for nonlinear models based on term clustering**. *International journal of control*, 62(3):569–587, 1995.
- [110] DE OLIVEIRA TELOLI, R.; VILLANI, L. G.; DA SILVA, S. ; TODD, M. D.. **On the use of the gp-narx model for predicting hysteresis effects of bolted joint structures**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159:107751, 2021.
- [111] ADAM, D. K. J. B.. **A method for stochastic optimization in: 3rd international conference on learning representations**, 2015.
- [112] CLEVERT, D.-A.; UNTERTHINER, T. ; HOCHREITER, S.. **Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (elus)**. *arXiv preprint arXiv:1511.07289*, 2015.
- [113] ABADI, M.; AGARWAL, A.; BARHAM, P.; BREVDO, E.; CHEN, Z.; CITRO, C.; CORRADO, G. S.; DAVIS, A.; DEAN, J.; DEVIN, M.; GHEMAWAT, S.; GOODFELLOW, I.; HARP, A.; IRVING, G.; ISARD, M.; JOZEFOWICZ, R.; JIA, Y.; KAISER, L.; KUDLUR, M.; LEVENBERG, J.; MANÉ, D.; SCHUSTER, M.; MONGA, R.; MOORE, S.; MURRAY, D.; OLAH, C.; SHLENS, J.; STEINER, B.; SUTSKEVER, I.; TALWAR, K.; TUCKER, P.; VANHOUCKE, V.; VASUDEVAN, V.; VIÉGAS, F.; VINYALS, O.; WARDEN, P.; WATTENBERG, M.; WICKE, M.; YU, Y. ; ZHENG, X.. **TensorFlow, Large-scale machine learning on heterogeneous systems**. 11 2015.
- [114] JUNIOR, W. R. L.; DA ANDRADE, L. P. C.; OLIVEIRA, S. C. P. ; MARTINS, S. A. M.. **Sysidentpy: A python package for system identification using narmax models**. *Journal of Open Source Software*, 5(54):2384, 2020.
- [116] **Propriedades mecânicas - dureza**. <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/dureza>. acessado em 18/03/2019.
- [117] VAN OVERSCHEE, P.; DE MOOR, B.. **N4sid: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems**. *Automatica*, 30(1):75–93, 1994.

- [118] TUAN, H. M.; SANFILIPPO, F. ; HAO, N. V.. **Modelling and control of a 2-dof robot arm with elastic joints for safe human-robot interaction.** *Frontiers in Robotics and AI*, p. 223, 2021.
- [119] LEE, H. J.; LEE, K. H.; LEE, S. H.; MOON, H.; CHOI, H. R. ; KOO, J. C.. **Coaxial damping series elastic actuator for improved performance of transmissibility.** *Mechatronics*, 80:102666, 2021.
- [120] OTARAN, A.; TOKATLI, O. ; PATOGLU, V.. **Physical human-robot interaction using handson-sea: An educational robotic platform with series elastic actuation.** *IEEE Transactions on Haptics*, 14(4):922–929, 2021.
- [121] LIU, Y.; LI, Z.; SU, H.; JIANG, L. ; SU, C.-Y.. **Whole body control of an autonomous mobile manipulator using series elastic actuators.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021.